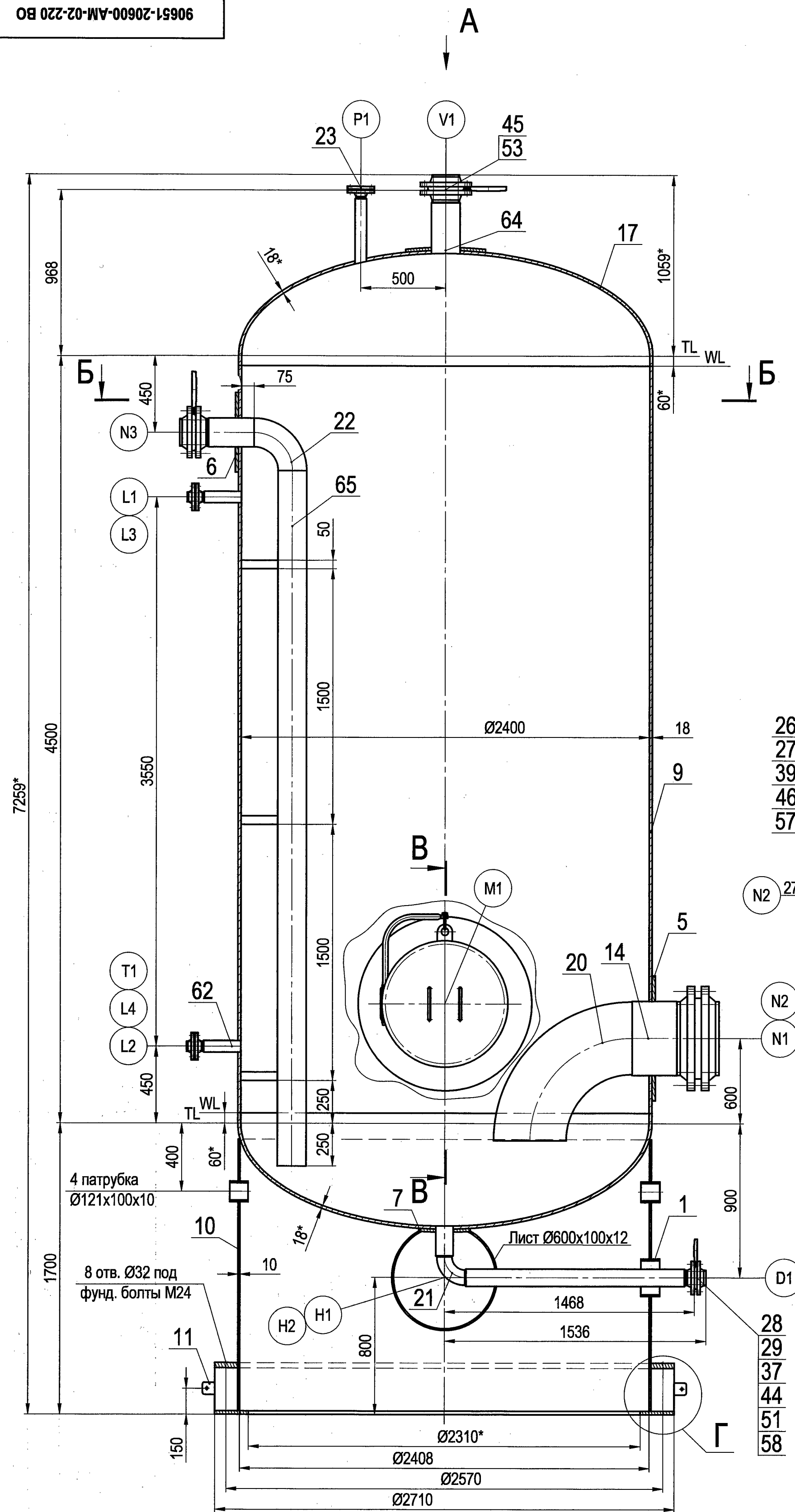


№ строки	Формат	Обозначение	Наименование	Кол. листов	№ экз.	Примечание
1						
2			Документация общая			
3						
4			Вновь разработанная			
5						
6	*)	90651-20600-AM-02-220 ВО	Чертеж общего вида	4	—	*)А1, А4
7	A4	90651-20600-AM-02-220 ПЗ	Пояснительная записка	5	—	
8	A4	90651-20600-AM-02-220 РР	Механический расчет	390	—	
9						
10			Примененная			
11						
12	A4	AM-02-ДТ-01-03	Пластина заземления	1	—	
13	A4	AM-02-ДТ-02-01	Ступенька	1	—	
14	A4	AM-02-ДТ-02-02	Скоба	1	—	
15	A3	AM-02-ДТ-03-02	Крепление трубы	1	—	
16	A4	AM-02-ДТ-08-01	Строповое устройство	1	—	
17	A4	27-AM-02 Д	Требования к техническим			
18			предложениям поставщика	3	—	
19	A4	27-AM-03 Д	Требования к рабочей			
20			конструкторской документации	3	—	Изм.2
21		ПЛ-В-КМ-02	Схема расположения закладных			
22			деталей для крепления площадок			
23			обслуживания на			
24			вертикальных сосудах	1	—	Изм.1
25						

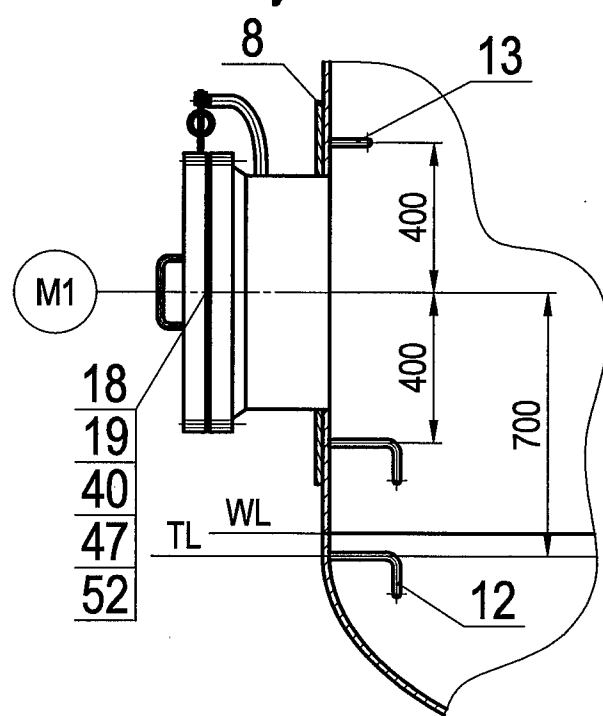
Взам. инв. №	23			обслуживания на					
	24			вертикальных сосудах			1	—	Изм.1
	25								
Подп. и дата				ООО "Афипский НПЗ"					
				Организация слива, приема и откачки ВГО от сторонних производителей в РП №10 и организация раздельного налива ЛДФ и ТДФ					
				Сливо-наливная эстакада ЭС-1. Титул 20600					
Инв. № подл.						90651-20600-AM-02-220 ТП			
	Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	Е-20, Е-21, Е-22 Буферная емкость стороннего ВГО Ведомость технического проекта			
	Разраб.	Синельников И.		07.02.25					
	Проверил	Синельников А.		07.02.25					
	Нач. отд.	Фаустов		07.02.25					
Н. контр.	Сотник		07.02.25						
ГИП	Лоозе		07.02.25						
Лит.		Лист		Листов		НЕФТЕХИМПРОЕКТ NEFTECHIMPROEKT			
Т				1					



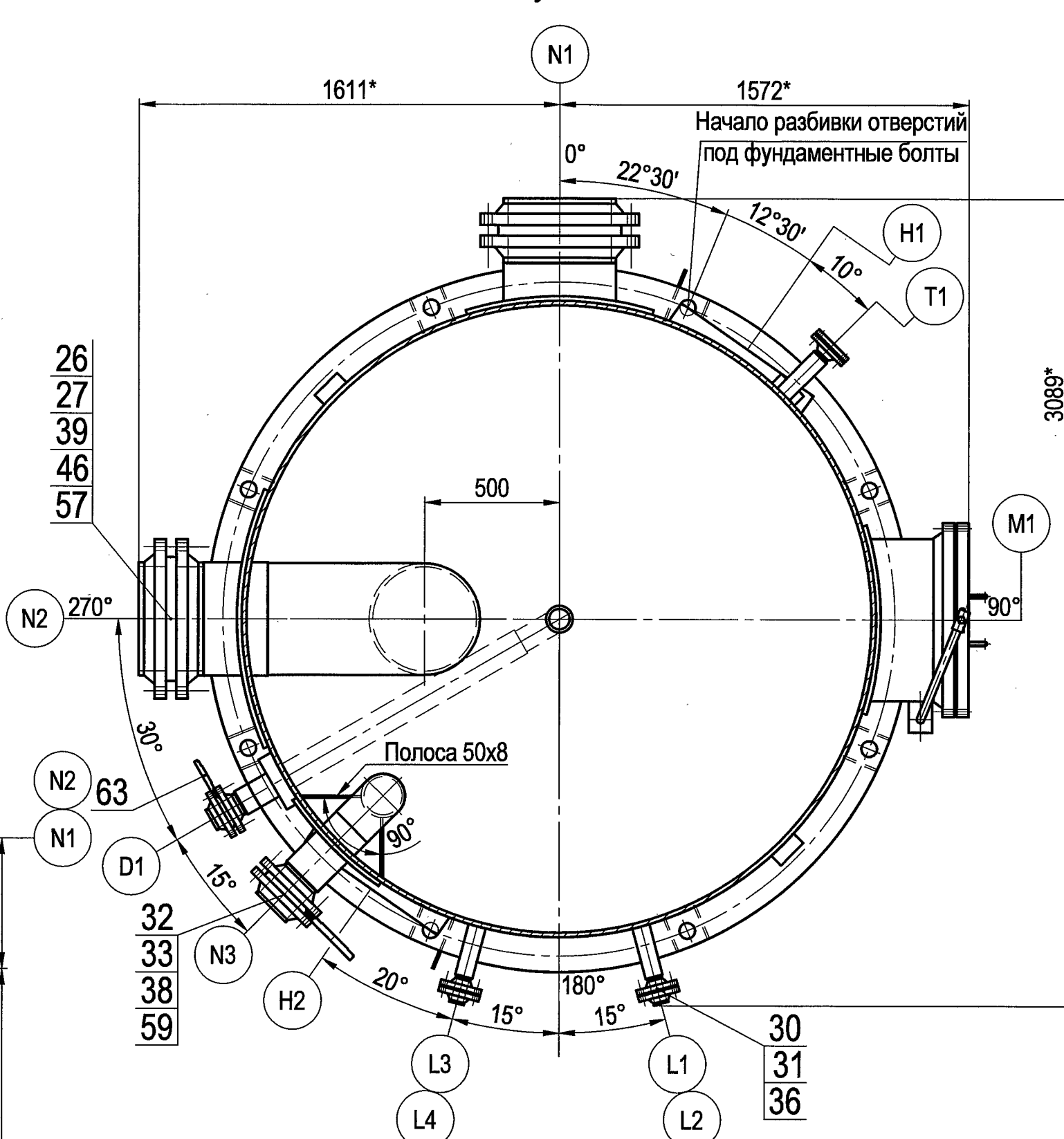
### Таблица штуцеров

Обозн.	Наименование	Патрубок		Фланец			Накладное кольцо	Вылет, мм	Расстояние от оси / ТЛ до присоединяемого трубопровода*, мм
		Диаметр, мм	Толщ., мм	DN, мм	PN, МПа	Тип упл. пов.***			
D1	Дренаж	102 нар.	12	80	2,5	F / E	18х100	См. черт.	См. черт.
L1	Измерение уровня	68 нар.	10	50	4,0	F / E		250	1519
L2	Измерение уровня	68 нар.	10	50	4,0	F / E		250	1519
L3	Измерение уровня	68 нар.	10	50	4,0	F / E		250	1519
L4	Измерение уровня	68 нар.	10	50	4,0	F / E		250	1519
M1	Люк-лаз	600 внутр.	10	600	2,5	1 / 2	18х200	300	-
N1	Выход продукта	434 нар.	18	400	2,5	F / E	18х150	250	1611
N2	Выход продукта	434 нар.	18	400	2,5	F / E	18х150	250	1611
N3	Вход газа	168 нар.	11	150	2,5	F / E	18х150	250	1562
P1	Измерение давления	68 нар.	10	50	4,0	F / E		См. черт.	-
T1	Измерение температуры	68 нар.	10	50	4,0	F / E		250	-
V1	Воздушник	168 нар.	11	150	2,5	F / E	18х150	См. черт	См. черт.

**В - В**  
Остальное условно не показано

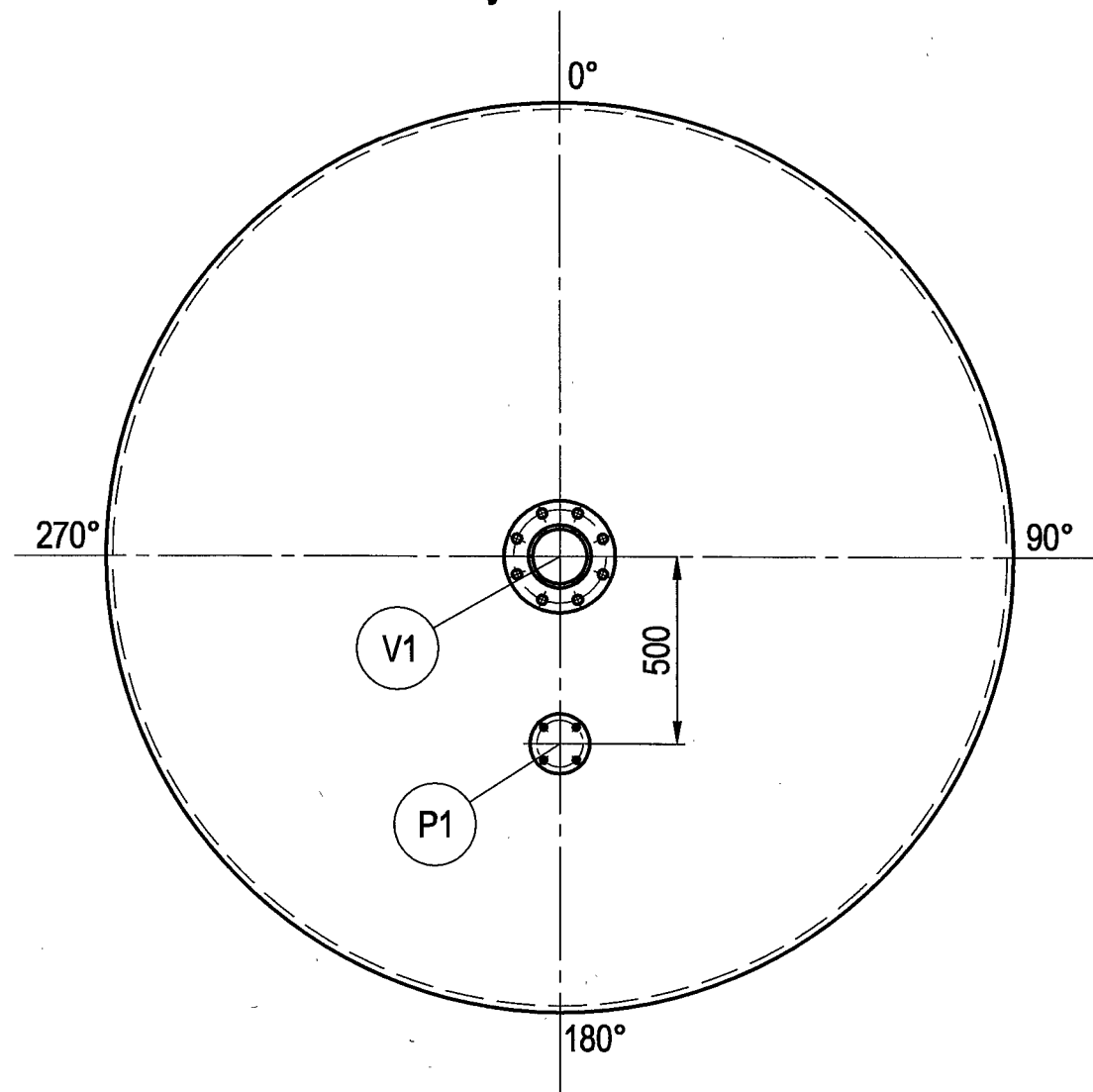


Б - Б  
Остальное условно не показано

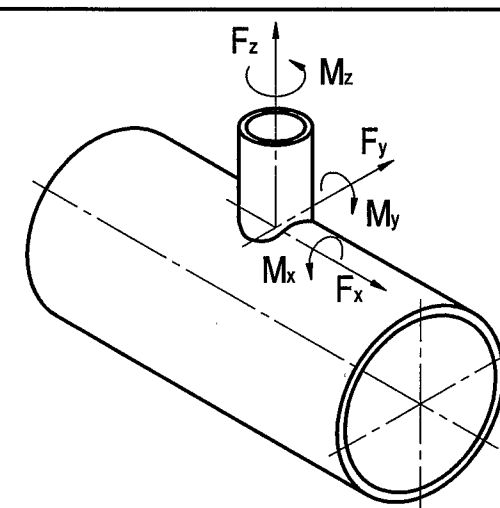


А

Остальное условно не показано



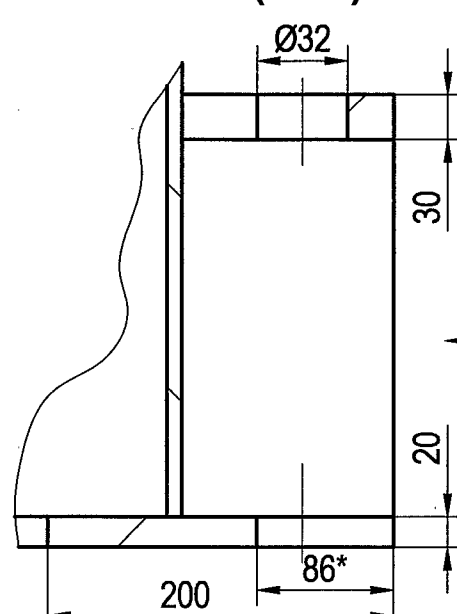
### Максимальные усилия и моменты на штуцерах



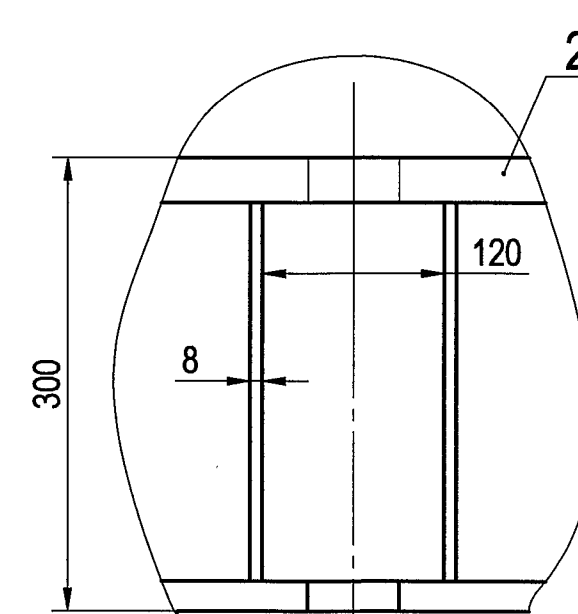
$F_x$  - продольное усилие;  
 $F_y$  - окружное усилие;  
 $F_z$  - осевое усилие;

$M_y$  - продольный изгибающий момент;  
 $M_x$  - окружной изгибающий момент;  
 $M_z$  - крутящий момент.

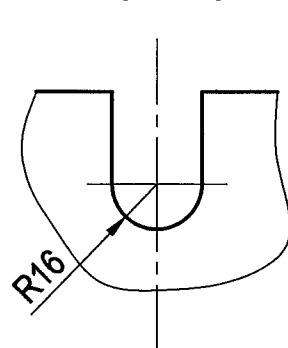
Штуцер	DN, мм	Fx, H	Fy, H	Fz, H	Mx, Н·м	My, Н·м	Mz, Н·м
N3	150	3100	3100	3100	3000	3000	3000
N1, N2	400	10000	10000	10000	16300	16300	16300

 $\Gamma(1:5)$ 

Д(1:5)



E(1:5)



7. Сосуд снаружи теплоизолируется. Конструкция и расположение втулок для крепления теплоизоляции – по ГОСТ 17314-81.
8. Допускается применение импортных материалов, если их применение предусмотрено международными стандартами на сосуда, работающие под давлением, и согласовано с АО «НЕФТЕХИМПРОЕКТ» и Заказчиком.
9. Истинное расположение штуцеров в плане указано на виде А и разрезе Б-Б.
10. Обогрев дна и нижней части обечайки (300 мм от линии перехода) осуществляется наружным электрообогревателем. Электрообогреватель устанавливается на площадке силами и средствами Заказчика, в объеме поставки изготовителя сосуда не входит.
11. Координаты и тип строповых устройств для транспортировки и установки сосуда в рабочее положение на монтажной площадке определяет Изготовитель. Конструкция устройств должна учитывать динамические нагрузки и местные напряжения корпуса в точках присоединения.
12. Расчет толщин стенок элементов сосуда проведен без учета технологической прибавки, необходимой для компенсации утонения стенок элементов аппарата при технологических операциях изготовления. Завод-изготовитель после выбора технологических операций изготовления аппарата, при необходимости, должен скорректировать расчет стенок элементов аппарата.
13. Каркас и ограничительное кольцо СНП выполнить из стали 12Х18Н10Т.
14. В рабочей документации должны быть указаны вращающие моменты при затяжке для шпилек всех фланцевых соединений.
15. Для возможности отключения сосуда на время проведения очистки, осмотра и ревизии между фланцами штуцеров "D1", "N3", "V1" устанавливаются поворотные заглушки исполнения 2 по АТК 26-18-93, между фланцами штуцеров "N1", "N2" устанавливается комплект заглушка-кольцо по типу исполнения 2 АТК 26-18-5-93 (внутренний диаметр кольца принять равным внутреннему диаметру фланца). Для комплекта заглушка-кольцо штуцеров "N1", "N2" предусмотреть строповое устройство по чертежу АМ-02-ДТ-08-01.
16. Для штуцеров, на которых не предусмотрены поворотные заглушки или комплекты заглушка-кольцо, включить в объем поставки заглушки по АТК 24-200-02-90 для проведения гидравлических испытаний.
17. Для фланцев по ГОСТ 33259-2015 группа контроля по ГОСТ 33259-2015 – IV.
18. Спецификация составлена на один сосуд. Всего сосуда три.
19. Предварительное расположение и размеры закладных деталей (пластиков) крепления площадок обслуживания приведены на схеме ПЛ-В-КМ-02. Истинное расположение будет уточнено позже. Закладные детали входят в объем поставки сосуда и привариваются к корпусу на заводе-изготовителе.
20. Предусмотреть приспособления для проверки вертикальности по ОСТ 36-18-77.
21. В объем поставки входят запасные части:
  - прокладки для пуска, наладки и ввода в эксплуатацию — 2 комплекта для каждого фланцевого соединения;
  - прокладки для проведения гидравлических испытаний — 2 комплекта для каждого фланцевого соединения;
  - крепежные детали (шпильки, гайки) — 10% от общего количества на сосуд, но не менее 2 шт. на каждое фланцевое соединение.
- Окончательный объем поставки запасных частей уточняет Заказчик (ООО «Афилский НПЗ»).
21. Принятые условные обозначения:
  - TL — линия перехода,
  - WL — линия сварного шва.
22. При отправке документации на рассмотрение в адрес «НЕФТЕХИМПРОЕКТ» (НХП) тема письма электронного сообщения всегда должна содержать код работ НХП, например: [К-651(30)]пробел[предмет письма].
23. \* — Размеры для справок.
24. \*\* — Значение уточняется при рабочем проектировании.
25. \*\*\* — Тип уплотнительной поверхности фланца штуцера / ответного фланца по стандарту фланца (ГОСТ 33259-2015, ГОСТ 28759-3-2022).

## Техническая характеристика

Наименование			В корпусе
Давление, МПа	Рабочее, изб.		1,2
	Расчетное	внутреннее, изб.	1,6
		наружное, абс.	-
	Пробное гидравлического испытания при изготовлении", изб.		2,22
Температура, °C	Рабочая		40÷80
	Расчетная стенки		100
	Минимально допустимая стенки сосуда, находящегося под расчетным давлением		Минус 23
Прибавка для компенсации коррозии (эрозии), мм			3
Группа сосуда по таблице 1 ГОСТ 34347-2017			1
Вместимость, м³			24,2
Толщина теплоизоляции, мм			70
Наименование рабочей среды			Вакуумный газойль
Группа рабочей среды по ТР ТС 032/2013			1
Характеристика рабочей среды	Класс опасности по ГОСТ 12.1.007-76		4
	Пожароопасность		Да
	Взрывоопасность		Да
Условия эксплуатации	Место установки		Вне помещения
	Сейсмичность, баллы MSK-64		8 баллов
	Ветровой район по ГОСТ 34283-2017		IV
	Температура наиболее холодных суток с обеспеченностью 0,92, °C		Минус 23
	Абсолютная минимальная температура воздуха, °C		Минус 36
Число циклов нагружения за назначенный срок службы			Не более 1000

### Технологические параметры среды

Наименование	В корпусе
Оптимальное рабочее давление, МПа изб.	0,07-1,2
Оптимальная рабочая температура, °С	40+80
Плотность, кг/м³	910
Характеристика и состав рабочей среды	См. ПЗ






## Примечания

1. Оптимальное рабочее давление и температура - это давление и температура, которые соответствуют проектному материальному балансу установок.
2. Рабочее давление сосуда соответствует максимальному внутреннему или наружному давлению среды, при котором обеспечивается безопасная работа сосуда, без учета гидростатического давления среды и допустимого кратковременного повышения давления во время действия предохранительного клапана или других предохранительных устройств.
3. Рабочая температура соответствует максимальной температуре среды, которая может поддерживаться в сосудах длительный период времени вследствие допустимых изменений режима работы технологического процесса.

## Технические требования

1. Судосуд подлежит учету в органах Ростехнадзора в соответствии с Федеральными нормами и правилами в области промышленной безопасности "Правила промышленной безопасности опасных производственных объектов при использовании оборудования, работающего под избыточным давлением".
2. Изготовление, контроль, испытание и поставка емкости должны производиться в соответствии с требованиями ГОСТ 34347-2017 "Сосуды и аппараты стальные сварные. Общие технические условия" и настоящим техническим проектом.
3. В комплект документации поставщика сосуда должно входить "Обоснование безопасности" согласно требованиям Технического Регламента Таможенного союза "О безопасности машин и оборудования" ТР ТС 010/2011 и Технического Регламента Таможенного союза "О безопасности оборудования, работающего под избыточным давлением" ТР ТС 032/2013.
4. Назначенный срок службы сосуда – 20 лет.
5. Опору (поз. "2", "10") изготовить в соответствии с техническими требованиями АТК 24.200.03-90. Отверстия под фундаментные болты разместить симметрично главным осям и вне главных осей. Опора оснащается двумя пластинами заземления на осях 22,5° и 202,5°.
6. Корпус сосуда на месте монтажа заземлить в соответствии с действующими правилами ПУЭ.

ООО "Афипский НПЗ"  
Организация слива, приема и откачки ВГО от сторонних производителей в РП №10  
и организация раздельного налива ЛДФ и ТДФ  
Сливо-наливная эстакада ЭС-1. Титул 20600

					90651-20600-AM-02-220 BO			
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	Е-20, Е-21, Е-22 Буферная емкость стороннего ВГО Чертеж общего вида	Лит.	Масса	Масштаб
Разраб.		Синельников И.		07.02.25		T	10500**	1:20
Проверил		Островский		07.02.25		Лист	1	Листов 4
Нач. отд.		Фаустов		07.02.25		НЕФТЕХИМПРОЕКТ		
Н. контр.		Сотник		07.02.25		NEFTECHIMPROEKT		
ГИП		Лозе		07.02.25				

Инв. № подл.		Подп. и дата		Взам. инв. №		Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Масса, кг	Материал	Примечание
								Сборочные единицы				
						1	АМ-02-ДТ-03-02	Крепление трубы	61	6	09Г2С	D1
						2		Опорный узел	1	824	09Г2С	
								Детали				
						5		Накладное кольцо Ø734хØ434х18	2	38,1	09Г2С	N1, N2
						6		Накладное кольцо Ø468хØ168х18	2	21,1	09Г2С	N3, V1
						7		Накладное кольцо Ø268хØ68х18	1	9,1	09Г2С	D1
						8		Накладное кольцо Ø1020хØ620х18	1	72,6	09Г2С	M1
						9		Обечайка	1	4611	09Г2С	
						10		Обечайка опоры	1	550	09Г2С	
						11	АМ-02-ДТ-01-03	Пластина заземления	2	0,23	12Х18Н10Т	
						12	АМ-02-ДТ-02-01	Ступенька	2	2,4	09Г2С	M1
						13	АМ-02-ДТ-02-02	Скоба	1	1,2	09Г2С	M1
						14		Патрубок 434х18	2	100	09Г2С	N1, N2
								Стандартные изделия				
						17		Днище 2400-18 ГОСТ 6533-78	2	962	09Г2С	
						18		Люк 1-600-2,5-10 ОСТ 26-2005-83	1	265	09Г2С	M1
						19		Устройство 3-600-2,5				
								ОСТ 26-2013-83	1	20,4	09Г2С	M1
						20		Отвод 90-426х8-09Г2С				
								ГОСТ 17375-2001	1	78		N2
						21		Отвод 90-89х6-09Г2С				
								ГОСТ 17375-2001	1	2,3		D1
						22		Отвод 90-168х8-09Г2С				
								ГОСТ 17375-2001	1	11,2		N3

№		Обозначение	Наименование		Кол.	Масса, кг	Материал	Примечание	
23			Заглушка 2-50-4,0-09Г2С						
			АТК 24.200.02-90		2	2,2		P1, T1	
			Фланцы ГОСТ 33259-2015						
26			400-25-11-1-Е-09Г2С		2	64,8		N1,N2	
27			400-25-11-1-Ф-09Г2С		2	64,8		N1,N2	
28			80-25-11-1-Е-09Г2С		1	4,48		D1	
29			80-25-11-1-Ф-09Г2С		1	4,48		D1	
30			50-40-11-1-Ф-09Г2С		6	2,81		L1-L4, P1, T1	
31			50-40-11-1-Е-09Г2С		4	2,81		L1-L4	
32			150-25-11-1-Е-09Г2С		2	12,6		N3, V1	
33			150-25-11-1-Ф-09Г2С		2	12,6		N3, V1	
			Прокладки ОСТ 26.260.454-99					см. ТТ п. 13	
36			СНП В-3-74-4,0-3,2		6			L1-L4, T1, P1	
37			СНП В-3-106-2,5-3,2		2			D1	
38			СНП В-3-183-2,5-3,2		4			N3, V1	
39			СНП В-3-447-2,5-4,5		4			N1, N2	
40			СНП В-3-639-2,5-4,5		1			M1	
			Шпильки ОСТ 26-2040-96						
44			1-M16x90.35X.019		32	0,119		D1, L1-L4, T1, P1	
Инв. № подл.					90651-20600-AM-02-220 ВО				Лист
									3
	Изм.	Лист	№ док.	Подп.					Дата



№		Обозначение	Наименование	Кол.	Масса, кг	Материал	Примечание
45			1-M24x140.35X.019	16	0,416		N3, V1
46			1-M30x160.35X.019	32	0,752		N1, N2
47			1-M20x150.35X.019	32	0,309		M1
			Гайки ОСТ 26-2041-96				
51			M16.35.019	64	0,039		D1, T1, P1
52			M20.35.019	64	0,077		M1
53			M24.35.019	32	0,133		N3, V1
54			M30.35.019	64	0,277		N1, N2
			Заглушки поворотные АТК 26-18-5-93				
57			2-400-2,5-09Г2С	2	70		N1, N2
58			2-80-2,5-09Г2С	1	3		D1
59			2-150-2,5-09Г2С	2	10,5		N3, V1
			Материалы				
			Трубы по ГОСТ 32528-2013				
62			68x10-09Г2С	1	47		L= 3,25 м, T1, P1, L1÷L4
63			102x12-09Г2С	1	38		L= 1,4 м, D1
64			168x11-09Г2С	1	24		L= 0,55 м, N3, V1
65			168x8-09Г2С	1	130		L= 4,1 м, N3

ООО "Афипский НПЗ". Организация слива, приема и откачки ВГО от сторонних производителей в РП №10  
и организация раздельного налива ЛДФ и ТДФ  
Сливо-наливная эстакада ЭС-1. Титул 20600

## ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Согласовано	Отд. 21-1	Карузо	07.02.25

Инв. № подл.	Подп. и дата		Взам. инв. №	

					90651-20600-AM-02-220 ПЗ		
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	<div>Е-20, Е-21, Е-22</div> <div>Буферная емкость стороннего ВГО</div> <div>НЕФТЕХИМПРОЕКТ NEFTECHIMPROEKT</div>		
Разраб.	Синельников И.			07.02.25			
Проверил	Островский			07.02.25			
Нач. отд.	Фаустов			07.02.25			
Н. контр.	Сотник			07.02.25			
ГИП	Лоозе			07.02.25	<div>Лит.</div> <div>Т</div> <div>Лист</div> <div>1</div> <div>Листов</div> <div>5</div>		

## СОДЕРЖАНИЕ

1	Введение .....	3
2	Техническая характеристика .....	3
3	Назначение .....	4
4	Описание конструкции и принцип работы .....	4
5	Механические расчеты .....	4
6	Требования к монтажу, пуску и безопасной эксплуатации .....	4
	Лист регистрации изменений .....	5

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №						Лист	
									2
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	90651-20600-AM-02-220 ПЗ				

## 1 Введение

Технический проект буферной емкости стороннего ВГО Е-20, Е-21, Е-22 разработан для применения на сливо-наливной эстакаде ЭС-1 ООО "Афипский НПЗ". Повторное применение данного проекта для других объектов должно быть согласовано с автором проекта.

## 2 Техническая характеристика

### Техническая характеристика сосуда

Рабочее давление, МПа изб.	1,2
Расчетное давление: внутреннее, МПа изб. наружное, МПа абс.	1,6 —
Пробное давление гидравлического испытания при изготовлении, МПа изб.	2,22
Рабочая температура, °С	40÷80
Расчетная температура стенки, °С	100
Минимально допустимая температура стенки сосуда, находящегося под расчетным давлением, °С	Минус 23
Характеристика рабочей среды: — класс опасности среды по ГОСТ 12.1.007-76 — взрывоопасность — пожароопасность	4 Да Да
Прибавка для компенсации коррозии (эрозии), мм	3
Вместимость, м³	24,2
Масса пустого сосуда, кг	10500
Назначенный срок службы сосуда, лет	20
Число циклов за назначенный срок службы	не более 1000
Группа сосуда по таблице 1 ГОСТ 34347-2017	1
Группа рабочей среды по ТР ТС 032/2013	1

### Технологические параметры среды

Оптимальное рабочее давление, МПа изб.	0,07-1,2
Оптимальная рабочая температура, °С	40÷80
Наименование рабочей среды и состав	Вакуумный газойль Сера – н.б. 2,0 % масс.; мех. примеси – до 1 % масс.
Парциальное давление H <sub>2</sub> S, МПа абс.	—
Парциальное давление H <sub>2</sub> , МПа абс.	—
Парциальное давление СО, МПа абс.	—
Кислотность среды, pH	—
Воспламеняемость по ГОСТ 12.1.044-2018	IIВ-ТЗ
Категория и группа взрывоопасности по ГОСТ 30852.5-2002, ГОСТ 30852.11-2002	ГЖ

Взам. инв. №	
Подп. и дата	
Инв. № подл.	

Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата

90651-20600-AM-02-220 ПЗ

Лист

3

Примечания:

- а) Оптимальное рабочее давление и температура – это давление и температура, которые соответствуют проектному материальному балансу установки.
- б) Рабочее давление сосуда соответствуют максимальному внутреннему или наружному давлению среды, при котором обеспечивается безопасная работа сосуда, без учета гидростатического давления среды и допустимого кратковременного повышения давления во время действия предохранительного клапана или других предохранительных устройств.
- в) Рабочая температура соответствует максимальной температуре среды, которая может поддерживаться в сосуде длительный период времени вследствие допустимых изменений режима работы технологического процесса.

### 3 Назначение

Буферные емкости Е-20, Е-21, Е-22 предназначены для заполнения системы слива вакуумного газойля из вагонов-цистерн.

### 4 Описание конструкции и принцип работы

Буферная емкость стороннего ВГО Е-20, Е-21, Е-22 представляет собой вертикальный цилиндрический сосуд диаметром 2400 мм с эллиптическими днищами, установленный на цилиндрическую опору-юбку. Сосуд имеет технологические штуцеры для обеспечения работы согласно назначению. Для контроля уровня предусматриваются штуцеры L1÷L4. Для возможности осмотра сосуда предусмотрен люк-лаз М1.

При заполнении системы вакуумным газойлем, выталкивая "воздушные пробки", продукт поступает в емкость через штуцер N3. Вытесненный в емкость воздух выходит в атмосферу через воздушник (штуцер V1). При сливе из вагонов-цистерн вакуумный газойль поступает в емкость через штуцер N1, откачка осуществляется через штуцер N2, оборудованный опускной трубой. Для освобождения емкости от продукта предназначен штуцер D1.

Для подключения приборов для измерения давления в сосуде предусмотрен штуцер P1. Для подключения приборов для измерения температуры предусмотрен штуцер T1.

### 5 Механические расчеты

Для подтверждения прочности и надежности сосуда, его элементов проведены все необходимые для этого расчеты.

Механический расчет 90651-20600-AM-02-220 PP выполнен в системе автоматизированного проектирования Passat 3.02 и содержит:

- расчеты цилиндрических обечаек, эллиптических днищ под действием внутреннего избыточного давления;
- расчеты укрепления отверстий при внутреннем давлении;
- расчеты на прочность элементов корпуса (днищ) при внешних статических нагрузках на штуцер и сейсмическом воздействии;
- расчеты на прочность и герметичность фланцевых соединений;
- расчеты плоских крышек;
- расчеты на прочность элементов опорного узла.

### 6 Требования к монтажу, пуску и безопасной эксплуатации

Для обеспечения требований к монтажу, пуску и безопасной эксплуатации буферных емкостей стороннего ВГО Е-20, Е-21, Е-22 необходимо руководствоваться документацией, разработанной заводом-изготовителем в соответствии с Федеральными нормами и правилами в области промышленной безопасности "Правила промышленной безопасности опасных производственных объектов при использовании оборудования, работающего под избыточным давлением".

Взам. инв. №		Подп. и дата		Инв. № подл.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
--------------	--	--------------	--	--------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--



[illegible]

Этот документ является собственностью "НЕФТЕХИМПРОЕКТ" и не подлежит копированию и распространению без его согласия

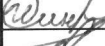


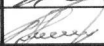

НЕФТЕХИМПРОЕКТ  
NEFTECHIMPROEKT

МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ

РР

ООО "Афипский НПЗ". Организация слива, приема и откачки ВГО от сторонних производителей в РП №10  
и организация раздельного налива ЛДФ и ТДФ  
Сливо-наливная эстакада ЭС-1. Титул 20600

## МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ

Взам. инв. №	Подп. и дата							
Инв. № подл.						90651-20600-AM-02-220 РР		
	Изм	Лист	№ док.	Подп.	Дата			
	Разраб.	Синельников И.		07.02.25	Е-20, Е-21, Е-22 Буферная емкость стороннего ВГО			
	Проверил	Островский		07.02.25				
	Нач. отд.	Фаустов		07.02.25				
	Н. контр.	Сотник		07.02.25				
ГИП	Лоозе		07.02.25					
Лит.		Лист	Листов					
Т		1	390	НЕФТЕХИМПРОЕКТ NEFTECHIMPROEKT				

Этот документ является собственностью "НЕФТЕХИМПРОЕКТ" и не подлежит копированию и распространению без его согласия		НЕФТЕХИМПРОЕКТ NEFTECHIMPROEKT		МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ			РР	
		Содержание						
		Введение ..... 3						
		Условия нагружения ..... 3						
		Сводные таблицы..... 4						
		Определение периода собственных колебаний по методу Рэлея..... 20						
		Расчёт ветровых нагрузок..... 27						
		Расчёт сейсмических нагрузок..... 34						
		Расчёт суммарных нагрузок..... 38						
		Опора колонного аппарата..... 44						
		Цилиндрический участок опоры ..... 50						
		Опорный узел элемента 'Опора колонного аппарата'..... 54						
		Группа патрубков элемента 'Опора колонного аппарата' ..... 60						
		Постамент колонного аппарата ..... 61						
		Нагрузки на фундамент ..... 62						
		Нагрузки на постамент ..... 63						
		Обечайка цилиндрическая ..... 64						
		Днище эллиптическое верхнее, нижнее..... 74						
		Вход продукта (N1) ..... 77						
		Выход продукта (N2)..... 87						
		Вход газа (N3) ..... 97						
		Дренаж (D1)..... 107						
		Измерение уровня (L1-L4)..... 113						
		Воздушник (V1) ..... 119						
		Люк-лаз (M1)..... 126						
		Измерение давления (P1) ..... 132						
		Измерение температуры (T1) ..... 139						
		Фланцевое соединение N1, N2 ..... 145						
		Фланцевое соединение N3 ..... 174						
		Фланцевое соединение D1 ..... 203						
		Фланцевое соединение L1-L4..... 232						
		Фланцевое соединение V1 ..... 261						
		Крышка плоская M1 ..... 290						
		Крышка плоская P1..... 311						
		Крышка плоская T1 ..... 333						
		Отвод D1 ..... 355						
		Патрубок D1 ..... 377						
		Внешние нагрузки на аппарат N1 ..... 380						
		Внешние нагрузки на аппарат N2 ..... 382						
Внешние нагрузки на аппарат N3 ..... 384								
Площадка обслуживания №1..... 386								
Площадка обслуживания №2..... 387								
Площадка обслуживания №3..... 388								
Список литературы..... 389								
Лист регистрации изменений ..... 390								
Инв. № подл.		Подп. и дата		Взам. инв. №		90651-20600-AM-02-220 РР		Лист
								2
Изм.		Лист		№ док.		Подп.		Дата

90651-20600-AM-02-220 РР изм.0.docx

Формат А4

## Введение

Расчет на прочность выполнен в программе "Пассат 3.02.0.0", разработанной ООО НТП "Трубопровод".

## Условия нагружения

Расчетные случаи	Площадки	Огнезащита	Теплоизоляция	Нагрузки как внешние	Тарелки	Насадка	Ребойлер	Жидкость	Ветер / Экран
Рабочие условия	X	X	X	X				X	X
Испытание	X	X						X	X
Монтаж макс.	X	X	X						X
Монтаж мин.									X

Рабочая среда	Вакуумный газойль
К заполнения аппарата	1.00
Плотность жидкости/газа	910 кг/куб.м
Вид испытаний	Гидроиспытания
Давление испытаний	2.22 МПа
Ветровой район	IV
Сейсмичность, баллов	8

Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №						
					90651-20600-AM-02-220 PP					Лист			
										3			

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	

Этот документ является собственностью "НЕФТЕХИМПРОЕКТ" и не подлежит копированию и распространению без его согласия

НЕФТЕХИМПРОЕКТ NEFTECHIMPROEKT		МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ					РР	
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 нижнее	09Г2С Лист	2400	18	678	3.8	1		
Отвод D1	09Г2С Труба	77	6	188.5	3	1		
Патрубок D1	09Г2С Труба	78	12	1425	3	1		
Обечайка цилиндрическая	09Г2С Лист	2400	18	4380	3.8	1		
Отвод N2	09Г2С Лист	410	8	942.48	3	1		
Крышка плоская M1	09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка	600	45	125.2	3	1		
Отвод N3	09Г2С Труба	152	8	353.43	3	1		
Патрубок N3	09Г2С Труба	146	11	4075	3	1		
Крышка плоская T1	09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка	48	18	65.2	3	1		
Днище эллиптическое верхнее	09Г2С Лист	2400	18	678	3.8	1		
Крышка плоская P1	09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка	48	18	65.2	3	1		
Рабочие условия								
Элемент	Расчетная температура, °C	Расчетное давление, МПа	Допускаемые напряжения, МПа	Расчетная толщина с уч. прибавок, мм	Допускаемое давление, МПа	Условие прочности		
Днище эллиптическое нижнее	100	1.6409	177	14.951	2.0883	выполнено		
Отвод D1	100	1.644	160	3.4999	8.554	выполнено		
Патрубок D1	100	1.644	160	3.4028	33.103	выполнено		
Фланцевое соединение D1	-	1.644	-	-	6.1572	выполнено		
Обечайка цилиндрическая	100	1.6346	177	14.933	2.0822	выполнено		
Фланцевое соединение N1	-	1.6313	-	-	3.335	выполнено		
					90651-20600-AM-02-220 РР			Лист
								4
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата				



Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №

Этот документ является собственностью "НЕФТЕХИМПРОЕКТ" и не подлежит копированию и распространению без его согласия

НЕФТЕХИМПРОЕКТ NEFTECHIMPROEKT		МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ				РР
Фланцевое соединение N2	-	1.6313	-	-	3.335	выполне- но
Отвод N2	100	1.6352	177	5.2575	3.2885	выполне- но
Крышка плос- кая M1	100	1.6313	144	33.945	3.0052	выполне- но
Фланцевое соединение N3	-	1.6	-	-	4.624	выполне- но
Отвод N3	100	1.6	160	3.9354	7.5102	выполне- но
Патрубок N3	100	1.6376	160	3.751	16.623	выполне- но
Крышка плос- кая T1	100	1.6311	144	12.869	3.7678	выполне- но
Фланцевое соединение L2	-	1.6311	-	-	5.4932	выполне- но
Фланцевое соединение L4	-	1.6311	-	-	5.4932	выполне- но
Фланцевое соединение L1	-	1.6001	-	-	5.4932	выполне- но
Фланцевое соединение L3	-	1.6001	-	-	5.4932	выполне- но
Днище эллип- тическое верхнее	100	1.6	177	14.672	2.0883	выполне- но
Фланцевое соединение V1	-	1.6	-	-	4.624	выполне- но
Крышка плос- кая P1	100	1.6	144	12.868	3.6972	выполне- но
Условия испытаний						
Элемент	Расчетное давление, МПа	Допускаемые напряжения, МПа	Расчетная тол- щина с уч. приба- вок, мм	Допускаемое давление, МПа	Условие прочности	
Днище эллиптиче- ское нижнее	2.2794	272.73	13.85	3.2178	выполнено	
Отвод D1	2.2825	254.55	3.436	13.609	выполнено	
Патрубок D1	2.2825	254.55	3.3513	52.665	выполнено	
Фланцевое соеди- нение D1	2.2825	-	-	-	выполнено	
Обечайка цилин- дрическая	2.2729	272.73	13.843	3.2083	выполнено	
Фланцевое соеди- нение N1	2.2696	-	-	-	выполнено	
Фланцевое соеди- нение N2	2.2696	-	-	-	выполнено	
Отвод N2	2.2735	272.73	5.0361	5.0671	выполнено	
					Лист	
				90651-20600-AM-02-220 РР		
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	5	

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	

Этот документ является собственностью "НЕФТЕХИМПРОЕКТ" и не подлежит копированию и распространению без его согласия

НЕФТЕХИМПРОЕКТ NEFTECHIMPROEKT		МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ					РР
Крышка плоская М1	2.2696	222.73	32.348	4.6482	выполнено		
Фланцевое соединение N3	2.2345	-	-	-	выполнено		
Отвод N3	2.236	254.55	3.8212	11.948	выполнено		
Патрубок N3	2.276	254.55	3.6557	26.446	выполнено		
Крышка плоская Т1	2.2694	222.73	11.228	7.5426	выполнено		
Фланцевое соединение L2	2.2694	-	-	-	выполнено		
Фланцевое соединение L4	2.2694	-	-	-	выполнено		
Фланцевое соединение L1	2.2378	-	-	-	выполнено		
Фланцевое соединение L3	2.2378	-	-	-	выполнено		
Днище эллиптическое верхнее	2.23	272.73	13.632	3.2178	выполнено		
Фланцевое соединение V1	2.2216	-	-	-	выполнено		
Крышка плоская Р1	2.222	222.73	11.226	7.3887	выполнено		
Штуцера							
Исходные данные							
Элемент	Метка	Тип	Материал	Диаметр, мм	Толщина стенки, мм	Длина (высота), мм	Суммарная прибавка, мм
Дренаж (D1)	D1	Проходящий с накладным кольцом	09Г2С Лист	78	12	120	3
Вход продукта (N1)	N1	Проходящий с накладным кольцом	09Г2С Лист	398	18	170	3.8
Выход продукта (N2)	N2	Проходящий с накладным кольцом	09Г2С Лист	398	18	170	3.8
Люк-лаз (M1)	M1	Проходящий с накладным кольцом	09Г2С Лист	600	10	279	3.8
Вход газа (N3)	N3	Проходящий с накладным кольцом	09Г2С Труба	146	11	159	3
Измерение температуры (T1)	T1	Проходящий без укрепления	09Г2С Труба	48	10	182	3
Измерение уровня (L2)	L2	Проходящий без укрепления	09Г2С Труба	48	10	182	3
90651-20600-AM-02-220 РР							Лист
							6
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата			

Этот документ является собственностью "НЕФТЕХИМПРОЕКТ" и не подлежит копированию и распространению без его согласия

НЕФТЕХИМПРОЕКТ NEFTECHIMPROEKT			МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ					РР
Измерение уровня (L4)	L4	Проходящий без укрепления	09Г2С Труба	48	10	182	3	
Измерение уровня (L1)	L1	Проходящий без укрепления	09Г2С Труба	48	10	182	3	
Измерение уровня (L3)	L3	Проходящий без укрепления	09Г2С Труба	48	10	182	3	
Воздушник (V1)	V1	Проходящий с накладным кольцом	09Г2С Труба	146	11	159	3	
Измерение давления (P1)	P1	Проходящий без укрепления	09Г2С Труба	48	10	182	3	
Рабочие условия								
Элемент	Расчетная температура, °C	Расчетное давление, МПа	Допускаемые напряжения, МПа	Расчетная толщина с уч. прибавок, мм	Допускаемое давление, МПа	Условие прочности		
Дренаж (D1)	100	1.6424	246.6	3.3915	2.0883	выполнено		
Вход продукта (N1)	100	1.6313	176.49	5.6778	2.0822	выполнено		
Выход продукта (N2)	100	1.6313	176.49	5.6778	2.0822	выполнено		
Люк-лаз (M1)	100	1.6313	176.48	6.613	2.0822	выполнено		
Вход газа (N3)	100	1.6	185.77	3.7638	2.0822	выполнено		
Измерение температуры (T1)	100	1.6311	176.56	3.2767	2.0822	выполнено		
Измерение уровня (L2)	100	1.6311	176.56	3.2767	2.0822	выполнено		
Измерение уровня (L4)	100	1.6311	176.56	3.2767	2.0822	выполнено		
Измерение уровня (L1)	100	1.6001	185.73	3.2714	2.0822	выполнено		
Измерение уровня (L3)	100	1.6001	185.73	3.2714	2.0822	выполнено		
Воздушник (V1)	100	1.6	264.26	3.7638	2.0883	выполнено		
Измерение давления (P1)	100	1.6	302.78	3.2714	2.2387	выполнено		
Условия испытаний								
Элемент	Расчетное давление, МПа	Диаметр отв., не треб. укрепления, мм	Расчетная толщина с уч. прибавок, мм	Допускаемое давление, МПа	Условие прочности			
Дренаж (D1)	2.2809	319.52	3.3527	3.2178	выполнено			
Вход продукта (N1)	2.2696	227.45	5.4947	3.2083	выполнено			
							Лист	
90651-20600-AM-02-220 РР							7	
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата				

Взам. инв. №

Подп. и дата

Инв. № подл.

90651-20600-AM-02-220 РР\_изм.0.docx

Формат А4

Этот документ является собственностью "НЕФТЕХИМПРОЕКТ" и не подлежит копированию и распространению без его согласия

НЕФТЕХИМПРОЕКТ NEFTECHIMPROEKT		МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ				РР
Выход продук-та (N2)	2.2696	227.45	5.4947	3.2083	выполнено	
Люк-лаз (M1)	2.2696	227.45	6.3388	3.2083	выполнено	
Вход газа (N3)	2.2345	235.69	3.6701	3.2083	выполнено	
Измерение температуры (T1)	2.2694	227.51	3.2418	3.2083	выполнено	
Измерение уровня (L2)	2.2694	227.51	3.2418	3.2083	выполнено	
Измерение уровня (L4)	2.2694	227.51	3.2418	3.2083	выполнено	
Измерение уровня (L1)	2.2378	234.92	3.2384	3.2083	выполнено	
Измерение уровня (L3)	2.2378	234.92	3.2384	3.2083	выполнено	
Воздушник (V1)	2.2235	338.59	3.6668	3.2178	выполнено	
Измерение давления (P1)	2.2241	379.55	3.2369	3.4495	выполнено	
Расчёт заполнения						
Рабочие условия						
Элемент	Полный объем, м³	Объем про-дукта, м³	Масса про-дукта, кг	Высота столба, мм	Макс. высота столба при 100%, мм	ξ
Днище эллиптиче-ское нижнее	2.081	2.081	2039.4	4260.5	6058.9	1
Дренаж (D1)	0.74361·10 <sup>-3</sup>	0.74361·10 <sup>-3</sup>	0.72874	4416	6214.4	1
Отвод D1	0.87775·10 <sup>-3</sup>	0.87775·10 <sup>-3</sup>	0.8602	4574.5	6372.9	1
Патрубок D1	0.0068092	0.0068092	6.673	4575	6373.4	1
Фланцевое соеди-нение D1	0.52658·10 <sup>-3</sup>	0.52658·10 <sup>-3</sup>	0.51604	4575	6373.4	1
Обечайка цилин-дрическая	19.797	16.273	15947	3600.5	5398.9	0.82196
Вход продукта (N1)	0.026072	0.026072	25.55	3259.5	5057.9	1
Фланцевое соеди-нение N1	0.025778	0.025778	25.262	3259.5	5057.9	1
Выход продукта (N2)	0.026072	0.026072	25.55	3259.5	5057.9	1
Фланцевое соеди-нение N2	0.025778	0.025778	25.262	3259.5	5057.9	1
Отвод N2	0.12443	0.12443	121.94	3660.5	5458.9	1
Люк-лаз (M1)	0.091534	0.091534	89.703	3260.5	5058.9	1
Крышка плоская M1	0.023355	0.023355	22.888	3260.5	5058.9	1
Вход газа (N3)	0.0032623	0	0	0	1481.9	0
Фланцевое соеди-нение N3	0.0023806	0	0	0	1481.9	0
Отвод N3	0.0064133	0	0	0	1633.9	0
Патрубок N3	0.068222	0.065468	64.159	3910.5	5708.9	0.95964
90651-20600-AM-02-220 РР						Лист
						8
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата		

Взам. инв. №

Подп. и дата

Инв. № подл.

90651-20600-AM-02-220 РР\_изм.0.docx

Формат А4

Этот документ является собственностью "НЕФТЕХИМПРОЕКТ" и не подлежит копированию и распространению без его согласия

НЕФТЕХИМПРОЕКТ NEFTECHIMPROEKT		МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ					РР
Измерение температуры (Т1)	0.36073·10 <sup>-3</sup>	0.36073·10 <sup>-3</sup>	0.35352	3234.5	5032.9	1	
Крышка плоская Т1	0.84325·10 <sup>-4</sup>	0.84325·10 <sup>-4</sup>	0.082639	3234.5	5032.9	1	
Измерение уровня (L2)	0.36065·10 <sup>-3</sup>	0.36065·10 <sup>-3</sup>	0.35344	3234.5	5032.9	1	
Фланцевое соединение L2	0.17408·10 <sup>-3</sup>	0.17408·10 <sup>-3</sup>	0.1706	3234.5	5032.9	1	
Измерение уровня (L4)	0.36073·10 <sup>-3</sup>	0.36073·10 <sup>-3</sup>	0.35352	3234.5	5032.9	1	
Фланцевое соединение L4	0.17408·10 <sup>-3</sup>	0.17408·10 <sup>-3</sup>	0.1706	3234.5	5032.9	1	
Измерение уровня (L1)	0.36065·10 <sup>-3</sup>	0.91928·10 <sup>-4</sup>	0.090089	14.538	1812.9	0.25489	
Фланцевое соединение L1	0.17408·10 <sup>-3</sup>	0.44508·10 <sup>-4</sup>	0.043617	14.538	1812.9	0.25567	
Измерение уровня (L3)	0.36073·10 <sup>-3</sup>	0.91928·10 <sup>-4</sup>	0.090089	14.538	1812.9	0.25484	
Фланцевое соединение L3	0.17408·10 <sup>-3</sup>	0.44508·10 <sup>-4</sup>	0.043617	14.538	1812.9	0.25567	
Днище эллиптическое верхнее	2.0793	0	0	0	1018.9	0	
Воздушник (V1)	0.0032495	0	0	0	360.05	0	
Фланцевое соединение V1	0.0023806	0	0	0	165.4	0	
Измерение давления (Р1)	0.37512·10 <sup>-3</sup>	0	0	0	419.17	0	
Крышка плоская Р1	0.84325·10 <sup>-4</sup>	0	0	0	205.64	0	
Σ	24.399	18.773	18398	—	—	—	

Полости аппарата

ρ – плотность рабочей среды  
V<sub>полн</sub> – полный объем  
V<sub>прод</sub> – объем продукта  
М – масса продукта

Рабочие условия

Элемент	Испытания	Р <sub>исп</sub> , МПа	Жидкость	ρ, кг/м³	V <sub>полн</sub> , м³	V <sub>прод</sub> , м³	М, кг	Среда	H <sub>2</sub> S
Днище эллиптическое нижнее	Гидро	2.22	Да	980	24.2	18.583	18211	Мазут	Нет (-)

Расчет весов и центров тяжести

Рабочие условия (с заполнением продуктом):

Элемент	Вес, Н	Положение центра тяжести (относительно начала координат модели)
Днище эллиптическое нижнее	29942	X = 0 мм, Y = 0 мм, Z = (-293.97) мм

Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата
------	------	--------	-------	------

90651-20600-AM-02-220 РР

Лист  
9

Взам. инв. №


Подп. и дата

Инв. № подл.



Этот документ является собственностью "НЕФТЕХИМПРОЕКТ" и не подлежит копированию и распространению без его согласия	НЕФТЕХИМПРОЕКТ NEFTECHIMPROEKT		МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ		РР
	Опора колонного аппарата		65021	X = 1.8063 мм, Y = (-1.8063) мм, Z = (-1003) мм	
	В том числе:				
	Постамент колонного аппарата		-	X = - мм, Y = - мм, Z = - мм	
	Дренаж (D1)		136.53	X = 0 мм, Y = 0 мм, Z = (-703.02) мм	
	Отвод D1		31.139	X = (-28.09) мм, Y = 28.09 мм, Z = (-895.74) мм	
	Патрубок D1		437.66	X = (-588.67) мм, Y = 588.67 мм, Z = (-935.46) мм	
	Фланцевое соединение D1		111.97	X = (-1137.1) мм, Y = 1137.1 мм, Z = (-935.46) мм	
	Обечайка цилиндрическая		2.0393·10 <sup>5</sup>	X = 0 мм, Y = (-1.0376) мм, Z = 1898.7 мм	
	Вход продукта (N1)		1019.6	X = 0 мм, Y = 1265.3 мм, Z = 539.92 мм	
	Фланцевое соединение N1		1879.6	X = 0 мм, Y = 1525.7 мм, Z = 540 мм	
	Выход продукта (N2)		1220.6	X = (-1244) мм, Y = 0 мм, Z = 540.04 мм	
	Фланцевое соединение N2		1879.6	X = (-1525.7) мм, Y = 0 мм, Z = 540 мм	
	Отвод N2		1958.1	X = (-682.41) мм, Y = 0 мм, Z = 337.8 мм	
	Люк-лаз (M1)		2087.1	X = 1295.7 мм, Y = 0 мм, Z = 640.34 мм	
	Крышка плоская M1		2299.1	X = 1598.5 мм, Y = 0 мм, Z = 640 мм	
	Вход газа (N3)		320.29	X = (-872.53) мм, Y = (-872.56) мм, Z = 3989.8 мм	
	Фланцевое соединение N3		312.71	X = (-1044.8) мм, Y = (-1044.8) мм, Z = 3990 мм	
	Отвод N3		109.41	X = (-685.71) мм, Y = (-685.71) мм, Z = 3917.3 мм	
	Патрубок N3		2331.3	X = (-634.31) мм, Y = (-634.31) мм, Z = 1705.3 мм	
	Измерение температуры (T1)		31.449	X = 919.37 мм, Y = 919.37 мм, Z = 390 мм	
	Крышка плоская T1		54.46	X = 1021.6 мм, Y = 1021.6 мм, Z = 390 мм	
	Измерение уровня (L2)		31.454	X = 336.51 мм, Y = (-1255.9) мм, Z = 390 мм	
	Фланцевое соединение L2		60.385	X = 374.78 мм, Y = (-1398.7) мм, Z = 390 мм	
	Измерение уровня (L4)		31.449	X = (-336.51) мм, Y = (-1255.9) мм, Z = 390 мм	
	Фланцевое соединение L4		60.385	X = (-374.78) мм, Y = (-1398.7) мм, Z = 390 мм	
	Измерение уровня (L1)		28.871	X = 336.51 мм, Y = (-1255.9) мм, Z = 3609.5 мм	
	Фланцевое соединение L1		59.14	X = 374.78 мм, Y = (-1398.7) мм, Z = 3609.9 мм	
	Измерение уровня (L3)		28.865	X = (-336.51) мм, Y = (-1255.9) мм, Z = 3609.5 мм	
	Фланцевое соединение L3		59.14	X = (-374.78) мм, Y = (-1398.7) мм, Z = 3609.9 мм	
Площадка обслуживания №2		46276	X = 0 мм, Y = 0 мм, Z = 3100 мм		
Площадка обслуживания №3		46276	X = 0 мм, Y = 0 мм, Z = 100 мм		
Взам. инв. №	Днище эллиптическое верхнее		9916.6	X = 0 мм, Y = 0 мм, Z = 4758.2 мм	
	Воздушник (V1)		322.13	X = 0 мм, Y = 0 мм, Z = 5073.9 мм	
	Фланцевое соединение V1		312.71	X = 0 мм, Y = 0 мм, Z = 5316.1 мм	
Подп. и дата	Измерение давления (P1)		29.096	X = 0 мм, Y = (-500.47) мм, Z = 5089.5 мм	
	Крышка плоская P1		53.65	X = 0 мм, Y = (-500) мм, Z = 5238.3 мм	
	Площадка обслуживания №1		18432	X = 0 мм, Y = 0 мм, Z = 5140 мм	
Инв. № подл.	Σ		4.371·10 <sup>5</sup>	X = (-4.011) мм, Y = 3.6936 мм, Z = 1420 мм	
	Условия испытаний (с заполнением средой)*:				
	*При пневмоиспытаниях, для не заполняемого элемента, или отсутствии испытаний для элемента выводится сухой вес				
					Лист
Изм.		Лист	№ док.	Подп.	Дата
90651-20600-AM-02-220 РР					10


PP

Элемент	Вес, Н	Положение центра тяжести (относительно начала координат модели  )
Днище эллиптическое нижнее	30351	X = 0 мм, Y = 0 мм, Z = (-293.41) мм
Опора колонного аппарата	65021	X = 1.8063 мм, Y = (-1.8063) мм, Z = (-1003) мм
В том числе:		
Постамент колонного аппарата	-	X = - мм, Y = - мм, Z = - мм
Дренаж (D1)	136.68	X = 0 мм, Y = 0 мм, Z = (-703.06) мм
Отвод D1	31.311	X = (-28.097) мм, Y = 28.097 мм, Z = (-895.73) мм
Патрубок D1	438.99	X = (-588.67) мм, Y = 588.67 мм, Z = (-935.46) мм
Фланцевое соединение D1	112.07	X = (-1137.1) мм, Y = 1137.1 мм, Z = (-935.46) мм
Обечайка цилиндрическая	2.4169·10 <sup>5</sup>	X = 0 мм, Y = 0 мм, Z = 2196.6 мм
Вход продукта (N1)	1024.7	X = 0 мм, Y = 1265.5 мм, Z = 539.92 мм
Фланцевое соединение N1	1884.7	X = 0 мм, Y = 1525.7 мм, Z = 540 мм
Выход продукта (N2)	1225.7	X = (-1244.3) мм, Y = 0 мм, Z = 540.04 мм
Фланцевое соединение N2	1884.7	X = (-1525.7) мм, Y = 0 мм, Z = 540 мм
Отвод N2	1982.5	X = (-682.47) мм, Y = 0 мм, Z = 337.75 мм
Люк-лаз (M1)	2105.1	X = 1296.2 мм, Y = 0 мм, Z = 640.34 мм
Крышка плоская M1	2303.7	X = 1598.4 мм, Y = 0 мм, Z = 640 мм
Вход газа (N3)	352.29	X = (-876.61) мм, Y = (-876.64) мм, Z = 3989.9 мм
Фланцевое соединение N3	336.05	X = (-1044.8) мм, Y = (-1044.8) мм, Z = 3990 мм
Отвод N3	172.31	X = (-687) мм, Y = (-687) мм, Z = 3915.5 мм
Патрубок N3	2371.1	X = (-634.31) мм, Y = (-634.31) мм, Z = 1727.5 мм
Измерение температуры (T1)	31.519	X = 919.37 мм, Y = 919.37 мм, Z = 390 мм
Крышка плоская T1	54.477	X = 1021.6 мм, Y = 1021.6 мм, Z = 390 мм
Измерение уровня (L2)	31.525	X = 336.51 мм, Y = (-1255.9) мм, Z = 390 мм
Фланцевое соединение L2	60.42	X = 374.78 мм, Y = (-1398.7) мм, Z = 390 мм
Измерение уровня (L4)	31.519	X = (-336.51) мм, Y = (-1255.9) мм, Z = 390 мм
Фланцевое соединение L4	60.42	X = (-374.78) мм, Y = (-1398.7) мм, Z = 390 мм
Измерение уровня (L1)	31.525	X = 336.51 мм, Y = (-1255.9) мм, Z = 3610 мм
Фланцевое соединение L1	60.42	X = 374.78 мм, Y = (-1398.7) мм, Z = 3610 мм
Измерение уровня (L3)	31.519	X = (-336.51) мм, Y = (-1255.9) мм, Z = 3610 мм
Фланцевое соединение L3	60.42	X = (-374.78) мм, Y = (-1398.7) мм, Z = 3610 мм
Площадка обслуживания №2	46276	X = 0 мм, Y = 0 мм, Z = 3100 мм
Площадка обслуживания №3	46276	X = 0 мм, Y = 0 мм, Z = 100 мм
Днище эллиптическое верхнее	29801	X = 0 мм, Y = 0 мм, Z = 4671.1 мм
Воздушник (V1)	354	X = 0 мм, Y = 0 мм, Z = 5079.5 мм
Фланцевое соединение V1	336.05	X = 0 мм, Y = 0 мм, Z = 5316.2 мм
Измерение давления (P1)	32.774	X = 0 мм, Y = (-500.44) мм, Z = 5089.5 мм
Крышка плоская P1	54.477	X = 0 мм, Y = (-500) мм, Z = 5238 мм

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №

Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №					
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата			

НЕФТЕХИМПРОЕКТ NEFTECHIMPROEKT		МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ		PP	
Площадка обслуживания №1		18432	X = 0 мм, Y = 0 мм, Z = 5140 мм		
Σ		4.9544·10 <sup>5</sup>	X = (-3.7541) мм, Y = 3.042 мм, Z = 1730.2 мм		
Условия монтажа (сухой вес):					
Элемент	Вес, Н	Положение центра тяжести (относительно начала координат модели  )			
Днище эллиптическое нижнее	9942.4	X = 0 мм, Y = 0 мм, Z = (-378.93) мм			
Опора колонного аппарата	65021	X = 1.8063 мм, Y = (-1.8063) мм, Z = (-1003) мм			
В том числе:					
Постамент колонного аппарата	-	X = - мм, Y = - мм, Z = - мм			
Дренаж (D1)	129.38	X = 0 мм, Y = 0 мм, Z = (-701.11) мм			
Отвод D1	22.703	X = (-27.587) мм, Y = 27.587 мм, Z = (-896.45) мм			
Патрубок D1	372.22	X = (-588.67) мм, Y = 588.67 мм, Z = (-935.46) мм			
Фланцевое соединение D1	106.91	X = (-1137.1) мм, Y = 1137.1 мм, Z = (-935.46) мм			
Обечайка цилиндрическая	47539	X = (-5.0633) мм, Y = (-4.4502) мм, Z = 2218.5 мм			
Вход продукта (N1)	769.04	X = 0 мм, Y = 1253.7 мм, Z = 539.89 мм			
Фланцевое соединение N1	1631.9	X = 0 мм, Y = 1525.6 мм, Z = 540 мм			
Выход продукта (N2)	969.98	X = (-1229.3) мм, Y = 0 мм, Z = 540.05 мм			
Фланцевое соединение N2	1631.9	X = (-1525.6) мм, Y = 0 мм, Z = 540 мм			
Отвод N2	762.24	X = (-675.06) мм, Y = 0 мм, Z = 345.15 мм			
Люк-лаз (M1)	1207.4	X = 1254 мм, Y = 0 мм, Z = 640.57 мм			
Крышка плоская M1	2074.7	X = 1603.1 мм, Y = 0 мм, Z = 640 мм			
Вход газа (N3)	320.29	X = (-872.53) мм, Y = (-872.56) мм, Z = 3989.8 мм			
Фланцевое соединение N3	312.71	X = (-1044.8) мм, Y = (-1044.8) мм, Z = 3990 мм			
Отвод N3	109.41	X = (-685.71) мм, Y = (-685.71) мм, Z = 3917.3 мм			
Патрубок N3	1702.1	X = (-634.31) мм, Y = (-634.31) мм, Z = 1727.5 мм			
Измерение температуры (T1)	27.982	X = 919.36 мм, Y = 919.36 мм, Z = 390 мм			
Крышка плоская T1	53.65	X = 1021.8 мм, Y = 1021.8 мм, Z = 390 мм			
Измерение уровня (L2)	27.988	X = 336.51 мм, Y = (-1255.9) мм, Z = 390 мм			
Фланцевое соединение L2	58.712	X = 374.78 мм, Y = (-1398.7) мм, Z = 390 мм			
Измерение уровня (L4)	27.982	X = (-336.51) мм, Y = (-1255.9) мм, Z = 390 мм			
Фланцевое соединение L4	58.712	X = (-374.78) мм, Y = (-1398.7) мм, Z = 390 мм			
Измерение уровня (L1)	27.988	X = 336.51 мм, Y = (-1255.9) мм, Z = 3610 мм			
Фланцевое соединение L1	58.712	X = 374.78 мм, Y = (-1398.7) мм, Z = 3610 мм			
Измерение уровня (L3)	27.982	X = (-336.51) мм, Y = (-1255.9) мм, Z = 3610 мм			
Фланцевое соединение L3	58.712	X = (-374.78) мм, Y = (-1398.7) мм, Z = 3610 мм			
Площадка обслуживания №2	28923	X = 0 мм, Y = 0 мм, Z = 3100 мм			
Площадка обслуживания №3	28923	X = 0 мм, Y = 0 мм, Z = 100 мм			
Днище эллиптическое верхнее	9916.6	X = 0 мм, Y = 0 мм, Z = 4758.2 мм			
					Лист
90651-20600-AM-02-220 PP					12
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	

Этот документ является собственностью "НЕФТЕХИМПРОЕКТ" и не подлежит копированию и распространению без его согласия

НЕФТЕХИМПРОЕКТ NEFTECHIMPROEKT		МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ				PP	
Воздушник (V1)		322.13	X = 0 мм, Y = 0 мм, Z = 5073.9 мм				
Фланцевое соединение V1		312.71	X = 0 мм, Y = 0 мм, Z = 5316.1 мм				
Измерение давления (P1)		29.096	X = 0 мм, Y = (-500.47) мм, Z = 5089.5 мм				
Крышка плоская P1		53.65	X = 0 мм, Y = (-500) мм, Z = 5238.3 мм				
Площадка обслуживания №1		11520	X = 0 мм, Y = 0 мм, Z = 5140 мм				
Σ		2.1505·10 <sup>5</sup> X = (-6.982) мм, Y = 5.9419 мм, Z = 1163.8 мм					
Использование материалов							
Элемент		Материал		Количество		Площадь поверхности(наружная+внутренняя)	
Днище эллиптическое нижнее							
		09Г2С Лист		961.97 кг		13759000 мм <sup>2</sup>	
		Изоляция		51.827 кг		15392000 мм <sup>2</sup>	
Опора колонного аппарата							
		09Г2С Крепеж		11.592 кг		302100 мм <sup>2</sup>	
		09Г2С Лист		1505.1 кг		32176000 мм <sup>2</sup>	
		Огнезащита внешняя		2708.2 кг		26863000 мм <sup>2</sup>	
		Огнезащита внутренняя		2405.2 кг		23959000 мм <sup>2</sup>	
Дренаж (D1)							
		09Г2С Лист		13.193 кг		245820 мм <sup>2</sup>	
Отвод D1							
		09Г2С Труба		2.315 кг		101430 мм <sup>2</sup>	
Патрубок D1							
		09Г2С Труба		37.954 кг		812600 мм <sup>2</sup>	
Фланцевое соединение D1							
		09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка		9.377 кг		206690 мм <sup>2</sup>	
		35X Крепеж		1.524 кг		72601 мм <sup>2</sup>	
		Спирально-навитая с лентой из нержавеющей стали		2 шт.		14484 мм <sup>2</sup>	
Обечайка цилиндрическая							
		09Г2С Лист		4610.6 кг		65673000 мм <sup>2</sup>	
		Изоляция		236.92 кг		69253000 мм <sup>2</sup>	
Вход продукта (N1)							
		09Г2С Лист		78.417 кг		1207500 мм <sup>2</sup>	
Фланцевое соединение N1							
		09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка		145.73 кг		1552300 мм <sup>2</sup>	
		35X Крепеж		20.666 кг		521400 мм <sup>2</sup>	
		Спирально-навитая с лентой из нержавеющей стали		2 шт.		93645 мм <sup>2</sup>	
Выход продукта (N2)							
Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №					Лист
			90651-20600-AM-02-220 PP				13
			Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата

90651-20600-AM-02-220 PP\_изм.0.docx

Формат A4

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №

Этот документ является собственностью "НЕФТЕХИМПРОЕКТ" и не подлежит копированию и распространению без его согласия

НЕФТЕХИМПРОЕКТ NEFTECHIMPROEKT		МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ		РР	
	09Г2С Лист	98.907 кг	1496600 мм²		
Фланцевое соедине- ние N2					
	09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка	145.73 кг	1552300 мм²		
	35Х Крепеж	20.666 кг	521400 мм²		
	Спирально-навитая с лен- той из нержавеющей стали	2 шт.	93645 мм²		
Отвод N2					
	09Г2С Лист	77.724 кг	2496300 мм²		
Люк-лаз (M1)					
	09Г2С Лист	123.12 кг	2419400 мм²		
Крышка плоская M1					
	09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка	198.56 кг	1708000 мм²		
	35Х Крепеж	12.996 кг	481940 мм²		
	Спирально-навитая с лен- той из нержавеющей стали	1 шт.	62173 мм²		
Вход газа (N3)					
	09Г2С Лист	21.035 кг	324670 мм²		
	09Г2С Труба	11.625 кг	280100 мм²		
Фланцевое соедине- ние N3					
	09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка	27.055 кг	446720 мм²		
	35Х Крепеж	4.8308 кг	156980 мм²		
	Спирально-навитая с лен- той из нержавеющей стали	2 шт.	32014 мм²		
Отвод N3					
	09Г2С Труба	11.157 кг	363350 мм²		
Патрубок N3					
	09Г2С Труба	173.56 кг	4030700 мм²		
Внешние нагрузки на аппарат N1					
Внешние нагрузки на аппарат N2					
Внешние нагрузки на аппарат N3					
Измерение темпера- туры (T1)					
	09Г2С Труба	2.8532 кг	76561 мм²		
Крышка плоская T1					
	09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка	4.855 кг	108990 мм²		
	35Х Крепеж	0.61552 кг	31636 мм²		
	Спирально-навитая с лен- той из нержавеющей стали	1 шт.	4906.2 мм²		
Измерение уровня (L2)					
			90651-20600-AM-02-220 РР		Лист
					14
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	



Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	

Этот документ является собственностью "НЕФТЕХИМПРОЕКТ" и не подлежит копированию и распространению без его согласия

НЕФТЕХИМПРОЕКТ NEFTECHIMPROEKT		МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ		РР	
	09Г2С Труба	2.8539 кг	76564 мм²		
Фланцевое соедине- ние L2					
	09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка	5.3523 кг	117560 мм²		
	35Х Крепеж	0.63446 кг	32239 мм²		
	Спирально-навитая с лен- той из нержавеющей стали	1 шт.	4906.2 мм²		
Измерение уровня (L4)					
	09Г2С Труба	2.8532 кг	76561 мм²		
Фланцевое соедине- ние L4					
	09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка	5.3523 кг	117560 мм²		
	35Х Крепеж	0.63446 кг	32239 мм²		
	Спирально-навитая с лен- той из нержавеющей стали	1 шт.	4906.2 мм²		
Измерение уровня (L1)					
	09Г2С Труба	2.8539 кг	76564 мм²		
Фланцевое соедине- ние L1					
	09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка	5.3523 кг	117560 мм²		
	35Х Крепеж	0.63446 кг	32239 мм²		
	Спирально-навитая с лен- той из нержавеющей стали	1 шт.	4906.2 мм²		
Измерение уровня (L3)					
	09Г2С Труба	2.8532 кг	76561 мм²		
Фланцевое соедине- ние L3					
	09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка	5.3523 кг	117560 мм²		
	35Х Крепеж	0.63446 кг	32239 мм²		
	Спирально-навитая с лен- той из нержавеющей стали	1 шт.	4906.2 мм²		
Площадка обслужи- вания №2					
	Ст3 Лист	2949.2 кг	47377000 мм²		
Площадка обслужи- вания №3					
	Ст3 Лист	2949.2 кг	47406000 мм²		
Днище эллиптическое верхнее					
	09Г2С Лист	959.47 кг	13732000 мм²		
	Изоляция	51.704 кг	15386000 мм²		
Воздушник (V1)					
	09Г2С Лист	21.347 кг	338190 мм²		
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	
90651-20600-AM-02-220 РР					Лист
					15

Итого:

## Расчёт давления испытаний по ГОСТ 34347-2017

90651-20600-AM-02-220 PP

Этот документ является собственностью "НЕФТЕХИМПРОЕКТ" и не подлежит копированию и распространению без его согласия

НЕФТЕХИМПРОЕКТ  
NEFTECHIMPROEKT

МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ

РР

Вход газа (N3)	2.2147
Фланцевое соединение N3	2.2847
Измерение температуры (T1)	2.3319
Крышка плоская T1	2.3291
Измерение уровня (L2)	2.3319
Фланцевое соединение L2	2.3291
Измерение уровня (L4)	2.3319
Фланцевое соединение L4	2.3291
Измерение уровня (L1)	2.2877
Фланцевое соединение L1	2.2849
Измерение уровня (L3)	2.2877
Фланцевое соединение L3	2.2849
Днище эллиптическое верхнее	2.2147
Воздушник (V1)	2.2147
Фланцевое соединение V1	2.2847
Измерение давления (P1)	2.2875
Крышка плоская P1	2.2847
P <sub>test,min</sub> = 2.2147	

Категория оборудования по ТР ТС 032/2013

Элемент, связанный с полостью	Только жидкость (ξ>0.99)	Группа рабочей среды	Вместимость, м³	Произведение значения максимального допустимого рабочего давления и значения вместимости, МПа·м³	Максимальное допустимое рабочее давление, МПа	Категория оборудования
Днище эллиптическое нижнее	Нет	I	24.2	39.783	1.644	4

Приложенные нагрузки

Рабочие условия

Название элемента	Нагрузки						Примечание
Дренаж (D1)							
Патрубок D1	F=0 Н	M=0 Н·м	Q=0 Н	M <sub>t</sub> =0 Н·м			
Фланцевое соединение D1							
Обечайка цилиндрическая	F=0 Н	M=0 Н·м	Q=0 Н	M <sub>t</sub> =0 Н·м			Авто
Вход продукта (N1)	F <sub>R</sub> =(-10000) Н	F <sub>C</sub> =10000 Н	F <sub>L</sub> =10000 Н	M <sub>C</sub> =16300 Н·м	M <sub>L</sub> =16300 Н·м	M <sub>T</sub> =16300 Н·м	Не приложены как внешние
Фланцевое соединение N1	F <sub>R</sub> =(-10000) Н	F <sub>C</sub> =10000 Н	F <sub>L</sub> =10000 Н	M <sub>C</sub> =16300 Н·м	M <sub>L</sub> =16300 Н·м	M <sub>T</sub> =16300 Н·м	Не приложены как внешние

Изм.

Лист

№ док.

Подп.

Дата

90651-20600-AM-02-220 РР

Лист

17

Взам. инв. №

Подп. и дата

Изм. № подл.

90651-20600-AM-02-220 РР\_изм.0.docx

Формат А4

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №

Этот документ является собственностью "НЕФТЕХИМПРОЕКТ" и не подлежит копированию и распространению без его согласия

НЕФТЕХИМПРОЕКТ NEFTECHIMPROEKT					МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ			РР
Выход про- дукта (N2)	$F_R=(-10000) \text{ Н}$	$F_C=10000 \text{ Н}$	$F_L=10000 \text{ Н}$	$M_C=16300 \text{ Н} \cdot \text{м}$	$M_L=16300 \text{ Н} \cdot \text{м}$	$M_T=16300 \text{ Н} \cdot \text{м}$	Не прило- жены как внешние	
Фланцевое соединение N2	$F_R=(-10000) \text{ Н}$	$F_C=10000 \text{ Н}$	$F_L=10000 \text{ Н}$	$M_C=16300 \text{ Н} \cdot \text{м}$	$M_L=16300 \text{ Н} \cdot \text{м}$	$M_T=16300 \text{ Н} \cdot \text{м}$	Не прило- жены как внешние	
Люк-лаз (M1)								
Вход газа (N3)	$F_R=(-3100) \text{ Н}$	$F_C=3100 \text{ Н}$	$F_L=3100 \text{ Н}$	$M_C=3000 \text{ Н} \cdot \text{м}$	$M_L=3000 \text{ Н} \cdot \text{м}$	$M_T=3000 \text{ Н} \cdot \text{м}$	Не прило- жены как внешние	
Фланцевое соединение N3	$F_R=(-3100) \text{ Н}$	$F_C=3100 \text{ Н}$	$F_L=3100 \text{ Н}$	$M_C=3000 \text{ Н} \cdot \text{м}$	$M_L=3000 \text{ Н} \cdot \text{м}$	$M_T=3000 \text{ Н} \cdot \text{м}$	Не прило- жены как внешние	
Патрубок N3	$F=0 \text{ Н}$	$M=0 \text{ Н} \cdot \text{м}$	$Q=0 \text{ Н}$	$M_t=0 \text{ Н} \cdot \text{м}$				
Внешние нагрузки на аппарат N1	$F_x=14142 \text{ Н}$	$F_y=0 \text{ Н}$	$F_z=(-10000) \text{ Н}$	$M_x=0 \text{ Н} \cdot \text{м}$	$M_y=32659 \text{ Н} \cdot \text{м}$	$M_z=0 \text{ Н} \cdot \text{м}$		
Внешние нагрузки на аппарат N2	$F_x=14142 \text{ Н}$	$F_y=0 \text{ Н}$	$F_z=(-10000) \text{ Н}$	$M_x=0 \text{ Н} \cdot \text{м}$	$M_y=32659 \text{ Н} \cdot \text{м}$	$M_z=0 \text{ Н} \cdot \text{м}$		
Внешние нагрузки на аппарат N3	$F_x=4384 \text{ Н}$	$F_y=0 \text{ Н}$	$F_z=(-3100) \text{ Н}$	$M_x=0 \text{ Н} \cdot \text{м}$	$M_y=7359 \text{ Н} \cdot \text{м}$	$M_z=0 \text{ Н} \cdot \text{м}$		
Измерение температуры (T1)								
Измерение уровня (L2)								
Фланцевое соединение L2								
Измерение уровня (L4)								
Фланцевое соединение L4								
Измерение уровня (L1)								
Фланцевое соединение L1								
Измерение уровня (L3)								
Фланцевое соединение L3								
Воздушник (V1)								
Фланцевое соединение V1								
					90651-20600-AM-02-220 РР			Лист
								18
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата				

Измерение  
давления (P1)

### Условия испытаний:

Название элемента	Нагрузки				Примечание
Дренаж (D1)					
Патрубок D1	F=0 Н	M=0 Н·м	Q=0 Н	M <sub>t</sub> =0 Н·м	
Фланцевое соединение D1					
Обечайка цилиндрическая	F=0 Н	M=0 Н·м	Q=0 Н	M <sub>t</sub> =0 Н·м	Авто
Вход продукта (N1)					
Фланцевое соединение N1					
Выход продукта (N2)					
Фланцевое соединение N2					
Люк-лаз (M1)					
Вход газа (N3)					
Фланцевое соединение N3					
Патрубок N3	F=0 Н	M=0 Н·м	Q=0 Н	M <sub>t</sub> =0 Н·м	
Внешние нагрузки на аппарат N1					
Внешние нагрузки на аппарат N2					
Внешние нагрузки на аппарат N3					
Измерение температуры (T1)					
Измерение уровня (L2)					
Фланцевое соединение L2					
Измерение уровня (L4)					
Фланцевое соединение L4					
Измерение уровня (L1)					
Фланцевое соединение L1					
Измерение уровня (L3)					
Фланцевое соединение L3					
Воздушник (V1)					
Фланцевое соединение V1					
Измерение давления (P1)					

Взам. инв. №

**Подп. и дата**

ИНВ. № подл.

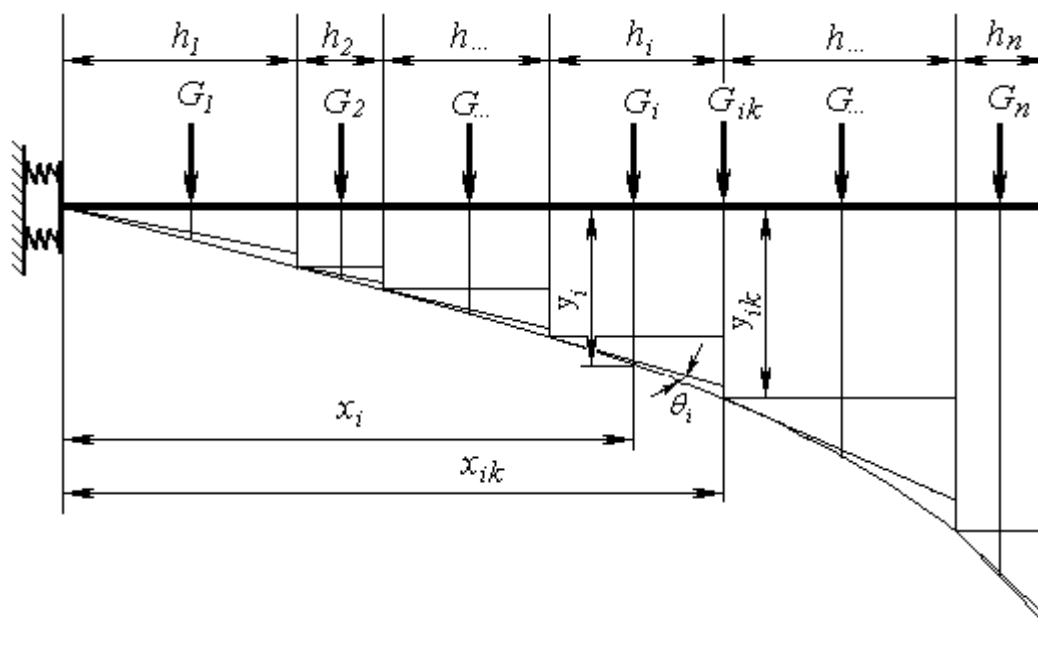
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата

90651-20600-AM-02-220 PP

Лист

19

## Определение периода собственных колебаний по методу Рэлея



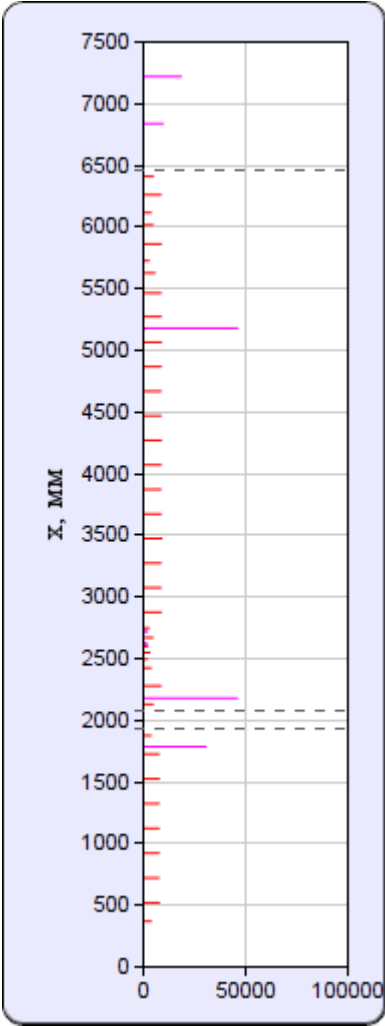
$G_i$  – весовая нагрузка, приложенная в центре тяжести элемента (обечайки, переходы)  
 $G_{ik}$  – нагрузка от сосредоточенной массы (обслуживающие площадки, насадки, тарелки, днища)  
 $x_i$  – расстояние от фундамента до центра тяжести элемента  
 $x_{ik}$  – расстояние от фундамента до точки приложения сосредоточенной массы  
 $y_i$  – перемещения от весовых нагрузок в центре тяжести элемента  
 $y_{ik}$  – перемещения от весовых нагрузок в точке приложения сосредоточенной массы

### Расчёт в рабочих условиях (коррозия учтена)

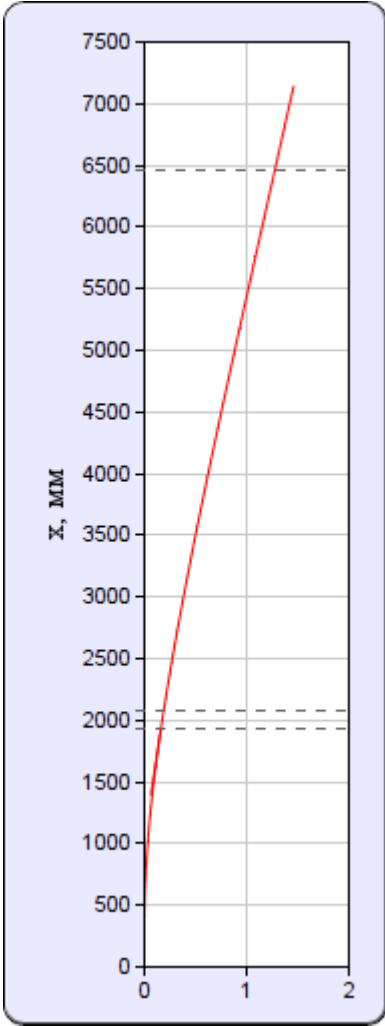
Период собственных колебаний:

$$T = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{\sum (G_i \cdot y_i^2 + G_{ik} \cdot y_{ik}^2)}{g \cdot \sum (G_i \cdot y_i + G_{ik} \cdot y_{ik})}} = 0.078254 \text{ с}$$

Изм. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №				
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	90651-20600-AM-02-220 РР	
					Лист	20



Весовые нагрузки, G, Н



Перемещения от весовых нагрузок, y, мм

Расчёт в рабочих условиях (коррозия не учтена)

Период собственных колебаний:

$$T = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{\sum (G_i \cdot y_i^2 + G_{ik} \cdot y_{ik}^2)}{g \cdot \sum (G_i \cdot y_i + G_{ik} \cdot y_{ik})}} = 0.068498 \text{ с}$$

Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата

Взам. инв. №

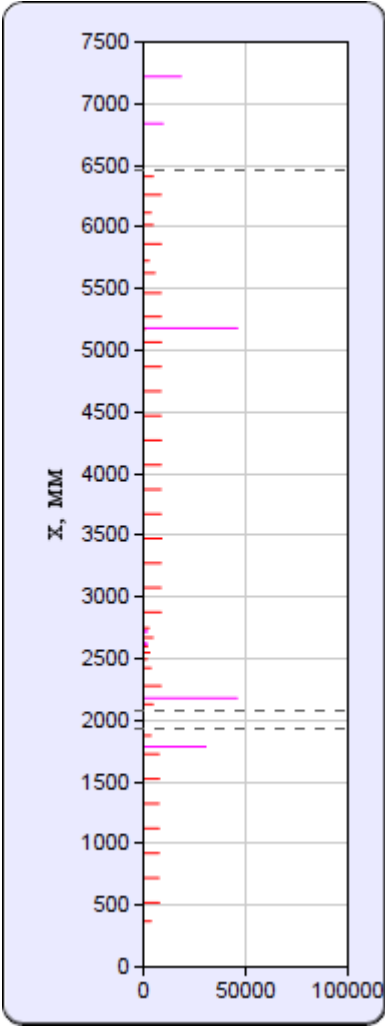
Подп. и дата

Инв. № подл.

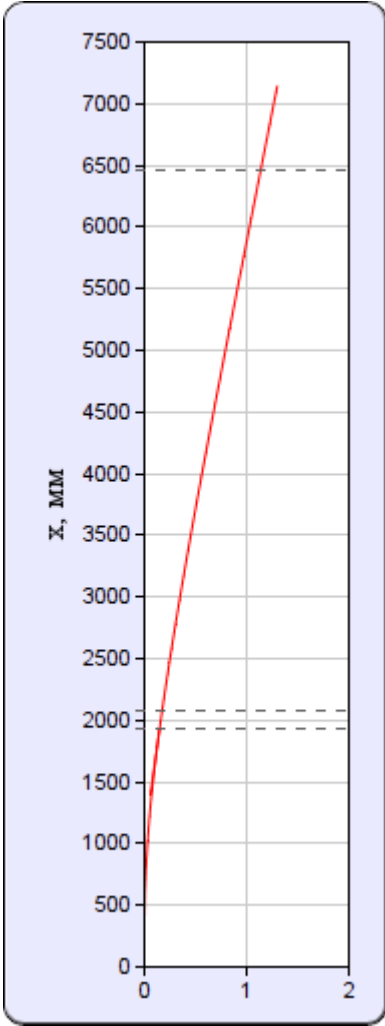
90651-20600-AM-02-220 РР

Лист

21



Весовые нагрузки, G, Н



Перемещения от весовых нагрузок, y, мм

Расчёт в условиях монтажа (коррозия учтена)

Период собственных колебаний:

$$T = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{\sum (G_i \cdot y_i^2 + G_{ik} \cdot y_{ik}^2)}{g \cdot \sum (G_i \cdot y_i + G_{ik} \cdot y_{ik})}} = 0.078709 \text{ с}$$

Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата

Взам. инв. №

Подп. и дата

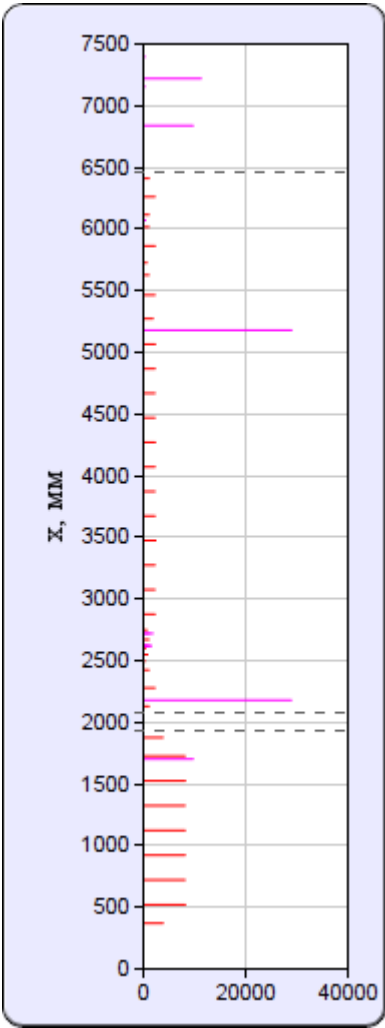
Инв. № подл.

90651-20600-AM-02-220 РР

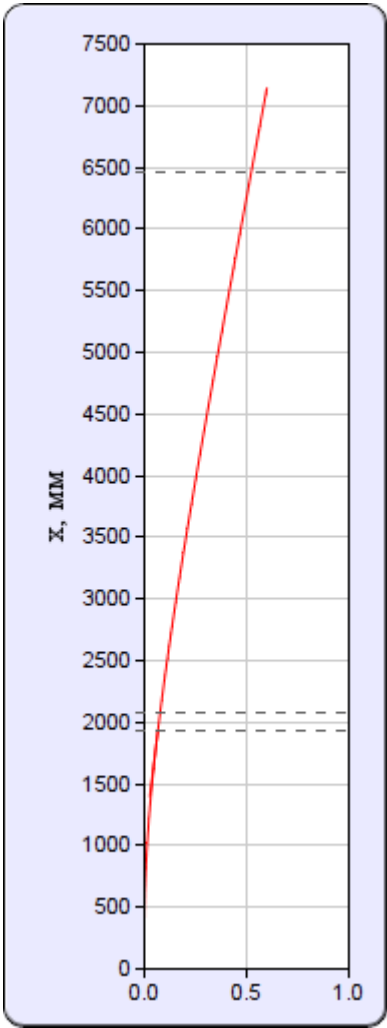
Лист

22





Весовые нагрузки, G, Н



Перемещения от весовых нагрузок, y, мм

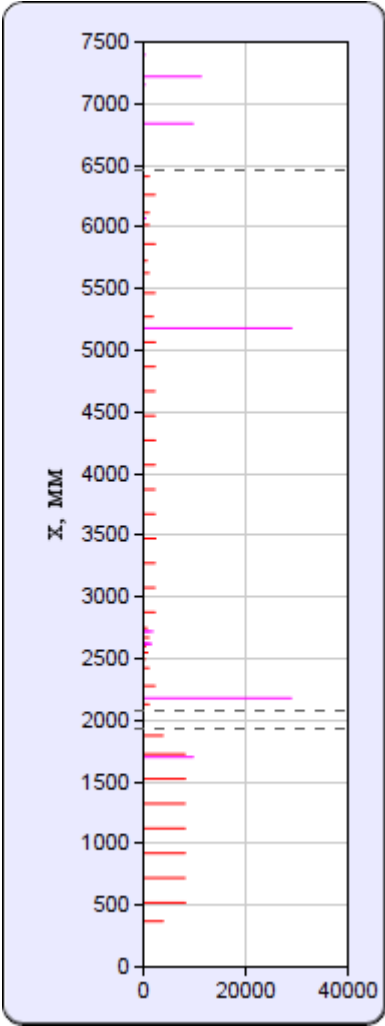
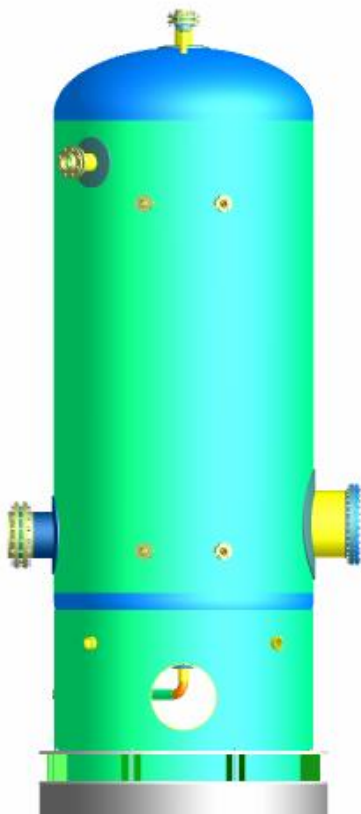
Расчёт в условиях монтажа (коррозия не учтена)

Период собственных колебаний:

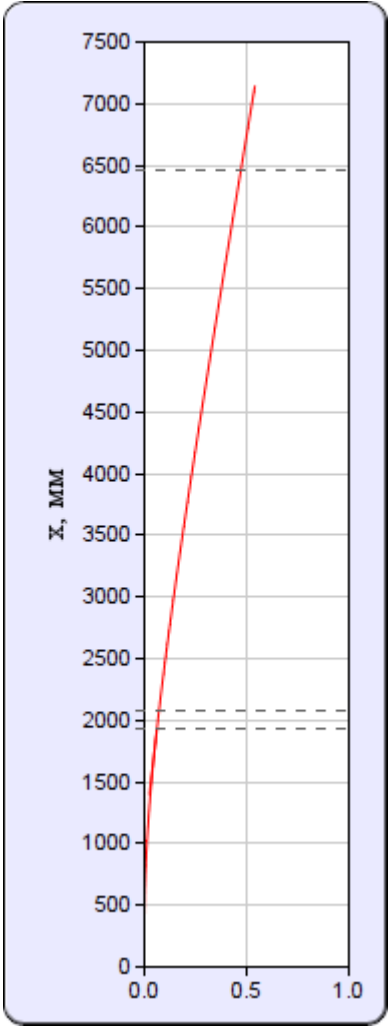
$$T = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{\sum (G_i \cdot y_i^2 + G_{ik} \cdot y_{ik}^2)}{g \cdot \sum (G_i \cdot y_i + G_{ik} \cdot y_{ik})}} = 0.064429 \text{ с}$$

Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата

Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата



Весовые нагрузки, G, Н



Перемещения от весовых нагрузок, y, мм

Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания, коррозия учтена)

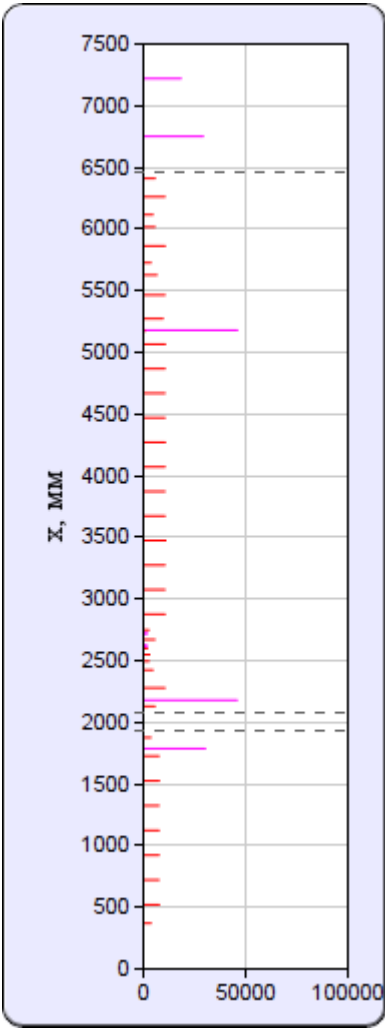
Период собственных колебаний:

$$T = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{\sum (G_i \cdot y_i^2 + G_{ik} \cdot y_{ik}^2)}{g \cdot \sum (G_i \cdot y_i + G_{ik} \cdot y_{ik})}} = 0.078690 \text{ с}$$

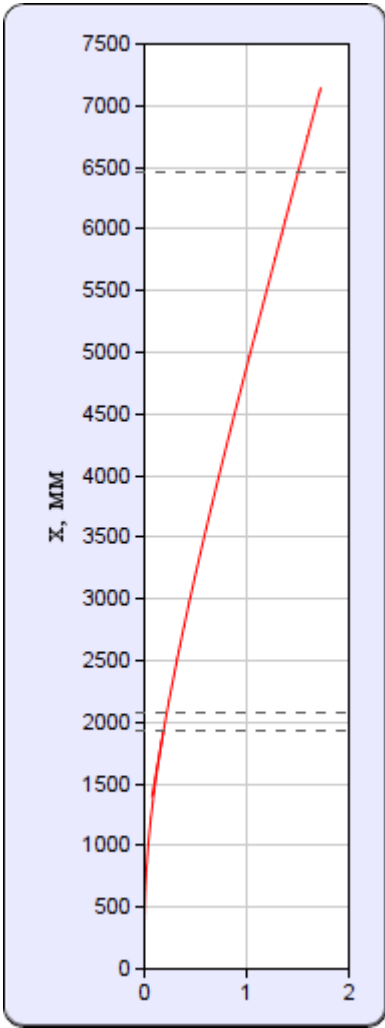
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата

Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата

90651-20600-AM-02-220 РР



Весовые нагрузки, G, Н



Перемещения от весовых нагрузок, y, мм

Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания, коррозия не учтена)

Период собственных колебаний:

$$T = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{\sum (G_i \cdot y_i^2 + G_{ik} \cdot y_{ik}^2)}{g \cdot \sum (G_i \cdot y_i + G_{ik} \cdot y_{ik})}} = 0.070619 \text{ с}$$

Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата

Взам. инв. №

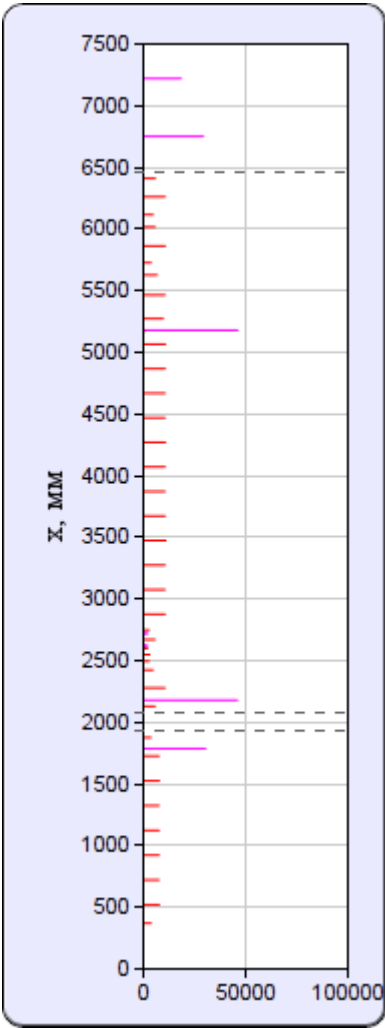
Подп. и дата

Инв. № подл.

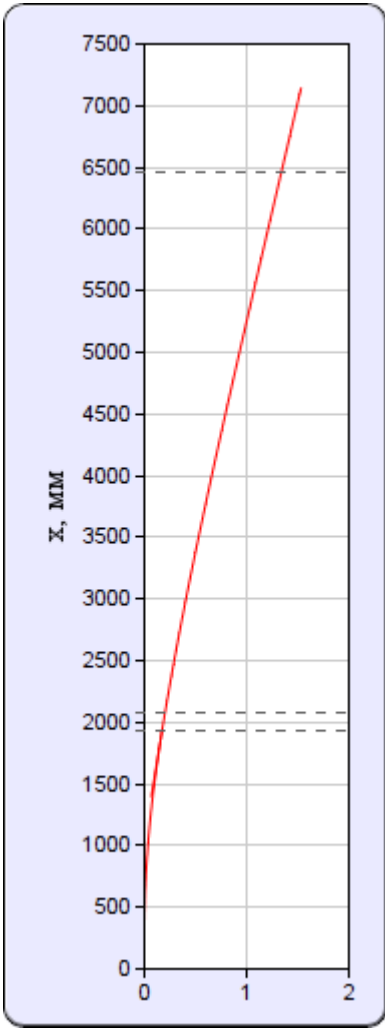
90651-20600-AM-02-220 РР

Лист

25



Весовые нагрузки, G, Н



Перемещения от весовых нагрузок, y, мм

Инов. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №
Изм.	Лист	№ док.
Подп.	Дата	

## Расчёт ветровых нагрузок

**Расчёт по ГОСТ 34283-2017 (RUS) (с учетом типа местности)**

Нормативное значение средней составляющей ветровой нагрузки  $i$ -го участка:

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

где  $\theta_i$  – коэффициент, учитывающий изменение ветрового давления по высоте аппарата:

$$\Theta_i = \begin{cases} 0.75, & (x_j + x_{\text{очт}}) \leq 5 \text{ м} \\ \left( \frac{x_j + x_{\text{очт}}}{10} \right)^{0.3}, & (x_j + x_{\text{очт}}) > 5 \text{ м} \end{cases}$$

Средняя составляющая ветровой нагрузки на  $i$ -м участке:

$$P_{ist} = q_{ist} \cdot D_i \cdot h_{it}$$

где  $D_i$  – наружный диаметр  $i$ -го участка,

$h_i$  – высота  $i$ -го участка.

Коэффициент пространственной корреляции пульсаций давления ветра:

$$v = 0.968 - 0.025 \cdot \sqrt{H + x_{O_2H}}$$

Пульсационная составляющая ветровой нагрузки на  $i$ -м участке:

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

где  $G_i$  – вес  $i$ -го участка,

$\xi$  – коэффициент динамичности,

$\eta_i$  – приведенное относительное ускорение центра тяжести  $i$ -го участка.

Ветровая нагрузка на  $i$ -м участке:

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

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

$$M_{vj} = 1.4 \cdot q_0 \cdot \Theta_j \cdot (x_i - x_0) \cdot (1 + 0.75 \cdot \xi \cdot \chi_j \cdot m_j) \cdot \sum A_p$$

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

$$M_{vj} = 0.85 \cdot q_0 \cdot \theta_j \cdot (x_i - x_0) \cdot (1 + 0.75 \cdot \xi \cdot \chi_j \cdot m_j) \cdot A_j,$$

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

$A_j$  – площадь, ограниченная контуром  $j$ -й площадки;

$$\chi = 1.56 \cdot \left( \frac{X_j + X_{\text{OCH}}}{H + X_{\text{OCH}}} \right)^{1.6},$$

$m_i$  – коэффициент пульсации давления ветра:

$$m_j = 0.76 \cdot \left( \frac{X_j + X_{\text{окт}}}{10} \right)^{-0.15}$$

$H = 7118$  мм - общая высота аппарата от поверхности земли.

Расчетный изгибающий момент в сечении на высоте  $x_0$ :

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

### Расчёт в рабочих условиях (коррозия учтена)

Нормативное значение ветрового давления (для IV ветрового района):  $q_0 = 0.48 \cdot 10^{-3}$  МПа

$$v = 0.968 - 0.025 \sqrt{H} = 0.9013$$

Безразмерный параметр, зависящий от периода собственных колебаний аппарата по 1-й форме (период колебаний  $T = 0.078254$  с, см.Расчёт периода колебаний)

$$\varepsilon = \frac{T \cdot \sqrt{q_{10}}}{790} = 0.0021702$$

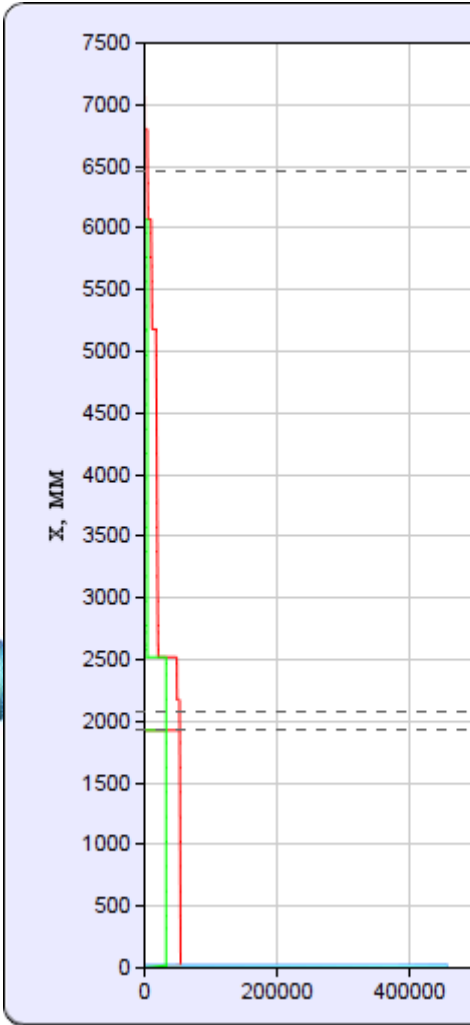
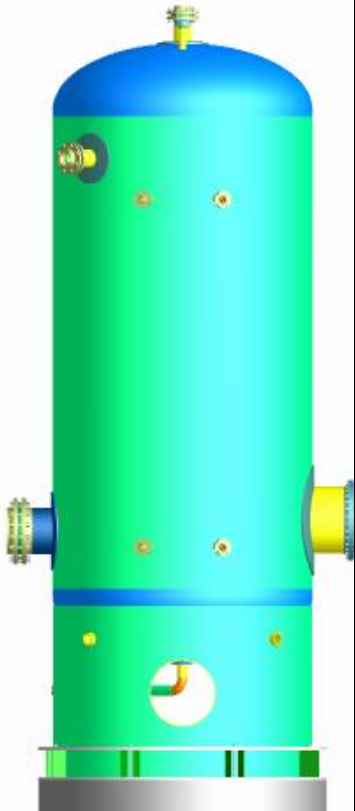
Взам. инв. №	$m_j = 0.76 \cdot \left( \frac{H_j \cdot \gamma_{оксн}}{10} \right)$ <p>H = 7118 мм - общая высота аппарата от поверхности земли.</p> <p>Расчетный изгибающий момент в сечении на высоте x<sub>0</sub>:</p> $M_v = \sum_{i=1}^n P_i \cdot (x_i - x_0) + \sum_{i=1}^m M_{vi}$					
Подп. и дата	<p><b>Расчёт в рабочих условиях (коррозия учтена)</b></p> <p>Нормативное значение ветрового давления (для IV ветрового района): q<sub>0</sub>= 0.48·10<sup>-3</sup> МПа</p> $v = 0.968 - 0.025 \sqrt{H} = 0.9013$ <p>Безразмерный параметр, зависящий от периода собственных колебаний аппарата по 1-й форме (период колебаний T = 0.078254 с, см.Расчёт периода колебаний)</p>					
Инв. № подл.	$\varepsilon = \frac{T \cdot \sqrt{q_0}}{790} = 0.0021702$					
					90651-20600-AM-02-220 PP	Лист
						27
	Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	

Коэффициент динамичности для периода собственных колебаний аппарата по 1-й форме:

$$\xi = 1.1 + \sqrt{15.5 \cdot \varepsilon} = 1.2834$$

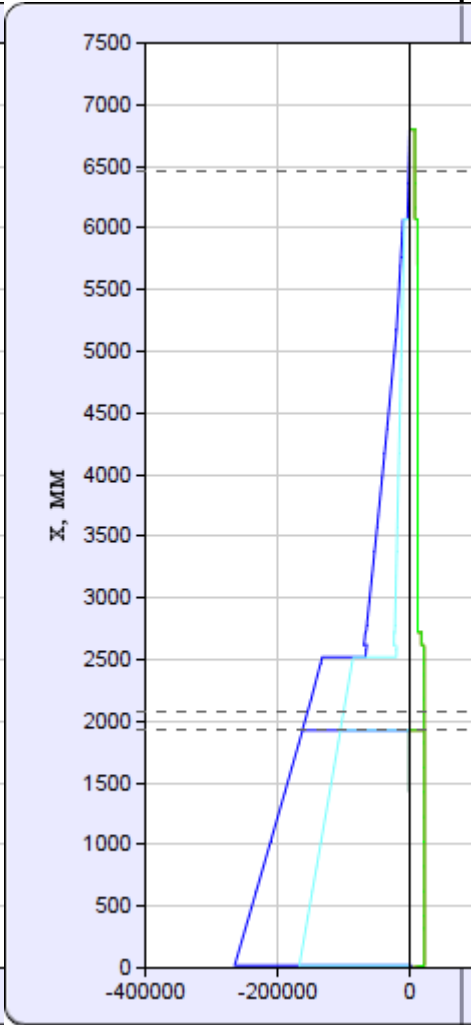
$$\frac{h}{D} = 7478.9 / 2545.4 = 2.9383$$

$\frac{h}{D} \leq 10$ , расчет на вихревое возбуждение (ветровой резонанс) не требуется.



Боковая нагрузка,  
 $P_w$ , Н

—  $Q_x$ 
—  $Q_y$ 
—  $Q_x + P_{wx}$   
—  $Q_y + P_{wy}$



Изгибающий момент,  
 $M_w$ , Н·м

—  $M_x$ 
—  $M_y$ 
—  $M_x + M_{wx}$   
—  $M_y + M_{wy}$

Элемент	Высота до начала элемента, мм	Наружный диаметр, мм	Нагрузка от площадок, Н	Суммарная нагрузка, Н	Изгибающий момент, Н·м
Постамент колонного аппарата	0	2702	0	54518	$2.657 \cdot 10^5$
Опора колонного аппарата	300	2678	0	54314	$2.4944 \cdot 10^5$
Днище эллиптическое нижнее	1906.6	2576	0	53063	$1.5587 \cdot 10^5$
Обечайка цилиндрическая	2060	2576	9732.8	53063	$1.5587 \cdot 10^5$
Днище эллиптическое верхнее	6440	2576	3973.2	4534.2	7935.3

Расчёт в рабочих условиях (коррозия не учтена)

$$\nu = 0.968 - 0.025 \sqrt{H} = 0.9013$$

Безразмерный параметр, зависящий от периода собственных колебаний аппарата по 1-й форме (период колебаний  $T = 0.068498$  с, см. Расчет периода колебаний)

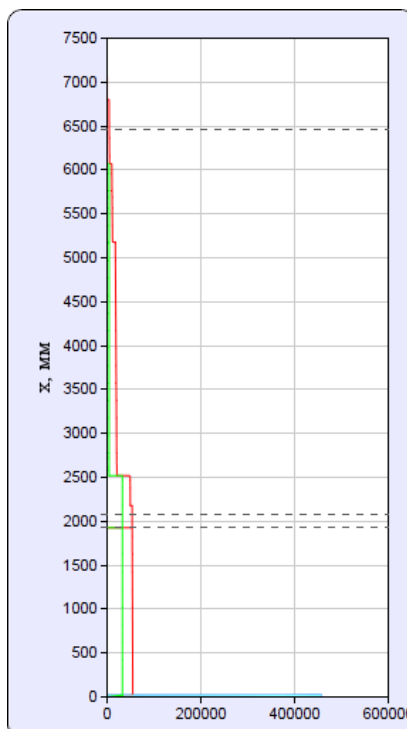
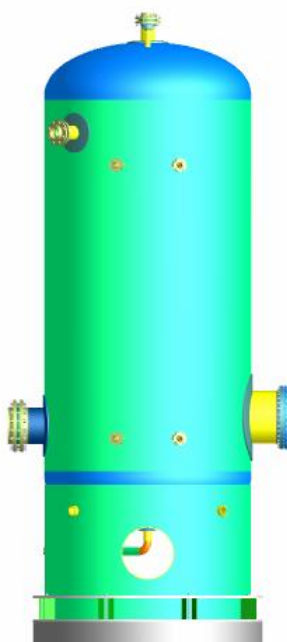
$$\varepsilon = \frac{T \cdot \sqrt{q_0}}{790} = 0.0018997$$

Коэффициент динамичности для периода собственных колебаний аппарата по 1-й форме:

$$\xi = 1.1 + \sqrt{15.5 \cdot \varepsilon} = 1.2716$$

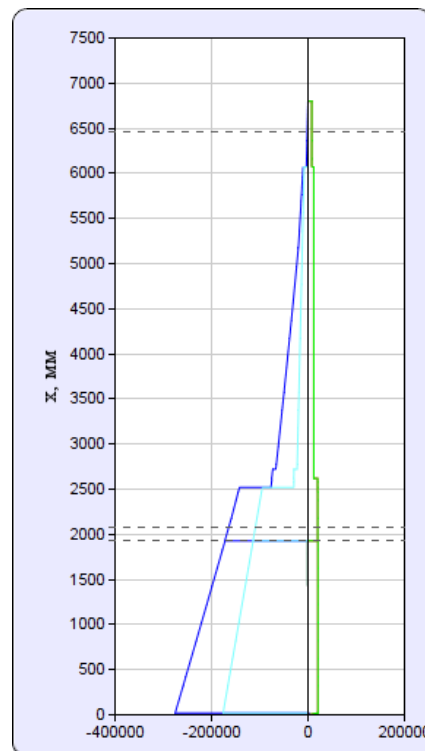
$$\frac{h}{D} \leq 10,$$

расчет на вихревое возбуждение (ветровой резонанс) не требуется.



Боковая нагрузка,  
 $P_w, H$

—  $Q_x$  —  $Q_y$  —  $Q_x + P_{wx}$   
—  $Q_y + P_{wy}$



Изгибающий момент,  
 $M_w, H \cdot m$

—  $M_x$  —  $M_y$  —  $M_x + M_{wx}$   
—  $M_y + M_{wy}$

Элемент	Высота до начала элемента, мм	Наружный диаметр, мм	Нагрузка от площадок, Н	Суммарная нагрузка, Н	Изгибающий момент, Н·м
Постамент колонного аппарата	0	2702	0	54844	$2.7607 \cdot 10^5$
Опора колонного аппарата	300	2678	0	54639	$2.597 \cdot 10^5$
Днище эллиптическое нижнее	1906.6	2576	0	53376	$1.6543 \cdot 10^5$
Обечайка цилиндрическая	2060	2576	9703	53376	$1.6543 \cdot 10^5$
Днище эллиптическое верхнее	6440	2576	3953.1	4514	7933.9

### Расчёт в условиях монтажа (коррозия учтена)

$$\nu = 0.968 - 0.025 \sqrt{H} = 0.9013$$

Безразмерный параметр, зависящий от периода собственных колебаний аппарата по 1-й форме (период колебаний  $T = 0.078709$  с, см. Расчет периода колебаний)

$$\varepsilon = \frac{T \cdot \sqrt{q_0}}{790} = 0.0021828$$

Коэффициент динамичности для периода собственных колебаний аппарата по 1-й форме:

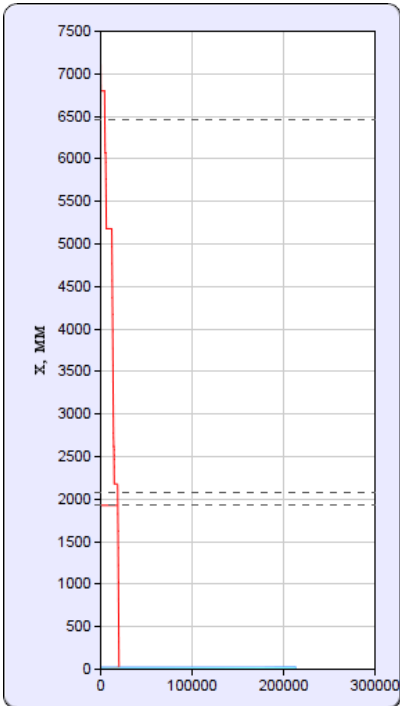
90651-20600-AM-02-220 РР

Лист

29

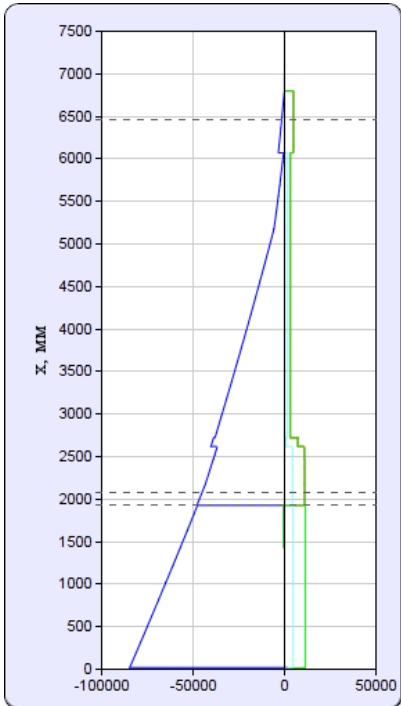
$$\xi = 1.1 + \sqrt{15.5 \cdot \varepsilon} = 1.2839$$

$$\frac{h}{D} \leq 10, \quad \text{расчет на вихревое возбуждение (ветровой резонанс) не требуется.}$$



Боковая нагрузка,  
 $P_w$ , Н

$$\begin{aligned} & \text{--- } Q_x \text{ --- } Q_y \text{ --- } Q_x + P_{wx} \\ & \text{--- } Q_y + P_{wy} \end{aligned}$$



Изгибающий момент,  
 $M_w$ , Н·м

$$\begin{aligned} & \text{--- } M_x \text{ --- } M_y \text{ --- } M_x + M_{wx} \\ & \text{--- } M_y + M_{wy} \end{aligned}$$

Элемент	Высота до начала элемента, мм	Наружный диаметр, мм	Нагрузка от площадок, Н	Суммарная нагрузка, Н	Изгибающий момент, Н·м
Постамент колонного аппарата	0	2702	0	20080	85387
Опора колонного аппарата	300	2678	0	19876	79455
Днище эллиптическое нижнее	1906.6	2576	0	18630	46397
Обечайка цилиндрическая	2060	2576	9734.2	18630	46398
Днище эллиптическое верхнее	6440	2576	3974.1	4535.1	5114.4

Расчёт в условиях монтажа (коррозия не учтена)

$$v = 0.968 - 0.025 \sqrt{H} = 0.9013$$

Безразмерный параметр, зависящий от периода собственных колебаний аппарата по 1-й форме (период колебаний  $T = 0.064429$  с, см.Расчёт периода колебаний)

$$\varepsilon = \frac{T \cdot \sqrt{q_0}}{790} = 0.0017868$$

Коэффициент динамичности для периода собственных колебаний аппарата по 1-й форме:

$$\xi = 1.1 + \sqrt{15.5 \cdot \varepsilon} = 1.2664$$

$$\frac{h}{D} \leq 10, \quad \text{расчет на вихревое возбуждение (ветровой резонанс) не требуется.}$$

Взам. инв. №

Подп. и дата

Инв. № подл.

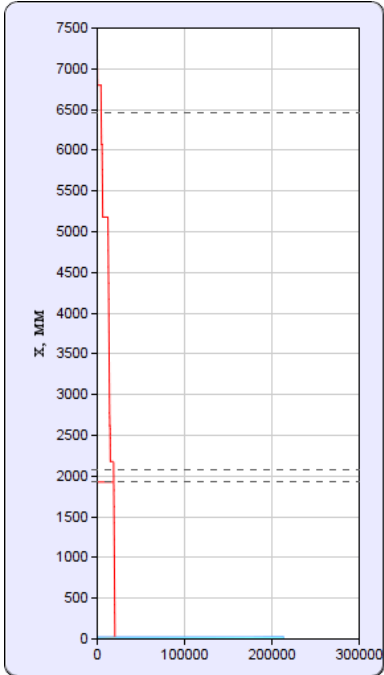
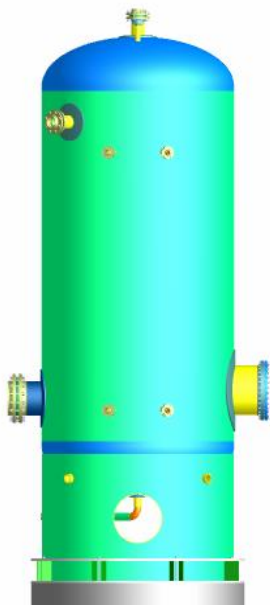
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата

90651-20600-AM-02-220 РР

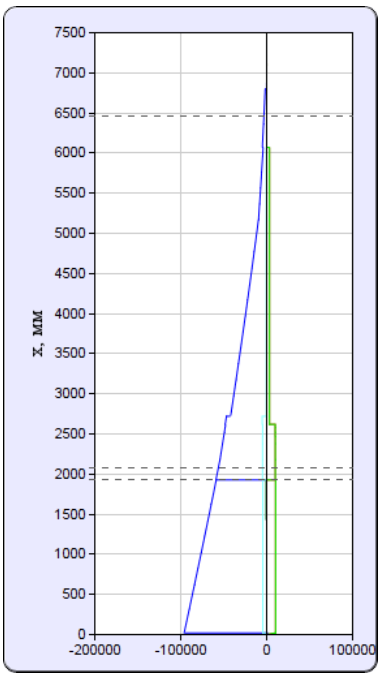
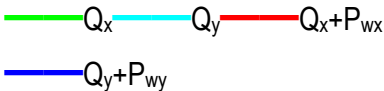
Лист

30

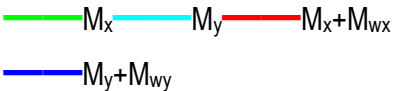




Боковая нагрузка,  
Р<sub>w</sub>, Н



Изгибающий момент,  
M<sub>w</sub>, Н·м



Элемент	Высота до начала элемента, мм	Наружный диаметр, мм	Нагрузка от площадок, Н	Суммарная нагрузка, Н	Изгибающий момент, Н·м
Постамент колонного аппарата	0	2702	0	20234	96570
Опора колонного аппарата	300	2678	0	20030	90572
Днище эллиптическое нижнее	1906.6	2576	0	18760	57048
Обечайка цилиндрическая	2060	2576	9690	18760	57050
Днище эллиптическое верхнее	6440	2576	3944.3	4505.2	3211.7

Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания, коррозия учтена)

$$\nu = 0.968 - 0.025 \sqrt{H} = 0.9013$$

Безразмерный параметр, зависящий от периода собственных колебаний аппарата по 1-й форме (период колебаний T = 0.078690 с, см.Расчёт периода колебаний)

$$\varepsilon = \frac{T \cdot \sqrt{q_0}}{790} = 0.0021823$$

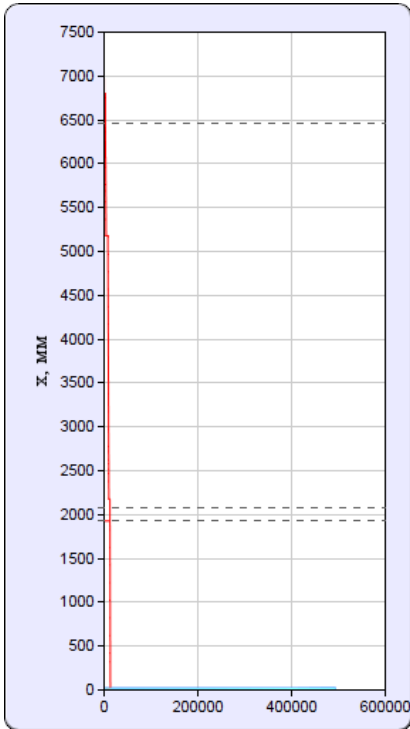
Коэффициент динамичности для периода собственных колебаний аппарата по 1-й форме:

$$\xi = 1.1 + \sqrt{15.5 \cdot \varepsilon} = 1.2839$$

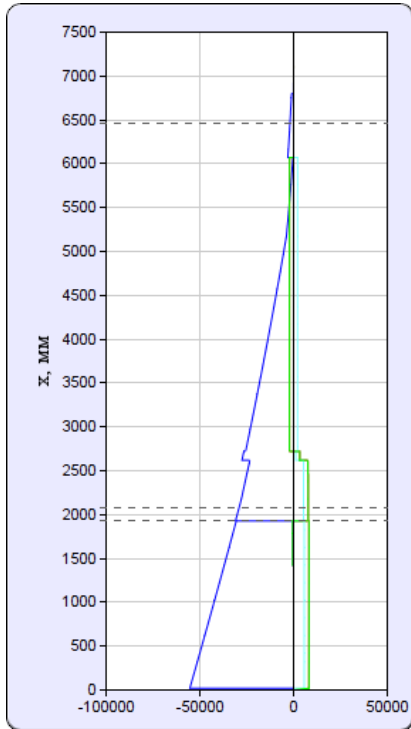
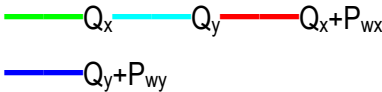
Изм. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №

Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата

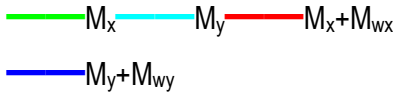
90651-20600-AM-02-220 РР



Боковая нагрузка,  
 $P_w, \text{Н}$



Изгибающий момент,  
 $M_w, \text{Н·м}$



Элемент	Высота до начала элемента, мм	Наружный диаметр, мм	Нагрузка от площадок, Н	Суммарная нагрузка, Н	Изгибающий момент, Н·м
Постамент колонного аппарата	0	2702	0	13380	55944
Опора колонного аппарата	300	2678	0	13258	51997
Днище эллиптическое нижнее	1906.6	2576	0	12507	30073
Обечайка цилиндрическая	2060	2576	5840.5	12507	30074
Днище эллиптическое верхнее	6440	2436	2384.5	2703.6	1933.2

Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания, коррозия не учтена)

$\nu = 0.968 - 0.025 \sqrt{H} = 0.9013$

Безразмерный параметр, зависящий от периода собственных колебаний аппарата по 1-й форме (период колебаний  $T = 0.070619$  с, см. Расчёт периода колебаний)

$\varepsilon = \frac{T \cdot \sqrt{q_0}}{790} = 0.0019585$

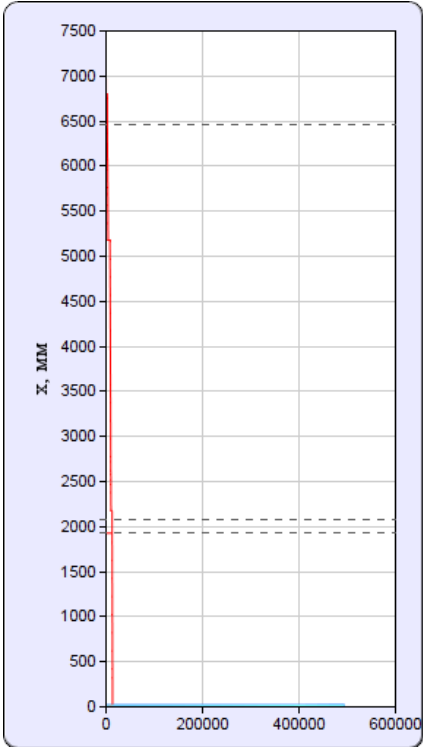
Коэффициент динамичности для периода собственных колебаний аппарата по 1-й форме:

$\xi = 1.1 + \sqrt{15.5 \cdot \varepsilon} = 1.2742$

Взам. инв. №	
Подп. и дата	
Инв. № подл.	

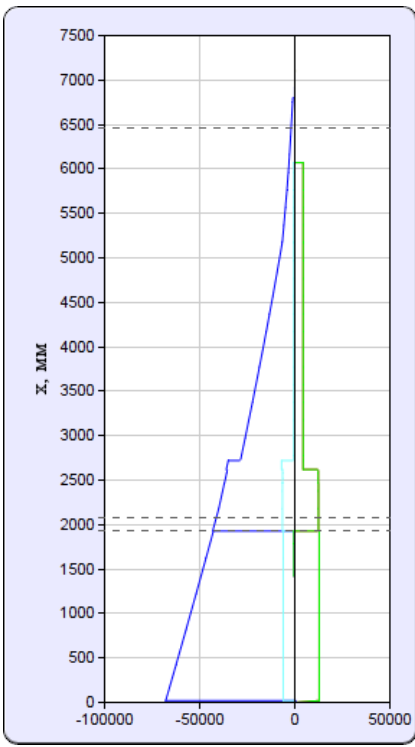
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата

90651-20600-AM-02-220 PP



Боковая нагрузка,  
 $P_w$ , Н

—  $Q_x$  —  $Q_y$  —  $Q_x + P_{wx}$   
—  $Q_y + P_{wy}$



Изгибающий момент,  
 $M_w$ , Н·м

—  $M_x$  —  $M_y$  —  $M_x + M_{wx}$   
—  $M_y + M_{wy}$

Элемент	Высота до начала элемента, мм	Наружный диаметр, мм	Нагрузка от площадок, Н	Суммарная нагрузка, Н	Изгибающий момент, Н·м
Постамент колонного аппарата	0	2702	0	13540	69048
Опора колонного аппарата	300	2678	0	13417	65082
Днище эллиптическое нижнее	1906.6	2576	0	12661	43066
Обечайка цилиндрическая	2060	2576	5825.8	12661	43067
Днище эллиптическое верхнее	6440	2436	2374.5	2693.7	1925.7

Изм. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №

Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата

90651-20600-AM-02-220 РР

## Расчёт сейсмических нагрузок

### Расчет по ГОСТ 34283-2017 (RUS)

#### Расчёт в рабочих условиях (коррозия учтена)

Коэффициент динамичности ( $T \leq 0,1c$ ):

$$\beta = 1 + 15 \cdot T = 1 + 15 \cdot 0.078254 = 2.1738$$

Коэффициент, определяемый назначением сосуда или аппарата:

$$K_0 = 2$$

Коэффициент, учитывающий допустимые повреждения в сосудах и аппаратах:

$$K_1 = 0.25$$

Коэффициент, учитывающий способность сосуда или аппарата к рассеиванию энергии:

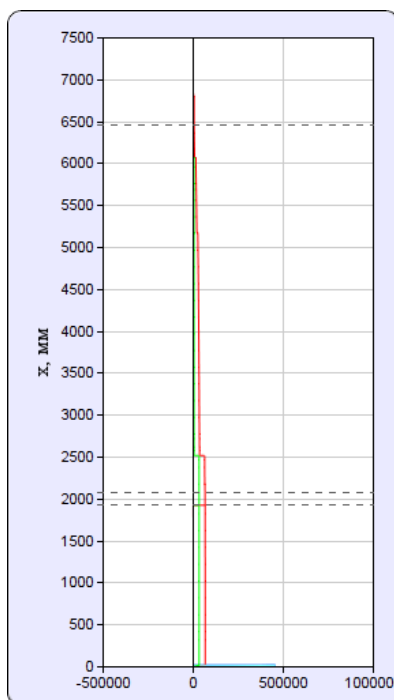
$$K_\psi = 1$$

Сейсмический коэффициент:

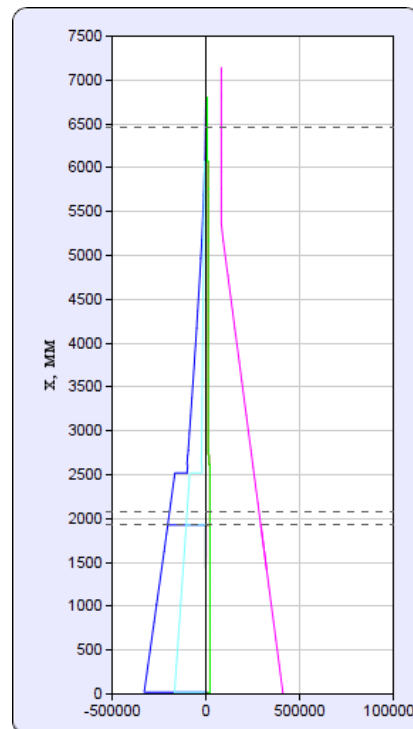
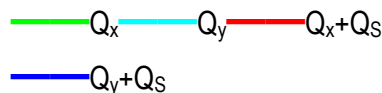
$$K_s = 0.2$$

Сейсмическая нагрузка, приложенная в центре тяжести  $i$ -го элемента:

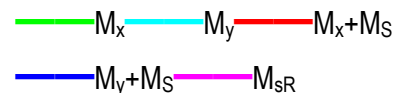
$$S_i = K_0 \cdot K_1 \cdot K_s \cdot K_\psi \cdot \beta \cdot G_i \cdot y_i \cdot \frac{\sum_{i=1}^n G_i \cdot y_i}{\sum_{i=1}^n G_i \cdot y_i^2}$$



Сейсмическая нагрузка  
 $S, Q_s, N$



Изгибающий момент  
 $M_s, N \cdot m$



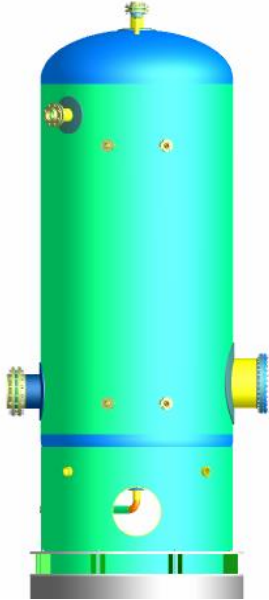
Элемент корпуса	Высота до начала элемента, мм	Сейсмическая нагрузка, Н	Изгибающий момент, Н·м	Расчётный изгибающий момент, Н·м
Постамент колонного аппарата	0	66199	$3.2959 \cdot 10^5$	$4.1076 \cdot 10^5$

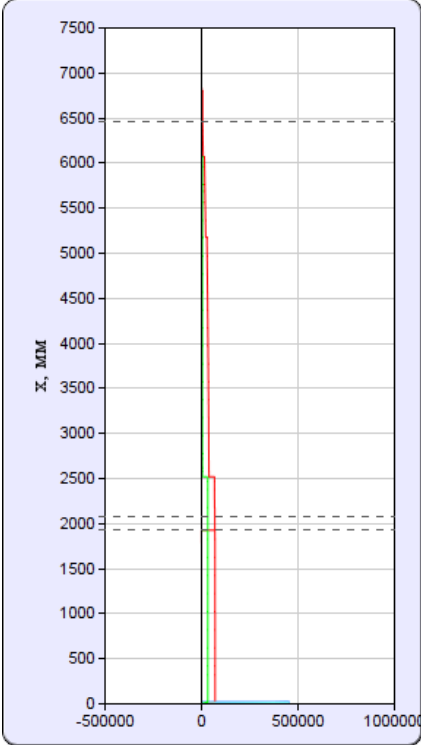
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	90651-20600-AM-02-220 PP	Лист 34
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата		
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата		

Этот документ является собственностью "НЕФТЕХИМПРОЕКТ" и не подлежит копированию и распространению без его согласия

НЕФТЕХИМПРОЕКТ NEFTECHIMPROEKT		МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ			РР
Опора колонного аппарата	300	66199	$3.0978 \cdot 10^5$	$3.9223 \cdot 10^5$	
Днище эллиптическое нижнее	1906.6	65123	$1.946 \cdot 10^5$	$2.8357 \cdot 10^5$	
Обечайка цилиндрическая	2060	65123	$1.946 \cdot 10^5$	$2.8357 \cdot 10^5$	
Днище эллиптическое верхнее	6440	4938.5	7984.9	82398	

Расчёт в рабочих условиях (коррозия не учтена)





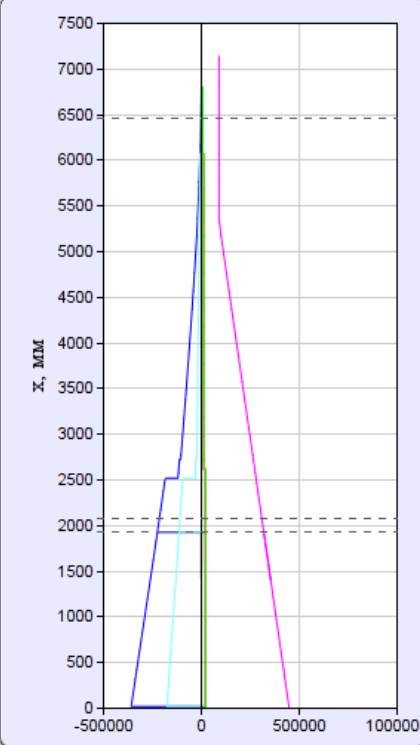
Сейсмическая нагрузка  
 $S, Q_s, H$

$Q_x$

$Q_y$

$Q_x + Q_s$

$Q_y + Q_s$



Изгибающий момент  
 $M_s, H \cdot m$

$M_x$

$M_y$

$M_x + M_s$

$M_y + M_s$

$M_{sR}$

Элемент корпуса	Высота до начала элемента, мм	Сейсмическая нагрузка, Н	Изгибающий момент, Н·м	Расчётный изгибающий момент, Н·м
Постамент колонного аппарата	0	70380	$3.5904 \cdot 10^5$	$4.4745 \cdot 10^5$
Опора колонного аппарата	300	70380	$3.3796 \cdot 10^5$	$4.2728 \cdot 10^5$
Днище эллиптическое нижнее	1906.6	69142	$2.1537 \cdot 10^5$	$3.0891 \cdot 10^5$
Обечайка цилиндрическая	2060	69142	$2.1537 \cdot 10^5$	$3.0891 \cdot 10^5$
Днище эллиптическое верхнее	6440	5571.6	8039.8	89759

Расчёт в условиях монтажа (коррозия учтена)

Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата

90651-20600-AM-02-220 РР

Лист  
35

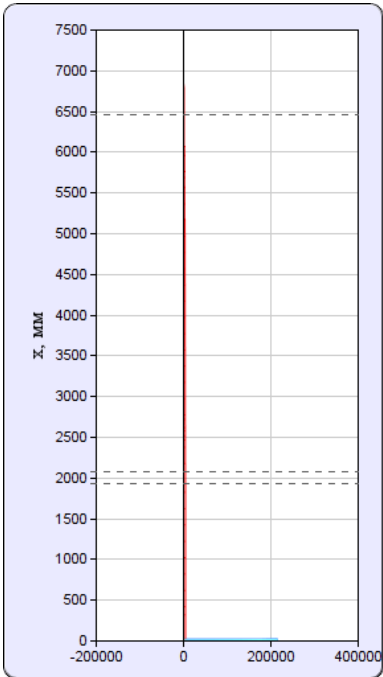
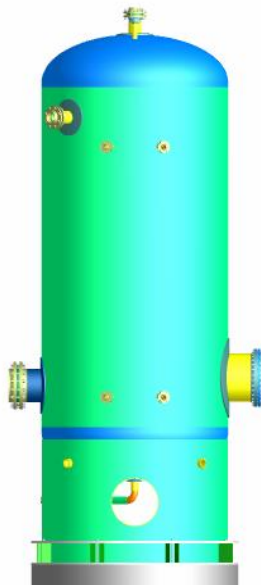
Взам. инв. №

Подп. и дата

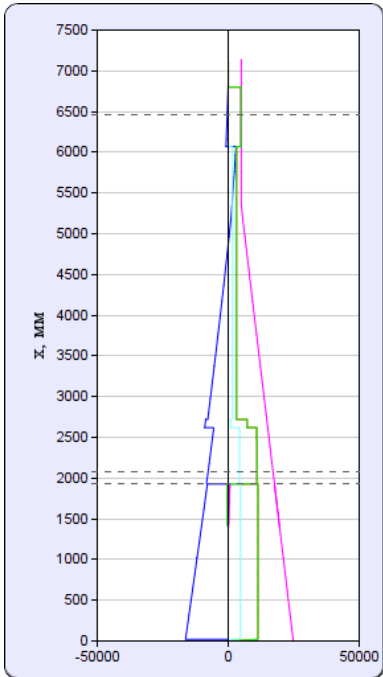
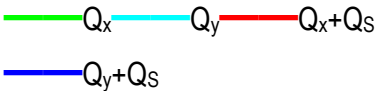
Инв. № подл.

90651-20600-AM-02-220 РР\_изм.0.docx

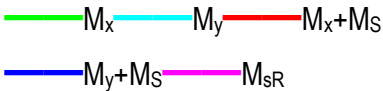
Формат А4



Сейсмическая нагрузка  
 $S, Q_s, \text{H}$



Изгибающий момент  
 $M_s, \text{H}\cdot\text{м}$

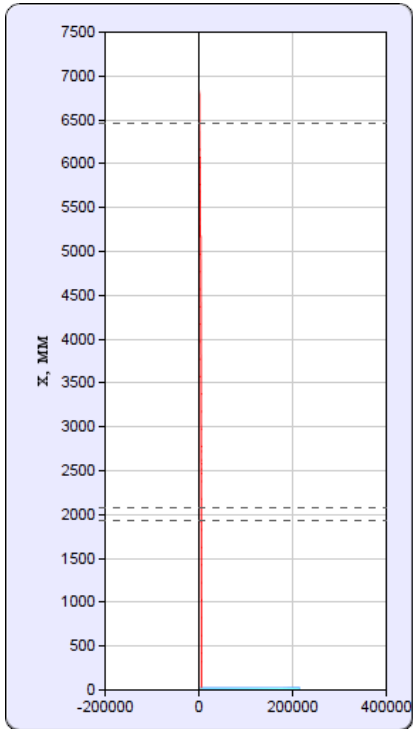


Элемент корпуса	Высота до начала элемента, мм	Сейсмическая нагрузка, Н	Изгибающий момент, Н·м	Расчётный изгибающий момент, Н·м
Постамент колонного аппарата	0	4409	19859	24749
Опора колонного аппарата	300	4409	18788	23633
Днище эллиптическое нижнее	1906.6	4197.8	13391	17086
Обечайка цилиндрическая	2060	4197.8	13391	17086
Днище эллиптическое верхнее	6440	1047.7	4885.8	4964.7

Расчёт в условиях монтажа (коррозия не учтена)

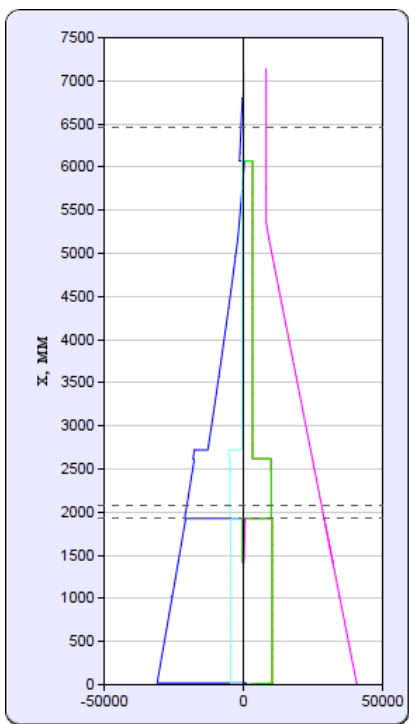
Изм. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №

Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата



Сейсмическая нагрузка  
 $S, Q_s, H$

$Q_x$   $Q_y$   $Q_x+Q_s$   
 $Q_y+Q_s$



Изгибающий момент  
 $M_s, H \cdot m$

$M_x$   $M_y$   $M_x+M_s$   
 $M_y+M_s$   $M_{sR}$

Элемент корпуса	Высота до начала элемента, мм	Сейсмическая нагрузка, Н	Изгибающий момент, Н·м	Расчётный изгибающий момент, Н·м
Постамент колонного аппарата	0	5420.5	32642	40680
Опора колонного аппарата	300	5420.5	31104	38846
Днище эллиптическое нижнее	1906.6	5158.3	22623	28085
Обечайка цилиндрическая	2060	5158.3	22623	28085
Днище эллиптическое верхнее	6440	1365.4	814.19	8160.6

Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата

Взам. инв. №

Подп. и дата

Изм. № подл.

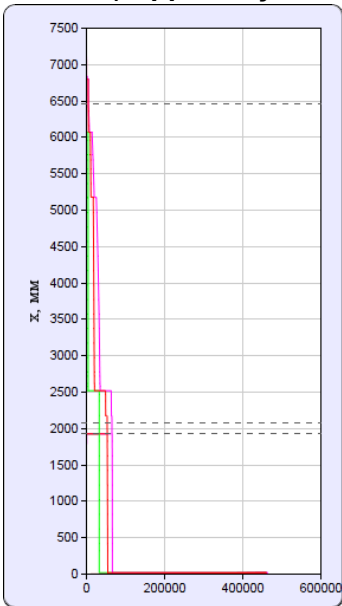
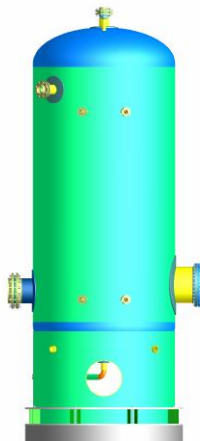
90651-20600-AM-02-220 РР

Лист

37

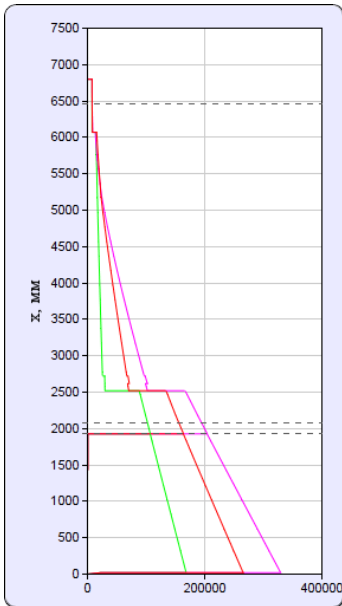
Расчёт суммарных нагрузок

Расчёт в рабочих условиях (коррозия учтена)



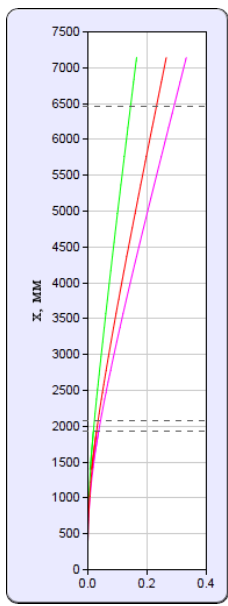
Горизонтальная нагрузка,  
 $Q_{sum}, H$

— внеш.  
— внеш.+сейсм.  
— внеш.+ветр.  
— внеш.+ветр.рез.



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

— внеш.  
— внеш.+сейсм.  
— внеш.+ветр.  
— внеш.+ветр.рез.



Перемещения,  
 $u, mm$

— внеш.  
— внеш.+сейсм.  
— внеш.+ветр.  
— внеш.+ветр.рез.

Элемент корпуса	Высота до начала элемента, мм	Вертикальная нагрузка, Н	Горизонтальная нагрузка, Н		Изгибающий момент, Н·м	
			с учётом сейсм. нагрузки	с учётом ветр. нагрузки	с учётом сейсм. нагрузки	с учётом ветр. нагрузки
Постамент колонного аппарата	0	$(-4.5812 \cdot 10^5)$	66199	54518	$4.1076 \cdot 10^5$	$2.657 \cdot 10^5$
Опора колонного аппарата	300	$(-4.5609 \cdot 10^5)$	66199	54314	$3.9223 \cdot 10^5$	$2.4944 \cdot 10^5$
Днище эллиптическое нижнее	1906.6	$(-3.6247 \cdot 10^5)$	65123	53063	$2.8357 \cdot 10^5$	$1.5587 \cdot 10^5$
Обечайка цилиндрическая	2060	$(-3.6015 \cdot 10^5)$	65123	53063	$2.8357 \cdot 10^5$	$1.5587 \cdot 10^5$
Днище эллиптическое верхнее	6440	$(-29066)$	4938.5	4534.2	82398	7935.3

Расчёт в рабочих условиях (коррозия не учтена)

Изм. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №
--------------	--------------	--------------

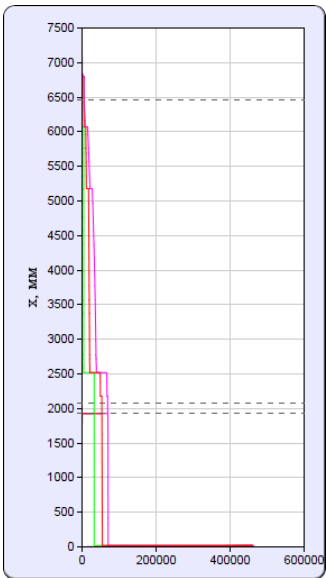
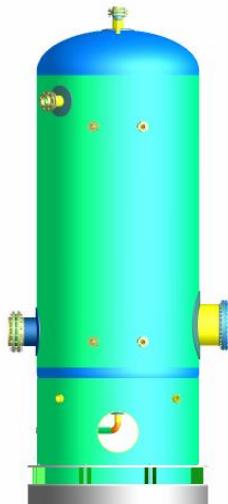
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата
------	------	--------	-------	------

90651-20600-AM-02-220 PP

Лист

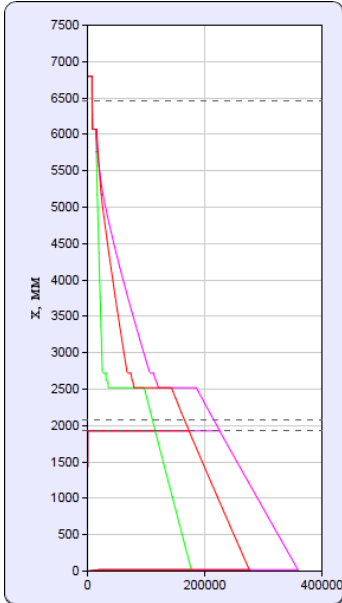
38





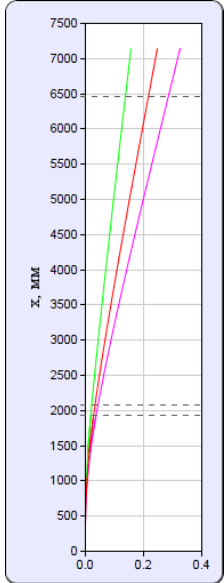
Горизонтальная нагрузка,  
 $Q_{sum}, H$

— внеш.  
— внеш.+сейсм.  
— внеш.+ветр.  
— внеш.+ветр.рез.



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

— внеш.  
— внеш.+сейсм.  
— внеш.+ветр.  
— внеш.+ветр.рез.



Перемещения,  
 $u, mm$

— внеш.  
— внеш.+сейсм.  
— внеш.+ветр.  
— внеш.+ветр.рез.

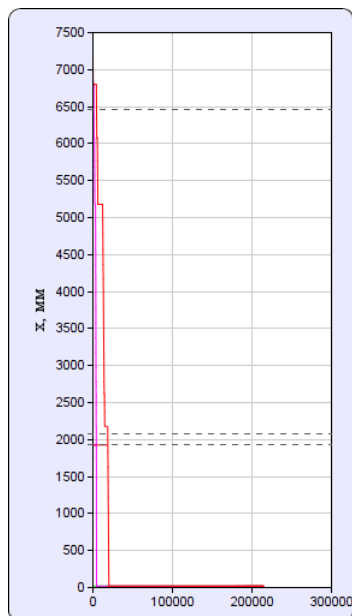
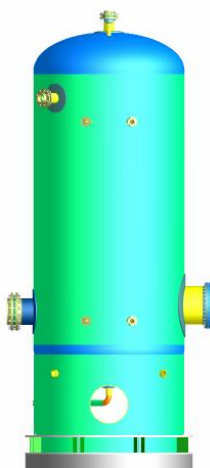
Элемент корпуса	Высота до начала элемента, мм	Вертикальная нагрузка, Н	Горизонтальная нагрузка, Н		Изгибающий момент, Н·м	
			с учётом сейсм. нагрузки	с учётом ветр. нагрузки	с учётом сейсм. нагрузки	с учётом ветр. нагрузки
Постамент колонного аппарата	0	$(-4.5812 \cdot 10^5)$	70380	54844	$4.4745 \cdot 10^5$	$2.7607 \cdot 10^5$
Опора колонного аппарата	300	$(-4.5609 \cdot 10^5)$	70380	54639	$4.2728 \cdot 10^5$	$2.597 \cdot 10^5$
Днище эллиптическое нижнее	1906.6	$(-3.6247 \cdot 10^5)$	69142	53376	$3.0891 \cdot 10^5$	$1.6543 \cdot 10^5$
Обечайка цилиндрическая	2060	$(-3.6015 \cdot 10^5)$	69142	53376	$3.0891 \cdot 10^5$	$1.6543 \cdot 10^5$
Днище эллиптическое верхнее	6440	$(-29066)$	5571.6	4514	89759	7933.9

Расчёт в условиях монтажа (коррозия учтена)

Изм. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №
--------------	--------------	--------------

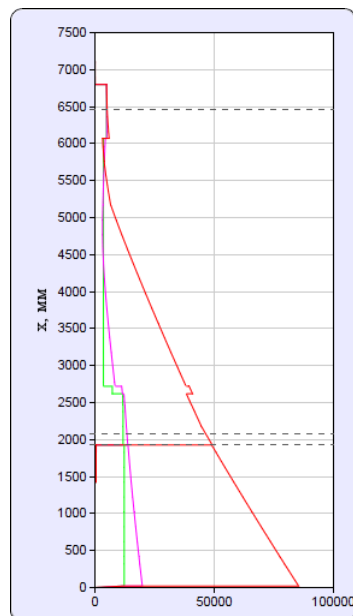
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата
------	------	--------	-------	------

90651-20600-AM-02-220 PP



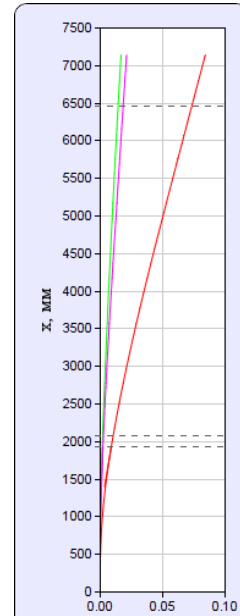
Горизонтальная нагрузка,  
 $Q_{sum}, H$

— внеш.  
— внеш.+сейсм.  
— внеш.+ветр.  
— внеш.+ветр.рез.



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

— внеш.  
— внеш.+сейсм.  
— внеш.+ветр.  
— внеш.+ветр.рез.



Перемещения,  
 $u, mm$

— внеш.  
— внеш.+сейсм.  
— внеш.+ветр.  
— внеш.+ветр.рез.

Элемент корпуса	Высота до начала элемента, мм	Вертикальная нагрузка, Н	Горизонтальная нагрузка, Н		Изгибающий момент, Н·м	
			с учётом сейсм. нагрузки	с учётом ветр. нагрузки	с учётом сейсм. нагрузки	с учётом ветр. нагрузки
Постамент колонного аппарата	0	$(-2.1416 \cdot 10^5)$	4409	20080	24749	85387
Опора колонного аппарата	300	$(-2.1213 \cdot 10^5)$	4409	19876	23633	79455
Днище эллиптическое нижнее	1906.6	$(-1.3859 \cdot 10^5)$	4197.8	18630	17086	46397
Обечайка цилиндрическая	2060	$(-1.3805 \cdot 10^5)$	4197.8	18630	17086	46398
Днище эллиптическое верхнее	6440	$(-22154)$	1047.7	4535.1	4964.7	5114.4

Расчёт в условиях монтажа (коррозия не учтена)

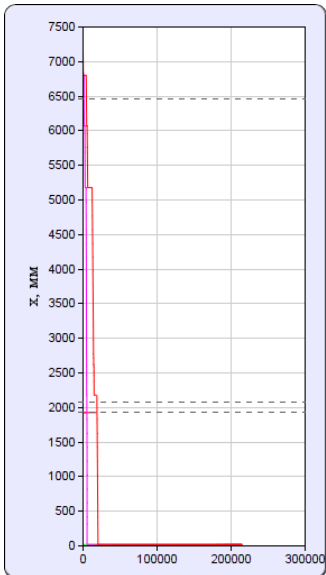
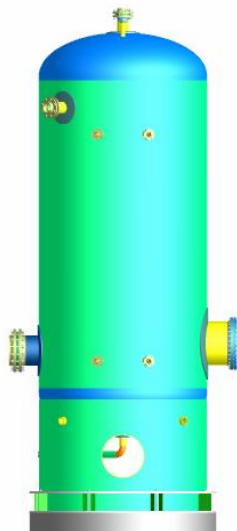
Изм. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №

Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата

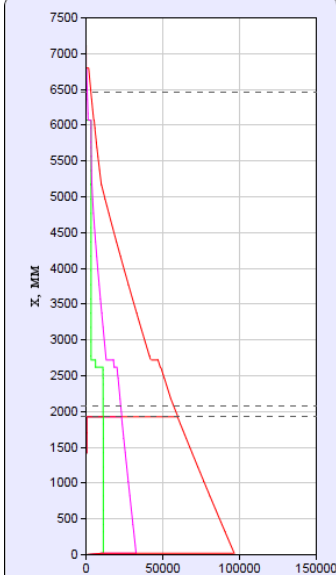
90651-20600-AM-02-220 PP

Лист

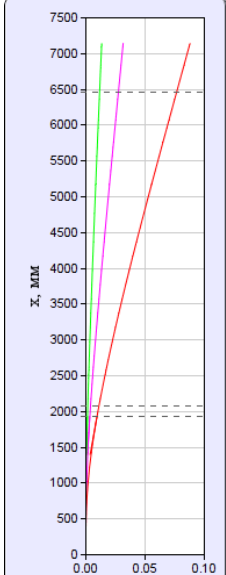
40



Горизонтальная нагрузка,  
 $Q_{sum}, H$



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



Перемещения,  
 $y, mm$



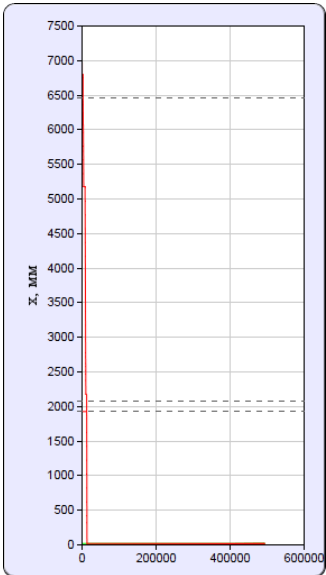
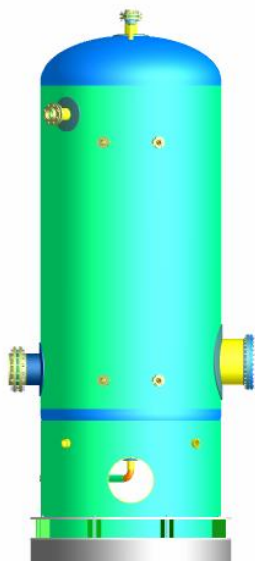
Элемент корпуса	Высота до начала элемента, мм	Вертикальная нагрузка, Н	Горизонтальная нагрузка, Н		Изгибающий момент, Н·м	
			с учётом сейсм. нагрузки	с учётом ветр. нагрузки	с учётом сейсм. нагрузки	с учётом ветр. нагрузки
Постамент колонного аппарата	0	$(-2.1416 \cdot 10^5)$	5420.5	20234	40680	96570
Опора колонного аппарата	300	$(-2.1213 \cdot 10^5)$	5420.5	20030	38846	90572
Днище эллиптическое нижнее	1906.6	$(-1.3859 \cdot 10^5)$	5158.3	18760	28085	57048
Обечайка цилиндрическая	2060	$(-1.3805 \cdot 10^5)$	5158.3	18760	28085	57050
Днище эллиптическое верхнее	6440	$(-22154)$	1365.4	4505.2	8160.6	3211.7

Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания, коррозия учтена)

Взам. инв. №	
Подп. и дата	
Инв. № подл.	

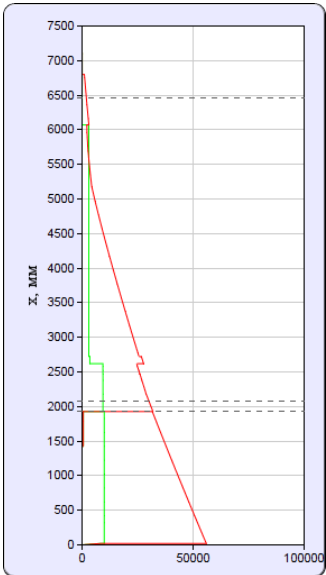
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата

90651-20600-AM-02-220 РР



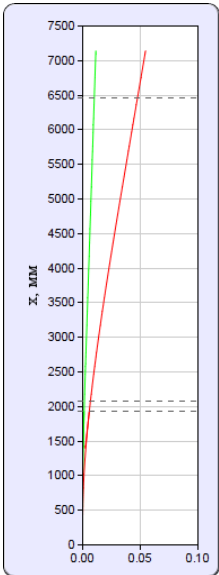
Горизонтальная нагрузка,  
 $Q_{sum}, H$

— внеш.  
— внеш.+сейсм.  
— внеш.+ветр.  
— внеш.+ветр.рез.



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

— внеш.  
— внеш.+сейсм.  
— внеш.+ветр.  
— внеш.+ветр.рез.



Перемещения,  
 $u, mm$

— внеш.  
— внеш.+сейсм.  
— внеш.+ветр.  
— внеш.+ветр.рез.

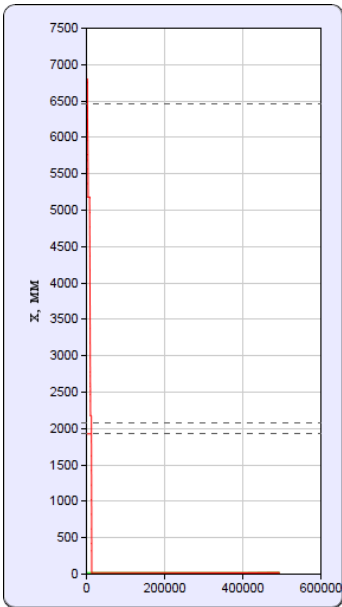
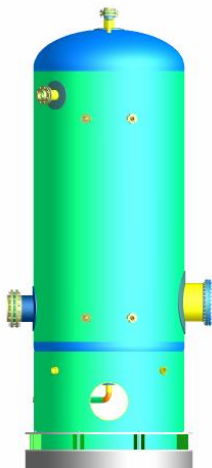
Элемент корпуса	Высота до начала элемента, мм	Вертикальная нагрузка, Н	Горизонтальная нагрузка с учётом ветр. нагрузки, Н	Изгибающий момент с учётом ветр. нагрузки, Н·м
Постамент колонного аппарата	0	$(-4.9328 \cdot 10^5)$	13380	55944
Опора колонного аппарата	300	$(-4.9125 \cdot 10^5)$	13258	51997
Днище эллиптическое нижнее	1906.6	$(-3.9722 \cdot 10^5)$	12507	30073
Обечайка цилиндрическая	2060	$(-3.9448 \cdot 10^5)$	12507	30074
Днище эллиптическое верхнее	6440	(-49011)	2703.6	1933.2

Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания, коррозия не учтена)

Взам. инв. №	
Подп. и дата	
Инв. № подл.	

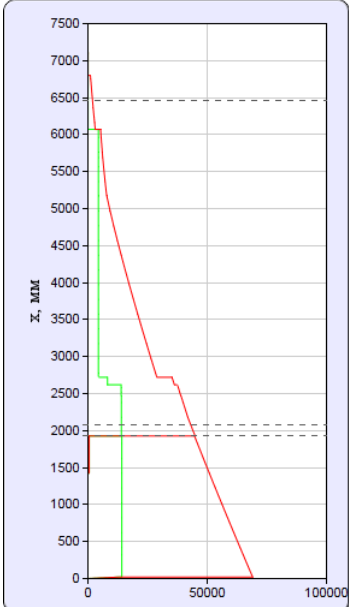
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата

90651-20600-AM-02-220 PP



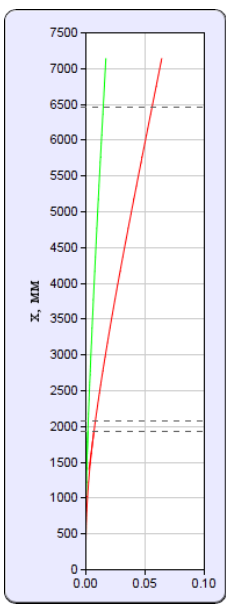
Горизонтальная нагрузка,  
 $Q_{sum}, H$

внеш.  
внеш.+сейсм.  
внеш.+ветр.  
внеш.+ветр.рез.



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

внеш.  
внеш.+сейсм.  
внеш.+ветр.  
внеш.+ветр.рез.



Перемещения,  
 $u, mm$

внеш.  
внеш.+сейсм.  
внеш.+ветр.  
внеш.+ветр.рез.

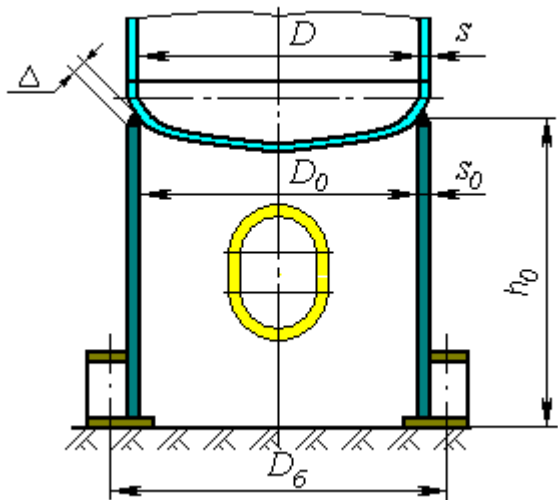
Элемент корпуса	Высота до начала элемента, мм	Вертикальная нагрузка, Н	Горизонтальная нагрузка с учётом ветр. нагрузки, Н	Изгибающий момент с учётом ветр. нагрузки, Н·м
Постамент колонного аппарата	0	$(-4.9328 \cdot 10^5)$	13540	69048
Опора колонного аппарата	300	$(-4.9125 \cdot 10^5)$	13417	65082
Днище эллиптическое нижнее	1906.6	$(-3.9722 \cdot 10^5)$	12661	43066
Обечайка цилиндрическая	2060	$(-3.9448 \cdot 10^5)$	12661	43067
Днище эллиптическое верхнее	6440	$(-49011)$	2693.7	1925.7

Взам. инв. №	
Подп. и дата	
Инв. № подл.	

Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата

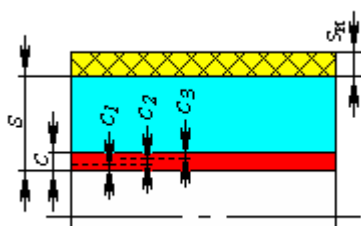
90651-20600-AM-02-220 PP

Опора колонного аппарата



Исходные данные

Несущий элемент:	Днище эллиптическое нижнее
Высота опоры, $h_0$ :	1606.6 мм
Диаметр верхнего основания, $D_0$ :	2408 мм
Опорный элемент	
Группа патрубков	
Цилиндрический участок:	
Материал:	09Г2С Лист
Толщина стенки, $s_0$ :	10 мм
Прибавка для компенсации коррозии и эрозии, $c_1$ :	0 мм
Прибавка для компенсации минусового допуска, $c_2$ :	0.8 мм
Прибавка технологическая, $c_3$ :	0 мм
Сумма прибавок к расчётной толщине стенки, $c$ :	0.8 мм
Фундамент:	
Бетон:	В25(М350)
Изоляция:	



Название:	Огнезащита внешняя
Толщина, $s_{из}$ :	125мм
Плотность, $\rho_{из}$ :	1800 кг/м³
Присутствует в условиях испытаний:	Да
Присутствует в условиях монтажа:	Да
Футеровка:	

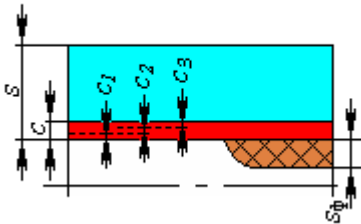
Изм. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №

Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата

90651-20600-AM-02-220 РР

Лист

44



Название: Огнезащита внутренняя  
 Толщина, sф: 125мм  
 Плотность, рф: 1800кг/м³  
 Присутствует в условиях испытаний: Да  
 Присутствует в условиях монтажа: Да

Расчёт в рабочих условиях

Условия нагружения:

Расчётная температура, T: 100 °С  
 Расчётный изгибающий момент в верхнем сечении: 3.1923·10<sup>5</sup> Н·м  
 Расчётный изгибающий момент в нижнем сечении: 4.2728·10<sup>5</sup> Н·м  
 Расчётное поперечное усилие в верхнем сечении: 69763 Н  
 Расчётное поперечное усилие в нижнем сечении: 70380 Н  
 Расчётное осевое сжимающее усилие, F: 4.5609·10<sup>5</sup> Н

Свойства материала опорной обечайки в месте сопряжения с корпусом:

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Лист при температуре 100 °С (рабочие условия):  
 [σ]<sub>0</sub>= 177 МПа

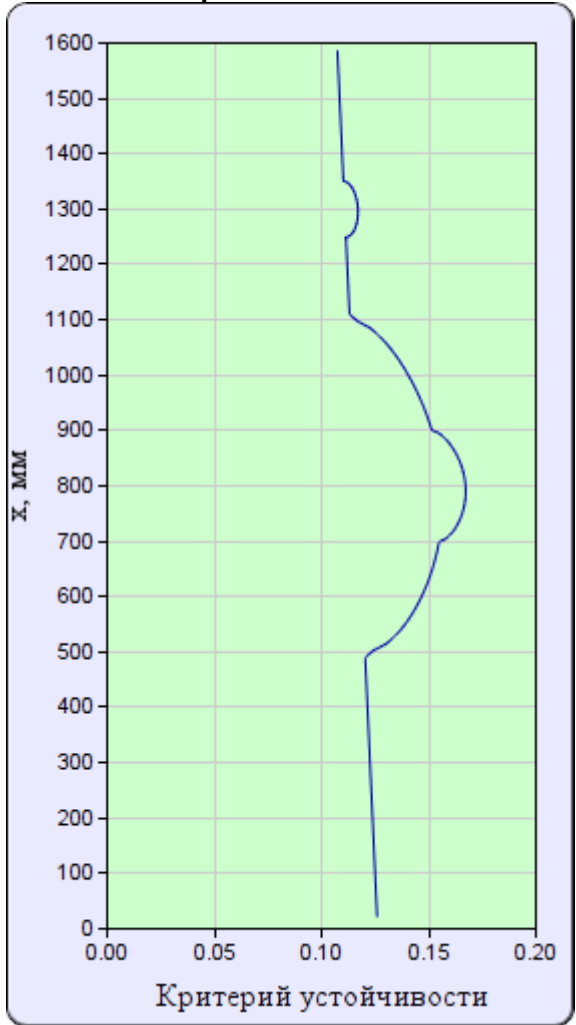
Свойства материала корпуса аппарата:

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Лист при температуре 100 °С (рабочие условия):  
 [σ]<sub>к</sub>= 177 МПа

Инов. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №

Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	90651-20600-AM-02-220 РР	Лист
						45

Расчёт опорной обечайки по ГОСТ 34233.9-2017



— Критерий устойчивости  
— Предельное значение

Параметры напряженного сечения

Координата сечения (от нижней точки основания):  $x = 791.24$  мм  
Диаметр в напряженном сечении:  $D_2 = 2408$  мм  
Элемент, содержащий напряженное сечение: Цилиндрический участок опоры  
Площадь:  $A = 56932$  мм<sup>2</sup>  
Толщина стенки в напряженном сечении:  $s' = 10$  мм  
Суммарная прибавка в напряженном сечении:  $c' = 0.8$  мм

$$\psi_1 = \frac{A}{\pi \cdot (D_2 + s' - c') \cdot (s' - c')} = 56932 / (3.1416 \cdot (2408 + 10 - 0.8) \cdot (10 - 0.8)) = 0.81491$$

Наименьший момент сопротивления:  $W = 0.027723$  м<sup>3</sup>

$$\psi_2 = \frac{4 \cdot W}{\pi \cdot (D_2 + s' - c')^2 \cdot (s' - c')} = 4 \cdot 0.027723 / (3.1416 \cdot (2408 + 10 - 0.8)^2 \cdot (10 - 0.8)) = 0.65666$$

Расстояние от оси до центра тяжести:  $b_s = 38.74$  мм

$$\psi_3 = \frac{b_s}{D_2} = 38.74 / 2408 = 0.016088$$

Осевая нагрузка, действующая в сечении  $x = 791.24$  мм:

$$F = 4.5609 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Изгибающий момент, действующий в сечении  $x = 791.24$  мм:

$$M = 3.7406 \cdot 10^5 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	90651-20600-AM-02-220 PP	Лист 46
Взам. инв. №		<div><math display="block">\Psi_1 = \frac{A}{\pi \cdot (D_2 + s' - c') \cdot (s' - c')} = 56932 / (3.1416 \cdot (2408 + 10 - 0.8) \cdot (10 - 0.8)) = 0.81491</math><p>Наименьший момент сопротивления: <math>W = 0.027723 \text{ м}^3</math></p><math display="block">\Psi_2 = \frac{4 \cdot W}{\pi \cdot (D_2 + s' - c')^2 \cdot (s' - c')} = 4 \cdot 0.027723 / (3.1416 \cdot (2408 + 10 - 0.8)^2 \cdot (10 - 0.8)) = 0.65666</math><p>Расстояние от оси до центра тяжести: <math>b_s = 38.74 \text{ мм}</math></p><math display="block">\Psi_3 = \frac{b_s}{D_2} = 38.74 / 2408 = 0.016088</math><p>Осевая нагрузка, действующая в сечении <math>x = 791.24 \text{ мм}</math>: <math>F = 4.5609 \cdot 10^5 \text{ Н}</math> Изгибающий момент, действующий в сечении <math>x = 791.24 \text{ мм}</math>: <math>M = 3.7406 \cdot 10^5 \text{ Н} \cdot \text{м}</math></p></div>				
Подп. и дата						
Инв. № подл.						



Устойчивость опорной обечайки в напряженном сечении :

$$\frac{F}{\psi_1 \cdot [F]} + \frac{M + F \cdot \psi_3 \cdot D_2}{\psi_2 \cdot [M]} = 4.5609 \cdot 10^5 / (0.81491 * 8.9292 \cdot 10^6) + (3.7406 \cdot 10^5 + 4.5609 \cdot 10^5 * 0.016088 * 2408) / (0.65666 * 5.7048 \cdot 10^6) = 0.16725$$

$$\frac{F}{\psi_1 \cdot [F]} + \frac{M + F \cdot \psi_3 \cdot D_2}{\psi_2 \cdot [M]} \leq 1.0; \quad \text{Условие устойчивости выполнено.}$$

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

$$\frac{1}{\pi \cdot D_0 \cdot \Delta} \left( \frac{4 \cdot M}{D_0} + F \right) = 1 / (3.1416 * 2408 * 10) * (4 * 3.1923 \cdot 10^5 / 2408 + 4.5609 \cdot 10^5) = 13.039 \text{ МПа}$$

$$0.8 \cdot \min\{[\sigma]_0; [\sigma]_k\} = 0.8 * \min\{177; 177\} = 141.6 \text{ МПа}$$

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

### Расчёт в условиях испытаний

#### Условия нагружения:

Расчётная температура, T:	20 °С
Расчётный изгибающий момент в верхнем сечении:	44672 Н·м
Расчётный изгибающий момент в нижнем сечении:	65082 Н·м
Расчётное поперечное усилие в верхнем сечении:	12721 Н
Расчётное поперечное усилие в нижнем сечении:	13417 Н
Расчётное осевое сжимающее усилие, F:	4.9125·10 <sup>5</sup> Н

#### Свойства материала опорной обечайки в месте сопряжения с корпусом:

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Лист при температуре 20 °С (условия гидротестирования):

$$[\sigma]^{20_0} = \frac{R_{eL20}}{n_T} = 300 / 1.1 = 272.73 \text{ МПа}$$

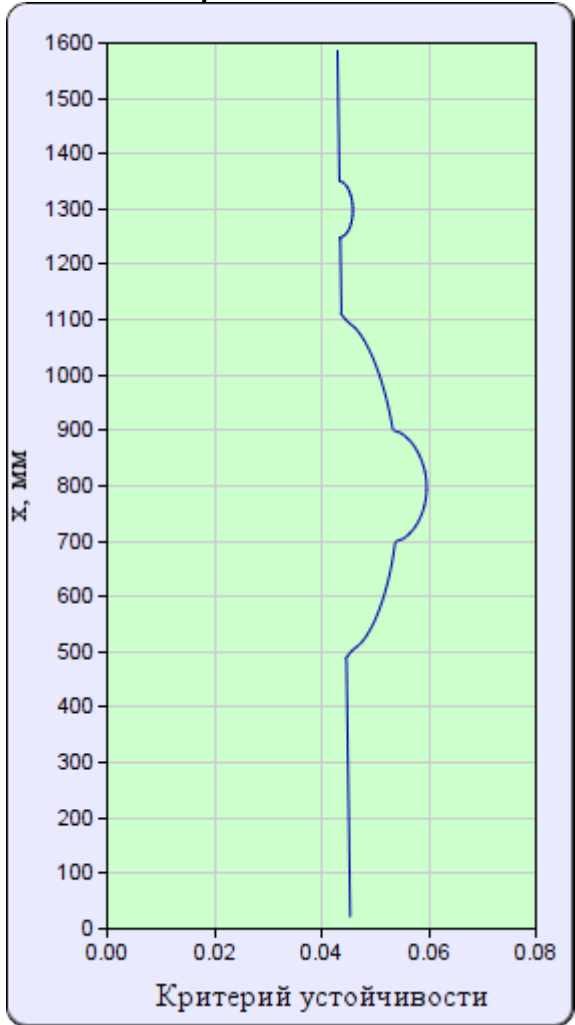
#### Свойства материала корпуса аппарата:

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Лист при температуре 20 °С (условия гидротестирования):

$$[\sigma]^{20_K} = \frac{R_{eL20}}{n_T} = 300 / 1.1 = 272.73 \text{ МПа}$$

Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	90651-20600-AM-02-220 PP	Лист		
							47	
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата				

Расчёт опорной обечайки по ГОСТ 34233.9-2017



— Критерий устойчивости  
— Предельное значение

Параметры напряженного сечения

Координата сечения (от нижней точки основания):  $x = 795.62 \text{ мм}$   
Диаметр в напряженном сечении:  $D_2 = 2408 \text{ мм}$   
Элемент, содержащий напряженное сечение: Цилиндрический участок опоры  
Площадь:  $A = 56923 \text{ мм}^2$   
Толщина стенки в напряженном сечении:  $s' = 10 \text{ мм}$   
Суммарная прибавка в напряженном сечении:  $c' = 0.8 \text{ мм}$

$$\psi_1 = \frac{A}{\pi \cdot (D_2 + s' - c') \cdot (s' - c')} = 56923 / (3.1416 \cdot (2408 + 10 - 0.8) \cdot (10 - 0.8)) = 0.81478$$

Наименьший момент сопротивления:  $W = 0.027715 \text{ м}^3$

$$\psi_2 = \frac{4 \cdot W}{\pi \cdot (D_2 + s' - c')^2 \cdot (s' - c')} = 4 \cdot 0.027715 / (3.1416 \cdot (2408 + 10 - 0.8)^2 \cdot (10 - 0.8)) = 0.65647$$

Расстояние от оси до центра тяжести:  $b_s = 38.86 \text{ мм}$

$$\psi_3 = \frac{b_s}{D_2} = 38.86 / 2408 = 0.016138$$

Осевая нагрузка, действующая в сечении  $x = 795.62 \text{ мм}$ :

$$F = 4.9125 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Изгибающий момент, действующий в сечении  $x = 795.62 \text{ мм}$ :

$$M = 54974 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	90651-20600-AM-02-220 РР					Лист
								48
			Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	

Устойчивость опорной обечайки в напряженном сечении :

$$\frac{F}{\psi_1 \cdot [F]} + \frac{M + F \cdot \psi_3 \cdot D_2}{\psi_2 \cdot [M]} = 4.9125 \cdot 10^6 / (0.81478 \cdot 1.3058 \cdot 10^7) + (54974 + 4.9125 \cdot 10^6 \cdot 0.016138 \cdot 2408) / (0.65647 \cdot 8.4001 \cdot 10^6) = 0.059605$$

$$\frac{F}{\psi_1 \cdot [F]} + \frac{M + F \cdot \psi_3 \cdot D_2}{\psi_2 \cdot [M]} \leq 1.0; \quad \text{Условие устойчивости выполнено.}$$

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

$$\frac{1}{\pi \cdot D_0 \cdot \Delta} \left( \frac{4 \cdot M}{D_0} + F \right) = 1 / (3.1416 \cdot 2408 \cdot 10) \cdot (4 \cdot 44672 / 2408 + 4.9125 \cdot 10^6) = 7.4747 \text{ МПа}$$

$$0.8 \cdot \min \{ [\sigma]_0; [\sigma]_k \} = 0.8 \cdot \min \{ 272.73; 272.73 \} = 218.18 \text{ МПа}$$

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

Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата

Взам. инв. №

Подп. и дата

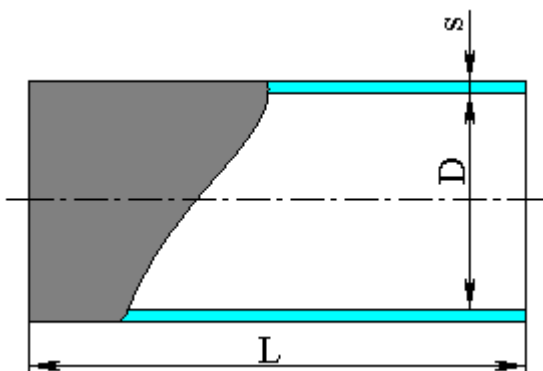
Изм. № подл.

90651-20600-AM-02-220 РР

Лист

49

Цилиндрический участок опоры



Исходные данные

Материал: 09Г2С Лист  
Внутр. диаметр, D: 2408 мм  
Толщина стенки, s: 10 мм  
Прибавка для компенсации коррозии и эрозии, c<sub>1</sub>: 0 мм  
Прибавка для компенсации минусового допуска, c<sub>2</sub>: 0.8 мм  
Прибавка технологическая, c<sub>3</sub>: 0 мм  
Сумма прибавок к расчётной толщине стенки, c: 0.8 мм  
Длина обечайки, L: 1586.6 мм

Коэффициенты прочности сварных швов:

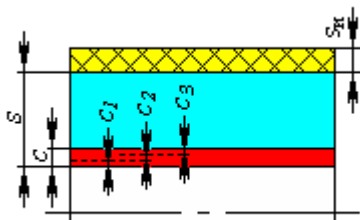
Продольный шов:

$\varphi_p = 1$

Окружной шов :

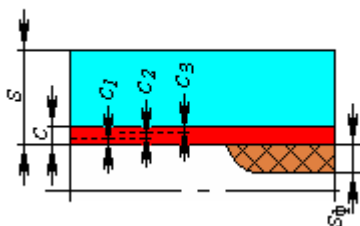
$\varphi_T = 1$

Изоляция:



Название: Огнезащита внешняя  
Толщина, s<sub>из.</sub>: 125мм  
Плотность, ρ<sub>из.</sub>: 1800 кг/м³  
Присутствует в условиях испытаний: Да  
Присутствует в условиях монтажа: Да

Футеровка:



Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата

Взам. инв. №

Подп. и дата

Изм. № подл.

90651-20600-AM-02-220 РР

Лист

50

Название: Огнезащита внутренняя  
Толщина,  $s_{\phi}$ : 125мм  
Плотность,  $\rho_{\phi}$ : 1800кг/м³  
Присутствует в условиях испытаний: Да  
Присутствует в условиях монтажа: Да

### Рабочие условия

#### Обечайка, нагруженная осевым сжимающим усилием

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Лист при температуре 100 °С (рабочие условия):

$[\sigma] = 177$  МПа

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия прочности :

$$[F]_{\Pi} = \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma] = 3.1416 \cdot (2408 + 10 - 0.8) \cdot (10 - 0.8) \cdot 177 = 1.2366 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Лист при температуре  $T = 100$  °С:

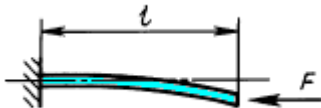
$$E = 1.91 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия местной устойчивости:

$$[F]_{E1} = \frac{31.0 \cdot 10^{-5} \cdot E}{n_y} \cdot D^2 \cdot \left[ \frac{100 \cdot (s - c)}{D} \right]^{2.5} = 310 \cdot 10^{-6} \cdot 1.91 \cdot 10^5 \cdot 2408^2 / (2.4) \cdot (100 \cdot (10 - 0.8) / 2408)^{2.5} = 1.2907 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

Расчётная длина для расчёта от действия осевой силы:

$$l_F = 7158.9 \text{ мм}$$



Приведённая длина:  $l_{пр} = 14318$  мм

Гибкость :

$$\lambda = \frac{2.83 \cdot l_{пр}}{D + s - c} = 2.83 \cdot 14318 / (2408 + 10 - 0.8) = 16.763$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия общей устойчивости :

$$[F]_{E2} = \frac{\pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot E}{n_y} \cdot \left( \frac{\pi}{\lambda} \right)^2 = 3.1416 \cdot (2408 + 10 - 0.8) \cdot (10 - 0.8) \cdot 1.91 \cdot 10^5 / (2.4) \cdot (3.1416 / 16.763)^2 = 1.9528 \cdot 10^8 \text{ Н}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия устойчивости :

$$[F]_E = \min \{ [F]_{E1}, [F]_{E2} \} = \min \{ 1.2907 \cdot 10^7, 1.9528 \cdot 10^8 \} = 1.2907 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие :

$$[F] = \frac{[F]_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left( \frac{[F]_{\Pi}}{[F]_E} \right)^2}} = 1.2366 \cdot 10^7 / (1 + (1.2366 \cdot 10^7 / 1.2907 \cdot 10^7)^2)^{1/2} = 8.9292 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

#### Обечайка, нагруженная изгибающим моментом

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Лист при температуре 100 °С (рабочие условия):

$[\sigma] = 177$  МПа

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия прочности :

$$[F]_{\Pi} = \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma] = 3.1416 \cdot (2408 + 10 - 0.8) \cdot (10 - 0.8) \cdot 177 = 1.2366 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности со стороны сжатия:

$$[M]_{\Pi} = \frac{D}{4} \cdot [F]_{\Pi} = 2408 / 4 \cdot 1.2366 \cdot 10^7 = 7.4442 \cdot 10^6 \text{ Н·м}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Лист при температуре  $T = 100$  °С:

$$E = 1.91 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия местной устойчивости:

$$[F]_{E1} = \frac{31.0 \cdot 10^{-5} \cdot E}{n_y} \cdot D^2 \cdot \left[ \frac{100 \cdot (s - c)}{D} \right]^{2.5} = 310 \cdot 10^{-6} \cdot 1.91 \cdot 10^5 \cdot 2408^2 / (2.4) \cdot (100 \cdot (10 - 0.8) / 2408)^{2.5} = 1.2907 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

Взам. инв. №					
Подп. и дата					
Инв. № подл.					
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	

90651-20600-AM-02-220 РР

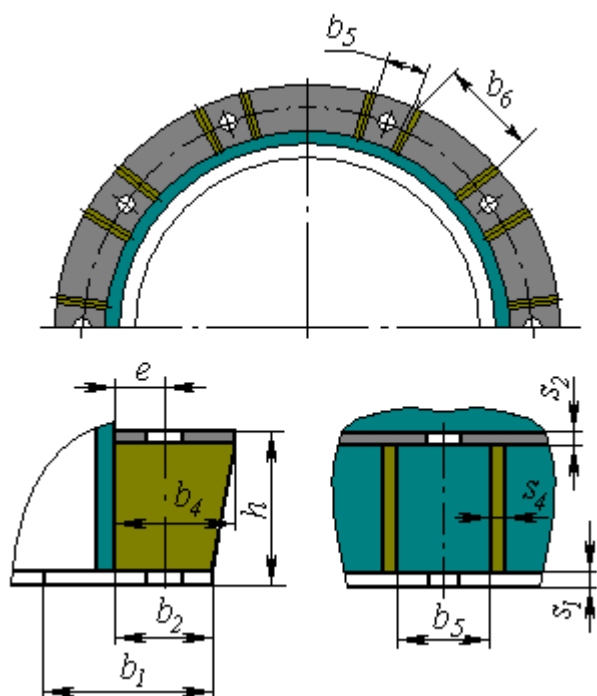
Лист

51





### Опорный узел элемента 'Опора колонного аппарата'



Несущий элемент: Опора колонного аппарата

Тип элемента: 4

Материал: 09Г2С Лист

Исполнительная  
толщина нижнего 20 мм

опорного кольца,  $s_1$ :  
Ширина нижнего  
стартового кольца  $b_1$  200 мм

Выступающая ширина нижнего опор- 141 мм

Наличие усиливающей пластины	Нет
------------------------------	-----

Ширина верхнего  
опорного кольца,  $b_4$ : 141 мм

Минимальное расстояние между двумя смежными ребрами,  $b_5$ : 120 мм

Исполнительная  
толщина верхнего      30 мм  
опорного кольца, s<sub>2</sub>:

Исполнительная  
толщина ребра,  $s_4$ : 8 мм

Высота опорного узла, h: 300 мм

Взам. инв. №		Ширина верхнего опорного кольца, b <sub>4</sub> : Минимальное расстояние между двумя смежными ребрами, b <sub>5</sub> : Исполнительная толщина верхнего опорного кольца, s <sub>2</sub> : Исполнительная толщина ребра, s <sub>4</sub> : Высота опорного узла, h:	141 мм
			120 мм
Подп. и дата			30 мм
			8 мм
Инв. № подл.			300 мм
			90651-20600-AM-02-220 PP
Изм.	Лист	№ док.	Подп.
			Дата

Лист
54





### Ширина нижнего опорного кольца (п. 8.3)

Расчетная ширина нижнего опорного кольца:

$$b_1^p = \frac{\frac{4 \cdot M}{D_6} + F}{\pi \cdot D_6 \cdot [\sigma]_{\text{бет}}} = (4 \cdot 4.2728 \cdot 10^5 / 2580 + 4.5609 \cdot 10^5) / (3.1416 \cdot 2580 \cdot 14.5) = 9.5172 \text{ мм}$$

Условие работоспособности:  $b_1 \geq b_1^p$   
 $200 \text{ мм} \geq 9.5172 \text{ мм}$ . Условие прочности выполнено.

### Толщина верхнего опорного кольца (п. 8.4)

Диаметр окружности, вписанной в шестигранник гайки:

$d = 33.2 \text{ мм}$

$$\chi_2 = \sqrt{\frac{3 \cdot \frac{b_4}{b_5}}{1 + \frac{\left(\frac{b_4}{b_5}\right)^2}{1 - \frac{d}{b_5}}}} = (3 \cdot 141 / 120 / (1 + (141 / 120)^2 / (1 - 33.2 / 120)))^{1/2} = 1.1009$$

Внутренний диаметр резьбы анкерного болта:

$d_6 = 20.311 \text{ мм}$

Площадь поперечного сечения анкерного болта по внутреннему диаметру резьбы:

$A_\sigma = 324.01 \text{ мм}^2$

$$\chi_2 \cdot \sqrt{\frac{A_\sigma \cdot [\sigma]_B}{[\sigma]_A}} + c = 1.1009 \cdot (324.01 \cdot 184 / 196)^{1/2} + 1.1 = 20.299 \text{ мм}$$

Условие работоспособности:  $s_2 \geq \chi_2 \cdot \sqrt{\frac{A_\sigma \cdot [\sigma]_B}{[\sigma]_A}} + c$   
 $30 \text{ мм} \geq 20.299 \text{ мм}$ . Условие прочности выполнено.

### Толщина ребра (п. 8.5)

$\chi_4 = 2$

$$\frac{A_\sigma \cdot [\sigma]_B}{\chi_4 \cdot b_2 \cdot [\sigma]_A} + c = 324.01 \cdot 184 / (2 \cdot 141 \cdot 196) + 1.1 = 2.1786 \text{ мм}$$

Условие работоспособности:  $s_4 \geq \frac{A_\sigma \cdot [\sigma]_B}{\chi_4 \cdot b_2 \cdot [\sigma]_A} + c$   
 $8 \text{ мм} \geq 2.1786 \text{ мм}$ . Условие прочности выполнено.

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

$b_3 = b_5 + b_6 = 120 + 910.12 = 1030.1 \text{ мм}$

$$N = \frac{D_2}{2 \cdot (s_0 - c)} \cdot \left( \frac{10 \cdot b_3}{D_2} \right)^{2.05} = 2408 / (2 \cdot (10 - 0.8)) \cdot (10 \cdot 1030.1 / 2408)^{2.05} = 2468.2$$

$K = 0$  при  $N \leq 10^4$  ;  $= 0$

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

$$\chi_5 = -0.0248 \cdot \left\{ \ln\left(\frac{N}{1100}\right) - \sqrt{\left[\ln\left(\frac{N}{1100}\right)\right]^2 + 2.628} \right\} + K = -0.0248 \cdot \left\{ \ln(2468.2 / 1100) - \left[ \ln(2468.2 / 1100) \right]^2 + 2.628 \right\}^{1/2} + 0 = 0.024880$$

$$\frac{6 \cdot \chi_5 \cdot A_\sigma \cdot [\sigma]_B \cdot e}{(s_0 - c)^2 \cdot h} = 6 \cdot 0.024880 \cdot 324.01 \cdot 184 \cdot 76 / ((10 - 0.8)^2 \cdot 300) = 26.637 \text{ МПа}$$

Условие работоспособности:  $\frac{6 \cdot \chi_5 \cdot A_\sigma \cdot [\sigma]_B \cdot e}{(s_0 - c)^2 \cdot h} \leq 1.5 \cdot [\sigma]_0$

Взам. инв. №					
Подп. и дата					
Инв. № подл.					
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	90651-20600-AM-02-220 РР
					Лист
					56



Условие выполнено.

### Толщина нижнего опорного кольца (п. 8.2)

Расстояние между двумя смежными ребрами  $b_6 = 910.12$  мм

$$\chi_1 = \frac{\left(1 + 1.81 \cdot \left(\frac{b_2}{b_6}\right)^3\right)^2}{\left(1 + 2.97 \cdot \left(\frac{b_2}{b_6}\right)^3\right)} = (1 + 1.81 \cdot (141 / 910.12)^3) / (1 + 2.97 \cdot (141 / 910.12)^3) = 0.99149$$

$$\chi_1 \cdot b_2 \cdot \sqrt{\frac{\frac{4 \cdot M}{D_6} + F}{D_6 \cdot b_1 \cdot [\sigma]_A} + c} = 0.99149 \cdot 141 \cdot ((4 \cdot 65082 / 2580 + 4.9125 \cdot 10^5) / (2580 \cdot 200 \cdot 272.73))^{1/2} + 1.1 = 10.168 \text{ мм}$$

Условие работоспособности:  $s_1 \geq \chi_1 \cdot b_2 \cdot \sqrt{\frac{\frac{4 \cdot M}{D_6} + F}{D_6 \cdot b_1 \cdot [\sigma]_A} + c}$

20 мм  $\geq$  10.168 мм. Условие прочности выполнено.

### Ширина нижнего опорного кольца (п. 8.3)

Расчетная ширина нижнего опорного кольца:

$$b_1^P = \frac{\frac{4 \cdot M}{D_6} + F}{\pi \cdot D_6 \cdot [\sigma]_{\text{сер}}} = (4 \cdot 65082 / 2580 + 4.9125 \cdot 10^5) / (3.1416 \cdot 2580 \cdot 14.5) = 5.0384 \text{ мм}$$

Условие работоспособности:  $b_1 \geq b_1^P$

200 мм  $\geq$  5.0384 мм. Условие прочности выполнено.

### Толщина верхнего опорного кольца (п. 8.4)

$$\chi_2 = \frac{\frac{3 \cdot b_4}{b_5}}{\sqrt{1 + \frac{\left(\frac{b_4}{b_5}\right)^2}{1 - \frac{d}{b_5}}}} = (3 \cdot 141 / 120) / (1 + ((141 / 120)^2 / (1 - 33.2 / 120)))^{1/2} = 1.1009$$

$$\chi_2 \cdot \sqrt{\frac{A_\sigma \cdot [\sigma]_B}{[\sigma]_A} + c} = 1.1009 \cdot (324.01 \cdot 184 / 272.73)^{1/2} + 1.1 = 17.376 \text{ мм}$$

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

30 мм  $\geq$  17.376 мм. Условие прочности выполнено.

### Толщина ребра (п. 8.5)

$$\chi_4 = 2$$

$$\frac{A_\sigma \cdot [\sigma]_B}{\chi_4 \cdot b_2 \cdot [\sigma]_A} + c = 324.01 \cdot 184 / (2 \cdot 141 \cdot 272.73) + 1.1 = 1.8752 \text{ мм}$$

Условие работоспособности:  $s_4 \geq \frac{A_\sigma \cdot [\sigma]_B}{\chi_4 \cdot b_2 \cdot [\sigma]_A} + c$

8 мм  $\geq$  1.8752 мм. Условие прочности выполнено.

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

$$b_3 = b_5 + b_6 = 120 + 910.12 = 1030.1 \text{ мм}$$

Взам. инв. №		Условие работоспособности: $s_2 \geq \chi_2 \cdot \sqrt{\frac{A_{\sigma} \cdot [\sigma]_B}{[\sigma]_A}} + c$				
		30 мм ≥ 17.376 мм. <b>Условие прочности выполнено.</b>				
Подп. и дата		<b>Толщина ребра (п. 8.5)</b>				
		$\chi_4 = 2$				
Инов. № подл.		$\frac{A_{\sigma} \cdot [\sigma]_B}{\chi_4 \cdot b_2 \cdot [\sigma]_A} + c = 324.01 \cdot 184 / (2 \cdot 141 \cdot 272.73) + 1.1 = 1.8752 \text{ мм}$				
		Условие работоспособности: $s_4 \geq \frac{A_{\sigma} \cdot [\sigma]_B}{\chi_4 \cdot b_2 \cdot [\sigma]_A} + c$				
		8 мм ≥ 1.8752 мм. <b>Условие прочности выполнено.</b>				
		<b>Прочность опорной обечайки в зоне верхнего опорного кольца (п. 8.6)</b>				
		$b_3 = b_5 + b_6 = 120 + 910.12 = 1030.1 \text{ мм}$				
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	90651-20600-AM-02-220 РР	Лист
						58

$$N = \frac{D_2}{2 \cdot (s_0 - c)} \cdot \left( \frac{10 \cdot b_3}{D_2} \right)^{2.05} = 2408 / (2 \cdot (10 - 0.8)) \cdot (10 \cdot 1030.1 / 2408)^{2.05} = 2468.2$$

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

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

$$\chi_s = -0.0248 \cdot \left\{ \ln\left(\frac{N}{1100}\right) - \sqrt{\left[\ln\left(\frac{N}{1100}\right)\right]^2 + 2.628} \right\} + K = -0.0248 \cdot \{ \ln(2468.2 / 1100) - (\ln(2468.2 / 1100))^2 + 2.628)^{1/2} \} + 0 = 0.024880$$

$$\frac{6 \cdot \chi_s \cdot A_\sigma \cdot [\sigma]_B \cdot e}{(s_0 - c)^2 \cdot h} = 6 \cdot 0.024880 \cdot 324.01 \cdot 184 \cdot 76 / ((10 - 0.8)^2 \cdot 300) = 26.637 \text{ МПа}$$

Условие работоспособности: 
$$\frac{6 \cdot \chi_s \cdot A_\sigma \cdot [\sigma]_B \cdot e}{(s_0 - c)^2 \cdot h} \leq 1.5 \cdot [\sigma]_0$$

26.637 МПа ≤ 409.09МПа.Условие прочности выполнено.

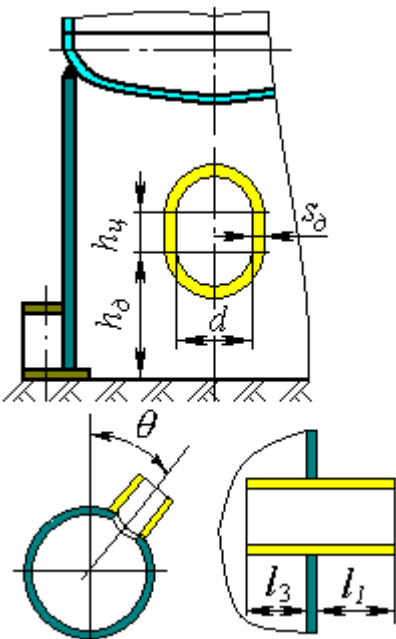
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата

Взам. инв. №

Подп. и дата

Изм. № подл.

Группа патрубков элемента 'Опора колонного аппарата'



Исходные данные

Несущий элемент: Опора колонного аппарата

№	Название патрубка	d, мм	s <sub>d</sub> , мм	h <sub>d</sub> , мм	h <sub>ц</sub> , мм	θ, °	l <sub>1</sub> , мм	l <sub>3</sub> , мм
1	H1	600	10	800	0	0	50	50
2	H2	600	10	800	0	180	50	50
3	D1	199	10	800	0	315	50	50
4	Air1	101	10	1300	0	45	50	50
5	Air2	101	10	1300	0	135	50	50
6	Air3	101	10	1300	0	225	50	50
7	Air4	101	10	1300	0	315	50	50

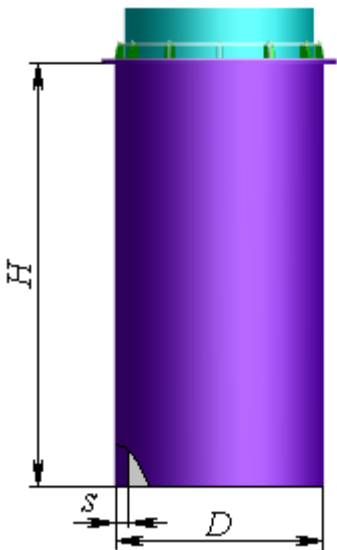
Изм. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №

Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата

90651-20600-AM-02-220 РР

Постамент колонного аппарата

Исходные данные



Тип постамента:  
Высота постамента, H:  
Диаметр, D:

Жесткая невесомая структура  
300мм  
2702 мм

Инов. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №

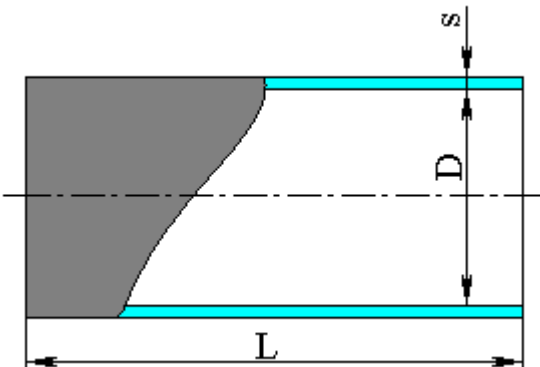
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата







Обечайка цилиндрическая



Исходные данные

Материал:	09Г2С Лист
Внутр. диаметр, D:	2400 мм
Толщина стенки, s:	18 мм
Прибавка для компенсации коррозии и эрозии, c <sub>1</sub> :	3 мм
Прибавка для компенсации минусового допуска, c <sub>2</sub> :	0.8 мм
Прибавка технологическая, c <sub>3</sub> :	0 мм
Сумма прибавок к расчётной толщине стенки, с:	3.8 мм
Длина обечайки, L:	4380 мм

Коэффициенты прочности сварных швов:

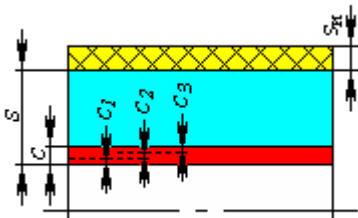
Продольный шов:

$\varphi_p = 1$

Окружной шов :

$\varphi_T = 1$

Изоляция:



Название:	Изоляция
Толщина, s <sub>из</sub> :	70мм
Плотность, ρ <sub>из</sub> :	100 кг/м³
Присутствует в условиях испытаний:	Да
Присутствует в условиях монтажа:	Да

Расчёт в рабочих условиях

Условия нагружения:

Расчётная температура, T:	100 °С
Расчётное внутреннее избыточное давление, p:	1.6346 МПа
Расчётный изгибающий момент, M:	3.0891·10 <sup>5</sup> Н·м
Расчётное поперечное усилие, Q:	69142 Н
Расчётное осевое сжимающее усилие, F:	3.6015·10 <sup>5</sup> Н
Расчётный крутящий момент, M <sub>к</sub> :	0 Н·м

Взам. инв. №	
Подп. и дата	
Инв. № подл.	

Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата

90651-20600-AM-02-220 РР

### Расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ 34233.2-2017

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Лист при температуре 100 °С (рабочие условия):

$$[\sigma] = 177 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Лист при температуре T = 100 °С:

$$E = 1.91 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

### Гладкая обечайка, нагруженная внутренним избыточным давлением

Расчётная толщина стенки с учётом прибавок:

$$s_p + c = \frac{p \cdot D}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p - p} + c = (1.6346 \cdot 2400) / (2 \cdot 177 \cdot 1 - 1.6346) + 3.8 = 14.933 \text{ мм}$$

$$14.933 \text{ мм} \leq 18 \text{ мм}$$

Заключение: **Условие работоспособности выполнено.**

Допускаемое давление :

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p \cdot (s - c)}{D + (s - c)} = 2 \cdot 177 \cdot 1 \cdot (18 - 3.8) / (2400 + 18 - 3.8) = 2.0822 \text{ МПа}$$

$$2.0822 \text{ МПа} \geq 1.6346 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности выполнено.**

Минимальное расстояние между "одиночными" штуцерами:

$$b_0 = 2 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c)} = 2 \cdot (2400 \cdot (18 - 3.8))^{1/2} = 369.22 \text{ мм}$$

Расчётная длина для расчёта от действия осевой силы:

$$l_F = 4900 \text{ мм}$$

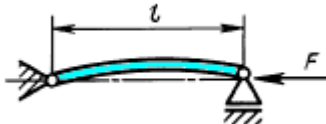
### Обечайка, нагруженная осевым сжимающим усилием

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия прочности :

$$[F]_{\text{пр}} = \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma] = 3.1416 \cdot (2400 + 18 - 3.8) \cdot (18 - 3.8) \cdot 177 = 1.9063 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия местной устойчивости:

$$[F]_{\text{Е1}} = \frac{31.0 \cdot 10^{-5} \cdot E}{n_y} \cdot D^2 \cdot \left[ \frac{100 \cdot (s - c)}{D} \right]^{2.5} = 310 \cdot 10^{-6} \cdot 1.91 \cdot 10^5 \cdot 2400^2 / (2.4) \cdot (100 \cdot (18 - 3.8) / 2400)^{2.5} = 3.8265 \cdot 10^7 \text{ Н}$$



Приведённая длина:  $l_{\text{пр}} = 4900 \text{ мм}$

Гибкость :

$$\lambda = \frac{2.83 \cdot l_{\text{пр}}}{D + s - c} = 2.83 \cdot 4900 / (2400 + 18 - 3.8) = 5.7439$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия общей устойчивости :

$$[F]_{\text{Е2}} = \frac{\pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot E}{n_y} \cdot \left( \frac{\pi}{\lambda} \right)^2 = 3.1416 \cdot (2400 + 18 - 3.8) \cdot (18 - 3.8) \cdot 1.91 \cdot 10^5 / (2.4) \cdot (3.1416 / 5.7439)^2 = 2.564 \cdot 10^9 \text{ Н}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия устойчивости :

$$[F]_{\text{Е}} = \min \{ [F]_{\text{Е1}}, [F]_{\text{Е2}} \} = \min \{ 3.8265 \cdot 10^7, 2.564 \cdot 10^9 \} = 3.8265 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие :

$$[F] = \frac{[F]_{\text{пр}}}{\sqrt{1 + \left( \frac{[F]_{\text{пр}}}{[F]_{\text{Е}}} \right)^2}} = 1.9063 \cdot 10^7 / (1 + (1.9063 \cdot 10^7 / 3.8265 \cdot 10^7)^2)^{1/2} = 1.7063 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

$$1.7063 \cdot 10^7 \text{ Н} \geq 3.6015 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено.**

Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	90651-20600-AM-02-220 РР	Лист 65
Взам. инв. №						
Подп. и дата						
Инв. № подл.						

### Обечайка, нагруженная изгибающим моментом

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности со стороны сжатия:

$$[M]_{\Pi} = \frac{D}{4} \cdot [F]_{\Pi} = 2400 / 4 \cdot 1.9063 \cdot 10^7 = 1.1438 \cdot 10^7 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости в пределах упругости:

$$[M]_{\text{Е}} = \frac{D}{3.5} \cdot [F]_{\text{Е1}} = 2400 / 3.5 \cdot 3.8265 \cdot 10^7 = 2.6239 \cdot 10^7 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

Допускаемый изгибающий момент :

$$[M] = \frac{[M]_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_{\Pi}}{[M]_{\text{Е}}}\right)^2}} = 1.1438 \cdot 10^7 / (1 + (1.1438 \cdot 10^7 / 2.6239 \cdot 10^7)^2)^{1/2} = 1.0485 \cdot 10^7 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

$$1.0485 \cdot 10^7 \text{ Н}\cdot\text{м} \geq 3.0891 \cdot 10^5 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено.**

### Обечайка, нагруженная поперечным усилием

Допускаемое поперечное усилие из условия прочности:

$$[Q]_{\Pi} = 0.25 \cdot \pi \cdot D \cdot (s - c) \cdot [\sigma] = 0.25 \cdot 3.1416 \cdot 2400 \cdot (18 - 3.8) \cdot 177 = 4.7376 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Расчётная длина для расчёта от действия давления:

$$l_p = 4900 \text{ мм}$$

Расчётная длина для расчёта от действия поперечной силы:

$$l_Q = 4900 \text{ мм}$$

Допускаемое поперечное усилие из условия устойчивости :

$$[Q]_{\text{Е}} = \frac{2.4 \cdot E \cdot (s - c)^2}{n_y} \cdot \left[ 0.18 + 3.3 \cdot \frac{D(s - c)}{l^2} \right] = 2.4 \cdot 1.91 \cdot 10^5 \cdot (18 - 3.8)^2 / 2.4 \cdot (0.18 + 3.3 \cdot 2400 \cdot (18 - 3.8) / 4900^2) = 7.1128 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Допускаемое поперечное усилие :

$$[Q] = \frac{[Q]_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[Q]_{\Pi}}{[Q]_{\text{Е}}}\right)^2}} = 4.7376 \cdot 10^6 / (1 + (4.7376 \cdot 10^6 / 7.1128 \cdot 10^6)^2)^{1/2} = 3.943 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

$$3.943 \cdot 10^6 \text{ Н} \geq 69142 \text{ Н}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено.**

### Обечайка, работающая под совместным действием нагрузок

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

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

$$\frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} + \left( \frac{Q}{[Q]} \right)^2 = 0 / 0 + 3.6015 \cdot 10^5 / 1.7063 \cdot 10^7 + 3.0891 \cdot 10^5 / 1.0485 \cdot 10^7 + (69142 / 3.943 \cdot 10^6)^2 = 0.050878 \leq 1$$

Заключение: **Условие устойчивости выполнено.**

### Обечайка, нагруженная осевым растягивающим усилием

Допускаемое осевое растягивающее усилие :

$$[F] = \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma] \cdot \varphi_T = 3.1416 \cdot (2400 + 18 - 3.8) \cdot (18 - 3.8) \cdot 177 \cdot 1 = 1.9063 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности со стороны растяжения:

$$[M]_{\text{тп}} = \frac{D}{4} \cdot [F] = 2400 / 4 \cdot 1.9063 \cdot 10^7 = 1.1438 \cdot 10^7 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

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

Взам. инв. №		$\frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} + \left(\frac{Q}{[Q]}\right)^2 = 0 / 0 + 3.6015 \cdot 10^5 / 1.7063 \cdot 10^7 + 3.0891 \cdot 10^5 / 1.0485 \cdot 10^7 + (69142 / 3.943 \cdot 10^6)^2 = 0.050878 \leq 1$					
		Заключение: <b>Условие устойчивости выполнено.</b>					
		<b>Обечайка, нагруженная осевым растягивающим усилием</b>					
Подп. и дата		Допускаемое осевое растягивающее усилие :					
		$[F] = \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma] \cdot \varphi_T = 3.1416 \cdot (2400 + 18 - 3.8) \cdot (18 - 3.8) \cdot 177 \cdot 1 = 1.9063 \cdot 10^7 \text{ Н}$					
		Допускаемый изгибающий момент из условия прочности со стороны растяжения:					
Инв. № подл.		$[M]_{\text{изг}} = \frac{D}{4} \cdot [F] = 2400 / 4 \cdot 1.9063 \cdot 10^7 = 1.1438 \cdot 10^7 \text{ Н} \cdot \text{м}$					
		Обечайка, работающая под совместным действием внутреннего давления, осевого растягивающего усилия и изгибающего момента.					
						90651-20600-AM-02-220 РР	Лист
							66
		Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	

Взам. инв. №	
Подп. и дата	
Инв. № подл.	

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

$$\frac{F + p \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}}{[F]} + \frac{M}{[M]_{\text{кр}}} = ((-3.6015 \cdot 10^5) + 1.6346 \cdot 3.1416 \cdot 2400^2 / 4) / 1.9063 \cdot 10^7 + 3.0891 \cdot 10^5 / 1.1438 \cdot 10^7 = 0.39603 \leq 1$$

Заключение: **Условие прочности выполнено.**

### Дополнительный расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ 34233.9-2017

Продольные напряжения на наветренной стороне :

$$\sigma_{x1} = \frac{p \cdot (D + s)}{4 \cdot (s - c)} - \frac{F}{\pi \cdot D \cdot (s - c)} + \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D^2 \cdot (s - c)} = \frac{1.6346 \cdot (2400 + 18)}{4 \cdot (18 - 3.8)} - \frac{3.6015 \cdot 10^5}{\pi \cdot 3.1416 \cdot 2400 \cdot (18 - 3.8)} + \frac{4 \cdot 3.0891 \cdot 10^5}{\pi \cdot 2400^2 \cdot (18 - 3.8)} = 71.031 \text{ МПа}$$

Кольцевые напряжения :

$$\sigma_y = \frac{p \cdot (D + s)}{2 \cdot (s - c)} = \frac{1.6346 \cdot (2400 + 18)}{2 \cdot (18 - 3.8)} = 139.17 \text{ МПа}$$

Эквивалентные напряжения на наветренной стороне :

$$\sigma_{\text{Э1}} = \max \{ |\sigma_{x1} - \sigma_y|; |\sigma_y|; |\sigma_{x1}| \} = \max \{ |71.031 - 139.17|; |139.17|; |71.031| \} = 139.17 \text{ МПа}$$

Продольные напряжения на подветренной стороне :

$$\sigma_{x2} = \frac{p \cdot (D + s)}{4 \cdot (s - c)} - \frac{F}{\pi \cdot D \cdot (s - c)} - \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D^2 \cdot (s - c)} = \frac{1.6346 \cdot (2400 + 18)}{4 \cdot (18 - 3.8)} - \frac{3.6015 \cdot 10^5}{\pi \cdot 3.1416 \cdot 2400 \cdot (18 - 3.8)} - \frac{4 \cdot 3.0891 \cdot 10^5}{\pi \cdot 2400^2 \cdot (18 - 3.8)} = 61.413 \text{ МПа}$$

Эквивалентные напряжения на подветренной стороне :

$$\sigma_{\text{Э2}} = \max \{ |\sigma_{x2} - \sigma_y|; |\sigma_y|; |\sigma_{x2}| \} = \max \{ |61.413 - 139.17|; |139.17|; |61.413| \} = 139.17 \text{ МПа}$$

$$1.2 \cdot [\sigma]_{\text{к}} \cdot \varphi = 1.2 \cdot 177 \cdot 1 = 212.4 \text{ МПа}$$

Условия прочности аппарата колонного типа при совместном действии нагрузок:

$$\max \{ \sigma_{\text{Э1}}; \sigma_{\text{Э2}} \} \leq 1.2 \cdot [\sigma]_{\text{к}} \cdot \varphi$$

$$\max \{ 139.17; 139.17 \} < 212.4$$

Заключение: **Условие прочности выполнено.**

### Расчет давления испытаний

Пробное давление при гидравлическом испытании, при работе элемента под внутренним давлением:

$$P_{\text{кр}} = 1.25 \cdot p \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]_{\text{к}}} = 1.25 \cdot 1.6346 \cdot 196 / 177 = 2.2626 \text{ МПа}$$

### Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)

#### Условия нагружения при испытаниях:

Расчётная температура, T:	20 °C
Расчётное внутреннее избыточное давление (с учётом гидростатического), p:	2.2729 МПа
Расчётный изгибающий момент, M:	43067 Н·м
Расчётное поперечное усилие, Q:	12661 Н
Расчётное осевое сжимающее усилие, F:	3.9448·10 <sup>5</sup> Н
Расчётный крутящий момент, M <sub>к</sub> :	0 Н·м

По ГОСТ 34233.1-2017 расчёт на прочность при испытаниях допускается не проводить, если выполнено условие:

$$P_{\text{исп}} < 1.35 \cdot P_{\text{расч}} \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]}$$

$$1.35 \cdot P_{\text{расч}} \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]} = 1.35 \cdot 1.6346 \cdot 196 / 177 = 2.4436 \text{ МПа} \geq 2.2729 \text{ МПа}$$

### Расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ 34233.2-2017

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

90651-20600-AM-02-220 РР

Лист

67

$$[\sigma]^{20} = \frac{R_{\sigma} / 20}{n_T} = 300 / 1.1 = 272.73 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Лист при температуре  $T = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ :  
 $E^{20} = 1.99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

### Гладкая обечайка, нагруженная внутренним избыточным давлением

Расчётная толщина стенки с учётом прибавок:

$$s_p + c = \frac{p \cdot D}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p - p} + c = (2.2729 \cdot 2400) / (2 \cdot 272.73 \cdot 1 - 2.2729) + 3.8 = 13.843 \text{ мм}$$

$$13.843 \text{ мм} \leq 18 \text{ мм}$$

Заключение: **Условие работоспособности выполнено.**

Допускаемое давление :

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p \cdot (s - c)}{D + (s - c)} = 2 \cdot 272.73 \cdot 1 \cdot (18 - 3.8) / (2400 + 18 - 3.8) = 3.2083 \text{ МПа}$$

$$3.2083 \text{ МПа} \geq 2.2729 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности выполнено.**

Минимальное расстояние между "одиночными" штуцерами:

$$b_0 = 2 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c)} = 2 \cdot (2400 \cdot (18 - 3.8))^{1/2} = 369.22 \text{ мм}$$

Расчётная длина для расчёта от действия осевой силы:

$$l_F = 4900 \text{ мм}$$

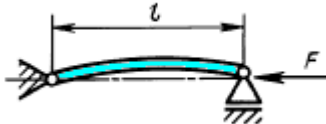
### Обечайка, нагруженная осевым сжимающим усилием

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия прочности :

$$[F]_{\text{пр}} = \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma] = 3.1416 \cdot (2400 + 18 - 3.8) \cdot (18 - 3.8) \cdot 272.73 = 2.9372 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия местной устойчивости:

$$[F]_{\text{Е1}} = \frac{31.0 \cdot 10^{-5} \cdot E}{n_y} \cdot D^2 \cdot \left[ \frac{100 \cdot (s - c)}{D} \right]^{2.5} = 310 \cdot 10^{-6} \cdot 1.99 \cdot 10^5 \cdot 2400^2 / (1.8) \cdot (100 \cdot (18 - 3.8) / 2400)^{2.5} = 5.3157 \cdot 10^7 \text{ Н}$$



Приведённая длина:  $l_{\text{пр}} = 4900 \text{ мм}$

Гибкость :

$$\lambda = \frac{2.83 \cdot l_{\text{пр}}}{D + s - c} = 2.83 \cdot 4900 / (2400 + 18 - 3.8) = 5.7439$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия общей устойчивости :

$$[F]_{\text{Е2}} = \frac{\pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot E}{n_y} \cdot \left( \frac{\pi}{\lambda} \right)^2 = 3.1416 \cdot (2400 + 18 - 3.8) \cdot (18 - 3.8) \cdot 1.99 \cdot 10^5 / (1.8) \cdot (3.1416 / 5.7439)^2 = 3.5618 \cdot 10^9 \text{ Н}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия устойчивости :

$$[F]_{\text{Е}} = \min \{ [F]_{\text{Е1}}, [F]_{\text{Е2}} \} = \min \{ 5.3157 \cdot 10^7, 3.5618 \cdot 10^9 \} = 5.3157 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие :

$$[F] = \frac{[F]_{\text{пр}}}{\sqrt{1 + \left( \frac{[F]_{\text{пр}}}{[F]_{\text{Е}}} \right)^2}} = 2.9372 \cdot 10^7 / (1 + (2.9372 \cdot 10^7 / 5.3157 \cdot 10^7)^2)^{1/2} = 2.5709 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

$$2.5709 \cdot 10^7 \text{ Н} \geq 3.9448 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено.**

Взам. инв. №	Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия устойчивости : $[F]_{\text{Е}} = \min \{ [F]_{\text{Е1}}, [F]_{\text{Е2}} \} = \min \{ 5.3157 \cdot 10^7, 3.5618 \cdot 10^9 \} = 5.3157 \cdot 10^7 \text{ Н}$ Допускаемое осевое сжимающее усилие : $[F] = \frac{[F]_{\text{н}}}{\sqrt{1 + \left( \frac{[F]_{\text{н}}}{[F]_{\text{Е}}} \right)^2}} = 2.9372 \cdot 10^7 / (1 + (2.9372 \cdot 10^7 / 5.3157 \cdot 10^7)^2)^{1/2} = 2.5709 \cdot 10^7 \text{ Н}$ $2.5709 \cdot 10^7 \text{ Н} \geq 3.9448 \cdot 10^5 \text{ Н}$ Заключение: <b>Условие прочности и устойчивости выполнено.</b>					
	Подп. и дата					
Инв. № подл.						
	Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	90651-20600-AM-02-220 РР

### Обечайка, нагруженная изгибающим моментом

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности со стороны сжатия:

$$[M]_{\Pi} = \frac{D}{4} \cdot [F]_{\Pi} = 2400 / 4 \cdot 2.9372 \cdot 10^7 = 1.7623 \cdot 10^7 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости в пределах упругости:

$$[M]_{\text{Е}} = \frac{D}{3.5} \cdot [F]_{\text{Е1}} = 2400 / 3.5 \cdot 5.3157 \cdot 10^7 = 3.645 \cdot 10^7 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Допускаемый изгибающий момент :

$$[M] = \frac{[M]_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left( \frac{[M]_{\Pi}}{[M]_{\text{Е}}} \right)^2}} = 1.7623 \cdot 10^7 / (1 + (1.7623 \cdot 10^7 / 3.645 \cdot 10^7)^2)^{1/2} = 1.5866 \cdot 10^7 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$1.5866 \cdot 10^7 \text{ Н} \cdot \text{м} \geq 43067 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено.**

### Обечайка, нагруженная поперечным усилием

Допускаемое поперечное усилие из условия прочности:

$$[Q]_{\Pi} = 0.25 \cdot \pi \cdot D \cdot (s - c) \cdot [\sigma] = 0.25 \cdot 3.1416 \cdot 2400 \cdot (18 - 3.8) \cdot 272.73 = 7.2999 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Расчётная длина для расчёта от действия давления:

$$l_p = 4900 \text{ мм}$$

Расчётная длина для расчёта от действия поперечной силы:

$$l_Q = 4900 \text{ мм}$$

Допускаемое поперечное усилие из условия устойчивости :

$$[Q]_{\text{Е}} = \frac{2.4 \cdot E \cdot (s - c)^2}{n_y} \cdot \left[ 0.18 + 3.3 \cdot \frac{D(s - c)}{l^2} \right] = 2.4 \cdot 1.99 \cdot 10^5 \cdot (18 - 3.8)^2 / 1.8 \cdot (0.18 + 3.3 \cdot 2400 \cdot (18 - 3.8) / 4900^2) = 9.8809 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Допускаемое поперечное усилие :

$$[Q] = \frac{[Q]_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left( \frac{[Q]_{\Pi}}{[Q]_{\text{Е}}} \right)^2}} = 7.2999 \cdot 10^6 / (1 + (7.2999 \cdot 10^6 / 9.8809 \cdot 10^6)^2)^{1/2} = 5.8714 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

$$5.8714 \cdot 10^6 \text{ Н} \geq 12661 \text{ Н}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено.**

### Обечайка, работающая под совместным действием нагрузок

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

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

$$\frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} + \left( \frac{Q}{[Q]} \right)^2 = 0 / 0 + 3.9448 \cdot 10^5 / 2.5709 \cdot 10^7 + 43067 / 1.5866 \cdot 10^7 + (12661 / 5.8714 \cdot 10^6)^2 = 0.018063 \leq 1$$

Заключение: **Условие устойчивости выполнено.**

### Обечайка, нагруженная осевым растягивающим усилием

Допускаемое осевое растягивающее усилие :

$$[F] = \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma] \cdot \varphi_T = 3.1416 \cdot (2400 + 18 - 3.8) \cdot (18 - 3.8) \cdot 272.73 \cdot 1 = 2.9372 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности со стороны растяжения:

$$[M]_{\text{тп}} = \frac{D}{4} \cdot [F] = 2400 / 4 \cdot 2.9372 \cdot 10^7 = 1.7623 \cdot 10^7 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

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

Взам. инв. №		$\frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} + \left(\frac{Q}{[Q]}\right)^2 = 0 / 0 + 3.9448 \cdot 10^5 / 2.5709 \cdot 10^7 + 43067 / 1.5866 \cdot 10^7 + (12661 / 5.8714 \cdot 10^6)^2 = 0.018063 \leq 1$ <p>Заключение: <b>Условие устойчивости выполнено.</b></p> <p><b>Обечайка, нагруженная осевым растягивающим усилием</b></p> <p>Допускаемое осевое растягивающее усилие :</p> $[F] = \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma] \cdot \varphi_T = 3.1416 \cdot (2400 + 18 - 3.8) \cdot (18 - 3.8) \cdot 272.73 \cdot 1 = 2.9372 \cdot 10^7 \text{ Н}$ <p>Допускаемый изгибающий момент из условия прочности со стороны растяжения:</p> $[M]_{\text{изг}} = \frac{D}{4} \cdot [F] = 2400 / 4 \cdot 2.9372 \cdot 10^7 = 1.7623 \cdot 10^7 \text{ Н} \cdot \text{м}$ <p>Обечайка, работающая под совместным действием внутреннего давления, осевого растягивающего усилия и изгибающего момента.</p>				
		Подп. и дата		Инв. № подл.		
<div>90651-20600-AM-02-220 РР</div> <div>Изм.    Лист    № док.    Подп.    Дата</div>						
					Лист	
					69	

Этот документ является собственностью "НЕФТЕХИМПРОЕКТ" и не подлежит копированию и распространению без его согласия

НЕФТЕХИМПРОЕКТ NEFTECHIMPROEKT		МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ		РР																		
<p>Проверка условия прочности: <math display="block">\frac{F + p \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}}{[F]} + \frac{M}{[M]_{\text{кр}}} \leq 1.0</math></p> <p><math display="block">\frac{F + p \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}}{[F]} + \frac{M}{[M]_{\text{кр}}} = ((-3.9448 \cdot 10^5) + 2.2729 \cdot 3.1416 \cdot 2400^2 / 4) / 2.9372 \cdot 10^7 + 43067 / 1.7623 \cdot 10^7 = 0.33909 \leq 1</math></p> <p>Заключение: <b>Условие прочности выполнено.</b></p> <p><b>Дополнительный расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ 34233.9-2017</b></p> <p>Продольные напряжения на наветренной стороне :</p> <p><math display="block">\sigma_{x1} = \frac{p \cdot (D + s)}{4 \cdot (s - c)} - \frac{F}{\pi \cdot D \cdot (s - c)} + \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D^2 \cdot (s - c)} = \frac{2.2729 \cdot (2400 + 18) / (4 \cdot (18 - 3.8)) - 3.9448 \cdot 10^5 / (3.1416 \cdot 2400 \cdot (18 - 3.8)) + 4 \cdot 43067 / (3.1416 \cdot 2400^2 \cdot (18 - 3.8))}{1} = 93.746 \text{ МПа}</math></p> <p>Кольцевые напряжения :</p> <p><math display="block">\sigma_y = \frac{p \cdot (D + s)}{2 \cdot (s - c)} = \frac{2.2729 \cdot (2400 + 18) / (2 \cdot (18 - 3.8))}{1} = 193.52 \text{ МПа}</math></p> <p>Эквивалентные напряжения на наветренной стороне :</p> <p><math display="block">\sigma_{\text{Э1}} = \max \{  \sigma_{x1} - \sigma_y ;  \sigma_y ;  \sigma_{x1}  \} = \max \{  93.746 - 193.52 ;  193.52 ;  93.746  \} = 193.52 \text{ МПа}</math></p> <p>Продольные напряжения на подветренной стороне :</p> <p><math display="block">\sigma_{x2} = \frac{p \cdot (D + s)}{4 \cdot (s - c)} - \frac{F}{\pi \cdot D \cdot (s - c)} - \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D^2 \cdot (s - c)} = \frac{2.2729 \cdot (2400 + 18) / (4 \cdot (18 - 3.8)) - 3.9448 \cdot 10^5 / (3.1416 \cdot 2400 \cdot (18 - 3.8)) - 4 \cdot 43067 / (3.1416 \cdot 2400^2 \cdot (18 - 3.8))}{1} = 92.405 \text{ МПа}</math></p> <p>Эквивалентные напряжения на подветренной стороне :</p> <p><math display="block">\sigma_{\text{Э2}} = \max \{  \sigma_{x2} - \sigma_y ;  \sigma_y ;  \sigma_{x2}  \} = \max \{  92.405 - 193.52 ;  193.52 ;  92.405  \} = 193.52 \text{ МПа}</math></p> <p><math display="block">1.2 \cdot [\sigma]_{\text{к}} \cdot \varphi = 1.2 \cdot 272.73 \cdot 1 = 327.27 \text{ МПа}</math></p> <p>Условия прочности аппарата колонного типа при совместном действии нагрузок:</p> <p><math display="block">\max \{ \sigma_{\text{Э1}}; \sigma_{\text{Э2}} \} \leq 1.2 \cdot [\sigma]_{\text{к}} \cdot \varphi</math><p><math display="block">\max \{ 193.52; 193.52 \} &lt; 327.27</math></p><p>Заключение: <b>Условие прочности выполнено.</b></p><p><b>Расчёт в условиях монтажа</b></p><p><b>Условия нагружения при монтаже:</b></p><table><tbody><tr><td>Расчётная температура, Т:</td><td>20</td><td>°С</td></tr><tr><td>Расчётное внутреннее избыточное давление, р:</td><td>0</td><td>МПа</td></tr><tr><td>Расчётный изгибающий момент, М:</td><td>57050</td><td>Н·м</td></tr><tr><td>Расчётное поперечное усилие, Q:</td><td>18760</td><td>Н</td></tr><tr><td>Расчётное осевое сжимающее усилие, F:</td><td>1.3805·10<sup>5</sup></td><td>Н</td></tr><tr><td>Расчётный крутящий момент, М<sub>к</sub>:</td><td>0</td><td>Н·м</td></tr></tbody></table><p><b>Расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ 34233.2-2017</b></p><p>Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Лист при температуре 20 °С (условия монтажа):</p><p><math display="block">[\sigma]^{20} = \frac{R_{\sigma} / 20}{n_T} = 300 / 1.1 = 272.73 \text{ МПа}</math></p><p>Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Лист при температуре Т = 20 °С:</p><p><math display="block">E^{20} = 1.99 \cdot 10^5 \text{ МПа}</math></p><p>Допускаемое давление :</p><p><math display="block">[p] = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p \cdot (s - c)}{D + (s - c)} = \frac{2 \cdot 272.73 \cdot 1 \cdot (18 - 3.8) / (2400 + 18 - 3.8)}{1} = 3.2083 \text{ МПа}</math></p><p>3.2083 МПа ≥ 0 МПа</p><p>Заключение: <b>Условие прочности выполнено.</b></p><p>Расчётная длина для расчёта от действия осевой силы:</p><p><math display="block">l_F = 4900 \text{ мм}</math></p></p>					Расчётная температура, Т:	20	°С	Расчётное внутреннее избыточное давление, р:	0	МПа	Расчётный изгибающий момент, М:	57050	Н·м	Расчётное поперечное усилие, Q:	18760	Н	Расчётное осевое сжимающее усилие, F:	1.3805·10 <sup>5</sup>	Н	Расчётный крутящий момент, М <sub>к</sub> :	0	Н·м
Расчётная температура, Т:	20	°С																				
Расчётное внутреннее избыточное давление, р:	0	МПа																				
Расчётный изгибающий момент, М:	57050	Н·м																				
Расчётное поперечное усилие, Q:	18760	Н																				
Расчётное осевое сжимающее усилие, F:	1.3805·10 <sup>5</sup>	Н																				
Расчётный крутящий момент, М <sub>к</sub> :	0	Н·м																				
Взам. инв. №	Подп. и дата	Инв. № подл.	90651-20600-AM-02-220 РР		Лист																	
					70																	
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата																		

90651-20600-AM-02-220 РР\_изм.0.docx

Формат А4





Допускаемое поперечное усилие из условия устойчивости :

$$[Q]_E = \frac{2.4 \cdot E \cdot (s-c)^2}{n_y} \cdot \left[ 0.18 + 3.3 \cdot \frac{D(s-c)}{l^2} \right] = 2.4 \cdot 1.99 \cdot 10^5 \cdot (18-3.8)^2 / 1.8 \cdot (0.18 + 3.3 \cdot 2400 \cdot (18-3.8) / 4900^2) = 9.8809 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Допускаемое поперечное усилие :

$$[Q] = \frac{[Q]_E}{\sqrt{1 + \left( \frac{[Q]_E}{[Q]_E} \right)^2}} = 7.2999 \cdot 10^6 / (1 + (7.2999 \cdot 10^6 / 9.8809 \cdot 10^6)^2)^{1/2} = 5.8714 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

$$5.8714 \cdot 10^6 \text{ Н} \geq 18760 \text{ Н}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено.**

### Обечайка, работающая под совместным действием нагрузок

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

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

$$\frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} + \left( \frac{Q}{[Q]} \right)^2 = 0 / 0 + 1.3805 \cdot 10^5 / 2.5709 \cdot 10^7 + 57050 / 1.5866 \cdot 10^7 + (18760 / 5.8714 \cdot 10^6)^2 = 0.0089757 \leq 1$$

Заключение: **Условие устойчивости выполнено.**

### Обечайка, нагруженная осевым растягивающим усилием

Допускаемое осевое растягивающее усилие :

$$[F] = \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma] \cdot \varphi_T = 3.1416 \cdot (2400 + 18 - 3.8) \cdot (18 - 3.8) \cdot 272.73 \cdot 1 = 2.9372 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности со стороны растяжения:

$$[M]_{\text{тп}} = \frac{D}{4} \cdot [F] = 2400 / 4 \cdot 2.9372 \cdot 10^7 = 1.7623 \cdot 10^7 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

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

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

$$\frac{F + p \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}}{[F]} + \frac{M}{[M]_{\text{тп}}} = ((-1.3805 \cdot 10^5) + 0 \cdot 3.1416 \cdot 2400^2 / 4) / 2.9372 \cdot 10^7 + 57050 / 1.7623 \cdot 10^7 = (-0.0014629) \leq 1$$

Заключение: **Условие прочности выполнено.**

### Дополнительный расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ 34233.9-2017

Продольные напряжения на наветренной стороне :

$$\sigma_{x1} = \frac{p \cdot (D + s)}{4 \cdot (s - c)} - \frac{F}{\pi \cdot D \cdot (s - c)} + \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D^2 \cdot (s - c)} = 0 \cdot (2400 + 18) / (4 \cdot (18 - 3.8)) - 1.3805 \cdot 10^5 / (3.1416 \cdot 2400 \cdot (18 - 3.8)) + 4 \cdot 57050 / (3.1416 \cdot 2400^2 \cdot (18 - 3.8)) = (-0.40133) \text{ МПа}$$

Кольцевые напряжения :

$$\sigma_y = \frac{p \cdot (D + s)}{2 \cdot (s - c)} = 0 \cdot (2400 + 18) / (2 \cdot (18 - 3.8)) = 0 \text{ МПа}$$

Эквивалентные напряжения на наветренной стороне :

$$\sigma_{E1} = \max \{ |\sigma_{x1} - \sigma_y|; |\sigma_y|; |\sigma_{x1}| \} = \max \{ |(-0.40133) - 0|; |0|; |(-0.40133)| \} = 0.40133 \text{ МПа}$$

Продольные напряжения на подветренной стороне :

$$\sigma_{x2} = \frac{p \cdot (D + s)}{4 \cdot (s - c)} - \frac{F}{\pi \cdot D \cdot (s - c)} - \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D^2 \cdot (s - c)} = 0 \cdot (2400 + 18) / (4 \cdot (18 - 3.8)) - 1.3805 \cdot 10^5 / (3.1416 \cdot 2400 \cdot (18 - 3.8)) - 4 \cdot 57050 / (3.1416 \cdot 2400^2 \cdot (18 - 3.8)) = (-2.1775) \text{ МПа}$$

Эквивалентные напряжения на подветренной стороне :

$$\sigma_{E2} = \max \{ |\sigma_{x2} - \sigma_y|; |\sigma_y|; |\sigma_{x2}| \} = \max \{ |(-2.1775) - 0|; |0|; |(-2.1775)| \} = 2.1775 \text{ МПа}$$

Взам. инв. №				
Подп. и дата				
Инв. № подл.				
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата

90651-20600-AM-02-220 РР

Лист

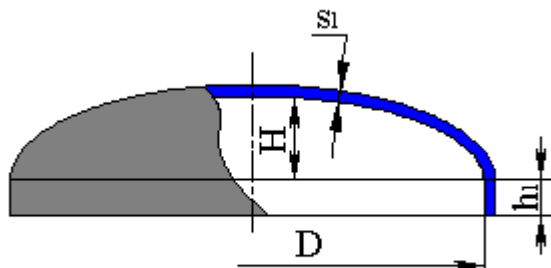
72

Заключение: **Условие прочности выполнено.**

Формат А4

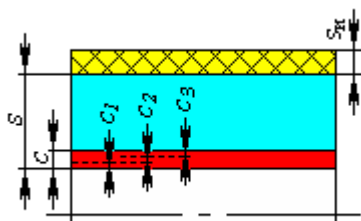
**Днище эллиптическое верхнее, нижнее**

Расчет выполнен на примере днища эллиптического нижнего



## Исходные данные

Материал:	09Г2С Лист
Внутр. диаметр, D:	2400 мм
Толщина стенки днища, $s_1$ :	18 мм
Прибавка для компенсации коррозии и эрозии, $c_1$ :	3 мм
Прибавка для компенсации минусового допуска, $c_2$ :	0.8 мм
Прибавка технологическая, $c_3$ :	0 мм
Суммарная прибавка к толщине стенки, $c$ :	3.8 мм
Высота днища, H:	600 мм
Длина отбортовки, $h_1$ :	60 мм
Коэффициент прочности сварного шва :	
$\varphi = 1$	
Изоляция:	



Название:	Изоляция
Толщина, $s_{из}$ :	70мм
Плотность, $\rho_{из}$ :	100 кг/м <sup>3</sup>
Присутствует в условиях испытаний:	Да
Присутствует в условиях монтажа:	Да

## Расчёт в рабочих условиях

**Условия нагружения:**

Расчётная температура, T:	100	°C
Расчётное внутреннее избыточное давление, p:	1.6409	МПа

## Расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ 34233.2-2017

**Допускаемые напряжения:**

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Лист при температуре 100 °С (рабочие условия):  
 $[\sigma] = 177 \text{ МПа}$

Взам. инв. №	Толщина, $S_{из}$ : 70 мм				
	Плотность, $\rho_{из}$ : 100 кг/м³				
Подп. и дата	Присутствует в условиях испытаний: Да				
	Присутствует в условиях монтажа: Да				
Инв. № подл.	<b>Расчёт в рабочих условиях</b>				
	<b>Условия нагружения:</b>				
	Расчётная температура, T: 100 °C				
	Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 1.6409 МПа				
	<b>Расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ 34233.2-2017</b>				
	<b>Допускаемые напряжения:</b>				
	Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Лист при температуре 100 °C (рабочие условия):				
	[ $\sigma$ ]= 177 МПа				
					90651-20600-AM-02-220 PP
	Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата

Лист
74

Этот документ является собственностью "НЕФТЕХИМПРОЕКТ" и не подлежит копированию и распространению без его согласия

НЕФТЕХИМПРОЕКТ NEFTECHIMPROEKT		МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ			РР		
Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Лист при температуре T = 100 °С: E= 1.91·10 <sup>5</sup> МПа							
Днища, нагруженные внутренним избыточным давлением.							
Радиус кривизны в вершине днища :							
$R = \frac{D^2}{4 \cdot H} = 2400^2 / (4 \cdot 600) = 2400 \text{ мм}$							
Расчётная толщина стенки с учётом прибавок :							
$s_{\text{н}} + c = \frac{p \cdot R}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi - 0.5 \cdot p} + c = (1.6409 \cdot 2400) / (2 \cdot 177 \cdot 1 - 0.5 \cdot 1.6409) + 3.8 = 14.951 \text{ мм}$							
14.951 мм ≤ 18 мм							
Заключение: Условие работоспособности выполнено.							
Допускаемое давление :							
$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi \cdot (s_1 - c)}{R + 0.5 \cdot (s_1 - c)} = 2 \cdot 177 \cdot 1 \cdot (18 - 3.8) / (2400 + 0.5 \cdot (18 - 3.8)) = 2.0883 \text{ МПа}$							
2.0883 МПа ≥ 1.6409 МПа							
Заключение: Условие прочности выполнено.							
Расчет давления испытаний							
Пробное давление при гидравлическом испытании, при работе элемента под внутренним давлением:							
$P_{\text{пр}} = 1.25 \cdot p \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]_{\text{т}}} = 1.25 \cdot 1.6409 \cdot 196 / 177 = 2.2714 \text{ МПа}$							
Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)							
Условия нагружения при испытаниях:							
Расчётная температура, T: 20 °С							
Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 2.2794 МПа							
Расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ 34233.2-2017							
По ГОСТ 34233.1-2017 расчёт на прочность при испытаниях допускается не проводить, если выполнено условие:							
$P_{\text{исп}} < 1.35 \cdot P_{\text{расч}} \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]}$							
$1.35 \cdot P_{\text{расч}} \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]} = 1.35 \cdot 1.6409 \cdot 196 / 177 = 2.4531 \text{ МПа} \geq 2.2794 \text{ МПа}$							
Допускаемые напряжения:							
Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Лист при температуре 20 °С (условия гидроиспытаний):							
$[\sigma]^{20} = \frac{R_{\text{е}} / 20}{n_T} = 300 / 1.1 = 272.73 \text{ МПа}$							
Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Лист при температуре T = 20 °С: E <sup>20</sup> = 1.99·10 <sup>5</sup> МПа							
Днища, нагруженные внутренним избыточным давлением.							
Радиус кривизны в вершине днища :							
$R = \frac{D^2}{4 \cdot H} = 2400^2 / (4 \cdot 600) = 2400 \text{ мм}$							
Расчётная толщина стенки с учётом прибавок :							
$s_{\text{н}} + c = \frac{p \cdot R}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi - 0.5 \cdot p} + c = (2.2794 \cdot 2400) / (2 \cdot 272.73 \cdot 1 - 0.5 \cdot 2.2794) + 3.8 = 13.85 \text{ мм}$							
13.85 мм ≤ 18 мм							
Заключение: Условие работоспособности выполнено.							
Взам. инв. №	Подп. и дата	Инв. № подл.	90651-20600-AM-02-220 РР				Лист
							75
			Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата

90651-20600-AM-02-220 РР\_изм.0.docx

Формат А4

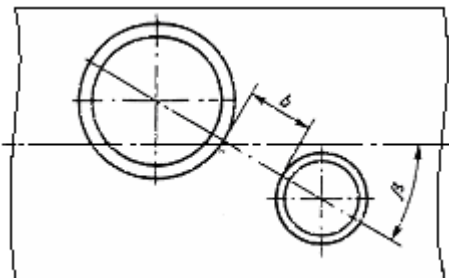
Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №

Этот документ является собственностью "НЕФТЕХИМПРОЕКТ" и не подлежит копированию и распространению без его согласия

<div> <div>НЕФТЕХИМПРОЕКТ NEFTECHIMPROEKT</div> <div>МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ</div> <div>РР</div> </div>				
<div> Допускаемое давление : <div> <div> <math display="block">[p] = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi \cdot (s_1 - c)}{R + 0.5 \cdot (s_1 - c)}</math> <div> <div> <math display="block">= 2 \cdot 272.73 \cdot 1 \cdot (18 - 3.8) / (2400 + 0.5 \cdot (18 - 3.8))</math> <div> <div>3.2178 МПа</div> <div>3.2178 МПа ≥ 2.2794 МПа</div> <div> Закключение: <b>Условие прочности выполнено.</b> </div> </div> </div> </div> </div> </div> </div>				
<div> <div> <div>90651-20600-AM-02-220 РР</div> <div>Лист</div> </div> <div> <div>76</div> </div> </div>				
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата



## Ближайший штуцер



Название штуцера:

### Измерение температуры (T1)

Расстояние до стенки ближайшего штуцера,  $b$ :

716.2 mm

Угол  $\beta$ :

99.88 °

Коэффициенты прочности сварных швов:

Продольный шов штуцера:

$$\varphi_1 = 1$$

Шов обечайки в зоне врезки штуцера:

$$\varnothing = 1$$

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$$D_p = D = 2400 \text{ mm}$$

Нагрузки, приложенные к патрубку, **не передаются** на соседние элементы аппарата

## Расчёт в рабочих условиях

**Условия нагружения:**

Расчётная температура, T: 100 °C

100 °C

Расчётное внутреннее избыточное давление, р: 1.6313 МПа

1.6313 МПа

## Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ 34233.3-2017

### Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Лист при температуре 100 °С (рабочие условия):

$$[\sigma] = 177 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 100 °C:

$$E = 1.91 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

## Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Лист при температуре 100 °С (рабочие условия):

$$[\sigma]_1 = 177 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 100 °C:

$$E_1 = 1.91 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

## Свойства материала кольца

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Лист при температуре 100 °С (рабочие условия):

$$[\sigma]_2 = 177 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 100 °C:

$$E_2 = 1.91 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Расчётная толщина стенки штуцера :

$$s_{lp} + c_s = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma_1 \cdot \phi_1 - p]} + c_s = 1.6313 \cdot (398 + 2 \cdot 3.8) / (2 \cdot 177 \cdot 1 - 1.6313) + 3.8 = 5.6778 \text{ mm}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера :

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = \frac{2 \cdot 177 \cdot 1 \cdot (18 - 3.8)}{398 + 18 + 3.8} = 11.974 \text{ МПа}$$

$$11.974 \text{ МПа} \geq 1.6313 \text{ МПа}$$

Взам. инв. №	Модуль продольной упругости при температуре 100 °С: $E_1 = 1.91 \cdot 10^5 \text{ МПа}$				
	<b>Свойства материала кольца</b> Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Лист при температуре 100 °С (рабочие условия): $[\sigma]_2 = 177 \text{ МПа}$				
Подп. и дата	Модуль продольной упругости при температуре 100 °С: $E_2 = 1.91 \cdot 10^5 \text{ МПа}$				
	Расчётная толщина стенки штуцера : $s_{\text{ш}} + c_s = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 - p} + c_s = 1.6313 \cdot (398 + 2 \cdot 3.8) / (2 \cdot 177 \cdot 1 - 1.6313) + 3.8 = 5.6778 \text{ мм}$				
Инв. № подл.	Допускаемое давление для патрубка штуцера : $[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 177 \cdot 1 \cdot (18 - 3.8) / (398 + 18 + 3.8) = 11.974 \text{ МПа}$				
	$11.974 \text{ МПа} \geq 1.6313 \text{ МПа}$				
<div> <div>90651-20600-AM-02-220 PP</div> </div>					Лист
					78
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	



Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено.**

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$$D_p = D = 2400 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера :

$$s_p = 11.111 \text{ мм}$$

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

$$d_p = d + 2 \cdot c_s = 398 + 2 \cdot 3.8 = 405.6 \text{ мм}$$

Максимальный диаметр отверстия:

$$d_{\max} = \begin{cases} D & \text{— для отверстий в цилиндрических обечайках} \\ D_k & \text{— для отверстий в конических обечайках} \\ 0.6 \cdot D & \text{— для отверстий в выпуклых днищах} \end{cases} = 2400 \text{ мм}$$

Расчетная толщина стенки обечайки, перехода или днища для определения диаметра отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$s_{pn} = s_p = 11.111 \text{ мм}$$

Наибольший допустимый диаметр одиночного отверстия, не требующего дополнительного укрепления при наличии избыточной толщины стенки сосуда:

$$d_0 = \min \left\{ 2 \cdot \left( \frac{s - c}{s_{pn}} - 0.8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)}; d_{\max} + 2 \cdot c_s \right\} = \min \{ 2 \cdot ((18 - 3.8) / 11.111 - 0.8) \cdot (2400 \cdot (18 - 3.8))^{1/2}; 2400 + 2 \cdot 3.8 \} = 176.49 \text{ мм}$$

Ширина зоны укрепления :

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (2400 \cdot (18 - 3.8))^{1/2} = 184.61 \text{ мм}$$

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

$$L_k = 383 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления :

$$l_p = L_0 = 184.61 \text{ мм}$$

Расчётная длина внешней части штуцера :

$$l_{1p} = \min \{ l_1; 1.25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \} = \min \{ 170; 1.25 \cdot ((398 + 2 \cdot 3.8) \cdot (18 - 3.8))^{1/2} \} = 94.864 \text{ мм}$$

### Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера :

$$\chi_1 = \min \left\{ 1.0; \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1.0, 177 / 177 \} = 1$$

Расчётная ширина кольца :

$$l_{2p} = \min \{ l_2; \sqrt{D_p \cdot (s_2 + s - c)} \} = \min \{ 150; (2400 \cdot (18 + 18 - 3.8))^{1/2} \} = 150 \text{ мм}$$

Для накладного кольца :

$$\chi_2 = \min \left\{ 1.0; \frac{[\sigma]_2}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1.0, 177 / 177 \} = 1$$

Расчётная длина внутренней части штуцера :

$$l_{3p} = \min \{ l_3; 0.5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})} \} = \min \{ 0; 0.5 \cdot ((398 + 2 \cdot 3.8) \cdot (18 - 3.8 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления :

$$d_{op} = 0.4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0.4 \cdot (2400 \cdot (18 - 3.8))^{1/2} = 73.843 \text{ мм}$$

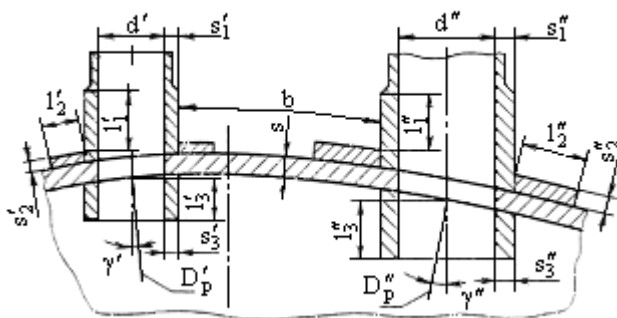
$$V = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l_{1p} \cdot (s_1 - c_s) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3}{l_p \cdot (s - c)}}{1 + 0.5 \cdot \frac{d_p - d_{op}}{l_p} + K_1 \cdot \frac{d + 2 \cdot c_s}{D_p} \cdot \frac{\varphi}{\varphi_1} \cdot \frac{l_{1p}}{l_p}}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

$$= \min \{ 1; [1 + (94.864 \cdot (18 - 3.8) \cdot 1 + 150 \cdot 18 \cdot 1 + 0 \cdot (18 - 3.8 - 0) \cdot 1) / (184.61 \cdot (18 - 3.8))] / [1 + 0.5 \cdot (405.6 - 73.843) / 184.61 + 1 \cdot (398 + 2 \cdot 3.8) / 2400 \cdot 1 / 1 \cdot 94.864 / 184.61] \} = 1.2813$$

$$= 1$$

Взам. инв. №	$\chi_2 = \min\left\{1,0; \frac{[\sigma]_2}{[\sigma]}\right\} = \min\{1,0, 177 / 177\} = 1$ <p>Расчётная длина внутренней части штуцера :</p> $l_{3p} = \min\left\{l_3; 0.5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})}\right\} = \min\{0; 0.5 \cdot ((398 + 2 \cdot 3.8) \cdot (18 - 3.8 - 0))^{1/2}\} = 0 \text{ мм}$ <p>Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления :</p> $d_{op} = 0.4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0.4 \cdot (2400 \cdot (18 - 3.8))^{1/2} = 73.843 \text{ мм}$ $V = \min\left\{1; \frac{1 + \frac{l_{1p} \cdot (s_1 - c_s) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3}{l_p \cdot (s - c)}}{1 + 0.5 \cdot \frac{d_p - d_{op}}{l_p} + K_1 \cdot \frac{d + 2 \cdot c_s}{D_p} \cdot \frac{\varphi}{\varphi_1} \cdot \frac{l_{1p}}{l_p}}\right\}$ $= \min\{1; [1 + (94.864 \cdot (18 - 3.8) \cdot 1 + 150 \cdot 18 \cdot 1 + 0 \cdot (18 - 3.8 - 0) \cdot 1) / (184.61 \cdot (18 - 3.8))] / [1 + 0.5 \cdot (405.6 - 73.843) / 184.61 + 1 \cdot (398 + 2 \cdot 3.8) / 2400 \cdot 1 / 1 \cdot 94.864 / 184.61] = 1.2813\}$ $= 1$					
	Подп. и дата					
Инв. № подл.						
						90651-20600-AM-02-220 РР
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	79	

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 1 \cdot (18 - 3.8) \cdot 1 \cdot 177 \cdot 1 / [2400 + (18 - 3.8) \cdot 1] = 2.0822 \text{ МПа}$$



Отверстие считается одиночным, если ближайшее к нему отверстие Измерение температуры (Т1) не оказывает на него влияния, т.е. расстояние между наружными поверхностями соответствующих штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (2400 \cdot (18 - 3.8))^{1/2} + (2400 \cdot (18 - 3.8))^{1/2} = 369.22 \text{ мм}$$

Условие выполнено, дальнейших расчётов укреплений не требуется.

Допускаемое давление  $[p] = 2.0822 \text{ МПа}$

$2.0822 \text{ МПа} \geq 1.6313 \text{ МПа}$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено.**

Площадь, необходимая для укрепления отверстия:

$$A_r = 0.5 \cdot (d_p - d_{op}) \cdot s_p = 0.5 \cdot (405.6 - 73.843) \cdot 11.111 = 1843.1 \text{ мм}^2$$

Располагаемая площадь укрепления одиночного отверстия:

$$A_a = 1_p \cdot (s_1 - s_p - c_s) \cdot \chi_1 + 1_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + 1_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3 + 1_p \cdot (s - s_p - c) \cdot \chi_4$$

$$= 94.864 \cdot (18 - 1.8778 - 3.8) \cdot 1 + 150 \cdot 18 \cdot 1 + 0 \cdot (18 - 3.8 - 0) \cdot 1 + 184.61 \cdot (18 - 11.111 - 3.8) \cdot 1$$

$$= 4439.2 \text{ мм}^2$$

$$A_r = 1843.1 \text{ мм}^2 \leq 4439.2 \text{ мм}^2$$

Заключение: **Условие прочности выполнено.**

### Расчет давления испытаний

Пробное давление при гидравлическом испытании, при работе элемента под внутренним давлением:

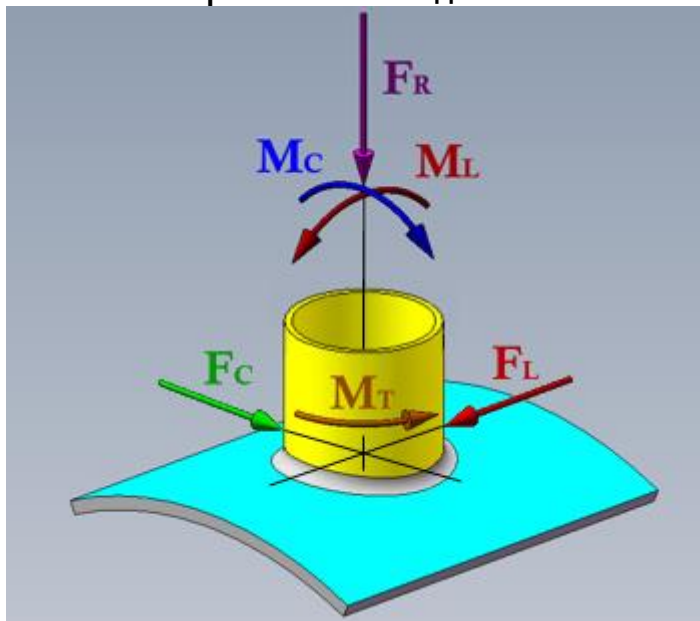
$$P_{\text{ип}} = 1.25 \cdot p \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]_t} = 1.25 \cdot 1.6313 \cdot 196 / 177 = 2.2581 \text{ МПа}$$

Пробное давление при гидравлическом испытании, при работе элемента под внутренним давлением:

$$P_{\text{ип}} = 1.25 \cdot p \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]_t} = 1.25 \cdot 1.6313 \cdot 196 / 177 = 2.2581 \text{ МПа}$$

Инв. № подл.						Подп. и дата		Взам. инв. №	
					90651-20600-AM-02-220 РР				Лист
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата					80

## Расчёт на прочность от воздействия внешних нагрузок по ГОСТ 34233.3-2017



Радиальная нагрузка,  $F_R$ : (-10000) Н

Окружной момент,  $M_c$ : 16300 Н·м

Продольный момент,  $M_L$ : 16300 Н·м

Крутящий момент,  $M_T$ : 16300 Н·м

Сдвиговая нагрузка,  $F_c$ : 10000 Н

Сдвиговая нагрузка,  $F_L$ : 10000 Н

Средний диаметр обечайки у отверстия :

$$D_c = D_p + s + c + s_2 = 2400 + 18 + 3.8 + 18 = 2439.8 \text{ mm}$$

Эквивалентная толщина обечайки около штуцера при  $l_2 < \sqrt{\frac{D_c}{2} \cdot (s + s_2)}$ :

$$s_3 = s + \min \left\{ s_2 \cdot \frac{l_2}{\sqrt{\frac{D_c}{2} \cdot (s + s_2)}}; s_2 \cdot \chi_2 - C \right\} = 18 + \min \{ 18 \cdot 150 / (2439.8 / 2 \cdot (18 + 18))^{1/2}; 18 \cdot 1 - 3.8 \} = 27.084 \text{ mm}$$

Средний диаметр штуцера :

$$d_c = d + s_1 + c_s = 398 + 18 + 3.8 = 419.8 \text{ mm}$$

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot s_3}} = 419.8 / (2439.8 \cdot 27.084)^{1/2} = 1.6331$$

Прочность от действия давления :

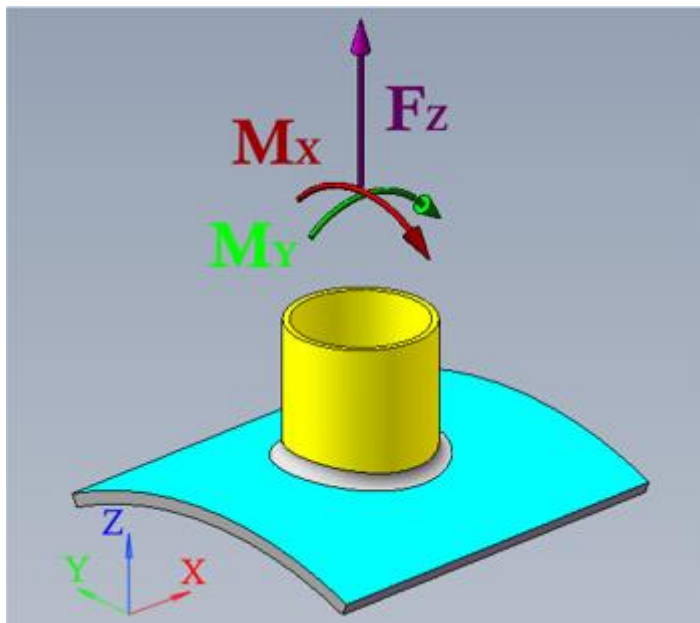
$$\Phi_p = \frac{p}{|p|} = |1.6313 / 2.0822| = 0.78347$$

Условие прочности:  $\Phi_p \leq 1$

$0.78347 \leq 1.0$ . Условие прочности выполнено.

Взам. инв. №	Подп. и дата	Инв. № подл.	Прочность от действия давления :						
			$\Phi_p = \left  \frac{p}{[p]} \right  =  1.6313 / 2.0822  = 0.78347$ <p>Условие прочности: <math>\Phi_p \leq 1</math></p> <p>0.78347 ≤ 1.0.Условие прочности выполнено.</p>						
								90651-20600-AM-02-220 PP	Лист
									81
			Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата		

Расчетная схема по ГОСТ 34233.3-2017



Осевое растягивающее усилие, действующее на штуцер :

$$F_z = -F_R = -(10000) = 10000 \text{ Н}$$

$$C_1 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 0.60072 + 0.95196 \cdot 1.6331 + 0.0051958 \cdot 1.6331^2 + (-0.0014064) \cdot 1.6331^3 + 0 \cdot 1.6331^4 = 2.1631$$

Допускаемое осевое усилие на штуцер из условия прочности в месте пересечения штуцера с обечайкой ( $\lambda_c = 1.6331$ ):

$$[F_{z1}] = [\sigma] \cdot (s + \chi_2 \cdot s_2 - c)^2 \cdot \max\{C_1; 1.81\} = 177 \cdot (18 + 1 \cdot 18 - 3.8)^2 \cdot \max\{2.1631; 1.81\} = 3.9697 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Наружный диаметр накладного кольца :

$$D_2 = d + 2 \cdot s_1 + 2 \cdot l_2 = 398 + 2 \cdot 18 + 2 \cdot 150 = 734 \text{ мм}$$

$$\lambda_c = \frac{D_2}{\sqrt{D_c \cdot (s - c)}} = 734 / (2439.8 \cdot (18 - 3.8)^{1/2}) = 3.9434$$

$$C_1 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 0.60072 + 0.95196 \cdot 3.9434 + 0.0051958 \cdot 3.9434^2 + (-0.0014064) \cdot 3.9434^3 + 0 \cdot 3.9434^4 = 4.3493$$

Допускаемое осевое усилие на штуцер из условия прочности у внешней кромки накладного кольца ( $\lambda_c = 3.9434$ ):

$$[F_{z2}] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \max\{C_1; 1.81\} = 177 \cdot (18 - 3.8)^2 \cdot \max\{4.3493; 1.81\} = 1.5523 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Допускаемое осевое усилие на штуцер при наличии накладного кольца:

$$[F_z] = \min\{[F_{z1}]; [F_{z2}]\} = \min\{3.9697 \cdot 10^5; 1.5523 \cdot 10^5\} = 1.5523 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Прочность от действия осевой нагрузки :

$$\Phi_z = \left| \frac{F_z}{[F_z]} \right| = |10000 / 1.5523 \cdot 10^5| = 0.064422$$

Условие прочности:  $\Phi_z \leq 1$

$0.064422 \leq 1.0$ . Условие прочности выполнено.

Окружной приведенный момент, действующий на штуцер :

$$M_x = M_c = 16300 \text{ Н·м}$$

Продольный приведенный момент, действующий на штуцер :

$$M_y = M_L = 16300 \text{ Н·м}$$

$$C_2 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 4.5263 + 0.064022 \cdot 1.6331 + 0.15888 \cdot 1.6331^2 + (-0.021419) \cdot 1.6331^3 + 0.0010350 \cdot 1.6331^4 = 4.9687$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности в месте пересечения штуцера с обечайкой ( $\lambda_c = 1.6331$ ):

$$[M_{x1}] = [\sigma] \cdot (s + \chi_2 \cdot s_2 - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_2; 4.9\} = 177 \cdot (18 + 1 \cdot 18 - 3.8)^2 \cdot 419.8 / 4 \cdot \max\{4.9687; 4.9\} = 95699 \text{ Н·м}$$

$$C_2 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 4.5263 + 0.064022 \cdot 3.9434 + 0.15888 \cdot 3.9434^2 + (-0.021419) \cdot 3.9434^3 + 0.0010350 \cdot 3.9434^4 = 6.1862$$

Взам. инв. №		$\Phi_x = \left  \frac{-x}{[F_x]} \right  =  10000 / 1.5523 \cdot 10^5  = 0.064422$					
		Условие прочности: $\Phi_x \leq 1$ $0.064422 \leq 1.0$ . Условие прочности выполнено.					
Подп. и дата		Окружной приведенный момент, действующий на штуцер : $M_x = M_c = 16300 \text{ Н} \cdot \text{м}$					
		Продольный приведенный момент, действующий на штуцер : $M_y = M_L = 16300 \text{ Н} \cdot \text{м}$					
Инв. № подл.		$C_2 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = \frac{4.5263 + 0.064022 \cdot 1.6331 + 0.15888 \cdot 1.6331^2 + (-0.021419) \cdot 1.6331^3 + 0.0010350 \cdot 1.6331^4}{1.6331^4} = 4.9687$					
		Допускаемый изгибающий момент из условия прочности в месте пересечения штуцера с обечайкой ( $\lambda_c = 1.6331$ ):					
		$[M_{x1}] = [\sigma] \cdot \{s + \chi_2 \cdot s_2 - c\}^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_2; 4.9\} = 177 \cdot (18 + 1 \cdot 18 - 3.8)^2 \cdot 419.8 / 4 \cdot \max\{4.9687; 4.9\} = 95699 \text{ Н} \cdot \text{м}$					
		$C_2 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = \frac{4.5263 + 0.064022 \cdot 3.9434 + 0.15888 \cdot 3.9434^2 + (-0.021419) \cdot 3.9434^3 + 0.0010350 \cdot 3.9434^4}{3.9434^4} = 6.1862$					
						90651-20600-AM-02-220 РР	Лист
							82
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата			

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности у внешней кромки накладного кольца ( $\lambda_c = 3.9434$ ):

$$[M_{x2}] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{D_2}{4} \cdot \max\{C_2; 4.9\} = 177 \cdot (18 - 3.8)^2 \cdot 734 / 4 \cdot \max\{6.1862; 4.9\} = 40515 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

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

$$[M_x] = \min\{[M_{x1}; M_{x2}]\} = \min\{95699; 40515\} = 40515 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot (s + \chi_2 \cdot s_2 - c)}} = 419.8 / (2439.8 \cdot (18 + 1 \cdot 18 - 3.8))^{1/2} = 1.4977$$

$$C_3 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 8.4238$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности в месте пересечения штуцера с обечайкой ( $\lambda_c = 1.4977$ ):

$$[M_{y1}] = [\sigma] \cdot (s + \chi_2 \cdot s_2 - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_3; 4.9\} = 177 \cdot (18 + 1 \cdot 18 - 3.8)^2 \cdot 419.8 / 4 \cdot \max\{8.4238; 4.9\} = 1.6225 \cdot 10^5 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

$$C_3 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 23.386$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности у внешней кромки накладного кольца ( $\lambda_c = 3.9434$ ):

$$[M_{y2}] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{D_2}{4} \cdot \max\{C_3; 4.9\} = 177 \cdot (18 - 3.8)^2 \cdot 734 / 4 \cdot \max\{23.386; 4.9\} = 1.5316 \cdot 10^5 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, совпадающей с осью, при наличии накладного кольца:

$$[M_y] = \min\{[M_{y1}; M_{y2}]\} = \min\{1.6225 \cdot 10^5; 1.5316 \cdot 10^5\} = 1.5316 \cdot 10^5 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

Прочность от действия изгибающих моментов :

$$\Phi_b = \sqrt{\left(\frac{M_x}{[M_x]}\right)^2 + \left(\frac{M_y}{[M_y]}\right)^2} = ((16300 / 40515)^2 + (16300 / 1.5316 \cdot 10^5)^2)^{1/2} = 0.41616$$

Условие прочности:  $\Phi_b \leq 1$

$0.41616 \leq 1.0$ . **Условие прочности выполнено.**

Прочность от совместного действия нагрузок :

$$\sqrt{\left[\max\left\{\left|\frac{\Phi_p}{C_4} + \Phi_z\right|; \left|\Phi_z\right|; \left|\frac{\Phi_p}{C_4} - 0.2 \cdot \Phi_z\right|\right\}\right]^2 + \Phi_b^2} = ((\max\{0.78347 / 1 + 0.064422; 0.064422; 0.78347 / 1 - 0.2 \cdot 0.064422\})^2 + 0.41616^2)^{1/2} = 0.94452$$

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

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

$0.94452 \leq 1.0$ . **Условие прочности выполнено.**

Максимальные продольные растягивающие напряжения в штуцере :

$$\sigma_1 = \frac{p \cdot (d + s_1)}{4 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{4 \cdot \sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{\pi \cdot (d + s_1)^2 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{F_z}{\pi \cdot (d + s_1) \cdot (s_1 - c_s)} = \frac{1.6313 \cdot (398 + 18) / (4 \cdot (18 - 3.8)) + 4 \cdot (16300^2 + 16300^2)^{1/2} / (3.1416 \cdot (398 + 18)^2 \cdot (18 - 3.8)) + 10000 / (3.1416 \cdot (398 + 18) \cdot (18 - 3.8))}{1} = 24.43 \text{ МПа}$$

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

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

$24.43 \text{ МПа} \leq 177 \text{ МПа}$ . **Условие прочности выполнено.**

$$\frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{[M]} + \frac{|F_z|}{[F]} = (16300^2 + 16300^2)^{1/2} / 3.237 \cdot 10^5 + |0| / 3.2548 \cdot 10^6 = 0.071213$$

Если  $F_z$  растягивающая продольная сила, то  $F_z$  следует принять равной нулю.

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

$0.071213 \leq 1.0$ . **Условие устойчивости выполнено.**

Взам. инв. №				
Подп. и дата				
Инв. № подл.				
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата

90651-20600-AM-02-220 РР

Лист

83

### Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)

**Условия нагружения при испытаниях:**

Расчётная температура, T: 20 °C

Расчётное внутреннее избыточное давление, р: 2.2696 МПа

## Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ 34233.3-2017

## Свойства материала элемента, несущего штуцер

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

$$[\sigma]^{20} = \frac{R_e / 20}{n_T} = 300 / 1.1 = 272.73 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 20 °С:

 $E = 1.99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ 

## Свойства материала штуцера

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

$$[\sigma]^{20_1} = \frac{R_e / 20}{n_T} = 300 / 1.1 = 272.73 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 20 °C:

$$E_1 = 1.99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

## Свойства материала кольца

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

$$[\sigma]^{20_2} = \frac{R_e / 20}{n_T} = 300 / 1.1 = 272.73 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 20 °C:

$$E_2 = 1.99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Расчётная толщина стенки штуцера :

$$s_{\text{p}} + c_s = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma_1 \cdot \omega_1 - p]} + c_s = 2.2696 \cdot (398 + 2 \cdot 3.8) / (2 \cdot 272.73 \cdot 1 - 2.2696) + 3.8 = 5.4947 \text{ mm}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера :

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = \frac{2 \cdot 272.73 \cdot 1 \cdot (18 - 3.8)}{(398 + 18 + 3.8)} = 18.45 \text{ МПа}$$

$$18.45 \text{ МПа} \geq 2.2696 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено.**

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$$D_p = D = 2400 \text{ mm}$$

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера :

$$S_D = 10.028 \text{ mm}$$

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

$$d_p = d + 2 \cdot c_s = 398 + 2 \cdot 3.8 = 405.6 \text{ mm}$$

Максимальный диаметр отверстия:

$$d_{\max} = \begin{cases} D & \text{— для отверстий в цилиндрических обечайках} \\ D_k & \text{— для отверстий в конических обечайках} \\ 0.6 \cdot D & \text{— для отверстий в выпуклых днищах} \end{cases} = 2400 \text{ мм}$$

Расчетная толщина стенки обечайки, перехода или днища для определения диаметра отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$S_{pri} = S_p = 10.028\text{mm}$$

Наибольший допустимый диаметр одиночного отверстия, не требующего дополнительного укрепления при наличии избыточной толщины стенки сосуда:

Взам. инв. №	Расчётный диаметр отверстия (ось штуцера совпадает с нормалью к поверхности в центре отверстия):			
	$d_p = d + 2 \cdot c_s = 398 + 2 \cdot 3.8 = 405.6 \text{ мм}$			
Подп. и дата	Максимальный диаметр отверстия:			
	$d_{\max} = \begin{cases} D & \text{— для отверстий в цилиндрических обечайках— для отверстий в конических обечайках — для от-} \\ D_k & \text{верстий в выпуклых днищах} \end{cases} = 2400\text{мм}$			
Инв. № подл.	Расчетная толщина стенки обечайки, перехода или днища для определения диаметра отверстия, не требующего дополнительного укрепления:			
	$s_{pn} = s_p = 10.028\text{мм}$			
Наибольший допустимый диаметр одиночного отверстия, не требующего дополнительного укрепления при наличии избыточной толщины стенки сосуда:				
90651-20600-AM-02-220 PP				
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата

$$d_0 = \min \left\{ 2 \cdot \left( \frac{s-c}{s_{pn}} - 0.8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s-c)}; d_{max} + 2 \cdot c_s \right\} = \min \{ 2 \cdot ((18-3.8) / 10.028 - 0.8) \cdot (2400 \cdot (18-3.8))^{1/2}; 2400 + 2 \cdot 3.8 \} = 227.45 \text{ мм}$$

Ширина зоны укрепления :

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s-c)} = (2400 \cdot (18-3.8))^{1/2} = 184.61 \text{ мм}$$

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

$$L_k = 383 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления :

$$l_p = L_0 = 184.61 \text{ мм}$$

Расчётная длина внешней части штуцера :

$$l_{1p} = \min \{ l_1; 1.25 \cdot \sqrt{(d+2 \cdot c_s) \cdot (s_1-c_s)} \} = \min \{ 170; 1.25 \cdot ((398+2 \cdot 3.8) \cdot (18-3.8))^{1/2} \} = 94.864 \text{ мм}$$

### Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера :

$$\chi_1 = \min \left\{ 1.0; \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1.0, 272.73 / 272.73 \} = 1$$

Расчётная ширина кольца :

$$l_{2p} = \min \{ l_2; \sqrt{D_p \cdot (s_2+s-c)} \} = \min \{ 150; (2400 \cdot (18+18-3.8))^{1/2} \} = 150 \text{ мм}$$

Для накладного кольца :

$$\chi_2 = \min \left\{ 1.0; \frac{[\sigma]_2}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1.0, 272.73 / 272.73 \} = 1$$

Расчётная длина внутренней части штуцера :

$$l_{3p} = \min \{ l_3; 0.5 \cdot \sqrt{(d+2 \cdot c_s) \cdot (s_3-c_s-c_{s1})} \} = \min \{ 0; 0.5 \cdot ((398+2 \cdot 3.8) \cdot (18-3.8-0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления :

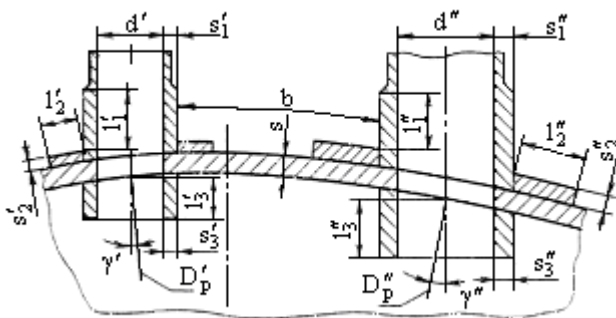
$$d_{op} = 0.4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s-c)} = 0.4 \cdot (2400 \cdot (18-3.8))^{1/2} = 73.843 \text{ мм}$$

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

$$= \min \{ 1; [1 + (94.864 \cdot (18-3.8) \cdot 1 + 150 \cdot 18 \cdot 1 + 0 \cdot (18-3.8-0) \cdot 1) / (184.61 \cdot (18-3.8))] / [1 + 0.5 \cdot (405.6 - 73.843) / 184.61 + 1 \cdot (398+2 \cdot 3.8) / 2400 \cdot 1 / 1 \cdot 94.864 / 184.61] \} = 1.2813$$

$$= 1$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s-c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s-c) \cdot V} = 2 \cdot 1 \cdot (18-3.8) \cdot 1 \cdot 272.73 \cdot 1 / [2400 + (18-3.8) \cdot 1] = 3.2083 \text{ МПа}$$



Отверстие считается одиночным, если ближайшее к нему отверстие Измерение температуры (Т1) не оказывает на него влияния, т.е. расстояние между наружными поверхностями соответствующих штуцеров удовлетворяет условию:

90651-20600-AM-02-220 PP

Лист

85







## Выход продукта (N2)

### Исходные данные

Элемент:

Условное обозначение (метка)

Элемент, несущий штуцер:

Тип элемента, несущего штуцер:

Тип штуцера:

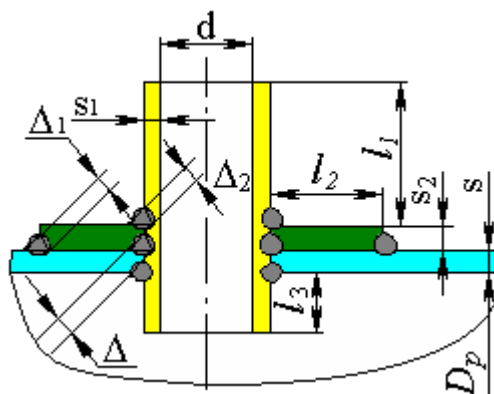
Выход продукта (N2)

N2

Обечайка цилиндрическая

Обечайка цилиндрическая

Проходящий с накладным  
кольцом



Материал несущего элемента:

Толщина стенки несущего элемента,  $s$ :

Сумма прибавок к стенке несущего элемента,  $s$ :

Материал штуцера:

Внутренний диаметр штуцера,  $d$ :

Толщина стенки штуцера,  $s_1$ :

Сумма прибавок к толщине стенки штуцера (включая коррозию),  $s_s$ :

Длина штуцера,  $l_1$ :

09Г2С Лист

18мм

3.8 мм

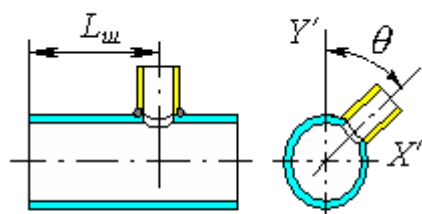
09Г2С Лист

398 мм

18 мм

3.8 мм

170 мм



Смещение штуцера,  $L_{ш}$ :

Угол поворота штуцера,  $\theta$ :

Длина внутр. части штуцера,  $l_3$ :

Прибавка на коррозию,  $s_{s1}$ :

Материал кольца:

Ширина кольца,  $l_2$ :

Толщина кольца,  $s_2$ :

Минимальный размер сварного шва,  $\Delta$ :

Минимальный размер сварного шва,  $\Delta_1$ :

Минимальный размер сварного шва,  $\Delta_2$ :

Расчётные параметры размещения штуцера:

540 мм

270 °

100 мм

0 мм

09Г2С Лист

150 мм

18 мм

18 мм

18 мм

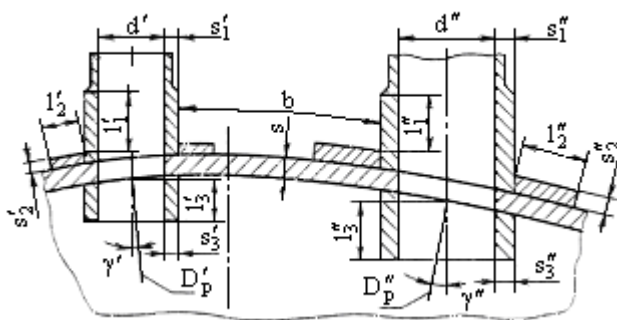
18 мм

Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	90651-20600-AM-02-220 РР	Лист 87
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата		
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата		





$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 1 \cdot (18 - 3.8) \cdot 1 \cdot 177 \cdot 1 / [2400 + (18 - 3.8) \cdot 1] = 2.0822 \text{ МПа}$$



Отверстие считается одиночным, если ближайшее к нему отверстие Измерение уровня (L4) не оказывает на него влияния, т.е. расстояние между наружными поверхностями соответствующих штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (2400 \cdot (18 - 3.8))^{1/2} + (2400 \cdot (18 - 3.8))^{1/2} = 369.22 \text{ мм}$$

Условие выполнено, дальнейших расчётов укреплений не требуется.

Допускаемое давление  $[p] = 2.0822 \text{ МПа}$

$2.0822 \text{ МПа} \geq 1.6313 \text{ МПа}$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено.**

Площадь, необходимая для укрепления отверстия:

$$A_r = 0.5 \cdot (d_p - d_{op}) \cdot s_p = 0.5 \cdot (405.6 - 73.843) \cdot 11.111 = 1843.1 \text{ мм}^2$$

Располагаемая площадь укрепления одиночного отверстия:

$$A_a = l_p \cdot (s_1 - s_p - c_s) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3 + l_p \cdot (s - s_p - c) \cdot \chi_4$$

$$= 94.864 \cdot (18 - 1.8778 - 3.8) \cdot 1 + 150 \cdot 18 \cdot 1 + 37.946 \cdot (18 - 3.8 - 0) \cdot 1 + 184.61 \cdot (18 - 11.111 - 3.8) \cdot 1$$

$$= 4978 \text{ мм}^2$$

$$A_r = 1843.1 \text{ мм}^2 \leq 4978 \text{ мм}^2$$

Заключение: **Условие прочности выполнено.**

### Расчет давления испытаний

Пробное давление при гидравлическом испытании, при работе элемента под внутренним давлением:

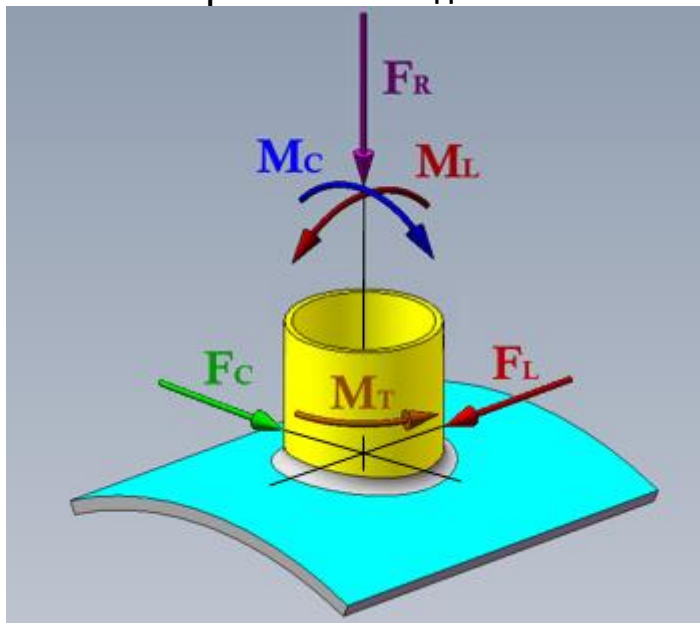
$$P_{\text{пр}} = 1.25 \cdot p \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]_t} = 1.25 \cdot 1.6313 \cdot 196 / 177 = 2.2581 \text{ МПа}$$

Пробное давление при гидравлическом испытании, при работе элемента под внутренним давлением:

$$P_{\text{пр}} = 1.25 \cdot p \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]_t} = 1.25 \cdot 1.6313 \cdot 196 / 177 = 2.2581 \text{ МПа}$$

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №					
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	90651-20600-AM-02-220 РР	Лист	
						90	

Расчёт на прочность от воздействия внешних нагрузок по ГОСТ 34233.3-2017



Радиальная нагрузка,  $F_R$ : (-10000) Н

Окружной момент,  $M_C$ : 16300 Н·м

Продольный момент,  $M_L$ : 16300 Н·м

Крутящий момент,  $M_T$ : 16300 Н·м

Сдвиговая нагрузка,  $F_C$ : 10000 Н

Сдвиговая нагрузка,  $F_L$ : 10000 Н

Средний диаметр обечайки у отверстия :

$$D_c = D_p + s + c + s_2 = 2400 + 18 + 3.8 + 18 = 2439.8 \text{ мм}$$

Эквивалентная толщина обечайки около штуцера при  $l_2 < \sqrt{\frac{D_c}{2} \cdot (s + s_2)}$  :

$$s_3 = s + \min \left\{ s_2 \cdot \frac{l_2}{\sqrt{\frac{D_c}{2} \cdot (s + s_2)}}; s_2 \right\} \cdot \lambda_2 - c = 18 + \min \{ 18 \cdot 150 / (2439.8 / 2 \cdot (18 + 18))^{1/2}; 18 \} \cdot 1 - 3.8 = 27.084 \text{ мм}$$

Средний диаметр штуцера :

$$d_c = d + s_1 + c_s = 398 + 18 + 3.8 = 419.8 \text{ мм}$$

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot s_3}} = 419.8 / (2439.8 \cdot 27.084)^{1/2} = 1.6331$$

Прочность от действия давления :

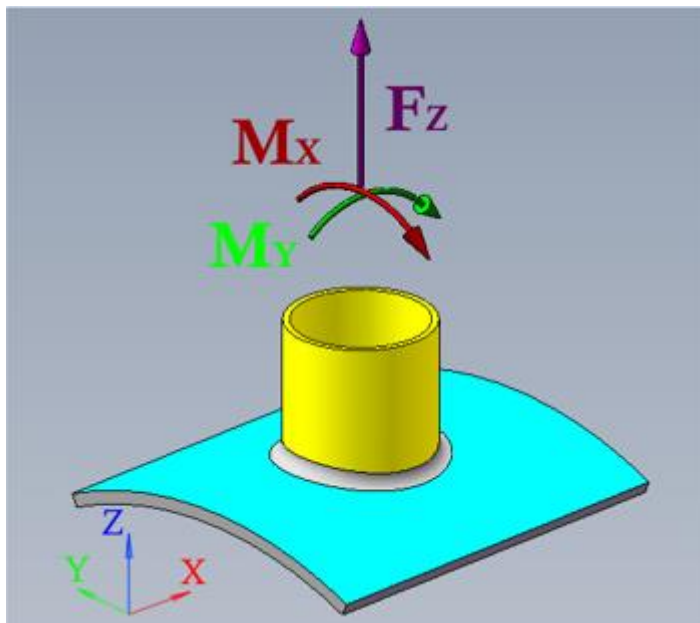
$$\Phi_p = \left| \frac{p}{[p]} \right| = |1.6313 / 2.0822| = 0.78347$$

Условие прочности:  $\Phi_p \leq 1$

$0.78347 \leq 1.0$ . Условие прочности выполнено.

Взам. инв. №		Подп. и дата		Инв. № подл.		90651-20600-AM-02-220 РР				Лист
										91
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата						

Расчетная схема по ГОСТ 34233.3-2017



Осевое растягивающее усилие, действующее на штуцер :

$$F_z = -F_R = -(-10000) = 10000 \text{ Н}$$

$$C_1 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 0.60072 + 0.95196 \cdot 1.6331 + 0.0051958 \cdot 1.6331^2 + (-0.0014064) \cdot 1.6331^3 + 0 \cdot 1.6331^4 = 2.1631$$

Допускаемое осевое усилие на штуцер из условия прочности в месте пересечения штуцера с обечайкой ( $\lambda_c = 1.6331$ ):

$$[F_{z1}] = [\sigma] \cdot (s + \chi_2 \cdot s_2 - c)^2 \cdot \max\{C_1; 1.81\} = 177 \cdot (18 + 1 \cdot 18 - 3.8)^2 \cdot \max\{2.1631; 1.81\} = 3.9697 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Наружный диаметр накладного кольца :

$$D_2 = d + 2 \cdot s_1 + 2 \cdot l_2 = 398 + 2 \cdot 18 + 2 \cdot 150 = 734 \text{ мм}$$

$$\lambda_c = \frac{D_2}{\sqrt{D_c \cdot (s - c)}} = 734 / (2439.8 \cdot (18 - 3.8)^{1/2}) = 3.9434$$

$$C_1 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 0.60072 + 0.95196 \cdot 3.9434 + 0.0051958 \cdot 3.9434^2 + (-0.0014064) \cdot 3.9434^3 + 0 \cdot 3.9434^4 = 4.3493$$

Допускаемое осевое усилие на штуцер из условия прочности у внешней кромки накладного кольца ( $\lambda_c = 3.9434$ ):

$$[F_{z2}] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \max\{C_1; 1.81\} = 177 \cdot (18 - 3.8)^2 \cdot \max\{4.3493; 1.81\} = 1.5523 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Допускаемое осевое усилие на штуцер при наличии накладного кольца:

$$[F_z] = \min\{[F_{z1}]; [F_{z2}]\} = \min\{3.9697 \cdot 10^5; 1.5523 \cdot 10^5\} = 1.5523 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Прочность от действия осевой нагрузки :

$$\Phi_z = \left| \frac{F_z}{[F_z]} \right| = |10000 / 1.5523 \cdot 10^5| = 0.064422$$

Условие прочности:  $\Phi_z \leq 1$

$0.064422 \leq 1.0$ . Условие прочности выполнено.

Окружной приведенный момент, действующий на штуцер :

$$M_x = M_c = 16300 \text{ Н·м}$$

Продольный приведенный момент, действующий на штуцер :

$$M_y = M_L = 16300 \text{ Н·м}$$

$$C_2 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 4.5263 + 0.064022 \cdot 1.6331 + 0.15888 \cdot 1.6331^2 + (-0.021419) \cdot 1.6331^3 + 0.0010350 \cdot 1.6331^4 = 4.9687$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности в месте пересечения штуцера с обечайкой ( $\lambda_c = 1.6331$ ):

$$[M_{x1}] = [\sigma] \cdot (s + \chi_2 \cdot s_2 - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_2; 4.9\} = 177 \cdot (18 + 1 \cdot 18 - 3.8)^2 \cdot 419.8 / 4 \cdot \max\{4.9687; 4.9\} = 95699 \text{ Н·м}$$

$$C_2 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 4.5263 + 0.064022 \cdot 3.9434 + 0.15888 \cdot 3.9434^2 + (-0.021419) \cdot 3.9434^3 + 0.0010350 \cdot 3.9434^4 = 6.1862$$

Взам. инв. №		$\Phi_x = \left  \frac{-x}{[F_x]} \right  =  10000 / 1.5523 \cdot 10^5  = 0.064422$					
		Условие прочности: $\Phi_x \leq 1$ $0.064422 \leq 1.0$ . Условие прочности выполнено.					
Подп. и дата		Окружной приведенный момент, действующий на штуцер : $M_x = M_c = 16300 \text{ Н} \cdot \text{м}$					
		Продольный приведенный момент, действующий на штуцер : $M_y = M_L = 16300 \text{ Н} \cdot \text{м}$					
Инв. № подл.		$C_2 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = \frac{4.5263 + 0.064022 \cdot 1.6331 + 0.15888 \cdot 1.6331^2 + (-0.021419) \cdot 1.6331^3 + 0.0010350 \cdot 1.6331^4}{1.6331^4} = 4.9687$					
		Допускаемый изгибающий момент из условия прочности в месте пересечения штуцера с обечайкой ( $\lambda_c = 1.6331$ ):					
		$[M_{x1}] = [\sigma] \cdot \{s + \chi_2 \cdot s_2 - c\}^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_2; 4.9\} = 177 \cdot (18 + 1 \cdot 18 - 3.8)^2 \cdot 419.8 / 4 \cdot \max\{4.9687; 4.9\} = 95699 \text{ Н} \cdot \text{м}$					
		$C_2 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = \frac{4.5263 + 0.064022 \cdot 3.9434 + 0.15888 \cdot 3.9434^2 + (-0.021419) \cdot 3.9434^3 + 0.0010350 \cdot 3.9434^4}{3.9434^4} = 6.1862$					
						90651-20600-AM-02-220 РР	Лист
							92
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата			

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности у внешней кромки накладного кольца ( $\lambda_c = 3.9434$ ):

$$[M_{x2}] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{D_2}{4} \cdot \max\{C_2; 4.9\} = 177 \cdot (18 - 3.8)^2 \cdot 734 / 4 \cdot \max\{6.1862; 4.9\} = 40515 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

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

$$[M_x] = \min\{[M_{x1}; M_{x2}]\} = \min\{95699; 40515\} = 40515 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot (s + \chi_2 \cdot s_2 - c)}} = 419.8 / (2439.8 \cdot (18 + 1 \cdot 18 - 3.8))^{1/2} = 1.4977$$

$$C_3 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 8.4238$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности в месте пересечения штуцера с обечайкой ( $\lambda_c = 1.4977$ ):

$$[M_{y1}] = [\sigma] \cdot (s + \chi_2 \cdot s_2 - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_3; 4.9\} = 177 \cdot (18 + 1 \cdot 18 - 3.8)^2 \cdot 419.8 / 4 \cdot \max\{8.4238; 4.9\} = 1.6225 \cdot 10^5 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

$$C_3 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 23.386$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности у внешней кромки накладного кольца ( $\lambda_c = 3.9434$ ):

$$[M_{y2}] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{D_2}{4} \cdot \max\{C_3; 4.9\} = 177 \cdot (18 - 3.8)^2 \cdot 734 / 4 \cdot \max\{23.386; 4.9\} = 1.5316 \cdot 10^5 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, совпадающей с осью, при наличии накладного кольца:

$$[M_y] = \min\{[M_{y1}; M_{y2}]\} = \min\{1.6225 \cdot 10^5; 1.5316 \cdot 10^5\} = 1.5316 \cdot 10^5 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

Прочность от действия изгибающих моментов :

$$\Phi_b = \sqrt{\left(\frac{M_x}{[M_x]}\right)^2 + \left(\frac{M_y}{[M_y]}\right)^2} = ((16300 / 40515)^2 + (16300 / 1.5316 \cdot 10^5)^2)^{1/2} = 0.41616$$

Условие прочности:  $\Phi_b \leq 1$

$0.41616 \leq 1.0$ . Условие прочности выполнено.

Прочность от совместного действия нагрузок :

$$\sqrt{\left[\max\left\{\left|\frac{\Phi_p}{C_4} + \Phi_z\right|; \left|\Phi_z\right|; \left|\frac{\Phi_p}{C_4} - 0.2 \cdot \Phi_z\right|\right\}\right]^2 + \Phi_b^2} = ((\max\{0.78347 / 1 + 0.064422; 0.064422; 0.78347 / 1 - 0.2 \cdot 0.064422\})^2 + 0.41616^2)^{1/2} = 0.94452$$

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

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

$0.94452 \leq 1.0$ . Условие прочности выполнено.

Максимальные продольные растягивающие напряжения в штуцере :

$$\sigma_1 = \frac{p \cdot (d + s_1)}{4 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{4 \cdot \sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{\pi \cdot (d + s_1)^2 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{F_z}{\pi \cdot (d + s_1) \cdot (s_1 - c_s)} = \frac{1.6313 \cdot (398 + 18) / (4 \cdot (18 - 3.8)) + 4 \cdot ((16300^2 + 16300^2)^{1/2}) / (3.1416 \cdot (398 + 18)^2 \cdot (18 - 3.8)) + 10000 / (3.1416 \cdot (398 + 18) \cdot (18 - 3.8))}{1} = 24.43 \text{ МПа}$$

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

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

$24.43 \text{ МПа} \leq 177 \text{ МПа}$ . Условие прочности выполнено.

$$\frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{[M]} + \frac{|F_z|}{[F]} = (16300^2 + 16300^2)^{1/2} / 3.237 \cdot 10^5 + |0| / 3.2548 \cdot 10^6 = 0.071213$$

Если  $F_z$  растягивающая продольная сила, то  $F_z$  следует принять равной нулю.

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

$0.071213 \leq 1.0$ . Условие устойчивости выполнено.

Взам. инв. №					
Подп. и дата					
Инв. № подл.					
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	

90651-20600-AM-02-220 РР

Лист

93





$$d_0 = \min \left\{ 2 \cdot \left( \frac{s-c}{s_{pn}} - 0.8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s-c)}; d_{\max} + 2 \cdot c_s \right\} = \min \{ 2 * ((18 - 3.8) / 10.028 - 0.8) * (2400 * (18 - 3.8))^{1/2}; 2400 + 2 * 3.8 \} = 227.45 \text{ мм}$$

Ширина зоны укрепления :

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s-c)} = (2400 * (18 - 3.8))^{1/2} = 184.61 \text{ мм}$$

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

$$L_k = 383 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления :

$$l_p = L_0 = 184.61 \text{ мм}$$

Расчётная длина внешней части штуцера :

$$l_{1p} = \min \{ l_1; 1.25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \} = \min \{ 170; 1.25 * ((398 + 2 * 3.8) * (18 - 3.8))^{1/2} \} = 94.864 \text{ мм}$$

### Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера :

$$\chi_1 = \min \left\{ 1.0; \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1.0, 272.73 / 272.73 \} = 1$$

Расчётная ширина кольца :

$$l_{2p} = \min \{ l_2; \sqrt{D_p \cdot (s_2 + s - c)} \} = \min \{ 150; (2400 * (18 + 18 - 3.8))^{1/2} \} = 150 \text{ мм}$$

Для накладного кольца :

$$\chi_2 = \min \left\{ 1.0; \frac{[\sigma]_2}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1.0, 272.73 / 272.73 \} = 1$$

Расчётная длина внутренней части штуцера :

$$l_{3p} = \min \{ l_3; 0.5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})} \} = \min \{ 100; 0.5 * ((398 + 2 * 3.8) * (18 - 3.8 - 0))^{1/2} \} = 37.946 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления :

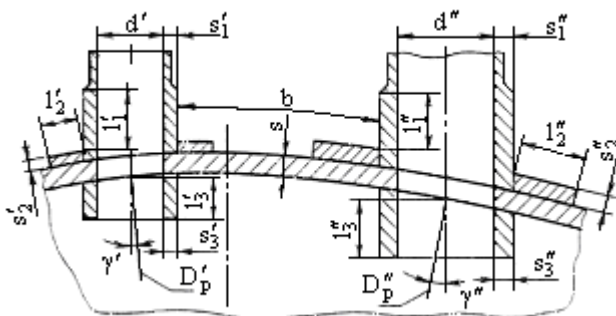
$$d_{op} = 0.4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s-c)} = 0.4 * (2400 * (18 - 3.8))^{1/2} = 73.843 \text{ мм}$$

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

$$= \min \{ 1; [1 + (94.864 * (18 - 3.8) * 1 + 150 * 18 * 1 + 37.946 * (18 - 3.8 - 0) * 1) / (184.61 * (18 - 3.8))] / [1 + 0.5 * (405.6 - 73.843) / 184.61 + 1 * (398 + 2 * 3.8) / 2400 * 1 / 1 * 94.864 / 184.61] = 1.3848 \}$$

$$= 1$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s-c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s-c) \cdot V} = 2 * 1 * (18 - 3.8) * 1 * 272.73 * 1 / [2400 + (18 - 3.8) * 1] = 3.2083 \text{ МПа}$$



Отверстие считается одиночным, если ближайшее к нему отверстие Измерение уровня (L4) не оказывает на него влияния, т.е. расстояние между наружными поверхностями соответствующих штуцеров удовлетворяет условию:

Взам. инв. №		Подп. и дата		Инв. № подл.	
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	

90651-20600-AM-02-220 PP

Лист

95

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №

Этот документ является собственностью "НЕФТЕХИМПРОЕКТ" и не подлежит копированию и распространению без его согласия

НЕФТЕХИМПРОЕКТ NEFTECHIMPROEKT					МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ					РР	
$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (2400 \cdot (18 - 3.8))^{1/2} + (2400 \cdot (18 - 3.8))^{1/2} = 369.22 \text{ мм}$ <p>Условие выполнено, дальнейших расчётов укреплений не требуется.</p> <p>Допускаемое давление [р] = 3.2083 МПа</p> <p>3.2083 МПа ≥ 2.2696 МПа</p> <p>Заключение: <b>Условие прочности и устойчивости выполнено.</b></p> <p>Площадь, необходимая для укрепления отверстия:</p> $A_r = 0.5(d_p - d_{op}) \cdot s_p = 0.5 \cdot (405.6 - 73.843) \cdot 10.028 = 1663.4 \text{ мм}^2$ <p>Располагаемая площадь укрепления одиночного отверстия:</p> $A_a = l_p \cdot (s_1 - s_p - c_s) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3 + l_p \cdot (s - s_p - c) \cdot \chi_4$ $= 94.864 \cdot (18 - 1.6947 - 3.8) \cdot 1 + 150 \cdot 18 \cdot 1 + 37.946 \cdot (18 - 3.8 - 0) \cdot 1 + 184.61 \cdot (18 - 10.028 - 3.8) \cdot 1$ $= 5195.3 \text{ мм}^2$ <p><math>A_r = 1663.4 \text{ мм}^2 \leq 5195.3 \text{ мм}^2</math></p> <p>Заключение: <b>Условие прочности выполнено.</b></p>											
					90651-20600-AM-02-220 РР					Лист	
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата						96	



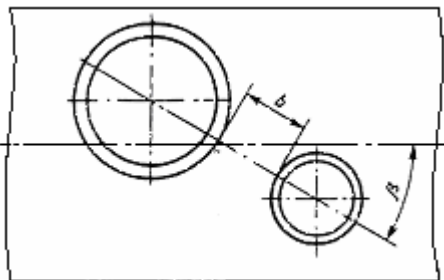
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата

Взам. инв. №	Подп. и дата
--------------	--------------

Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата
------	------	--------	-------	------

Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата
------	------	--------	-------	------

Ближайший штуцер



Название штуцера:

Измерение уровня (L3)

Расстояние до стенки ближайшего штуцера, b:

624.36 мм

Угол β:

121.96 °

Коэффициенты прочности сварных швов:

Продольный шов штуцера:

$\phi_1 = 1$

Шов обечайки в зоне врезки штуцера:

$\phi = 1$

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$D_p = D = 2400$  мм

Нагрузки, приложенные к патрубку, **не передаются** на соседние элементы аппарата

### Расчёт в рабочих условиях

#### Условия нагружения:

Расчётная температура, T: 100 °C

Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 1.6 МПа

#### Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ 34233.3-2017

#### Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Лист при температуре 100 °C (рабочие условия):

$[\sigma] = 177$  МПа

Модуль продольной упругости при температуре 100 °C:

$E = 1.91 \cdot 10^5$  МПа

#### Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Труба при температуре 100 °C (рабочие условия):

$[\sigma]_1 = 160$  МПа

Модуль продольной упругости при температуре 100 °C:

$E_1 = 1.91 \cdot 10^5$  МПа

#### Свойства материала кольца

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Лист при температуре 100 °C (рабочие условия):

$[\sigma]_2 = 177$  МПа

Модуль продольной упругости при температуре 100 °C:

$E_2 = 1.91 \cdot 10^5$  МПа

Расчётная толщина стенки штуцера :

$$s_p + c_s = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \phi_1 - p} + c_s = \frac{1.6 \cdot (146 + 2 \cdot 3)}{2 \cdot 160 \cdot 1 - 1.6} + 3 = 3.7638 \text{ мм}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера :

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \phi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = \frac{2 \cdot 160 \cdot 1 \cdot (11 - 3)}{146 + 11 + 3} = 16 \text{ МПа}$$

16 МПа  $\geq$  1.6 МПа

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено.**

90651-20600-AM-02-220 РР

Лист

98

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$$D_p = D = 2400 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера :

$$s_p = 10.897 \text{ мм}$$

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

$$d_p = d + 2 \cdot c_s = 146 + 2 \cdot 3 = 152 \text{ мм}$$

Максимальный диаметр отверстия:

$$d_{\max} = \begin{cases} D & \text{— для отверстий в цилиндрических обечайках} \\ D_k & \text{— для отверстий в конических обечайках} \\ 0.6 \cdot D & \text{— для отверстий в выпуклых днищах} \end{cases} = 2400 \text{ мм}$$

Расчетная толщина стенки обечайки, перехода или днища для определения диаметра отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$s_{pn} = s_p = 10.897 \text{ мм}$$

Наибольший допустимый диаметр одиночного отверстия, не требующего дополнительного укрепления при наличии избыточной толщины стенки сосуда:

$$d_0 = \min \left\{ 2 \cdot \left( \frac{s - c}{s_{pn}} - 0.8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)}; d_{\max} + 2 \cdot c_s \right\} = \min \{ 2 \cdot ((18 - 3.8) / 10.897 - 0.8) \cdot (2400 \cdot (18 - 3.8))^{1/2}; 2400 + 2 \cdot 3 \} = 185.77 \text{ мм}$$

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

Ширина зоны укрепления :

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (2400 \cdot (18 - 3.8))^{1/2} = 184.61 \text{ мм}$$

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

$$L_k = 366 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления :

$$l_p = L_0 = 184.61 \text{ мм}$$

Расчётная длина внешней части штуцера :

$$l_{1p} = \min \{ l_1; 1.25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \} = \min \{ 159; 1.25 \cdot ((146 + 2 \cdot 3) \cdot (11 - 3))^{1/2} \} = 43.589 \text{ мм}$$

### Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера :

$$\chi_1 = \min \left\{ 1.0; \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1.0, 160 / 177 \} = 0.90395$$

Расчётная ширина кольца :

$$l_{2p} = \min \{ l_2; \sqrt{D_p \cdot (s_2 + s - c)} \} = \min \{ 150; (2400 \cdot (18 + 18 - 3.8))^{1/2} \} = 150 \text{ мм}$$

Для накладного кольца :

$$\chi_2 = \min \left\{ 1.0; \frac{[\sigma]_2}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1.0, 177 / 177 \} = 1$$

Расчётная длина внутренней части штуцера :

$$l_{3p} = \min \{ l_3; 0.5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})} \} = \min \{ 75; 0.5 \cdot ((146 + 2 \cdot 3) \cdot (11 - 3 - 0))^{1/2} \} = 17.436 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления :

$$d_{op} = 0.4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0.4 \cdot (2400 \cdot (18 - 3.8))^{1/2} = 73.843 \text{ мм}$$

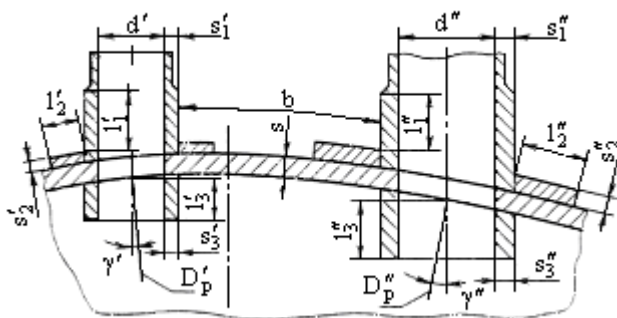
$$V = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l_{1p} \cdot (s_1 - c_s) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3}{l_p \cdot (s - c)}}{1 + 0.5 \cdot \frac{d_p - d_{op}}{l_p} + K_1 \cdot \frac{d + 2 \cdot c_s}{D_p} \cdot \frac{\varphi}{\varphi_1} \cdot \frac{l_{1p}}{l_p}}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

$$= \min \{ 1; [1 + (43.589 \cdot (11 - 3) \cdot 0.90395 + 150 \cdot 18 \cdot 1 + 17.436 \cdot (11 - 3 - 0) \cdot 0.90395) / (184.61 \cdot (18 - 3.8))] / [1 + 0.5 \cdot (152 - 73.843) / 184.61 + 1 \cdot (146 + 2 \cdot 3) / 2400 \cdot 1 / 1 \cdot 43.589 / 184.61] \} = 1.7921$$

$$= 1$$

Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	90651-20600-AM-02-220 РР	Лист 99
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата		

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 1 \cdot (18 - 3.8) \cdot 1 \cdot 177 \cdot 1 / [2400 + (18 - 3.8) \cdot 1] = 2.0822 \text{ МПа}$$



Отверстие считается одиночным, если ближайшее к нему отверстие Измерение уровня (L3) не оказывает на него влияния, т.е. расстояние между наружными поверхностями соответствующих штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (2400 \cdot (18 - 3.8))^{1/2} + (2400 \cdot (18 - 3.8))^{1/2} = 369.22 \text{ мм}$$

Условие выполнено, дальнейших расчётов укреплений не требуется.

Допускаемое давление  $[p] = 2.0822 \text{ МПа}$

$2.0822 \text{ МПа} \geq 1.6 \text{ МПа}$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено.**

Площадь, необходимая для укрепления отверстия:

$$A_r = 0.5 \cdot (d_p - d_{op}) \cdot s_p = 0.5 \cdot (152 - 73.843) \cdot 10.897 = 425.83 \text{ мм}^2$$

Располагаемая площадь укрепления одиночного отверстия:

$$A_a = 1_p \cdot (s_1 - s_p - c_s) \cdot \chi_1 + 1_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + 1_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3 + 1_p \cdot (s - s_p - c) \cdot \chi_4$$

$$= 43.589 \cdot (11 - 0.76382 - 3) \cdot 0.90395 + 150 \cdot 18 \cdot 1 + 17.436 \cdot (11 - 3 - 0) \cdot 0.90395 + 184.61 \cdot (18 - 10.897 - 3.8) \cdot 1$$

$$= 3721 \text{ мм}^2$$

$$A_r = 425.83 \text{ мм}^2 \leq 3721 \text{ мм}^2$$

Заключение: **Условие прочности выполнено.**

### Расчет давления испытаний

Пробное давление при гидравлическом испытании, при работе элемента под внутренним давлением:

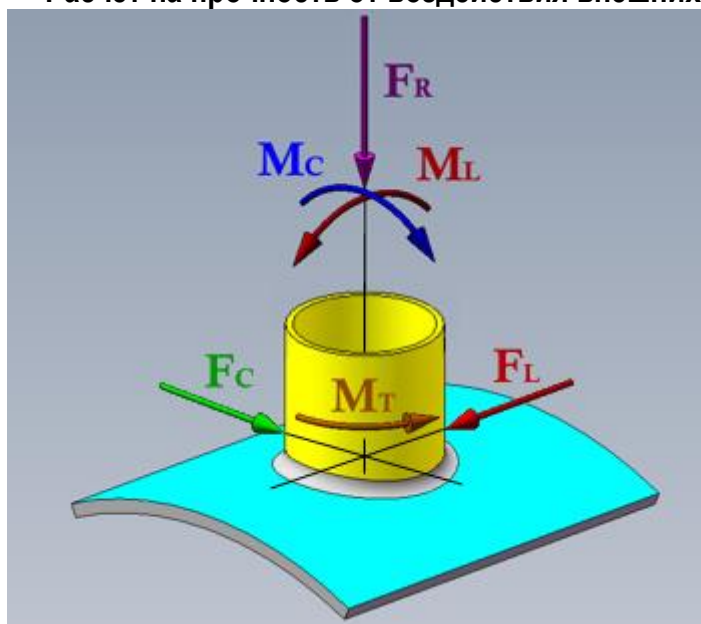
$$P_{\text{гп}} = 1.25 \cdot p \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]_t} = 1.25 \cdot 1.6 \cdot 183 / 160 = 2.2875 \text{ МПа}$$

Пробное давление при гидравлическом испытании, при работе элемента под внутренним давлением:

$$P_{\text{гп}} = 1.25 \cdot p \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]_t} = 1.25 \cdot 1.6 \cdot 196 / 177 = 2.2147 \text{ МПа}$$

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №					
					90651-20600-AM-02-220 РР	Лист	
						100	
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата			

## Расчёт на прочность от воздействия внешних нагрузок по ГОСТ 34233.3-2017



Радиальная нагрузка,  $F_R$ : (-3100) Н

Окружной момент,  $M_c$ : 3000 Н·м

Продольный момент,  $M_L$ : 3000 Н·м

Крутящий момент,  $M_T$ : 3000 Н·м

Сдвиговая нагрузка,  $F_c$ : 3100 Н

Сдвиговая нагрузка,  $F_L$ : 3100 Н

Средний диаметр обечайки у отверстия :

$$D_c = D_p + s + c + s_2 = 2400 + 18 + 3.8 + 18 = 2439.8 \text{ mm}$$

Эквивалентная толщина обечайки около штуцера при  $l_2 < \sqrt{\frac{D_c}{2} \cdot (s + s_2)}$ :

$$s_3 = s + \min \left\{ s_2 \cdot \frac{l_2}{\sqrt{\frac{D_c}{2} \cdot (s + s_2)}}; s_2 \cdot \chi_2 - C \right\} = 18 + \min \{ 18 \cdot 150 / (2439.8 / 2 \cdot (18 + 18))^{1/2}; 18 \cdot 1 - 3.8 \} = 27.084 \text{ mm}$$

Средний диаметр штуцера :

$$d_c = d + s_1 + c_s = 146 + 11 + 3 = 160 \text{ mm}$$

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot s_3}} = 160 / (2439.8 \cdot 27.084)^{1/2} = 0.62242$$

Прочность от действия давления :

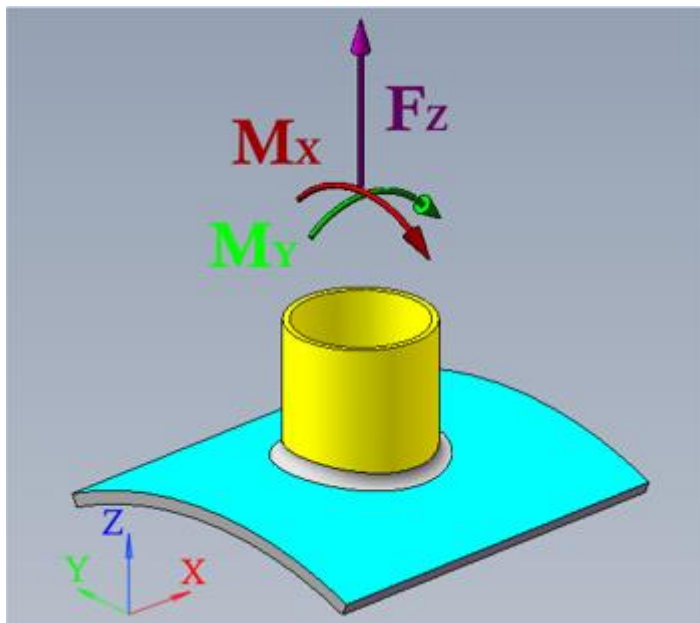
$$\Phi_p = \frac{|p|}{|p|} = |1.6 / 2.0822| = 0.76843$$

Условие прочности:  $\Phi_p \leq 1$

$0.76843 \leq 1.0$ . Условие прочности выполнено.

Взам. инв. №	Подп. и дата	Инв. № подл.	<p>Прочность от действия давления :</p> $\Phi_p = \left  \frac{p}{[p]} \right  =  1.6 / 2.0822  = 0.76843$ <p>Условие прочности: <math>\Phi_p \leq 1</math></p> <p>0.76843 ≤ 1.0. <span style="color: blue;">Условие прочности выполнено.</span></p>				
			Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата
			90651-20600-AM-02-220 PP				
			Лист 101				

Расчетная схема по ГОСТ 34233.3-2017



Осевое растягивающее усилие, действующее на штуцер :

$$F_z = -F_R = -(-3100) = 3100 \text{ Н}$$

$$C_1 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 0.60072 + 0.95196 \cdot 0.62242 + 0.0051958 \cdot 0.62242^2 + (-0.0014064) \cdot 0.62242^3 + 0 \cdot 0.62242^4 = 1.1949$$

Допускаемое осевое усилие на штуцер из условия прочности в месте пересечения штуцера с обечайкой ( $\lambda_c = 0.62242$ ):

$$[F_{z1}] = [\sigma] \cdot (s + \chi_2 \cdot s_2 - c)^2 \cdot \max\{C_1; 1.81\} = 177 \cdot (18 + 1 \cdot 18 - 3.8)^2 \cdot \max\{1.1949; 1.81\} = 3.3217 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Наружный диаметр накладного кольца :

$$D_2 = d + 2 \cdot s_1 + 2 \cdot l_2 = 146 + 2 \cdot 11 + 2 \cdot 150 = 468 \text{ мм}$$

$$\lambda_c = \frac{D_2}{\sqrt{D_c \cdot (s - c)}} = 468 / (2439.8 \cdot (18 - 3.8)^{1/2}) = 2.5143$$

$$C_1 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 0.60072 + 0.95196 \cdot 2.5143 + 0.0051958 \cdot 2.5143^2 + (-0.0014064) \cdot 2.5143^3 + 0 \cdot 2.5143^4 = 3.0048$$

Допускаемое осевое усилие на штуцер из условия прочности у внешней кромки накладного кольца ( $\lambda_c = 2.5143$ ):

$$[F_{z2}] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \max\{C_1; 1.81\} = 177 \cdot (18 - 3.8)^2 \cdot \max\{3.0048; 1.81\} = 1.0724 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Допускаемое осевое усилие на штуцер при наличии накладного кольца:

$$[F_z] = \min\{[F_{z1}]; [F_{z2}]\} = \min\{3.3217 \cdot 10^5; 1.0724 \cdot 10^5\} = 1.0724 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Прочность от действия осевой нагрузки :

$$\Phi_z = \left| \frac{F_z}{[F_z]} \right| = |3100 / 1.0724 \cdot 10^5| = 0.028907$$

Условие прочности:  $\Phi_z \leq 1$

$0.028907 \leq 1.0$ . Условие прочности выполнено.

Окружной приведенный момент, действующий на штуцер :

$$M_x = M_c = 3000 \text{ Н·м}$$

Продольный приведенный момент, действующий на штуцер :

$$M_y = M_L = 3000 \text{ Н·м}$$

$$C_2 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 4.5263 + 0.064022 \cdot 0.62242 + 0.15888 \cdot 0.62242^2 + (-0.021419) \cdot 0.62242^3 + 0.0010350 \cdot 0.62242^4 = 4.6227$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности в месте пересечения штуцера с обечайкой ( $\lambda_c = 0.62242$ ):

$$[M_{x1}] = [\sigma] \cdot (s + \chi_2 \cdot s_2 - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_2; 4.9\} = 177 \cdot (18 + 1 \cdot 18 - 3.8)^2 \cdot 160 / 4 \cdot \max\{4.6227; 4.9\} = 35970 \text{ Н·м}$$

$$C_2 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 4.5263 + 0.064022 \cdot 2.5143 + 0.15888 \cdot 2.5143^2 + (-0.021419) \cdot 2.5143^3 + 0.0010350 \cdot 2.5143^4 = 5.3926$$

Взам. инв. №		$\Phi_x = \left  \frac{-x}{[F_x]} \right  =  3100 / 1.0724 \cdot 10^5  = 0.028907$					
		Условие прочности: $\Phi_x \leq 1$ $0.028907 \leq 1.0$ . Условие прочности выполнено.					
Подп. и дата		Окружной приведенный момент, действующий на штуцер :					
		$M_x = M_c = 3000 \text{ Н} \cdot \text{м}$					
		Продольный приведенный момент, действующий на штуцер :					
		$M_y = M_L = 3000 \text{ Н} \cdot \text{м}$					
Инв. № подл.		$C_2 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 4.5263 + 0.064022 \cdot 0.62242 + 0.15888 \cdot 0.62242^2 + (-0.021419) \cdot 0.62242^3 + 0.0010350 \cdot 0.62242^4 = 4.6227$					
		Допускаемый изгибающий момент из условия прочности в месте пересечения штуцера с обечайкой ( $\lambda_c = 0.62242$ ):					
		$[M_{x1}] = [\sigma] \cdot (s + \chi_2 \cdot s_2 - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_2; 4.9\} = 177 \cdot (18 + 1 \cdot 18 - 3.8)^2 \cdot 160 / 4 \cdot \max\{4.6227; 4.9\} = 35970 \text{ Н} \cdot \text{м}$					
		$C_2 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 4.5263 + 0.064022 \cdot 2.5143 + 0.15888 \cdot 2.5143^2 + (-0.021419) \cdot 2.5143^3 + 0.0010350 \cdot 2.5143^4 = 5.3926$					
					90651-20600-AM-02-220 PP		Лист
							102
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата			



Допускаемый изгибающий момент из условия прочности у внешней кромки накладного кольца ( $\lambda_c = 2.5143$ ):

$$[M_{x2}] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{D_2}{4} \cdot \max\{C_2; 4.9\} = 177 \cdot (18 - 3.8)^2 \cdot 468 / 4 \cdot \max\{5.3926; 4.9\} = 22518 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

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

$$[M_x] = \min\{[M_{x1}; M_{x2}]\} = \min\{35970; 22518\} = 22518 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

$$\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c \cdot (s + \chi_2 \cdot s_2 - c)}} = 160 / (2439.8 \cdot (18 + 1 \cdot 18 - 3.8))^{1/2} = 0.57084$$

$$C_3 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 5.4088$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности в месте пересечения штуцера с обечайкой ( $\lambda_c = 0.57084$ ):

$$[M_{y1}] = [\sigma] \cdot (s + \chi_2 \cdot s_2 - c)^2 \cdot \frac{d_c}{4} \cdot \max\{C_3; 4.9\} = 177 \cdot (18 + 1 \cdot 18 - 3.8)^2 \cdot 160 / 4 \cdot \max\{5.4088; 4.9\} = 39705 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

$$C_3 = a_0 + a_1 \cdot \lambda_c + a_2 \cdot \lambda_c^2 + a_3 \cdot \lambda_c^3 + a_4 \cdot \lambda_c^4 = 12.876$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности у внешней кромки накладного кольца ( $\lambda_c = 2.5143$ ):

$$[M_{y2}] = [\sigma] \cdot (s - c)^2 \cdot \frac{D_2}{4} \cdot \max\{C_3; 4.9\} = 177 \cdot (18 - 3.8)^2 \cdot 468 / 4 \cdot \max\{12.876; 4.9\} = 53769 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

Допускаемый изгибающий момент, действующий на штуцер в плоскости, совпадающей с осью, при наличии накладного кольца:

$$[M_y] = \min\{[M_{y1}; M_{y2}]\} = \min\{39705; 53769\} = 39705 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

Прочность от действия изгибающих моментов :

$$\Phi_b = \sqrt{\left(\frac{M_x}{[M_x]}\right)^2 + \left(\frac{M_y}{[M_y]}\right)^2} = ((3000 / 22518)^2 + (3000 / 39705)^2)^{1/2} = 0.15316$$

Условие прочности:  $\Phi_b \leq 1$

$0.15316 \leq 1.0$ . Условие прочности выполнено.

Прочность от совместного действия нагрузок :

$$\sqrt{\left[\max\left\{\left|\frac{\Phi_p}{C_4} + \Phi_z\right|; \left|\Phi_z\right|; \left|\frac{\Phi_p}{C_4} - 0.2 \cdot \Phi_z\right|\right\}\right]^2 + \Phi_b^2} = ((\max\{0.76843 / 1 + 0.028907; 0.028907; 0.76843 / 1 - 0.2 \cdot 0.028907\})^2 + 0.15316^2)^{1/2} = 0.81191$$

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

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

$0.81191 \leq 1.0$ . Условие прочности выполнено.

Максимальные продольные растягивающие напряжения в штуцере :

$$\sigma_1 = \frac{p \cdot (d + s_1)}{4 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{4 \cdot \sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{\pi \cdot (d + s_1)^2 \cdot (s_1 - c_s)} + \frac{F_z}{\pi \cdot (d + s_1) \cdot (s_1 - c_s)} = 1.6 \cdot (146 + 11) / (4 \cdot (11 - 3)) + 4 \cdot (3000^2 + 3000^2)^{1/2} / (3.1416 \cdot (146 + 11)^2 \cdot (11 - 3)) + 3100 / (3.1416 \cdot (146 + 11) \cdot (11 - 3)) = 36.03 \text{ МПа}$$

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

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

$36.03 \text{ МПа} \leq 160 \text{ МПа}$ . Условие прочности выполнено.

$$\frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{[M]} + \frac{|F_z|}{[F]} = (3000^2 + 3000^2)^{1/2} / 22601 + |0| / 6.1927 \cdot 10^5 = 0.18772$$

Если  $F_z$  растягивающая продольная сила, то  $F_z$  следует принять равной нулю.

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

$0.18772 \leq 1.0$ . Условие устойчивости выполнено.

Взам. инв. №					
Подп. и дата					
Инв. № подл.					
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	

90651-20600-AM-02-220 РР

Лист

103

Этот документ является собственностью "НЕФТЕХИМПРОЕКТ" и не подлежит копированию и распространению без его согласия

НЕФТЕХИМПРОЕКТ NEFTECHIMPROEKT		МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ			РР					
Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)										
Условия нагружения при испытаниях:										
Расчётная температура, T: 20 °C										
Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 2.2345 МПа										
Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ 34233.3-2017										
Свойства материала элемента, несущего штуцер										
Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Лист при температуре 20 °C (условия гидроиспытаний):										
$[\sigma]^{20} = \frac{R_{\sigma} / 20}{n_T} = 300 / 1.1 = 272.73 \text{ МПа}$										
Модуль продольной упругости при температуре 20 °C:										
E = 1.99 · 10 <sup>5</sup> МПа										
Свойства материала штуцера										
Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Труба при температуре 20 °C (условия гидроиспытаний):										
$[\sigma]^{20_1} = \frac{R_{\sigma} / 20}{n_T} = 280 / 1.1 = 254.55 \text{ МПа}$										
Модуль продольной упругости при температуре 20 °C:										
E <sub>1</sub> = 1.99 · 10 <sup>5</sup> МПа										
Свойства материала кольца										
Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Лист при температуре 20 °C (условия гидроиспытаний):										
$[\sigma]^{20_2} = \frac{R_{\sigma} / 20}{n_T} = 300 / 1.1 = 272.73 \text{ МПа}$										
Модуль продольной упругости при температуре 20 °C:										
E <sub>2</sub> = 1.99 · 10 <sup>5</sup> МПа										
Расчётная толщина стенки штуцера :										
$s_{\text{ш}} + c_s = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 - p} + c_s = 2.2345 \cdot (146 + 2 \cdot 3) / (2 \cdot 254.55 \cdot 1 - 2.2345) + 3 = 3.6701 \text{ мм}$										
Допускаемое давление для патрубка штуцера :										
$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 254.55 \cdot 1 \cdot (11 - 3) / (146 + 11 + 3) = 25.455 \text{ МПа}$										
25.455 МПа ≥ 2.2345 МПа										
Заключение: <b>Условие прочности и устойчивости выполнено.</b>										
Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:										
D <sub>р</sub> = D = 2400 мм										
Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера :										
s <sub>р</sub> = 9.8724 мм										
Расчётный диаметр отверстия (ось штуцера совпадает с нормалью к поверхности в центре отверстия):										
d <sub>р</sub> = d + 2 · c <sub>s</sub> = 146 + 2 · 3 = 152 мм										
Максимальный диаметр отверстия:										
$d_{\text{max}} = \begin{cases} D & \text{— для отверстий в цилиндрических обечайках— для отверстий в конических обечайках — для от-} \\ D_k & \text{верстий в выпуклых днищах} \\ 0.6 \cdot D & \end{cases} = 2400 \text{ мм}$										
Расчетная толщина стенки обечайки, перехода или днища для определения диаметра отверстия, не требующего дополнительного укрепления:										
s <sub>рн</sub> = s <sub>р</sub> = 9.8724мм										
Наибольший допустимый диаметр одиночного отверстия, не требующего дополнительного укрепления при наличии избыточной толщины стенки сосуда:										
Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №								
Изм.				Лист	№ док.	Подп.	Дата	90651-20600-AM-02-220 РР		Лист
										104

90651-20600-AM-02-220 РР\_изм.0.docx

Формат А4







Коэффициенты прочности сварных швов:

Продольный шов штуцера:

$$\varphi_1 = 1$$

Шов обечайки в зоне врезки штуцера:

$$\varphi = 1$$

Расчётный диаметр выпуклого эллиптического днища :

$$D_P = \frac{D^2}{2 \cdot H} \cdot \sqrt{1 - 4 \cdot \frac{(D^2 - 4 \cdot H^2)}{D^4} \cdot R_{\text{un}}^2} = 2400^2 / (2 \cdot 600) \cdot (1 - 4 \cdot (2400^2 - 4 \cdot 600^2) \cdot 0^2 / 2400^4)^{1/2} = 4800 \text{ mm}$$

Нагрузки, приложенные к патрубку, **не передаются** на соседние элементы аппарата

## Расчёт в рабочих условиях

**Условия нагружения:**

Расчётная температура, T: 100 °C

Расчётное внутреннее избыточное давление,  $p$ : 1.6424 МПа

## Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ 34233.3-2017

### Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Лист при температуре 100 °С (рабочие условия):

$[\sigma] = 177 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости при температуре 100 °С:

$$E = 1.91 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

## Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Лист при температуре 100 °С (рабочие условия):

$$[\sigma]_1 = 177 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 100 °C:

$$E_1 = 1.91 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

## Свойства материала кольца

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Лист при температуре 100 °С (рабочие условия):

$$[\sigma]_2 = 177 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 100 °C:

$$E_2 = 1.91 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Расчётная толщина стенки штуцера :

$$s_{lp} + c_s = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot |\sigma_1 \cdot \phi_1 - p} + c_s = 1.6424 \cdot (78 + 2 \cdot 3) / (2 \cdot 177 \cdot 1 - 1.6424) + 3 = 3.3915 \text{ mm}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера :

$$[P] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = \frac{2 \cdot 177 \cdot 1 \cdot (12 - 3)}{78 + 12 + 3} = 34.258 \text{ МПа}$$

$$34.258 \text{ МПа} \geq 1.6424 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено.**

Расчётный диаметр выпуклого эллиптического днища :

$$D_p = \frac{D^2}{2 \cdot H} \cdot \sqrt{1 - 4 \cdot \frac{(D^2 - 4 \cdot H^2)}{D^4} \cdot R_{\text{ш}}^2} = 2400^2 / (2 \cdot 600) \cdot (1 - 4 \cdot (2400^2 - 4 \cdot 600^2) \cdot 0^2 / 2400^4)^{1/2} = 4800 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера :

$$S_p = 11.161 \text{ MM}$$

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

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

Максимальный диаметр отверстия:

Взам. инв. №	34.258 МПа ≥ 1.6424 МПа Заключение: <b>Условие прочности и устойчивости выполнено.</b> Расчётный диаметр выпуклого эллиптического днища : $D_P = \frac{D^2}{2 \cdot H} \cdot \sqrt{1 - 4 \cdot \frac{(D^2 - 4 \cdot H^2)}{D^4} \cdot R_{ш}^2} = 2400^2 / (2 \cdot 600) \cdot (1 - 4 \cdot (2400^2 - 4 \cdot 600^2) \cdot 0^2 / 2400^4)^{1/2} = 4800 \text{ мм}$				
	Подп. и дата	Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера : s <sub>p</sub> = 11.161 мм Расчётный диаметр отверстия (ось штуцера совпадает с нормалью к поверхности в центре отверстия): d <sub>p</sub> = d + 2 · c <sub>с</sub> = 78 + 2 · 3 = 84 мм Максимальный диаметр отверстия:			
Инв. № подл.		90651-20600-AM-02-220 PP			
	Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата

Лист
108

$$d_{\max} = \begin{cases} D & \text{– для отверстий в цилиндрических обечайках} \\ D_k & \text{– для отверстий в конических обечайках} \\ 0.6 \cdot D & \text{– для отверстий в выпуклых днищах} \end{cases} = 1440 \text{ мм}$$

Расчетная толщина стенки обечайки, перехода или днища для определения диаметра отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$s_{pn} = s_p = 11.161 \text{ мм}$$

Наибольший допустимый диаметр одиночного отверстия, не требующего дополнительного укрепления при наличии избыточной толщины стенки сосуда:

$$d_0 = \min \left\{ 2 \cdot \left( \frac{s-c}{s_{pn}} - 0.8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s-c)}; d_{\max} + 2 \cdot c_s \right\} = \min \{ 2 \cdot ((18-3.8) / 11.161 - 0.8) \cdot (4800 \cdot (18-3.8))^{1/2}; 1440 + 2 \cdot 3 \} = 246.6 \text{ мм}$$

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

Ширина зоны укрепления:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s-c)} = (4800 \cdot (18-3.8))^{1/2} = 261.07 \text{ мм}$$

Расчетная ширина зоны укрепления:

$$l_p = L_0 = 261.07 \text{ мм}$$

Расчетная длина внешней части штуцера:

$$l_{1p} = \min \{ l_1; 1.25 \cdot \sqrt{(d+2 \cdot c_s) \cdot (s_1-c_s)} \} = \min \{ 120; 1.25 \cdot ((78+2 \cdot 3) \cdot (12-3))^{1/2} \} = 34.369 \text{ мм}$$

### Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1.0; \frac{[\sigma]_h}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1.0, 177 / 177 \} = 1$$

Расчетная ширина кольца:

$$l_{2p} = \min \{ l_2; \sqrt{D_p \cdot (s_2+s-c)} \} = \min \{ 100; (4800 \cdot (18+18-3.8))^{1/2} \} = 100 \text{ мм}$$

Для накладного кольца:

$$\chi_2 = \min \left\{ 1.0; \frac{[\sigma]_2}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1.0, 177 / 177 \} = 1$$

Расчетная длина внутренней части штуцера:

$$l_{3p} = \min \{ l_3; 0.5 \cdot \sqrt{(d+2 \cdot c_s) \cdot (s_3-c_s-c_{s1})} \} = \min \{ 0; 0.5 \cdot ((78+2 \cdot 3) \cdot (12-3-0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$$

Расчетный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$d_{op} = 0.4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s-c)} = 0.4 \cdot (4800 \cdot (18-3.8))^{1/2} = 104.43 \text{ мм}$$

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

$$= \min \{ 1; [1 + (34.369 \cdot (12-3) \cdot 1 + 100 \cdot 18 \cdot 1 + 0 \cdot (12-3-0) \cdot 1) / (261.07 \cdot (18-3.8))] / [1 + 0.5 \cdot (84-104.43) / 261.07 + 2 \cdot (78+2 \cdot 3) / 4800 \cdot 1 / 1 \cdot 34.369 / 261.07] \} = 1.6251$$

$$= 1$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s-c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s-c) \cdot V} = 2 \cdot 2 \cdot (18-3.8) \cdot 1 \cdot 177 \cdot 1 / [4800 + (18-3.8) \cdot 1] = 2.0883 \text{ МПа}$$

Допускаемое давление  $[p] = 2.0883 \text{ МПа}$

$2.0883 \text{ МПа} \geq 1.6424 \text{ МПа}$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено.**

Площадь, необходимая для укрепления отверстия:

$$A_r = 0.5 \cdot (d_p - d_{op}) \cdot s_p = 0.5 \cdot (84 - 104.43) \cdot 11.161 = (-114.01) \text{ мм}^2$$

Взам. инв. №

Подп. и дата

Инв. № подл.

90651-20600-AM-02-220 РР

Лист

109

Взам. инв. №	
Подп. и дата	
Инв. № подл.	

Располагаемая площадь укрепления одиночного отверстия:

$$A_a = 1_p \cdot (s_1 - s_p - c_s) \cdot \chi_1 + 1_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + 1_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3 + 1_p \cdot (s - s_p - c) \cdot \chi_4$$

$$= 34.369 \cdot (12 - 0.39155 - 3) \cdot 1 + 100 \cdot 18 \cdot 1 + 0 \cdot (12 - 3 - 0) \cdot 1 + 261.07 \cdot (18 - 11.161 - 3.8) \cdot 1$$

$$= 2889.2 \text{ мм}^2$$

$$A_r = (-114.01) \text{ мм}^2 \leq 2889.2 \text{ мм}^2$$

Заключение: **Условие прочности выполнено.**

### Расчет давления испытаний

Пробное давление при гидравлическом испытании, при работе элемента под внутренним давлением:

$$P_{\text{пр}} = 1.25 \cdot p \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]_k} = 1.25 \cdot 1.6424 \cdot 196 / 177 = 2.2734 \text{ МПа}$$

Пробное давление при гидравлическом испытании, при работе элемента под внутренним давлением:

$$P_{\text{пр}} = 1.25 \cdot p \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]_k} = 1.25 \cdot 1.6424 \cdot 196 / 177 = 2.2734 \text{ МПа}$$

### Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)

#### Условия нагружения при испытаниях:

Расчётная температура, T: 20 °C

Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 2.2809 МПа

### Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ 34233.3-2017

#### Свойства материала элемента, несущего штуцер

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

$$[\sigma]_{20} = \frac{R_e / 20}{n_T} = 300 / 1.1 = 272.73 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 20 °C:

$$E = 1.99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

#### Свойства материала штуцера

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

$$[\sigma]_{20_1} = \frac{R_e / 20}{n_T} = 300 / 1.1 = 272.73 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 20 °C:

$$E_1 = 1.99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

#### Свойства материала кольца

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

$$[\sigma]_{20_2} = \frac{R_e / 20}{n_T} = 300 / 1.1 = 272.73 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 20 °C:

$$E_2 = 1.99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Расчётная толщина стенки штуцера :

$$s_p + c_s = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 - p} + c_s = 2.2809 \cdot (78 + 2 \cdot 3) / (2 \cdot 272.73 \cdot 1 - 2.2809) + 3 = 3.3527 \text{ мм}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера :

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 272.73 \cdot 1 \cdot (12 - 3) / (78 + 12 + 3) = 52.786 \text{ МПа}$$

$$52.786 \text{ МПа} \geq 2.2809 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено.**

Расчётный диаметр выпуклого эллиптического днища :

$$D_p = \frac{D^2}{2 \cdot H} \cdot \sqrt{1 - 4 \cdot \frac{(D^2 - 4 \cdot H^2)}{D^4} \cdot R_{\text{ш}}^2} = 2400^2 / (2 \cdot 600) \cdot (1 - 4 \cdot (2400^2 - 4 \cdot 600^2) \cdot 0^2 / 2400^4)^{1/2} = 4800 \text{ мм}$$







Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата
Изм. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №		

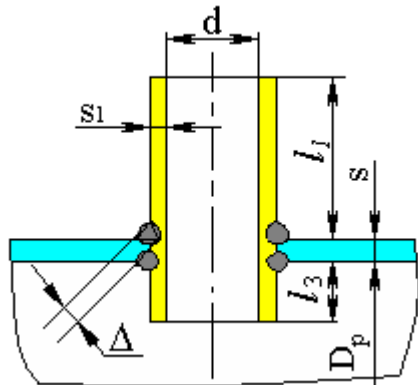
Этот документ является собственностью "НЕФТЕХИМПРОЕКТ" и не подлежит копированию и распространению без его согласия

Измерение уровня (L1-L4)

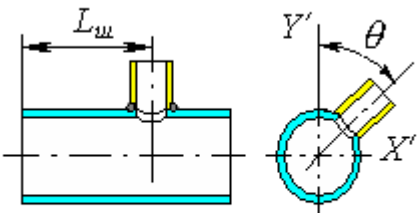
Расчет выполнен на примере штуцера L1

Исходные данные

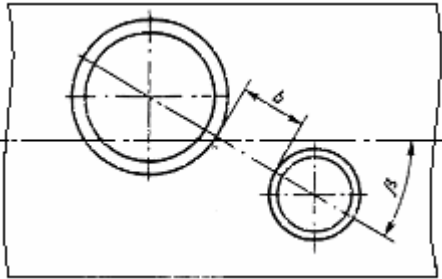
Элемент:	Измерение уровня (L1)
Условное обозначение (метка)	L1
Элемент, несущий штуцер:	Обечайка цилиндрическая
Тип элемента, несущего штуцер:	Обечайка цилиндрическая
Тип штуцера:	Проходящий без укрепления



Материал несущего элемента:	09Г2С Лист
Толщина стенки несущего элемента, s:	18мм
Сумма прибавок к стенке несущего элемента, с:	3.8 мм
Материал штуцера:	09Г2С Труба
Внутренний диаметр штуцера, d:	48 мм
Толщина стенки штуцера, s1:	10 мм
Сумма прибавок к толщине стенки штуцера (включая коррозию), сs:	3 мм
Длина штуцера, l1:	182 мм



Смещение штуцера, Lш:	3610 мм
Угол поворота штуцера, θ:	165 °
Длина внутр. части штуцера, l3:	0 мм
Прибавка на коррозию, сs1:	0 мм
Минимальный размер сварного шва, Δ:	10 мм
Расчётные параметры размещения штуцера:	
Ближайший штуцер	



Название штуцера:

Измерение уровня (L3)

Расстояние до стенки ближайшего штуцера, b:

569.73 мм

Угол  $\beta$ :

90 °

Коэффициенты прочности сварных швов:

Продольный шов штуцера:

$\varphi_1 = 1$

Шов обечайки в зоне врезки штуцера:

$\varphi = 1$

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$D_p = D = 2400 \text{ мм}$

Нагрузки, приложенные к патрубку, **не передаются** на соседние элементы аппарата

**Расчёт в рабочих условиях**

**Условия нагружения:**

Расчётная температура, T: 100 °C

Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 1.6001 МПа

**Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ 34233.3-2017**

**Свойства материала элемента, несущего штуцер**

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Лист при температуре 100 °C (рабочие условия):

$[\sigma] = 177 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости при температуре 100 °C:

$E = 1.91 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

**Свойства материала штуцера**

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Труба при температуре 100 °C (рабочие условия):

$[\sigma]_1 = 160 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости при температуре 100 °C:

$E_1 = 1.91 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Расчётная толщина стенки штуцера :

$$s_p + c_s = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 - p} + c_s = \frac{1.6001 \cdot (48 + 2 \cdot 3)}{2 \cdot 160 \cdot 1 - 1.6001} + 3 = 3.2714 \text{ мм}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера :

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = \frac{2 \cdot 160 \cdot 1 \cdot (10 - 3)}{48 + 10 + 3} = 36.721 \text{ МПа}$$

36.721 МПа  $\geq$  1.6001 МПа

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено.**

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$D_p = D = 2400 \text{ мм}$

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера :

$s_p = 10.898 \text{ мм}$

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

$d_p = d + 2 \cdot c_s = 48 + 2 \cdot 3 = 54 \text{ мм}$

Взам. инв. №	<p>Расчётная толщина стенки штуцера :</p> $s_{\text{ш}} + c_s = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 - p} = 1.6001 \cdot (48 + 2 \cdot 3) / (2 \cdot 160 \cdot 1 - 1.6001) + 3 = 3.2714 \text{ мм}$ <p>Допускаемое давление для патрубка штуцера :</p> $[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 160 \cdot 1 \cdot (10 - 3) / (48 + 10 + 3) = 36.721 \text{ МПа}$ <p>36.721 МПа ≥ 1.6001 МПа</p> <p>Заключение: <b>Условие прочности и устойчивости выполнено.</b></p> <p>Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:</p> $D_p = D = 2400 \text{ мм}$ <p>Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера :</p> $s_p = 10.898 \text{ мм}$ <p>Расчётный диаметр отверстия (ось штуцера совпадает с нормалью к поверхности в центре отверстия):</p> $d_p = d + 2 \cdot c_s = 48 + 2 \cdot 3 = 54 \text{ мм}$									
	Подп. и дата									
Инв. № подл.										
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	90651-20600-AM-02-220 РР					
Лист										
114										

Максимальный диаметр отверстия:

$$d_{\max} = \begin{cases} D & \text{— для отверстий в цилиндрических обечайках— для отверстий в конических обечайках — для от-} \\ D_k & \text{верстий в выпуклых днищах} \end{cases} = 2400 \text{ мм}$$

Расчетная толщина стенки обечайки, перехода или днища для определения диаметра отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$s_{\text{pn}} = s_p = 10.898 \text{ мм}$$

Наибольший допустимый диаметр одиночного отверстия, не требующего дополнительного укрепления при наличии избыточной толщины стенки сосуда:

$$d_0 = \min \left\{ 2 \cdot \left( \frac{s-c}{s_{\text{pn}}} - 0.8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s-c)}; d_{\max} + 2 \cdot c_s \right\} = \min \{ 2 \cdot ((18-3.8) / 10.898 - 0.8) \cdot (2400 \cdot (18-3.8))^{1/2}; 2400 + 2 \cdot 3 \} = 185.73 \text{ мм}$$

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

Ширина зоны укрепления :

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s-c)} = (2400 \cdot (18-3.8))^{1/2} = 184.61 \text{ мм}$$

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

$$L_k = 796 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления :

$$l_p = L_0 = 184.61 \text{ мм}$$

Расчётная длина внешней части штуцера :

$$l_{1p} = \min \{ l_1; 1.25 \cdot \sqrt{(d+2 \cdot c_s) \cdot (s_1-c_s)} \} = \min \{ 182; 1.25 \cdot ((48+2 \cdot 3) \cdot (10-3))^{1/2} \} = 24.303 \text{ мм}$$

### Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера :

$$\chi_1 = \min \left\{ 1.0; \frac{[\sigma]_h}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1.0, 160 / 177 \} = 0.90395$$

Расчётная длина внутренней части штуцера :

$$l_{3p} = \min \{ l_3; 0.5 \cdot \sqrt{(d+2 \cdot c_s) \cdot (s_3-c_s-c_{s1})} \} = \min \{ 0; 0.5 \cdot ((48+2 \cdot 3) \cdot (10-3-0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления :

$$d_{op} = 0.4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s-c)} = 0.4 \cdot (2400 \cdot (18-3.8))^{1/2} = 73.843 \text{ мм}$$

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

$$= \min \{ 1; [1 + (24.303 \cdot (10-3) \cdot 0.90395 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (10-3-0) \cdot 0.90395) / (184.61 \cdot (18-3.8))] / [1 + 0.5 \cdot (54 - 73.843) / 184.61 + 1 \cdot (48 + 2 \cdot 3) / 2400 \cdot 1 / 1 \cdot 24.303 / 184.61] = 1.1153 \}$$

$$= 1$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s-c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s-c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 1 \cdot (18-3.8) \cdot 1 \cdot 177 \cdot 1 / [2400 + (18-3.8) \cdot 1] = 2.0822 \text{ МПа}$$

Взам. инв. №

Подп. и дата

Инв. № подл.

90651-20600-AM-02-220 РР

Лист

115





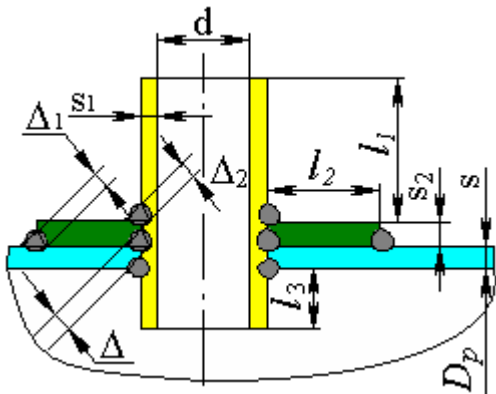




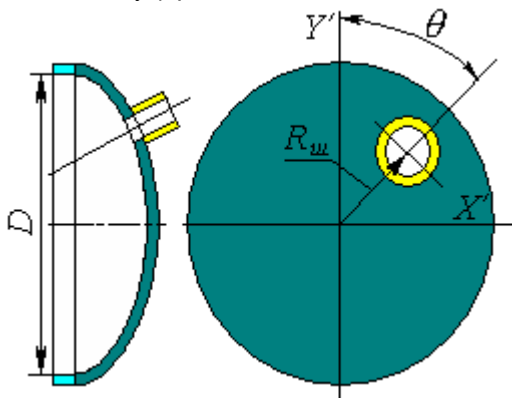
Воздушник (V1)

Исходные данные

Элемент:	Воздушник (V1)
Условное обозначение (метка)	V1
Элемент, несущий штуцер:	Днище эллиптическое верхнее
Тип элемента, несущего штуцер:	Днище эллиптическое
Тип штуцера:	Проходящий с накладным кольцом



Материал несущего элемента:	09Г2С Лист
Толщина стенки несущего элемента, s:	18 мм
Сумма прибавок к стенке несущего элемента, c:	3.8 мм
Материал штуцера:	09Г2С Труба
Внутренний диаметр штуцера, d:	146 мм
Толщина стенки штуцера, s1:	11 мм
Сумма прибавок к толщине стенки штуцера (включая коррозию), cs:	3 мм
Длина штуцера, l1:	159 мм



Смещение штуцера, Rш:	0 мм
Угол поворота штуцера, θ:	0 °
Длина внутр. части штуцера, l3:	75 мм
Прибавка на коррозию, cs1:	0 мм
Материал кольца:	09Г2С Лист
Ширина кольца, l2:	150 мм
Толщина кольца, s2:	18 мм
Минимальный размер сварного шва, Δ:	11 мм
Минимальный размер сварного шва, Δ1:	18 мм
Минимальный размер сварного шва, Δ2:	11 мм

Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата



16 МПа  $\geq$  1.6 МПа

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено.**

Расчётный диаметр выпуклого эллиптического днища :

$$D_p = \frac{D^2}{2 \cdot H} \cdot \sqrt{1 - 4 \cdot \frac{(D^2 - 4 \cdot H^2)}{D^4} \cdot R_{ш}^2} = 2400^2 / (2 \cdot 600) \cdot (1 - 4 \cdot (2400^2 - 4 \cdot 600^2) \cdot 0^2 / 2400^4)^{1/2} = 4800 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера :

$$s_p = 10.872 \text{ мм}$$

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

$$d_p = d + 2 \cdot c_s = 146 + 2 \cdot 3 = 152 \text{ мм}$$

Максимальный диаметр отверстия:

$$d_{\max} = \begin{cases} D & \text{— для отверстий в цилиндрических обечайках— для отверстий в конических обечайках — для от-} \\ D_k & \text{верстий в выпуклых днищах} \end{cases} = 1440 \text{ мм}$$

Расчетная толщина стенки обечайки, перехода или днища для определения диаметра отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$s_{pn} = s_p = 10.872 \text{ мм}$$

Наибольший допустимый диаметр одиночного отверстия, не требующего дополнительного укрепления при наличии избыточной толщины стенки сосуда:

$$d_0 = \min \left\{ 2 \cdot \left( \frac{s - c}{s_{pn}} - 0.8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)}; d_{\max} + 2 \cdot c_s \right\} = \min \{ 2 \cdot ((18 - 3.8) / 10.872 - 0.8) \cdot (4800 \cdot (18 - 3.8))^{1/2}; 1440 + 2 \cdot 3 \} = 264.26 \text{ мм}$$

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

Ширина зоны укрепления :

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (4800 \cdot (18 - 3.8))^{1/2} = 261.07 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления :

$$l_p = L_0 = 261.07 \text{ мм}$$

Расчётная длина внешней части штуцера :

$$l_{1p} = \min \{ l_1; 1.25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \} = \min \{ 159; 1.25 \cdot ((146 + 2 \cdot 3) \cdot (11 - 3))^{1/2} \} = 43.589 \text{ мм}$$

### Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера :

$$\chi_1 = \min \left\{ 1.0; \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1.0, 160 / 177 \} = 0.90395$$

Расчётная ширина кольца :

$$l_{2p} = \min \{ l_2; \sqrt{D_p \cdot (s_2 + s - c)} \} = \min \{ 150; (4800 \cdot (18 + 18 - 3.8))^{1/2} \} = 150 \text{ мм}$$

Для накладного кольца :

$$\chi_2 = \min \left\{ 1.0; \frac{[\sigma]_2}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1.0, 177 / 177 \} = 1$$

Расчётная длина внутренней части штуцера :

$$l_{3p} = \min \{ l_3; 0.5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})} \} = \min \{ 75; 0.5 \cdot ((146 + 2 \cdot 3) \cdot (11 - 3 - 0))^{1/2} \} = 17.436 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления :

$$d_{op} = 0.4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0.4 \cdot (4800 \cdot (18 - 3.8))^{1/2} = 104.43 \text{ мм}$$

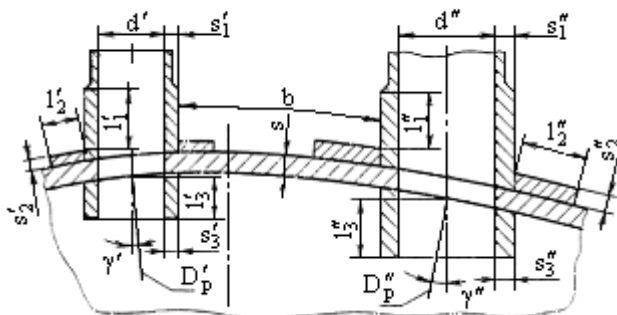
$$V = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l_{1p} \cdot (s_1 - c_s) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3}{l_p \cdot (s - c)}}{1 + 0.5 \cdot \frac{d_p - d_{op}}{l_p} + K_1 \cdot \frac{d + 2 \cdot c_s}{D_p} \cdot \frac{\varphi}{\varphi_1} \cdot \frac{l_{1p}}{l_p}}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

$$= \min \{ 1; [1 + (43.589 \cdot (11 - 3) \cdot 0.90395 + 150 \cdot 18 \cdot 1 + 17.436 \cdot (11 - 3 - 0) \cdot 0.90395) / (261.07 \cdot (18 - 3.8))] / [1 + 0.5 \cdot (152 - 104.43) / 261.07 + 2 \cdot (146 + 2 \cdot 3) / 4800 \cdot 1 / 1 \cdot 43.589 / 261.07] \} = 1.6768$$

Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	90651-20600-AM-02-220 РР	Лист 121

= 1

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 2 \cdot (18 - 3.8) \cdot 1 \cdot 177 \cdot 1 / [4800 + (18 - 3.8) \cdot 1] = 2.0883 \text{ МПа}$$



Отверстие считается одиночным, если ближайшее к нему отверстие Измерение давления (Р1) не оказывает на него влияния, т.е. расстояние между наружными поверхностями соответствующих штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (4800 \cdot (18 - 3.8))^{1/2} + (4476.6 \cdot (18 - 3.8))^{1/2} = 513.2 \text{ мм}$$

Условие не выполнено, требуется дополнительный расчёт укреплений.

$K_3 = 1$

$$V_1 = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l_1' \cdot (s_1' - c_s') \cdot \chi_1' + l_2' \cdot s_2' \cdot \chi_2' + l_3' \cdot (s_3' - c_s' - c_{s1}') \cdot \chi_3' + l_1'' \cdot (s_1'' - c_s'') \cdot \chi_1'' + l_2'' \cdot s_2'' \cdot \chi_2'' + l_3'' \cdot (s_3'' - c_s'' - c_{s1}'') \cdot \chi_3''}{b \cdot (s - c)}}{K_3 \left( 0.8 + \frac{d_p' + d_p''}{2 \cdot b} \right) + K_1 \left( \frac{d' + 2 \cdot c_s' \cdot \varphi' \cdot l_1'}{D_p' \cdot \varphi_1' \cdot b} + \frac{d'' + 2 \cdot c_s'' \cdot \varphi'' \cdot l_1''}{D_p'' \cdot \varphi_1'' \cdot b} \right)} \right\}$$

$$= \min \left\{ 1; \frac{1 + [(43.589 \cdot (11 - 3) \cdot 0.90395 + 150 \cdot 18 \cdot 1 + 17.436 \cdot (11 - 3 - 0) \cdot 0.90395 + 24.303 \cdot (10 - 3) \cdot 0.90395 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (10 - 3 - 0) \cdot 0.90395) / (385.13 \cdot (3.8 - 3.8))]}{1 \cdot (0.8 + (152 + 55.4) / (2 \cdot 385.13)) + 2 \cdot [(146 + 2 \cdot 3) / 4800 \cdot 1 / 1 \cdot 43.589 / 385.13 + [(48 + 2 \cdot 3) / 4476.6 \cdot 1 / 1 \cdot 24.303 / 385.13]} \right\} = 1.4866$$

= 1

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{0.5 \cdot (D_p' + D_p'') + (s - c) \cdot V_1} \cdot V_1 = 2 \cdot 2 \cdot (18 - 3.8) \cdot 1 \cdot 177 / [0.5 \cdot (4800 + 4476.6) + (18 - 3.8) \cdot 1] \cdot 1 = 2.1609 \text{ МПа}$$

Допускаемое давление  $[p] = \min\{2.0883; 2.1609\}$  МПа

2.0883 МПа  $\geq$  1.6 МПа

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено.**

Площадь, необходимая для укрепления отверстия:

$$A_r = 0.5 \cdot (d_p - d_{op}) \cdot s_p = 0.5 \cdot (152 - 104.43) \cdot 10.872 = 258.59 \text{ мм}^2$$

Располагаемая площадь укрепления одиночного отверстия:

$$A_a = l_p \cdot (s_1 - s_p - c_s) \cdot \chi_1 + l_2 \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_3 \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3 + l_p \cdot (s - s_p - c) \cdot \chi_4 = 43.589 \cdot (11 - 0.76382 - 3) \cdot 0.90395 + 150 \cdot 18 \cdot 1 + 17.436 \cdot (11 - 3 - 0) \cdot 0.90395 + 261.07 \cdot (18 - 10.872 - 3.8) \cdot 1 = 3980.1 \text{ мм}^2$$

$$A_r = 258.59 \text{ мм}^2 \leq 3980.1 \text{ мм}^2$$

Заклучение: **Условие прочности выполнено.**

### Расчет давления испытаний

Пробное давление при гидравлическом испытании, при работе элемента под внутренним давлением:

$$P_{\text{пр}} = 1.25 \cdot p \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]_t} = 1.25 \cdot 1.6 \cdot 183 / 160 = 2.2875 \text{ МПа}$$

Пробное давление при гидравлическом испытании, при работе элемента под внутренним давлением:

$$P_{\text{пр}} = 1.25 \cdot p \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]_t} = 1.25 \cdot 1.6 \cdot 196 / 177 = 2.2147 \text{ МПа}$$

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	90651-20600-AM-02-220 РР				Лист
							122
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата			

Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата

Взам. инв. №	
--------------	--

Подп. и дата	
--------------	--

Изм. № подл.	
--------------	--

Этот документ является собственностью "НЕФТЕХИМПРОЕКТ" и не подлежит копированию и распространению без его согласия

## Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)

### Условия нагружения при испытаниях:

Расчётная температура, T: 20 °C

Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 2.2235 МПа

### Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ 34233.3-2017

#### Свойства материала элемента, несущего штуцер

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

$$[\sigma]^{20} = \frac{R_{\sigma} / 20}{n_T} = 300 / 1.1 = 272.73 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 20 °C:

$$E = 1.99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

#### Свойства материала штуцера

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

$$[\sigma]^{20}_1 = \frac{R_{\sigma} / 20}{n_T} = 280 / 1.1 = 254.55 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 20 °C:

$$E_1 = 1.99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

#### Свойства материала кольца

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

$$[\sigma]^{20}_2 = \frac{R_{\sigma} / 20}{n_T} = 300 / 1.1 = 272.73 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 20 °C:

$$E_2 = 1.99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Расчётная толщина стенки штуцера :

$$s_{\text{ш}} + c_s = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 - p} + c_s = 2.2235 \cdot (146 + 2 \cdot 3) / (2 \cdot 254.55 \cdot 1 - 2.2235) + 3 = 3.6668 \text{ мм}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера :

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 254.55 \cdot 1 \cdot (11 - 3) / (146 + 11 + 3) = 25.455 \text{ МПа}$$

25.455 МПа ≥ 2.2235 МПа

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено.**

Расчётный диаметр выпуклого эллиптического днища :

$$D_p = \frac{D^2}{2 \cdot H} \cdot \sqrt{1 - 4 \cdot \frac{(D^2 - 4 \cdot H^2)}{D^4} \cdot R_{\text{ш}}^2} = 2400^2 / (2 \cdot 600) \cdot (1 - 4 \cdot (2400^2 - 4 \cdot 600^2) \cdot 0^2 / 2400^4)^{1/2} = 4800 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера :

$$s_p = 9.8035 \text{ мм}$$

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

$$d_p = d + 2 \cdot c_s = 146 + 2 \cdot 3 = 152 \text{ мм}$$

Максимальный диаметр отверстия:

$$d_{\text{max}} = \begin{cases} D & \text{— для отверстий в цилиндрических обечайках} \\ D_k & \text{— для отверстий в конических обечайках} \\ 0.6 \cdot D & \text{— для отверстий в выпуклых днищах} \end{cases} = 1440 \text{ мм}$$

Расчетная толщина стенки обечайки, перехода или днища для определения диаметра отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$s_{\text{pn}} = s_p = 9.8035 \text{ мм}$$

Наибольший допустимый диаметр одиночного отверстия, не требующего дополнительного укрепления при наличии избыточной толщины стенки сосуда:



Условие не выполнено, требуется дополнительный расчёт укреплений.

$$K_3 = 1$$

$$V_1 = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{1'_{1p} \cdot (s'_1 - c'_s) \cdot \chi'_1 + 1'_{2p} \cdot s'_2 \cdot \chi'_2 + 1'_{3p} \cdot (s'_3 - c'_s - c'_{s1}) \cdot \chi'_3 + 1'_{1p} \cdot (s''_1 - c_s) \cdot \chi''_{11} + 1'_{2p} \cdot s''_2 \cdot \chi''_2 + 1'_{3p} \cdot (s''_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi''_3}{b \cdot (s - c)}}{K_3 \left( 0.8 + \frac{d'_p + d''_p}{2 \cdot b} \right) + K_1 \left( \frac{d' + 2 \cdot c'_s}{D_p} \cdot \frac{\varphi'}{\varphi_1} \cdot \frac{1'_{1p}}{b} + \frac{d'' + 2 \cdot c_s}{D_p} \cdot \frac{\varphi''}{\varphi_1} \cdot \frac{1'_{1p}}{b} \right)} \right\}$$

$$= \min \{ 1; (1 + [(43.589 \cdot (11 - 3) \cdot 0.93333 + 150 \cdot 18 \cdot 1 + 17.436 \cdot (11 - 3 - 0) \cdot 0.93333 + 24.303 \cdot (10 - 3) \cdot 0.93333 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (10 - 3 - 0) \cdot 0.93333) / (385.13 \cdot (3.8 - 3.8))]) / (1 \cdot (0.8 + (152 + 55.4) / (2 \cdot 385.13)) + 2 \cdot [(146 + 2 \cdot 3) / 4800 \cdot 1 / 1 \cdot 43.589 / 385.13 + [(48 + 2 \cdot 3) / 4476.6 \cdot 1 / 1 \cdot 24.303 / 385.13] \cdot 1]) \}$$

$$= 1.4899$$

$$= 1$$

$$[p]_{\text{н}} = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{0.5 \cdot (D'_p + D''_p) + (s - c) \cdot V_1} = 2 \cdot 2 \cdot (18 - 3.8) \cdot 1 \cdot 272.73 / [0.5 \cdot (4800 + 4476.6) + (18 - 3.8) \cdot 1] \cdot 1 = 3.3296 \text{ МПа}$$

Допускаемое давление  $[p] = \min\{3.2178; 3.3296\}$  МПа

3.2178 МПа  $\geq$  2.2235 МПа

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено.**

Площадь, необходимая для укрепления отверстия:

$$A_r = 0.5 \cdot (d_p - d_{0p}) \cdot s_p = 0.5 \cdot (152 - 104.43) \cdot 9.8035 = 233.18 \text{ мм}^2$$

Располагаемая площадь укрепления одиночного отверстия:

$$A_a = 1_p \cdot (s_1 - s_p - c_s) \cdot \chi_1 + 1_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + 1_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3 + 1_p \cdot (s - s_p - c) \cdot \chi_4$$

$$= 43.589 \cdot (11 - 0.6668 - 3) \cdot 0.93333 + 150 \cdot 18 \cdot 1 + 17.436 \cdot (11 - 3 - 0) \cdot 0.93333 + 261.07 \cdot (18 - 9.8035 - 3.8) \cdot 1$$

$$= 4276.3 \text{ мм}^2$$

$$A_r = 233.18 \text{ мм}^2 \leq 4276.3 \text{ мм}^2$$

Заключение: **Условие прочности выполнено.**

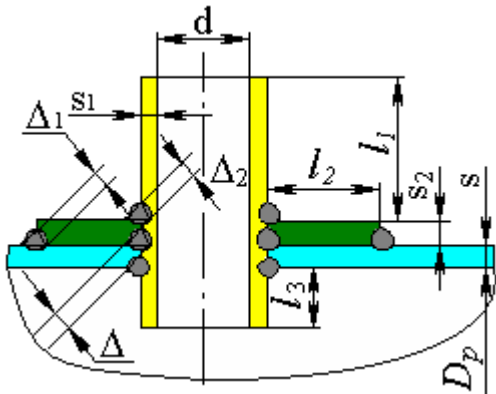
Инв. № подл.						Подп. и дата		Взам. инв. №	
					90651-20600-AM-02-220 РР				Лист
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата					125

Люк-лаз (М1)

Исходные данные

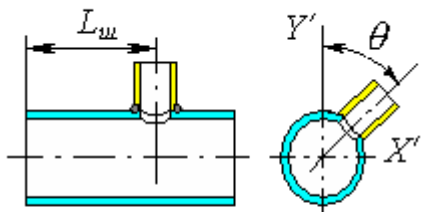
Элемент:  
Условное обозначение (метка)  
Элемент, несущий штуцер:  
Тип элемента, несущего штуцер:  
Тип штуцера:

Люк-лаз (М1)  
М1  
Обечайка цилиндрическая  
Обечайка цилиндрическая  
Проходящий с накладным  
кольцом



Материал несущего элемента:  
Толщина стенки несущего элемента, s:  
Сумма прибавок к стенке несущего элемента, с:  
Материал штуцера:  
Внутренний диаметр штуцера, d:  
Толщина стенки штуцера, s1:  
Сумма прибавок к толщине стенки штуцера (включая коррозию), сs:  
Длина штуцера, l1:

09Г2С Лист  
18мм  
3.8 мм  
09Г2С Лист  
600 мм  
10 мм  
3.8 мм  
279 мм



Смещение штуцера, Lш:  
Угол поворота штуцера, θ:  
Длина внутр. части штуцера, l3:  
Прибавка на коррозию, сs1:  
Материал кольца:  
Ширина кольца, l2:  
Толщина кольца, s2:  
Минимальный размер сварного шва, Δ:  
Минимальный размер сварного шва, Δ1:  
Минимальный размер сварного шва, Δ2:  
Расчётные параметры размещения штуцера:

640 мм  
90 °  
0 мм  
0 мм  
09Г2С Лист  
200 мм  
18 мм  
10 мм  
18 мм  
10 мм

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	90651-20600-AM-02-220 РР					Лист
								126
			Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	



Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата

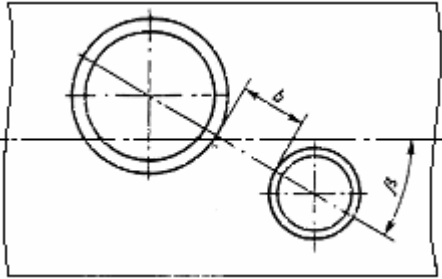
Взам. инв. №	
--------------	--

Подп. и дата	
--------------	--

Изм. № подл.	
--------------	--

Этот документ является собственностью "НЕФТЕХИМПРОЕКТ" и не подлежит копированию и распространению без его согласия

Ближайший штуцер



Название штуцера:

Измерение температуры  
(T1)

Расстояние до стенки ближайшего штуцера, b:

641.74 мм

Угол β:

106.19 °

Коэффициенты прочности сварных швов:

Продольный шов штуцера:

$\varphi_1 = 1$

Шов обечайки в зоне врезки штуцера:

$\varphi = 1$

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$D_p = D = 2400$  мм

Нагрузки, примененные к патрубку, **не передаются** на соседние элементы аппарата

### Расчёт в рабочих условиях

#### Условия нагружения:

Расчётная температура, T: 100 °C

Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 1.6313 МПа

### Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ 34233.3-2017

#### Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Лист при температуре 100 °C (рабочие условия):

$[\sigma] = 177$  МПа

Модуль продольной упругости при температуре 100 °C:

$E = 1.91 \cdot 10^5$  МПа

#### Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Лист при температуре 100 °C (рабочие условия):

$[\sigma]_1 = 177$  МПа

Модуль продольной упругости при температуре 100 °C:

$E_1 = 1.91 \cdot 10^5$  МПа

#### Свойства материала кольца

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Лист при температуре 100 °C (рабочие условия):

$[\sigma]_2 = 177$  МПа

Модуль продольной упругости при температуре 100 °C:

$E_2 = 1.91 \cdot 10^5$  МПа

Расчётная толщина стенки штуцера :

$$s_p + c_s = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 - p} + c_s = \frac{1.6313 \cdot (600 + 2 \cdot 3.8)}{2 \cdot 177 \cdot 1 - 1.6313} + 3.8 = 6.613 \text{ мм}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера :

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = \frac{2 \cdot 177 \cdot 1 \cdot (10 - 3.8)}{600 + 10 + 3.8} = 3.5758 \text{ МПа}$$

3.5758 МПа  $\geq$  1.6313 МПа

90651-20600-AM-02-220 РР

Лист

127

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено.**

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:

$$D_p = D = 2400 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера :

$$s_p = 11.111 \text{ мм}$$

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

$$d_p = d + 2 \cdot c_s = 600 + 2 \cdot 3.8 = 607.6 \text{ мм}$$

Максимальный диаметр отверстия:

$$d_{\max} = \begin{cases} D & \text{— для отверстий в цилиндрических обечайках} \\ D_k & \text{— для отверстий в конических обечайках} \\ 0.6 \cdot D & \text{— для отверстий в выпуклых днищах} \end{cases} = 2400 \text{ мм}$$

Расчетная толщина стенки обечайки, перехода или днища для определения диаметра отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$s_{pn} = s_p = 11.111 \text{ мм}$$

Наибольший допустимый диаметр одиночного отверстия, не требующего дополнительного укрепления при наличии избыточной толщины стенки сосуда:

$$d_0 = \min \left\{ 2 \cdot \left( \frac{s - c}{s_{pn}} - 0.8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)}; d_{\max} + 2 \cdot c_s \right\} = \min \{ 2 \cdot ((18 - 3.8) / 11.111 - 0.8) \cdot (2400 \cdot (18 - 3.8))^{1/2}; 2400 + 2 \cdot 3.8 \} = 176.48 \text{ мм}$$

Ширина зоны укрепления :

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (2400 \cdot (18 - 3.8))^{1/2} = 184.61 \text{ мм}$$

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

$$L_k = 390 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления :

$$l_p = L_0 = 184.61 \text{ мм}$$

Расчётная длина внешней части штуцера :

$$l_{1p} = \min \{ l_1; 1.25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \} = \min \{ 279; 1.25 \cdot ((600 + 2 \cdot 3.8) \cdot (10 - 3.8))^{1/2} \} = 76.721 \text{ мм}$$

### Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера :

$$\chi_1 = \min \left\{ 1.0; \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1.0, 177 / 177 \} = 1$$

Расчётная ширина кольца :

$$l_{2p} = \min \{ l_2; \sqrt{D_p \cdot (s_2 + s - c)} \} = \min \{ 200; (2400 \cdot (18 + 18 - 3.8))^{1/2} \} = 200 \text{ мм}$$

Для накладного кольца :

$$\chi_2 = \min \left\{ 1.0; \frac{[\sigma]_2}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1.0, 177 / 177 \} = 1$$

Расчётная длина внутренней части штуцера :

$$l_{3p} = \min \{ l_3; 0.5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})} \} = \min \{ 0; 0.5 \cdot ((600 + 2 \cdot 3.8) \cdot (10 - 3.8 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления :

$$d_{op} = 0.4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0.4 \cdot (2400 \cdot (18 - 3.8))^{1/2} = 73.843 \text{ мм}$$

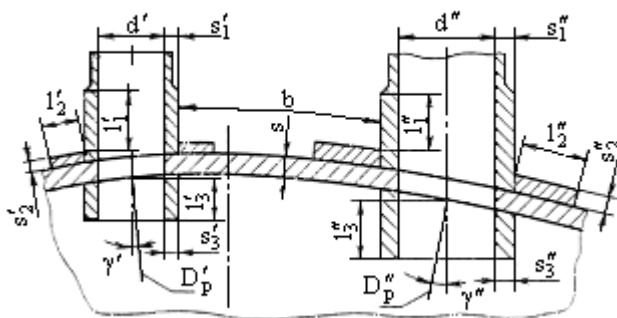
$$V = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l_{1p} \cdot (s_1 - c_s) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3}{l_p \cdot (s - c)}}{1 + 0.5 \cdot \frac{d_p - d_{op}}{l_p} + K_1 \cdot \frac{d + 2 \cdot c_s}{D_p} \cdot \frac{\varphi}{\varphi_1} \cdot \frac{l_{1p}}{l_p}}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

$$= \min \{ 1; [1 + (76.721 \cdot (10 - 3.8) \cdot 1 + 200 \cdot 18 \cdot 1 + 0 \cdot (10 - 3.8 - 0) \cdot 1) / (184.61 \cdot (18 - 3.8))] / [1 + 0.5 \cdot (607.6 - 73.843) / 184.61 + 1 \cdot (600 + 2 \cdot 3.8) / 2400 \cdot 1 / 1 \cdot 76.721 / 184.61] \} = 1.0015$$

$$= 1$$

Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	90651-20600-AM-02-220 РР	Лист 128
Взам. инв. №						
Подп. и дата						
Инв. № подл.						

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_n + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 1 \cdot (18 - 3.8) \cdot 1 \cdot 177 \cdot 1 / [2400 + (18 - 3.8) \cdot 1] = 2.0822 \text{ МПа}$$



Отверстие считается одиночным, если ближайшее к нему отверстие Измерение температуры (Т1) не оказывает на него влияния, т.е. расстояние между наружными поверхностями соответствующих штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D_b' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_b'' \cdot (s - c)} = (2400 \cdot (18 - 3.8))^{1/2} + (2400 \cdot (18 - 3.8))^{1/2} = 369.22 \text{ mm}$$

Условие выполнено, дальнейших расчётов укреплений не требуется.

Допускаемое давление  $[p] = 2.0822 \text{ МПа}$

$$2.0822 \text{ МПа} \geq 1.6313 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено.**

Площадь, необходимая для укрепления отверстия:

$$A_T = 0.5(d_p - d_{op}) \cdot s_p = 0.5 \cdot (607.6 - 73.843) \cdot 11.111 = 2965.3 \text{ mm}^2$$

Располагаемая площадь укрепления одиночного отверстия:

$$\begin{aligned} A_a &= 1_p \cdot (s_1 - s_p - c_s) \cdot \chi_1 + 1_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + 1_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3 + 1_p \cdot (s - s_p - c) \cdot \chi_4 \\ &= 76.721 * (10 - 2.813 - 3.8) * 1 + 200 * 18 * 1 + 0 * (10 - 3.8 - 0) * 1 + 184.61 * (18 - 11.111 - 3.8) * 1 \\ &= 4430.1 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$A_r = 2965.3 \text{ mm}^2 \leq 4430.1 \text{ mm}^2$$

Заключение: **Условие прочности выполнено.**

## Расчет давления испытаний

Пробное давление при гидравлическом испытании, при работе элемента под внутренним давлением:

$$P_{\text{тп}} = 1.25 \cdot p \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]_t} = 1.25 \cdot 1.6313 \cdot 196 / 177 = 2.2581 \text{ МПа}$$

Пробное давление при гидравлическом испытании, при работе элемента под внутренним давлением:

$$P_{\text{тп}} = 1.25 \cdot p \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma_t]} = 1.25 \cdot 1.6313 \cdot 196 / 177 = 2.2581 \text{ МПа}$$

### Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)

**Условия нагружения при испытаниях:**

Расчётная температура, T: 20 °C

Расчётное внутреннее избыточное давление, р: 2.2696 МПа

## Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ 34233.3-2017

### Свойства материала элемента, несущего штуцер

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

$$[\sigma]^{20} = \frac{R_{e120}}{n_T} = 300 / 1.1 = 272.73 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 20 °C:

$$E = 1.99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Взам. инв. №	<b>Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)</b>					
	<b>Условия нагружения при испытаниях:</b> Расчётная температура, T: 20 °C Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 2.2696 МПа					
Подп. и дата	<b>Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ 34233.3-2017</b>					
	<b>Свойства материала элемента, несущего штуцер</b> Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Лист при температуре 20 °C (условия гидроиспытаний): $[\sigma]^{20} = \frac{R_{\sigma} / 20}{n_T} = 300 / 1.1 = 272.73 \text{ МПа}$ Модуль продольной упругости при температуре 20 °C: E= 1.99·10 <sup>5</sup> МПа					
Инв. № подл.					90651-20600-AM-02-220 PP	Лист 129
	Изм.	Лист	№ док.	Подп.		



### Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера :

$$\chi_1 = \min \left\{ 1, 0; \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1, 0; 272.73 / 272.73 \} = 1$$

Расчётная ширина кольца :

$$l_{2p} = \min \left\{ l_2; \sqrt{D_p \cdot (s_2 + s - c)} \right\} = \min \{ 200; (2400 \cdot (18 + 18 - 3.8))^{1/2} \} = 200 \text{ мм}$$

Для накладного кольца :

$$\chi_2 = \min \left\{ 1, 0; \frac{[\sigma]_2}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1, 0; 272.73 / 272.73 \} = 1$$

Расчётная длина внутренней части штуцера :

$$l_{3p} = \min \left\{ l_3; 0.5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})} \right\} = \min \{ 0; 0.5 \cdot ((600 + 2 \cdot 3.8) \cdot (10 - 3.8 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления :

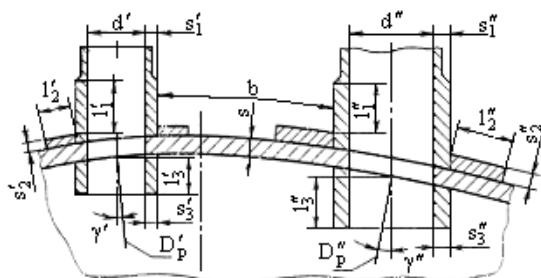
$$d_{op} = 0.4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0.4 \cdot (2400 \cdot (18 - 3.8))^{1/2} = 73.843 \text{ мм}$$

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

$$= \min \{ 1; [1 + (76.721 \cdot (10 - 3.8) \cdot 1 + 200 \cdot 18 \cdot 1 + 0 \cdot (10 - 3.8 - 0) \cdot 1) / (184.61 \cdot (18 - 3.8))] / [1 + 0.5 \cdot (607.6 - 73.843) / 184.61 + 1 \cdot (600 + 2 \cdot 3.8) / 2400 \cdot 1 / 1 \cdot 76.721 / 184.61] = 1.0015 \}$$

= 1

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} = 2 \cdot 1 \cdot (18 - 3.8) \cdot 1 \cdot 272.73 \cdot 1 / [2400 + (18 - 3.8) \cdot 1] = 3.2083 \text{ МПа}$$



Отверстие считается одиночным, если ближайшее к нему отверстие Измерение температуры (Т1) не оказывает на него влияния, т.е. расстояние между наружными поверхностями соответствующих штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (2400 \cdot (18 - 3.8))^{1/2} + (2400 \cdot (18 - 3.8))^{1/2} = 369.22 \text{ мм}$$

Условие выполнено, дальнейших расчётов укреплений не требуется.

Допускаемое давление  $[p] = 3.2083 \text{ МПа}$

$3.2083 \text{ МПа} \geq 2.2696 \text{ МПа}$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено.**

Площадь, необходимая для укрепления отверстия:

$$A_r = 0.5 \cdot (d_p - d_{op}) \cdot s_p = 0.5 \cdot (607.6 - 73.843) \cdot 10.028 = 2676.3 \text{ мм}^2$$

Располагаемая площадь укрепления одиночного отверстия:

$$A_a = l_p \cdot (s_1 - s_p - c_s) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3 + l_p \cdot (s - s_p - c) \cdot \chi_4$$

$$= 76.721 \cdot (10 - 2.5388 - 3.8) \cdot 1 + 200 \cdot 18 \cdot 1 + 0 \cdot (10 - 3.8 - 0) \cdot 1 + 184.61 \cdot (18 - 10.028 - 3.8) \cdot 1$$

$$= 4651.1 \text{ мм}^2$$

$$A_r = 2676.3 \text{ мм}^2 \leq 4651.1 \text{ мм}^2$$

Заключение: **Условие прочности выполнено.**

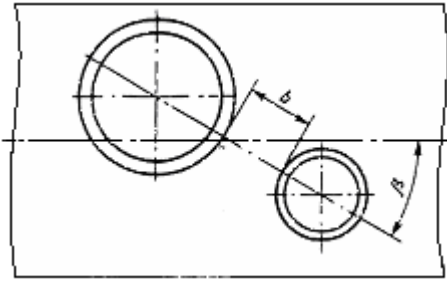
Взам. инв. №				
Подп. и дата				
Инв. № подл.				
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата

90651-20600-AM-02-220 РР

Лист

131





Название штуцера:

Воздушник (V1)

Расстояние до стенки ближайшего штуцера, b:

385.13 мм

Угол  $\beta$ :

0 °

Коэффициенты прочности сварных швов:

Продольный шов штуцера:

$\varphi_1 = 1$

Шов обечайки в зоне врезки штуцера:

$\varphi = 1$

Расчётный диаметр выпуклого эллиптического днища :

$$D_p = \frac{D^2}{2 \cdot H} \cdot \sqrt{1 - 4 \cdot \frac{(D^2 - 4 \cdot H^2)}{D^4} \cdot R_{ш}^2} = 2400^2 / (2 \cdot 600) \cdot (1 - 4 \cdot (2400^2 - 4 \cdot 600^2) \cdot 500^2 / 2400^4)^{1/2} = 4476.6 \text{ мм}$$

Нагрузки, приложенные к патрубку, **не передаются** на соседние элементы аппарата

### Расчёт в рабочих условиях

#### Условия нагружения:

Расчётная температура, T: 100 °C

Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 1.6 МПа

### Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ 34233.3-2017

#### Свойства материала элемента, несущего штуцер

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Лист при температуре 100 °C (рабочие условия):

$[\sigma] = 177 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости при температуре 100 °C:

$E = 1.91 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

#### Свойства материала штуцера

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Труба при температуре 100 °C (рабочие условия):

$[\sigma]_1 = 160 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости при температуре 100 °C:

$E_1 = 1.91 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Расчётная толщина стенки штуцера :

$$s_p + c_s = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 - p} + c_s = 1.6 \cdot (48 + 2 \cdot 3) / (2 \cdot 160 \cdot 1 - 1.6) + 3 = 3.2714 \text{ мм}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера :

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 160 \cdot 1 \cdot (10 - 3) / (48 + 10 + 3) = 36.721 \text{ МПа}$$

36.721 МПа  $\geq$  1.6 МПа

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено.**

Расчётный диаметр выпуклого эллиптического днища :

$$D_p = \frac{D^2}{2 \cdot H} \cdot \sqrt{1 - 4 \cdot \frac{(D^2 - 4 \cdot H^2)}{D^4} \cdot R_{ш}^2} = 2400^2 / (2 \cdot 600) \cdot (1 - 4 \cdot (2400^2 - 4 \cdot 600^2) \cdot 500^2 / 2400^4)^{1/2} = 4476.6 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера :

$s_p = 10.14 \text{ мм}$

Взам. инв. №	Е <sub>1</sub> = 1.91·10 <sup>5</sup> МПа				
	Расчётная толщина стенки штуцера :				
	$s_{\text{ш}} + c_s = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 - p} + c_s = 1.6 \cdot (48 + 2 \cdot 3) / (2 \cdot 160 \cdot 1 - 1.6) + 3 = 3.2714 \text{ мм}$				
Подп. и дата	Допускаемое давление для патрубка штуцера :				
	$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 160 \cdot 1 \cdot (10 - 3) / (48 + 10 + 3) = 36.721 \text{ МПа}$				
	36.721 МПа ≥ 1.6 МПа				
	Заключение: <b>Условие прочности и устойчивости выполнено.</b>				
	Расчётный диаметр выпуклого эллиптического днища :				
	$D_p = \frac{D^2}{2 \cdot H} \cdot \sqrt{1 - 4 \cdot \frac{(D^2 - 4 \cdot H^2)}{D^4} \cdot R_{\text{ш}}^2} = 2400^2 / (2 \cdot 600) \cdot (1 - 4 \cdot (2400^2 - 4 \cdot 600^2) \cdot 500^2 / 2400^4)^{1/2} = 4476.6 \text{ мм}$				
Инв. № подл.	Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера :				
	s <sub>p</sub> = 10.14 мм				
	90651-20600-AM-02-220 РР				
	Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата

Лист
133



Расчётный диаметр отверстия (смещённый штуцер на эллиптическом днище):

$$d_p = \frac{d + 2 \cdot c_s}{\sqrt{1 - \left( \frac{2 \cdot R_{\text{из}}}{D_p} \right)^2}} = (48 + 2 \cdot 3) / [1 - (2 \cdot 500 / 4476.6)^2]^{1/2} = 55.4 \text{ мм}$$

Максимальный диаметр отверстия:

$$d_{\text{max}} = \begin{cases} D & \text{— для отверстий в цилиндрических обечайках} \\ D_k & \text{— для отверстий в конических обечайках} \\ 0.6 \cdot D & \text{— для отверстий в выпуклых днищах} \end{cases} = 1440 \text{ мм}$$

Расчетная толщина стенки обечайки, перехода или днища для определения диаметра отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$s_{\text{pn}} = s_p = 10.14 \text{ мм}$$

Наибольший допустимый диаметр одиночного отверстия, не требующего дополнительного укрепления при наличии избыточной толщины стенки сосуда:

$$d_0 = \min \left\{ 2 \cdot \left( \frac{s - c}{s_{\text{pn}}} - 0.8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)}; d_{\text{max}} + 2 \cdot c_s \right\} = \min \{ 2 \cdot ((18 - 3.8) / 10.14 - 0.8) \cdot (4476.6 \cdot (18 - 3.8))^{1/2}; 1440 + 2 \cdot 3 \} = 302.78 \text{ мм}$$

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

Ширина зоны укрепления :

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (4476.6 \cdot (18 - 3.8))^{1/2} = 252.13 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления :

$$l_p = L_0 = 252.13 \text{ мм}$$

Расчётная длина внешней части штуцера :

$$l_{1p} = \min \{ l_1; 1.25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \} = \min \{ 182; 1.25 \cdot ((48 + 2 \cdot 3) \cdot (10 - 3))^{1/2} \} = 24.303 \text{ мм}$$

### Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера :

$$\chi_1 = \min \left\{ 1.0; \frac{[\sigma]_h}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1.0, 160 / 177 \} = 0.90395$$

Расчётная длина внутренней части штуцера :

$$l_{3p} = \min \{ l_3; 0.5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})} \} = \min \{ 0; 0.5 \cdot ((48 + 2 \cdot 3) \cdot (10 - 3 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления :

$$d_{0p} = 0.4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0.4 \cdot (4476.6 \cdot (18 - 3.8))^{1/2} = 100.85 \text{ мм}$$

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

$$= \min \{ 1; [1 + (24.303 \cdot (10 - 3) \cdot 0.90395 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (10 - 3 - 0) \cdot 0.90395) / (252.13 \cdot (18 - 3.8))] / [1 + 0.5 \cdot (55.4 - 100.85) / 252.13 + 2 \cdot (48 + 2 \cdot 3) / 4476.6 \cdot 1 / 1 \cdot 24.303 / 252.13] \} = 1.1433$$

= 1

$$[P]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} = 2 \cdot 2 \cdot (18 - 3.8) \cdot 1 \cdot 177 \cdot 1 / [4476.6 + (18 - 3.8) \cdot 1] = 2.2387 \text{ МПа}$$

Взам. инв. №

Подп. и дата

Инв. № подл.

90651-20600-AM-02-220 РР

Лист

134





## Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ 34233.3-2017

### Свойства материала элемента, несущего штуцер

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

$$[\sigma]^{20} = \frac{R_e / 20}{n_T} = 300 / 1.1 = 272.73 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 20 °С:

$$E = 1.99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

## Свойства материала штуцера

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

$$[\sigma]^{20_1} = \frac{R_{e/20}}{n_T} = 280 / 1.1 = 254.55 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 20 °С:

$$E_1 = 1.99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Расчётная толщина стенки штуцера :

$$s_{lp} + c_s = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma_1 \cdot \varphi_1 - p]} + c_s = 2.2241 \cdot (48 + 2 \cdot 3) / (2 \cdot 254.55 \cdot 1 - 2.2241) + 3 = 3.2369 \text{ mm}$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера :

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = \frac{2 \cdot 254.55 \cdot 1 \cdot (10 - 3)}{48 + 10 + 3} = 58.42 \text{ МПа}$$

$$58.42 \text{ МПа} \geq 2.2241 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено.**

Расчётный диаметр выпуклого эллиптического днища :

$$D_p = \frac{D^2}{2 \cdot H} \cdot \sqrt{1 - 4 \cdot \frac{(D^2 - 4 \cdot H^2)}{D^4} \cdot R_{ur}^2} = 2400^2 / (2 \cdot 600) \cdot (1 - 4 \cdot (2400^2 - 4 \cdot 600^2) \cdot 500^2 / 2400^4)^{1/2} = 4476.6 \text{ mm}$$

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера :

$$S_0 = 9.1454 \text{ mm}$$

Расчётный диаметр отверстия (смещённый штуцер на эллиптическом днище):

$$d_p = \frac{d + 2 \cdot c_s}{\sqrt{1 - \left( \frac{2 \cdot R_{mr}}{D_p} \right)^2}} = (48 + 2 \cdot 3) / [1 - (2 \cdot 500 / 4476.6)^2]^{1/2} = 55.4 \text{ mm}$$

Максимальный диаметр отверстия:

$$d_{\max} = \begin{cases} D & \text{— для отверстий в цилиндрических обечайках} \\ D_k & \text{— для отверстий в конических обечайках} \\ 0.6 \cdot D & \text{— для отверстий в выпуклых днищах} \end{cases} = 1440 \text{ мм}$$

Расчетная толщина стенки обечайки, перехода или днища для определения диаметра отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$s_{pn} = s_p = 9.1454\text{mm}$$

Наибольший допустимый диаметр одиночного отверстия, не требующего дополнительного укрепления при наличии избыточной толщины стенки сосуда:

$$d_0 = \min \left\{ 2 \cdot \left( \frac{s-c}{s_{pn}} - 0.8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s-c)}; d_{\max} + 2 \cdot c_s \right\} = \min \{ 2 * ((18-3.8) / 9.1454 - 0.8) * (4476.6 * (18-3.8))^{1/2}; 1440 + 2 * 3 \} = 379.55 \text{ mm}$$

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

Ширина зоны укрепления :

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (4476.6 \cdot (18 - 3.8))^{1/2} = 252.13 \text{ mm}$$

Расчётная ширина зоны укрепления :

$$l_p = L_0 = 252.13 \text{ mm}$$

Взам. инв. №		Подп. и дата		Инв. № подл.		<div> <div>90651-20600-AM-02-220 PP</div> <div>Лист</div> <div>136</div> </div>



Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №

Этот документ является собственностью "НЕФТЕХИМПРОЕКТ" и не подлежит копированию и распространению без его согласия

НЕФТЕХИМПРОЕКТ NEFTECHIMPROEKT			МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ			РР	
<p>3.3296 МПа ≥ 2.2241 МПа</p> <p>Заключение: <b>Условие прочности и устойчивости выполнено.</b></p> <p>Площадь, необходимая для укрепления отверстия:</p> <p><math>A_T = 0.5(d_p - d_{op}) \cdot s_p = 0.5 \cdot (55.4 - 100.85) \cdot 9.1454 = (-207.83) \text{мм}^2</math></p> <p>Располагаемая площадь укрепления одиночного отверстия:</p> <p><math>A_a = l_p \cdot (s_1 - s_{1p} - c_s) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3 + l_p \cdot (s - s_p - c) \cdot \chi_4</math></p> <p><math>= 24.303 \cdot (10 - 0.23695 - 3) \cdot 0.93333 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (10 - 3 - 0) \cdot 0.93333 + 252.13 \cdot (18 - 9.1454 - 3.8) \cdot 1</math></p> <p><math>= 1427.8 \text{мм}^2</math></p> <p><math>A_T = (-207.83) \text{ мм}^2 \leq 1427.8 \text{ мм}^2</math></p> <p>Заключение: <b>Условие прочности выполнено.</b></p>							
					90651-20600-AM-02-220 РР		Лист
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата			138

Измерение температуры (Т1)

Исходные данные

Элемент:

Условное обозначение (метка)

Элемент, несущий штуцер:

Тип элемента, несущего штуцер:

Тип штуцера:

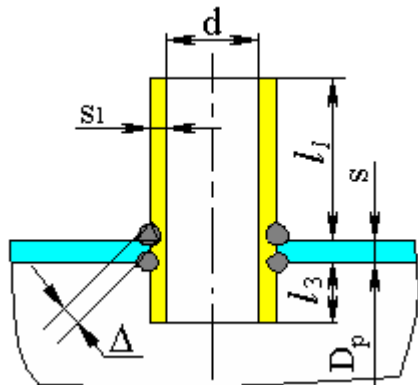
Измерение температуры  
(Т1)

Т1

Обечайка цилиндрическая

Обечайка цилиндрическая

Проходящий без укрепления



Материал несущего элемента:

Толщина стенки несущего элемента, s:

Сумма прибавок к стенке несущего элемента, с:

Материал штуцера:

Внутренний диаметр штуцера, d:

Толщина стенки штуцера, s1:

Сумма прибавок к толщине стенки штуцера (включая коррозию), сs:

Длина штуцера, l1:

09Г2С Лист

18мм

3.8 мм

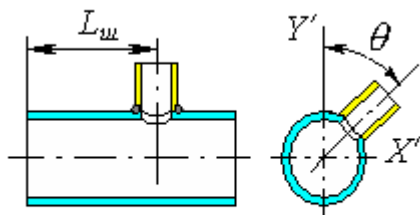
09Г2С Труба

48 мм

10 мм

3 мм

182 мм



Смещение штуцера, Lш:

Угол поворота штуцера, θ:

Длина внутр. части штуцера, l3:

Прибавка на коррозию, сs1:

Минимальный размер сварного шва, Δ:

Расчётные параметры размещения штуцера:

Ближайший штуцер

390 мм

45 °

0 мм

0 мм

10 мм

Изм. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №

Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата

90651-20600-AM-02-220 РР

Лист

139



Максимальный диаметр отверстия:

$$d_{\max} = \begin{cases} D & \text{— для отверстий в цилиндрических обечайках— для отверстий в конических обечайках — для от-} \\ D_k & \text{верстий в выпуклых днищах} \end{cases} = 2400 \text{ мм}$$

Расчетная толщина стенки обечайки, перехода или днища для определения диаметра отверстия, не требующего дополнительного укрепления:

$$s_{\text{рн}} = s_p = 11.109 \text{ мм}$$

Наибольший допустимый диаметр одиночного отверстия, не требующего дополнительного укрепления при наличии избыточной толщины стенки сосуда:

$$d_0 = \min \left\{ 2 \cdot \left( \frac{s-c}{s_{\text{рн}}} - 0.8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s-c)}; d_{\max} + 2 \cdot c_s \right\} = \min \{ 2 \cdot ((18-3.8) / 11.109 - 0.8) \cdot (2400 \cdot (18-3.8))^{1/2}; 2400 + 2 \cdot 3 \} = 176.56 \text{ мм}$$

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

Ширина зоны укрепления :

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s-c)} = (2400 \cdot (18-3.8))^{1/2} = 184.61 \text{ мм}$$

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

$$L_k = 416 \text{ мм}$$

Расчётная ширина зоны укрепления :

$$l_p = L_0 = 184.61 \text{ мм}$$

Расчётная длина внешней части штуцера :

$$l_{1p} = \min \{ l_1; 1.25 \cdot \sqrt{(d+2 \cdot c_s) \cdot (s_1-c_s)} \} = \min \{ 182; 1.25 \cdot ((48+2 \cdot 3) \cdot (10-3))^{1/2} \} = 24.303 \text{ мм}$$

### Отношения допускаемых напряжений

Для внешней части штуцера :

$$\chi_1 = \min \left\{ 1.0; \frac{[\sigma]_h}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1.0, 160 / 177 \} = 0.90395$$

Расчётная длина внутренней части штуцера :

$$l_{3p} = \min \{ l_3; 0.5 \cdot \sqrt{(d+2 \cdot c_s) \cdot (s_3-c_s-c_{s1})} \} = \min \{ 0; 0.5 \cdot ((48+2 \cdot 3) \cdot (10-3-0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления :

$$d_{оп} = 0.4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s-c)} = 0.4 \cdot (2400 \cdot (18-3.8))^{1/2} = 73.843 \text{ мм}$$

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

$$= \min \{ 1; [1 + (24.303 \cdot (10-3) \cdot 0.90395 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (10-3-0) \cdot 0.90395) / (184.61 \cdot (18-3.8))] / [1 + 0.5 \cdot (54 - 73.843) / 184.61 + 1 \cdot (48+2 \cdot 3) / 2400 \cdot 1 / 1 \cdot 24.303 / 184.61] = 1.1153 \}$$

$$= 1$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s-c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s-c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 1 \cdot (18-3.8) \cdot 1 \cdot 177 \cdot 1 / [2400 + (18-3.8) \cdot 1] = 2.0822 \text{ МПа}$$

Взам. инв. №

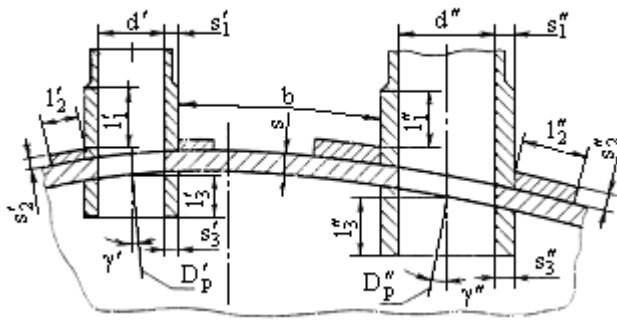
Подп. и дата

Инв. № подл.

90651-20600-AM-02-220 РР

Лист

141



Отверстие считается одиночным, если ближайшее к нему отверстие Люк-лаз (М1) не оказывает на него влияния, т.е. расстояние между наружными поверхностями соответствующих штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D'_p \cdot (s - c)} + \sqrt{D''_p \cdot (s - c)} = (2400 \cdot (18 - 3.8))^{1/2} + (2400 \cdot (18 - 3.8))^{1/2} = 369.22 \text{ мм}$$

Условие выполнено, дальнейших расчётов укреплений не требуется.

Допускаемое давление  $[p] = 2.0822 \text{ МПа}$

$2.0822 \text{ МПа} \geq 1.6311 \text{ МПа}$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено.**

Площадь, необходимая для укрепления отверстия:

$$A_r = 0.5 \cdot (d_p - d_{op}) \cdot s_p = 0.5 \cdot (54 - 73.843) \cdot 11.109 = (-110.22) \text{ мм}^2$$

Располагаемая площадь укрепления одиночного отверстия:

$$A_a = l_p \cdot (s_1 - s_p - c_s) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3 + l_p \cdot (s - s_p - c) \cdot \chi_4$$

$$= 24.303 \cdot (10 - 0.27666 - 3) \cdot 0.90395 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (10 - 3 - 0) \cdot 0.90395 + 184.61 \cdot (18 - 11.109 - 3.8) \cdot 1$$

$$= 718.25 \text{ мм}^2$$

$$A_r = (-110.22) \text{ мм}^2 \leq 718.25 \text{ мм}^2$$

Заключение: **Условие прочности выполнено.**

### Расчет давления испытаний

Пробное давление при гидравлическом испытании, при работе элемента под внутренним давлением:

$$P_{гп} = 1.25 \cdot p \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]_t} = 1.25 \cdot 1.6311 \cdot 183 / 160 = 2.3319 \text{ МПа}$$

### Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)

#### Условия нагружения при испытаниях:

Расчётная температура, T: 20 °C

Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 2.2694 МПа

### Расчёт укрепления отверстия по ГОСТ 34233.3-2017

#### Свойства материала элемента, несущего штуцер

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

$$[\sigma]^{20} = \frac{R_e / 20}{n_T} = 300 / 1.1 = 272.73 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 20 °C:

$$E = 1.99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

#### Свойства материала штуцера

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

$$[\sigma]^{20}_1 = \frac{R_e / 20}{n_T} = 280 / 1.1 = 254.55 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 20 °C:

$$E_1 = 1.99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	90651-20600-AM-02-220 РР					Лист
								142
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата				



НЕФТЕХИМПРОЕКТ NEFTECHIMPROEKT		МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ		PP		
Этот документ является собственностью "НЕФТЕХИМПРОЕКТ" и не подлежит копированию и распространению без его согласия	Расчётная толщина стенки штуцера :					
	$s_{ш} + c_s = \frac{p \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 - p} + c_s = 2.2694 \cdot (48 + 2 \cdot 3) / (2 \cdot 254.55 \cdot 1 - 2.2694) + 3 = 3.2418 \text{ мм}$					
	Допускаемое давление для патрубка штуцера :					
	$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 2 \cdot 254.55 \cdot 1 \cdot (10 - 3) / (48 + 10 + 3) = 58.42 \text{ МПа}$					
	58.42 МПа ≥ 2.2694 МПа					
	Заключение: <b>Условие прочности и устойчивости выполнено.</b>					
	Расчётный диаметр цилиндрической обечайки:					
	$D_p = D = 2400 \text{ мм}$					
	Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера :					
	$s_p = 10.027 \text{ мм}$					
	Расчётный диаметр отверстия (ось штуцера совпадает с нормалью к поверхности в центре отверстия):					
	$d_p = d + 2 \cdot c_s = 48 + 2 \cdot 3 = 54 \text{ мм}$					
	Максимальный диаметр отверстия:					
	$d_{\max} = \begin{cases} D & \text{— для отверстий в цилиндрических обечайках— для отверстий в конических обечайках — для от-} \\ D_k & \text{верстий в выпуклых днищах} \end{cases} = 2400 \text{ мм}$					
	Расчетная толщина стенки обечайки, перехода или днища для определения диаметра отверстия, не требующего дополнительного укрепления:					
	$s_{pn} = s_p = 10.027 \text{ мм}$					
	Наибольший допустимый диаметр одиночного отверстия, не требующего дополнительного укрепления при наличии избыточной толщины стенки сосуда:					
	$d_0 = \min \left\{ 2 \cdot \left( \frac{s - c}{s_{pn}} - 0.8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)}; d_{\max} + 2 \cdot c_s \right\} = \min \{ 2 \cdot ((18 - 3.8) / 10.027 - 0.8) \cdot (2400 \cdot (18 - 3.8))^{1/2}; 2400 + 2 \cdot 3 \} = 227.51 \text{ мм}$					
	$d_p < d_0$ : <b>Условие прочности выполнено.</b>					
	Ширина зоны укрепления :					
	$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = (2400 \cdot (18 - 3.8))^{1/2} = 184.61 \text{ мм}$					
	Расстояние от наружной поверхности штуцера до ближайшего несущего конструктивного элемента (Днище эллиптическое нижнее):					
	$L_k = 416 \text{ мм}$					
	Расчётная ширина зоны укрепления :					
	$l_p = L_0 = 184.61 \text{ мм}$					
	Расчётная длина внешней части штуцера :					
	$l_{ш} = \min \{ l_1; 1.25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \} = \min \{ 182; 1.25 \cdot ((48 + 2 \cdot 3) \cdot (10 - 3))^{1/2} \} = 24.303 \text{ мм}$					
	<b>Отношения допускаемых напряжений</b>					
	Для внешней части штуцера :					
	$\chi_1 = \min \left\{ 1.0; \frac{[\sigma]_h}{[\sigma]} \right\} = \min \{ 1.0, 254.55 / 272.73 \} = 0.93333$					
	Расчётная длина внутренней части штуцера :					
	$l_{зп} = \min \{ l_3; 0.5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})} \} = \min \{ 0; 0.5 \cdot ((48 + 2 \cdot 3) \cdot (10 - 3 - 0))^{1/2} \} = 0 \text{ мм}$					
	Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления :					
	$d_{оп} = 0.4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0.4 \cdot (2400 \cdot (18 - 3.8))^{1/2} = 73.843 \text{ мм}$					
	Взам. инв. №	Подп. и дата	Инв. № подл.			
				90651-20600-AM-02-220 PP	Лист	
					143	
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата		

90651-20600-AM-02-220 PP изм.0.docx

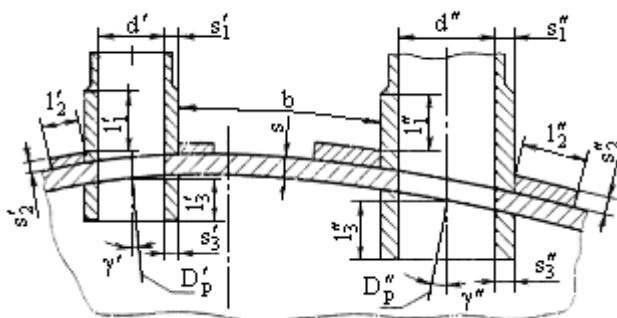
Формат А4

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

$$= \min \{1; [1 + (24.303 \cdot (10 - 3) \cdot 0.93333 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (10 - 3 - 0) \cdot 0.93333) / (184.61 \cdot (18 - 3.8))] / [1 + 0.5 \cdot (54 - 73.843) / 184.61 + 1 \cdot (48 + 2 \cdot 3) / 2400 \cdot 1 / 1 \cdot 24.303 / 184.61] = 1.1173\}$$

$$= 1$$

$$[p]_p = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V = 2 \cdot 1 \cdot (18 - 3.8) \cdot 1 \cdot 272.73 \cdot 1 / [2400 + (18 - 3.8) \cdot 1] = 3.2083 \text{ МПа}$$



Отверстие считается одиночным, если ближайшее к нему отверстие Люк-лаз (М1) не оказывает на него влияния, т.е. расстояние между наружными поверхностями соответствующих штуцеров удовлетворяет условию:

$$b > \sqrt{D_p' \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p'' \cdot (s - c)} = (2400 \cdot (18 - 3.8))^{1/2} + (2400 \cdot (18 - 3.8))^{1/2} = 369.22 \text{ мм}$$

Условие выполнено, дальнейших расчётов укреплений не требуется.

Допускаемое давление  $[p] = 3.2083 \text{ МПа}$

$3.2083 \text{ МПа} \geq 2.2694 \text{ МПа}$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено.**

Площадь, необходимая для укрепления отверстия:

$$A_r = 0.5 \cdot (d_p - d_{op}) \cdot s_p = 0.5 \cdot (54 - 73.843) \cdot 10.027 = (-99.482) \text{ мм}^2$$

Располагаемая площадь укрепления одиночного отверстия:

$$A_a = l_{1p} \cdot (s_1 - s_{1p} - c_s) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3 + l_p \cdot (s - s_p - c) \cdot \chi_4$$

$$= 24.303 \cdot (10 - 0.24179 - 3) \cdot 0.93333 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot (10 - 3 - 0) \cdot 0.93333 + 184.61 \cdot (18 - 10.027 - 3.8) \cdot 1$$

$$= 923.68 \text{ мм}^2$$

$$A_r = (-99.482) \text{ мм}^2 \leq 923.68 \text{ мм}^2$$

Заключение: **Условие прочности выполнено.**

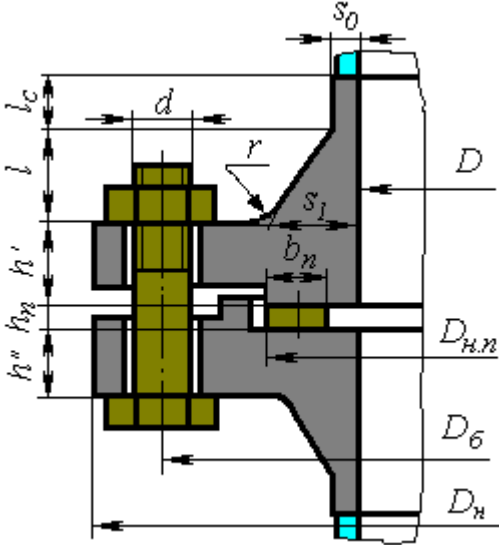
Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	90651-20600-AM-02-220 РР					Лист
								144
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата				Формат А4

Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата
Изм. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №		

Этот документ является собственностью "НЕФТЕХИМПРОЕКТ" и не подлежит копированию и распространению без его согласия

# Фланцевое соединение N1, N2

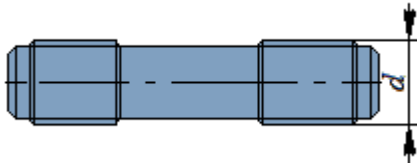
Расчет выполнен на примере фланцевого соединения N1



## Исходные данные

Тип фланцев: Приварные встык  
Исполнение: Выступ-впадина  
Диаметр болтовой окружности,  $D_б$ : 550 мм

### Шпильки:



Материал: 35X Крепеж  
Наружный диаметр,  $d$ : 30 мм  
Количество,  $n$ : 16  
Контроль затяжки: Без контроля затяжки

### Прокладка:

Материал прокладки: Спирально-навитая с лентой из нержавеющей стали  
Толщина,  $h_п$ : 3.2 мм  
Наружный диаметр,  $D_{н.п.}$ : 473 мм  
Ширина,  $b_п$ : 13 мм

### Закладная деталь:

Материал: 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ  
Толщина,  $s_{рп.}$ : 8479 Поковка  
29 мм

### Данные первого фланца (кольца):

Материал фланца (кольца): 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка  
Наружный диаметр фланца (кольца),  $D_н$ : 610 мм  
Толщина фланца (кольца) с впадиной,  $h''$ : 40 мм  
Внутренний диаметр фланца (кольца),  $D$ : 398 мм  
Сумма прибавок,  $c$ : 3 мм  
Длина конической части втулки,  $l$ : 40 мм  
Длина цилиндрической части втулки,  $l_c$ : 20 мм

Этот документ является собственностью "НЕФТЕХИМПРОЕКТ" и не подлежит копированию и распространению без его согласия

НЕФТЕХИМПРОЕКТ NEFTECHIMPROEKT		МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ			РР	
Толщина цилиндрической части втулки, s <sub>0</sub> :		17 мм				
Толщина конической части втулки, s <sub>1</sub> :		33 мм				
Радиус перехода, r:		5 мм				
Данные второго фланца (кольца):						
Материал фланца (кольца):		09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка				
Наружный диаметр фланца (кольца), D <sub>н</sub> :		610 мм				
Толщина фланца (кольца) с выступом, h'		44 мм				
Внутренний диаметр фланца (кольца), D:		398 мм				
Сумма прибавок, с:		3 мм				
Длина конической части втулки, l:		40 мм				
Длина цилиндрической части втулки, l <sub>с</sub> :		20 мм				
Толщина цилиндрической части втулки, s <sub>0</sub> :		17 мм				
Толщина конической части втулки, s <sub>1</sub> :		33 мм				
Радиус перехода, r:		5 мм				
Расчёт в рабочих условиях						
Условия нагружения:						
Расчётное осевое растягивающее усилие, F:		10000 Н				
Расчётный изгибающий момент, M:		23052 Н·м				
Расчётное внутреннее избыточное давление, p:		1.6313 МПа				
Расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ 34233.4-2017						
Расчётная температура элементов соединения:						
Температура фланца (кольца), t <sub>ф</sub> :		100 °С				
Температура фланца (кольца), t <sub>ф</sub> :		100 °С				
Температура болтов (шпилек), t <sub>б</sub> :		100 °С				
Свойства материала болтов (шпилек)						
Допускаемые напряжения для материала 35Х Крепеж при температуре 100 °С (рабочие условия):		[σ] <sub>6</sub> = 230 МПа				
Модуль продольной упругости для материала 35Х Крепеж при температуре T = 100 °С:		E <sub>6</sub> = 2.15·10 <sup>5</sup> МПа				
Коэффициент линейного расширения для материала 35Х Крепеж при температуре T = 100 °С:		α <sub>6</sub> = 0.134·10 <sup>-4</sup> /°С				
Допускаемые напряжения для материала 35Х Крепеж при температуре 20 °С (рабочие условия):		[σ] <sup>20</sup> <sub>6</sub> = 230 МПа				
Модуль продольной упругости для материала 35Х Крепеж при температуре T = 20 °С:		E <sup>20</sup> <sub>6</sub> = 2.18·10 <sup>5</sup> МПа				
Свойства материала фланца (кольца) 1						
Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре 100 °С (рабочие условия):		[σ] <sub>ф1</sub> = 144 МПа				
Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре T = 100 °С:		E <sub>1</sub> = 1.91·10 <sup>5</sup> МПа				
Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре T = 100 °С:		α <sub>1</sub> = 0.116·10 <sup>-4</sup> /°С				
Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре 20 °С (рабочие условия):		[σ] <sup>20</sup> <sub>ф1</sub> = 164.5 МПа				
Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре T =						
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	90651-20600-AM-02-220 РР	Лист
						146

Взам. инв. №

Подп. и дата

Инв. № подл.

90651-20600-AM-02-220 РР\_изм.0.docx

Формат А4



$$\beta_U = \frac{K^2(1+8.55 \cdot \lg K) - 1}{1.36 \cdot (K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = (1.5327^2 \cdot (1+8.55 \cdot \lg 1.5327) - 1) / (1.36 \cdot (1.5327^2 - 1) \cdot (1.5327 - 1)) = 5.1916$$

$$\lambda = \frac{\beta_F \cdot h + 1_0}{\beta_T \cdot 1_0} + \frac{\beta_V \cdot h^3}{\beta_U \cdot 1_0 \cdot s_0^2} = (0.83032 \cdot 40 + 82.256) / (1.6952 \cdot 82.256) + 0.23798 \cdot 40^3 / (5.1916 \cdot 82.256 \cdot 17^2) = 0.95151$$

Угловая податливость фланца при затяжке:

$$y_\Phi = \frac{0.91 \cdot \beta_V}{E^{20} \cdot \lambda \cdot s_0^2 \cdot 1_0} = 0.91 \cdot 0.23798 / (1.99 \cdot 10^5 \cdot 0.95151 \cdot 17^2 \cdot 82.256) = 0.27566 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ/\text{Н}\cdot\text{м}$$

Угловая податливость фланца, нагруженного внешним изгибающим моментом:

$$y_{\Phi M} = \left( \frac{\pi}{4} \right)^3 \cdot \frac{D_6}{E^{20} \cdot D_H \cdot h^3} = (3.1416 / 4)^3 \cdot 550 / (1.99 \cdot 10^5 \cdot 610 \cdot 40^3) = 0.19651 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ/\text{Н}\cdot\text{м}$$

Плечи моментов:

$$a = 0$$

$$b = 0.5 \cdot (D_6 - D_{\text{сп}}) = 0.5 \cdot (550 - 460) = 45 \text{ мм}$$

$$e = 0.5 \cdot (D_{\text{сп}} - D - s_3) = 0.5 \cdot (460 - 398 - 23.369) = 19.315 \text{ мм}$$

**Расчётные параметры второго фланца:**

$$\beta = \frac{s_1}{s_0} = 33/17 = 1.9412$$

$$x = \frac{1}{\sqrt{D \cdot s_0}} = 40 / (398 \cdot 17)^{1/2} = 0.48629$$

$$\kappa = 1 + (\beta - 1) \cdot \frac{x}{x + \frac{1 + \beta}{4}} = 1 + (1.9412 - 1) \cdot 0.48629 / (0.48629 + (1 + 1.9412) / 4) = 1.3747$$

Эквивалентная толщина втулки для фланца, приварного встык:

$$s_3 = \kappa \cdot s_0 = 1.3747 \cdot 17 = 23.369 \text{ мм}$$

$$1_0 = \sqrt{D \cdot s_0} = (398 \cdot 17)^{1/2} = 82.256 \text{ мм}$$

$$\beta_F = 0.83032$$

$$K = \frac{D_H}{D} = 610 / 398 = 1.5327$$

$$\beta_T = \frac{K^2(1+8.55 \cdot \lg K) - 1}{(1.05 + 1.945 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} = (1.5327^2 \cdot (1+8.55 \cdot \lg 1.5327) - 1) / ((1.05 + 1.945 \cdot 1.5327^2) \cdot (1.5327 - 1)) = 1.6952$$

$$\beta_V = 0.23798$$

$$\beta_U = \frac{K^2(1+8.55 \cdot \lg K) - 1}{1.36 \cdot (K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = (1.5327^2 \cdot (1+8.55 \cdot \lg 1.5327) - 1) / (1.36 \cdot (1.5327^2 - 1) \cdot (1.5327 - 1)) = 5.1916$$

$$\lambda = \frac{\beta_F \cdot h + 1_0}{\beta_T \cdot 1_0} + \frac{\beta_V \cdot h^3}{\beta_U \cdot 1_0 \cdot s_0^2} = (0.83032 \cdot 44 + 82.256) / (1.6952 \cdot 82.256) + 0.23798 \cdot 44^3 / (5.1916 \cdot 82.256 \cdot 17^2) = 1.0162$$

Угловая податливость фланца при затяжке:

$$y_\Phi = \frac{0.91 \cdot \beta_V}{E^{20} \cdot \lambda \cdot s_0^2 \cdot 1_0} = 0.91 \cdot 0.23798 / (1.99 \cdot 10^5 \cdot 1.0162 \cdot 17^2 \cdot 82.256) = 0.25812 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ/\text{Н}\cdot\text{м}$$

Угловая податливость фланца, нагруженного внешним изгибающим моментом:

$$y_{\Phi M} = \left( \frac{\pi}{4} \right)^3 \cdot \frac{D_6}{E^{20} \cdot D_H \cdot h^3} = (3.1416 / 4)^3 \cdot 550 / (1.99 \cdot 10^5 \cdot 610 \cdot 44^3) = 0.14764 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ/\text{Н}\cdot\text{м}$$

Плечи моментов:

$$a = 0$$

$$b = 0.5 \cdot (D_6 - D_{\text{сп}}) = 0.5 \cdot (550 - 460) = 45 \text{ мм}$$

$$e = 0.5 \cdot (D_{\text{сп}} - D - s_3) = 0.5 \cdot (460 - 398 - 23.369) = 19.315 \text{ мм}$$

Взам. инв. №	$\lambda = \frac{\beta_F \cdot h + 1_0}{\beta_T \cdot 1_0} + \frac{\beta_V \cdot h^3}{\beta_U \cdot 1_0 \cdot s_0^2} = (0.83032 \cdot 44 + 82.256) / (1.6952 \cdot 82.256) + 0.23798 \cdot 44^3 / (5.1916 \cdot 82.256 \cdot 17^2) = 1.0162$					
	Угловая податливость фланца при затяжке:					
Подп. и дата	$y_{\Phi} = \frac{0.91 \cdot \beta_V}{E^{20} \cdot \lambda \cdot s_0^2 \cdot 1_0} = 0.91 \cdot 0.23798 / (1.99 \cdot 10^5 \cdot 1.0162 \cdot 17^2 \cdot 82.256) = 0.25812 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ/\text{Н}\cdot\text{м}$					
	Угловая податливость фланца, нагруженного внешним изгибающим моментом:					
Инв. № подл.	$y_{\Phi M} = \left(\frac{\pi}{4}\right)^3 \cdot \frac{D_6}{E^{20} \cdot D_{\kappa} \cdot h^3} = (3.1416 / 4)^3 \cdot 550 / (1.99 \cdot 10^5 \cdot 610 \cdot 44^3) = 0.14764 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ/\text{Н}\cdot\text{м}$					
	Плечи моментов:					
	$a = 0$					
	$b = 0.5 \cdot (D_6 - D_{\text{сш}}) = 0.5 \cdot (550 - 460) = 45 \text{ мм}$					
$e = 0.5 \cdot (D_{\text{сш}} - D - s_3) = 0.5 \cdot (460 - 398 - 23.369) = 19.315 \text{ мм}$						
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	90651-20600-AM-02-220 РР	Лист
						148

НЕФТЕХИМПРОЕКТ NEFTECHIMPROEKT		МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ			РР
Характеристики прокладки:					
Тип и материал прокладки	Коэффициент m	Удельное давление обжатия q <sub>обж</sub> , МПа	Допускаемое удельное давление [q], МПа	Коэффициент обжатия К	Условный модуль сжатия E <sub>п</sub> , МПа
Спирально-навитая с лентой из нержавеющей стали	3	69	-	-	-
Эффективная ширина прокладки : b <sub>0</sub> = 13 мм <div> Примечание: <div> <div> <math>b_0 = b_{\text{пф}}</math> </div> <div> при <math>b_{\text{пф}} \leq 15.0</math> мм </div> </div> <div> <math>b_0 = 3.8 \cdot \sqrt{b_{\text{пф}}}</math> </div> <div> при <math>b_{\text{пф}} &gt; 15.0</math> мм </div> </div>					

НЕФТЕХИМПРОЕКТ NEFTECHIMPROEKT					МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ					PP					
$P_{61} = \alpha \cdot (Q_{\pi} + F) + R_{\pi} + \frac{4 \cdot \alpha_M \cdot  M }{D_{\pi\pi}} = 1.307 \cdot (2.7097 \cdot 10^5 + 0) + 91942 + 4 \cdot 1.2542 \cdot  0  / 460 = 4.4611 \cdot 10^5 \text{ Н}$															
Суммарная площадь сечения болтов (шпилек) по внутреннему диаметру резьбы или сечению наименьшего диаметра:															
$A_6 = n \cdot f_6 = 16 \cdot 520 = 8320 \text{ мм}^2$															
Расчётная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для обжатия прокладки и минимального начального натяжения болтов:															
$P_{62} = \max \{ P_{обж}; 0.4 \cdot A_6 \cdot [\sigma]_6^{20} \} = \max \{ 6.4814 \cdot 10^5; 0.4 \cdot 8320 \cdot 230 = 7.6544 \cdot 10^5 \} = 7.6544 \cdot 10^5 \text{ Н}$															
Расчёт без учета стесненности температурных деформаций															
Расчёт болтов(шпилек):															
Коэффициент увеличения допускаемых напряжений при затяжке: $\xi = 1.2$															
Коэффициент условий работы: $K_{yp} = 1$															
Коэффициент условий затяжки: $K_{yz} = 1$															
Коэффициент учета нагрузки от температурных деформаций: $K_{yt} = 1$															
Допускаемые напряжения для болтов (шпилек) при затяжке :															
$[\sigma]_6^M = \xi \cdot K_{yp} \cdot K_{yz} \cdot K_{yt} \cdot [\sigma]_6^{20} = 1.2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 230 = 276 \text{ МПа}$															
В соответствии с п.4.4 ГОСТ 34233.4-2017 фланцевые соединения должны отвечать условиям прочности и плотности как в случае учета внешней осевой силы и изгибающего момента, так и при расчете только на действие давления. Проводятся оба расчета, в отчет выводится худший случай.															
Болтовая нагрузка в условиях затяжки :															
$P_6^M = \max \{ P_{61}; P_{62} \} = \max \{ 7.1059 \cdot 10^5; 7.6544 \cdot 10^5 \} = 7.6544 \cdot 10^5 \text{ Н}$															
Условие прочности при затяжке:															
$\sigma_{61} = \frac{P_6^M}{A_6} \leq [\sigma]_6^M$															
$\sigma_{61} = \frac{P_6^M}{A_6} = 7.6544 \cdot 10^5 / 8320 = 92 \text{ МПа}$															
Крутящий момент при затяжке болтов (шпилек) без смазки при $\sigma_{61} < 120 \text{ МПа}$ :															
$M_{кр} = 0.3 \cdot \frac{P_6^M \cdot d}{n} = 0.3 \cdot 7.6544 \cdot 10^5 \cdot 30 / 16 = 430.56 \text{ Н·м}$															
При наличии смазки величина $M_{кр}$ снижается на 25% и составляет $0.75 \cdot M_{кр} = 322.92 \text{ Н·м}$															
$92 \text{ МПа} \leq 276 \text{ МПа}$ , <b>Условие прочности выполнено.</b>															
Допускаемые напряжения для болтов (шпилек) при рабочих условиях:															
$[\sigma]_6^P = K_{yp} \cdot K_{yz} \cdot K_{yt} \cdot [\sigma]_6 = 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 230 = 230 \text{ МПа}$															
Болтовая нагрузка в рабочих условиях :															
$P_6^P = P_6^M + (1 - \alpha) \cdot (Q_{\pi} + F) + \frac{4 \cdot (1 - \alpha_M) \cdot  M }{D_{\pi\pi}} = 7.6544 \cdot 10^5 + (1 - 1.307) \cdot (2.7097 \cdot 10^5 + 0) + 4 \cdot (1 - 1.2542) \cdot  0  / 460 = 6.8225 \cdot 10^5 \text{ Н}$															
Условие прочности в рабочих условиях:															
$\sigma_{62} = \frac{P_6^P}{A_6} \leq [\sigma]_6^P$															
$\sigma_{62} = \frac{P_6^P}{A_6} = 6.8225 \cdot 10^5 / 8320 = 82.001 \text{ МПа}$															
$82.001 \text{ МПа} \leq 230 \text{ МПа}$ , <b>Условие прочности выполнено.</b>															
										90651-20600-AM-02-220 PP					Лист
															150
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата											



### Расчёт первого фланца:

Коэффициент, учитывающий изгиб тарелки фланца между шпильками:

$$C_F = \max \left\{ 1; \sqrt{\frac{\frac{\pi \cdot D_6}{n}}{2 \cdot d + \frac{6 \cdot h}{m + 0.5}}} \right\} = \max \{1; (3.1416 \cdot 550 / 16 / (2 \cdot 30 + 6 \cdot 40 / (3 + 0.5)))^{1/2}\} = 1$$

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при затяжке:

$$M^M = C_F \cdot P_6^M \cdot b = 1 \cdot 7.6544 \cdot 10^5 \cdot 45 = 34445 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$f = \max \left\{ \frac{C_{36}}{1 + A}; 1.0 \right\} = \max \{2.3189 / (1 + 0.94118); 1.0\} = 1.1946$$

$$D^* = D + c + s_{0 \text{ при } (D + 2 \cdot c) < 20 \cdot (s_1 - c) \text{ и } f > 1} = 398 + 0 + 17 \text{ при } (398 + 2 \cdot 0) < 20 \cdot (33 - 0) \text{ и } f = 1.1946 > 1 = 415 \text{ мм}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении  $s_1$ :

$$\sigma_1^M = \frac{M^M}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D^*} = 34445 / (0.95151 \cdot (33 - 3)^2 \cdot 415) = 96.921 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в условиях затяжки:

$$\sigma_R^M = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + 1.0}{\lambda \cdot h^2 \cdot 1.0 \cdot D} \cdot M^M = (1.33 \cdot 0.83032 \cdot 40 + 82.256) / (0.95151 \cdot 40^2 \cdot 82.256 \cdot 398) \cdot 34445 = 87.375 \text{ МПа}$$

$$\beta_Y = \frac{1}{K - 1} \cdot \left( 0.69 + 5.72 \cdot \frac{K^2 \cdot \lg K}{K^2 - 1} \right) = 1 / (1.5327 - 1) \cdot (0.69 + 5.72 \cdot 1.5327^2 \cdot \lg 1.5327 / (1.5327^2 - 1)) = 4.763$$

$$\beta_Z = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = (1.5327^2 + 1) / (1.5327^2 - 1) = 2.4825$$

Окружное напряжение в тарелке в условиях затяжки:

$$\sigma_T^M = \frac{\beta_Y \cdot M^M}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^M = 4.763 \cdot 34445 / (40^2 \cdot 398) - 2.4825 \cdot 87.375 = 40.721 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении  $s_1$  (п. 8.5.1):

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^M + \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_1^M + \sigma_T^M \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{м}}^{20}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^M + \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_1^M + \sigma_T^M \right| \right\} = \max \{96.921 + 87.375; |96.921 + 40.721|\} = 184.3 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_{\text{м}}^{20} = 1.5 \cdot [\sigma]_{\text{ф}}^{20} = 1.5 \cdot 164.5 = 246.75 \text{ МПа}$$

$$K = \frac{D_H}{D} = 610 / 398 = 1.5327$$

Коэффициент учета размеров тарелки фланца:  $K_S = 1.0442$

$$K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{м}}^{20} = 1.0442 \cdot 1 \cdot 246.75 = 257.66 \text{ МПа}$$

184.3 МПа ≤ 257.66 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Болтовая нагрузка в рабочих условиях:

$$P_6^P = P_6^M + (1 - \alpha) \cdot (Q_{\text{д}} + F) + \frac{4 \cdot (1 - \alpha_{\text{м}}) \cdot |M|}{D_{\text{от}}} = \frac{7.6544 \cdot 10^5}{460} + (1 - 1.307) \cdot (2.7097 \cdot 10^5 + 10000) + 4 \cdot (1 - 1.2542) \cdot |23052| = 6.2821 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Приведенная нагрузка от внешней силы и момента:

$$Q_{\text{FM}}^+ = F + \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{от}}} = 10000 + 4 \cdot |23052| / 460 = 2.1045 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

$$Q_{\text{FM}}^- = F - \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{от}}} = 10000 - 4 \cdot |23052| / 460 = (-1.9045 \cdot 10^5) \text{ Н}$$

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при рабочих условиях:

$$M^P = C_F \cdot \max \left\{ P_6^P \cdot b + (Q_{\text{д}} + Q_{\text{FM}}^-) \cdot e; |Q_{\text{д}} + Q_{\text{FM}}^+| \cdot e \right\} = \frac{1 \cdot \max \{6.2821 \cdot 10^5 \cdot 45 + (2.7097 \cdot 10^5 + 2.1045 \cdot 10^5) \cdot 19.315; |2.7097 \cdot 10^5 + (-1.9045 \cdot 10^5)| \cdot 19.315\}}{19.315} = 37568 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	90651-20600-AM-02-220 РР	Лист 151
Взам. инв. №						
Подп. и дата						
Инв. № подл.						

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_1$ :

$$\sigma_1^P = \frac{M^P}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D} = 37568 / (0.95151 \cdot (33 - 3)^2 \cdot 415) = 105.71 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в рабочих условиях :

$$\sigma_R^P = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + 1_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot 1_0 \cdot D} \cdot M^P = (1.33 \cdot 0.83032 \cdot 40 + 82.256) / (0.95151 \cdot 40^2 \cdot 82.256 \cdot 398) \cdot 37568 = 95.298 \text{ МПа}$$

Окружное напряжение в тарелке в рабочих условиях :

$$\sigma_T^P = \frac{\beta_V \cdot M^P}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^P = 4.763 \cdot 37568 / (40^2 \cdot 398) - 2.4825 \cdot 95.298 = 44.414 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_1$  (+):

$$\sigma_{1mm}^{P+} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_1}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = (0.785 \cdot 398^2 \cdot 1.6313 + 10000 + 4 \cdot 23052 / (398 + 33)) / (3.1416 \cdot (398 + 33) \cdot (33 - 3)) = 10.507 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_1$  (п. 8.5.1):

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P+} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P+} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^{P+} \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_m$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P+} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P+} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^{P+} \right| \right\} = \frac{\max\{|105.71 - 10.507 + 95.298|; |105.71 - 10.507 + 44.414|; |105.71 + 10.507|\}}{10.507} = 190.5 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_m = 1.5 \cdot [\sigma]_f = 1.5 \cdot 144 = 216 \text{ МПа}$$

$$K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_m = 1.0442 \cdot 1 \cdot 216 = 225.55 \text{ МПа}$$

190.5 МПа ≤ 225.55 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_1$  (-):

$$\sigma_{1mm}^{P-} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F - \frac{4 \cdot M}{D + s_1}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = (0.785 \cdot 398^2 \cdot 1.6313 + 10000 - 4 \cdot 23052 / (398 + 33)) / (3.1416 \cdot (398 + 33) \cdot (33 - 3)) = (-0.026732) \text{ МПа}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P-} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P-} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^{P-} \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_m$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P-} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P-} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^{P-} \right| \right\} = \frac{\max\{|105.71 - (-0.026732) + 95.298|; |105.71 - (-0.026732) + 44.414|; |105.71 + (-0.026732)|\}}{201.04} = 201.04 \text{ МПа}$$

201.04 МПа ≤ 225.55 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_0^M = f \cdot \sigma_1^M = 1.1946 \cdot 96.921 = 115.78 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении  $s_0$  (п. 8.5.2):

$$\sigma_0^M \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R^{20}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_R^{20} = 3 \cdot [\sigma]_f^{20} = 3 \cdot 164.5 = 493.5 \text{ МПа}$$

$$1.3 \cdot [\sigma]_R^{20} = 1.3 \cdot 493.5 = 641.55 \text{ МПа}$$

115.78 МПа ≤ 641.55 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_0^P = f \cdot \sigma_1^P = 1.1946 \cdot 105.71 = 126.28 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_0$  (+):

$$\sigma_{0mm}^{P+} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_0}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = (0.785 \cdot 398^2 \cdot 1.6313 + 10000 + 4 \cdot 23052 / (398 + 17)) / (3.1416 \cdot (398 + 17) \cdot (17 - 3)) = 23.834 \text{ МПа}$$

Окружное мембранное напряжение от действия давления во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_{0mo}^P = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s_0 - c)} = 1.6313 \cdot 398 / (2 \cdot (17 - 3)) = 23.188 \text{ МПа}$$

Взам. инв. №	$[\sigma]_{\text{Р}}^{20} = 3 \cdot [\sigma]_{\text{Ф}}^{20} = 3 \cdot 164.5 = 493.5 \text{ МПа}$ $1.3 \cdot [\sigma]_{\text{Р}}^{20} = 1.3 \cdot 493.5 = 641.55 \text{ МПа}$ 115.78 МПа ≤ 641.55 МПа, <b>Условие прочности выполнено.</b> Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении $s_0$ : $\sigma_{\text{Ф}}^{\text{Р}} = f \cdot \sigma_{\text{Л}}^{\text{Р}} = 1.1946 \cdot 105.71 = 126.28 \text{ МПа}$ Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении $S_0$ (+): $\sigma_{0\text{мм}}^{\text{Р}+} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_0}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = (0.785 \cdot 398^2 \cdot 1.6313 + 10000 + 4 \cdot 23052 / (398 + 17)) / (3.1416 \cdot (398 + 17) \cdot (17 - 3)) = 23.834 \text{ МПа}$ Окружное мембранное напряжение от действия давления во втулке в рабочих условиях в сечении $s_0$ : $\sigma_{0\text{мо}}^{\text{Р}} = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s_0 - c)} = 1.6313 \cdot 398 / (2 \cdot (17 - 3)) = 23.188 \text{ МПа}$				
	Подп. и дата				

Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	90651-20600-AM-02-220 РР	Лист
						152

Этот документ является собственностью "НЕФТЕХИМПРОЕКТ" и не подлежит копированию и распространению без его согласия	НЕФТЕХИМПРОЕКТ NEFTECHIMPROEKT		МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ		РР
	Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении s <sub>0</sub> :				
	$\max \left\{ \left  \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P+} \right ; \left  0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right ; \left  0.7 \cdot \sigma_0^P \pm \left( \sigma_{0mm}^{P+} - \sigma_{0mo}^P \right) \right  \right\} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R$ $\max \left\{ \left  \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P+} \right ; \left  0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right ; \left  0.7 \cdot \sigma_0^P \pm \left( \sigma_{0mm}^{P+} - \sigma_{0mo}^P \right) \right  \right\} = \max\{126.28 \pm 23.834;  0.3 * 126.28 \pm 23.188 ;  0.7 * 126.28 \pm (23.834 - 23.188) \} = 150.12 \text{ МПа}$				
	Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):				
$[\sigma]_R = 3 \cdot [\sigma]_\Phi = 3 * 144 = 432 \text{ МПа}$ $1.3 \cdot [\sigma]_R = 1.3 * 432 = 561.6 \text{ МПа}$ <p>150.12 МПа ≤ 561.6 МПа, <b>Условие прочности выполнено.</b></p>					
Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении S <sub>0</sub> (–):					
$\sigma_{0mm}^{P-} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F - \frac{4 \cdot M}{D + s_0}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = (0.785 * 398^2 * 1.6313 + 0 - 4 * 0 / (398 + 17)) / (3.1416 * (398 + 17) * (17 - 3)) = 11.113 \text{ МПа}$					
$\max \left\{ \left  \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P-} \right ; \left  0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right ; \left  0.7 \cdot \sigma_0^P \pm \left( \sigma_{0mm}^{P-} - \sigma_{0mo}^P \right) \right  \right\} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R$ $\max \left\{ \left  \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P-} \right ; \left  0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right ; \left  0.7 \cdot \sigma_0^P \pm \left( \sigma_{0mm}^{P-} - \sigma_{0mo}^P \right) \right  \right\} = \max\{120.79 \pm 11.113;  0.3 * 120.79 \pm 23.188 ;  0.7 * 120.79 \pm (11.113 - 23.188) \} = 131.91 \text{ МПа}$					
131.91 МПа ≤ 561.6 МПа, <b>Условие прочности выполнено.</b>					
<b>Расчет в сечении s<sub>0</sub> в рабочих условиях (п. 8.5.5 ГОСТ 34233.4-2017):</b>					
Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении s <sub>0</sub> :					
$\max \left\{ \left  \sigma_{0mo}^P \right ; \left  \sigma_{0mm}^P \right  \right\} \leq [\sigma]_\Phi$ $\max \left\{ \left  \sigma_{0mo}^P \right ; \left  \sigma_{0mm}^P \right  \right\} = \max\{23.188;  23.834 \} = 23.834 \text{ МПа}$					
23.834 МПа ≤ 144 МПа, <b>Условие прочности выполнено.</b>					
Условие статической прочности при затяжке для тарелок:					
$\max \left\{ \left  \sigma_R^M \right ; \left  \sigma_T^M \right  \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_\Phi^{20}$ $\max \left\{ \left  \sigma_R^M \right ; \left  \sigma_T^M \right  \right\} = \max\{87.375;  40.721 \} = 87.375 \text{ МПа}$ $K_T \cdot [\sigma]_\Phi^{20} = 1 * 164.5 = 164.5 \text{ МПа}$					
87.375 МПа ≤ 164.5 МПа, <b>Условие прочности выполнено.</b>					
Условие статической прочности в рабочих условиях для тарелок:					
$\max \left\{ \left  \sigma_R^P \right ; \left  \sigma_T^P \right  \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_\Phi$ $\max \left\{ \left  \sigma_R^P \right ; \left  \sigma_T^P \right  \right\} = \max\{95.298;  44.414 \} = 95.298 \text{ МПа}$ $K_T \cdot [\sigma]_\Phi = 1 * 144 = 144 \text{ МПа}$					
95.298 МПа ≤ 144 МПа, <b>Условие прочности выполнено.</b>					
<b>Жёсткость фланца:</b>					
Угол поворота фланца в рабочих условиях:					
$\varpi = M^P \cdot y_\Phi \cdot \frac{E^{20}}{E} = 37568 * 0.27566 \cdot 10^{-5} * 1.99 \cdot 10^5 / 1.91 \cdot 10^5 = 0.1079^\circ$					
Допускаемый угол поворота фланца:					
$[\varpi] = 0.34377^\circ$					
Коэффициент увеличения допускаемого угла поворота фланцев: K <sub>ϖ</sub> = 1					
Условие выполнения жесткости фланцев :					
$\varpi \leq K_\varpi \cdot [\varpi] = 1 * 0.34377 = 0.34377^\circ$					
<b>Условие жёсткости выполнено.</b>					
Взам. инв. №		Подп. и дата		Изм. № подл.	
90651-20600-AM-02-220 РР					Лист
					153
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	

90651-20600-AM-02-220 РР изм.0.docx

Формат А4



Радиальное напряжение в тарелке в рабочих условиях :

$$\sigma_R^p = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + l_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot l_0 \cdot D} \cdot M^p = (1.33 \cdot 0.83032 \cdot 44 + 82.256) / (1.0162 \cdot 44^2 \cdot 82.256 \cdot 398) \cdot 37568 = 76.323 \text{ МПа}$$

Окружное напряжение в тарелке в рабочих условиях :

$$\sigma_T^P = \frac{\beta_Y \cdot M^P}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^P = 4.763 \cdot 37568 / (44^2 \cdot 398) - 2.4825 \cdot 76.323 = 42.752 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_1$  (+):

$$\sigma_{\text{mm}}^{\text{p+}} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_1}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = (0.785 \cdot 398^2 \cdot 1.6313 + 10000 + 4 \cdot 23052 / (398 + 33)) / (3.1416 \cdot (398 + 33) \cdot (33 - 3)) = 10.507 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_1$  (п. 8.5.1):

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{imm}}^{P+} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{imm}}^{P+} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{\text{imm}}^{P+} \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{пр}}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{imm}}^{P+} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{imm}}^{P+} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{\text{imm}}^{P+} \right| \right\} = \max \{ |98.983 - 10.507 + 76.323|; |98.983 - 10.507 + 42.752|; |98.983 + 10.507| \} = 164.8 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_{\text{M}} = 1.5 \cdot [\sigma]_{\text{ф}} = 1.5 \cdot 144 = 216 \text{ МПа}$$

$$K_c \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{н}} = 1.0442 \cdot 1 \cdot 216 = 225.55 \text{ МПа}$$

$$164.8 \text{ МПа} \leq 225.55 \text{ МПа, Условие прочности выполнено.}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_1$  (–):

$$\sigma_{\text{lim}}^{\text{p-}} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F - \frac{4 \cdot M}{D + s_1}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = (0.785 \cdot 398^2 \cdot 1.6313 + 10000 - 4 \cdot 23052 / (398 + 33)) / (3.1416 \cdot (398 + 33) \cdot (33 - 3)) = (-0.026732) \text{ МПа}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{lim}}^{P-} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{lim}}^{P-} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{\text{lim}}^{P-} \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{pr}}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{lim}}^{P-} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{lim}}^{P-} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{\text{lim}}^{P-} \right| \right\} = \max \{ 98.983 - (-0.026732) + 76.323; |98.983 - (-0.026732) + 42.752|; |98.983 + (-0.026732)| \} = 175.33 \text{ МПа}$$

$175.33 \text{ МПа} \leq 225.55 \text{ МПа}$ , **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_0^M = f \cdot \sigma_1^M = 1.1946 \cdot 90.753 = 108.41 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении  $s_0$  (п. 8.5.2):

$$\sigma_0^M \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R^{20}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_{\text{R}}^{20} = 3 \cdot [\sigma]_{\text{ш}}^{20} = 3 \cdot 164.5 = 493.5 \text{ МПа}$$

$$1.3 \cdot [\sigma]_{\text{R}}^{20} = 1.3 \cdot 493.5 = 641.55 \text{ МПа}$$

$108.41 \text{ МПа} \leq 641.55 \text{ МПа}$ , **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_0^P = f \cdot \sigma_1^P = 1.1946 \cdot 98.983 = 118.25 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_0$  (+):

$$\sigma_{0mm}^{p+} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_0}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = (0.785 \cdot 398^2 \cdot 1.6313 + 10000 + 4 \cdot 23052 / (398 + 17)) / (3.1416 \cdot (398 + 17) \cdot (17 - 3)) = 23.834 \text{ МПа}$$

Окружное мембранное напряжение от действия давления во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_{0mo}^p = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s_0 - c)} = 1.6313 \cdot 398 / (2 \cdot (17 - 3)) = 23.188 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^p \pm \sigma_{0mn}^{p+} \right|, \left| 0.3 \cdot \sigma_0^p \pm \sigma_{0mo}^p \right|, \left| 0.7 \cdot \sigma_0^p \pm \left( \sigma_{0mn}^{p+} - \sigma_{0mo}^p \right) \right| \right\} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R$$

Взам. инв. №	<p>106,41 МПа ≤ 641,55 МПа, <b>условие прочности выполнено.</b></p> <p>Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении <math>s_0</math>:</p> $\sigma_0^P = f \cdot \sigma_1^P = 1.1946 \cdot 98.983 = 118.25 \text{ МПа}$ <p>Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении <math>S_0 (+)</math>:</p> $\sigma_{0mm}^{P+} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_0}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = (0.785 \cdot 398^2 \cdot 1.6313 + 10000 + 4 \cdot 23052 / (398 + 17)) / (3.1416 \cdot (398 + 17) \cdot (17 - 3)) = 23.834 \text{ МПа}$ <p>Окружное мембранное напряжение от действия давления во втулке в рабочих условиях в сечении <math>s_0</math>:</p> $\sigma_{0mo}^P = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s_0 - c)} = 1.6313 \cdot 398 / (2 \cdot (17 - 3)) = 23.188 \text{ МПа}$ <p>Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении <math>s_0</math>:</p> $\max \left\{ \left  \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P+} \right ; \left  0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right ; \left  0.7 \cdot \sigma_0^P \pm \left( \sigma_{0mm}^{P+} - \sigma_{0mo}^P \right) \right  \right\} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R$				
	Подп. и дата				
Инв. № подл.					<div>90651-20600-AM-02-220 PP</div> <div>Лист 155</div>
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	





**Расчетная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для герметизации в рабочих условиях (нагрузки + давление, с учетом температурной нагрузки)**

$$\gamma = \frac{1}{y_{\pi} + y_{\epsilon} \cdot \frac{E_{\epsilon}^{20}}{E_{\epsilon}} + \left( y'_{\Phi} \cdot \frac{E_{\Phi}^{20}}{E_{\Phi}} + y''_{\Phi} \cdot \frac{E_{\Phi}^{20}}{E_{\Phi}} \right) \cdot b^2}$$

$$= 1 / (0 + 0.75093 \cdot 10^{-7} \cdot 2.18 \cdot 10^5 / 2.15 \cdot 10^5 + (0.27566 \cdot 10^{-5} \cdot 1.99 \cdot 10^5 / 1.91 \cdot 10^5 + 0.25812 \cdot 10^{-5} \cdot 1.99 \cdot 10^5 / 1.91 \cdot 10^5) \cdot 45^2)$$

$$= 3.6671 \cdot 10^6 \text{ Н/мм}$$

Нагрузка от температурных деформаций:

$$Q_t = \gamma \cdot \left( \begin{aligned} &(\alpha'_{\Phi} \cdot h' + \alpha'_{\text{ш}} \cdot h'_{\text{ш}}) \cdot (t_{\Phi 1} - 20^{\circ}\text{C}) + \\ &+ (\alpha''_{\Phi} \cdot h'' + \alpha''_{\text{ш}} \cdot h''_{\text{ш}}) \cdot (t_{\Phi 2} - 20^{\circ}\text{C}) + \\ &+ \alpha_p \cdot s_{\text{pn}} \cdot (t_p - 20^{\circ}\text{C}) - \\ &- \alpha_{\epsilon} \cdot (h' + h'' + s_{\text{pn}} + h'_{\text{ш}} + h''_{\text{ш}}) \cdot (t_{\epsilon} - 20^{\circ}\text{C}) \end{aligned} \right)$$

$$= 3.6671 \cdot 10^6 \cdot ((0.116 \cdot 10^{-4} \cdot 44 + 0 \cdot 0) \cdot (100 - 20^{\circ}\text{C}) + (0.116 \cdot 10^{-4} \cdot 40 + 0 \cdot 0) \cdot (100 - 20^{\circ}\text{C}) + 0.116 \cdot 10^{-4} \cdot 29 \cdot (100 - 20^{\circ}\text{C}) - 0.134 \cdot 10^{-4} \cdot (44 + 40 + 29 + 0 + 0) \cdot (100 - 20^{\circ}\text{C}))$$

$$= (-59671) \text{ Н}$$

$$P_{\epsilon 1} = \max \left\{ \begin{aligned} &\alpha \cdot (Q_d + F) + R_{\pi} + \frac{4 \cdot \alpha_M \cdot |M|}{D_{\text{ст}}} \\ &\alpha \cdot (Q_d + F) + R_{\pi} + \frac{4 \cdot \alpha_M \cdot |M|}{D_{\text{ст}}} - Q_t \end{aligned} \right\} = \max \left\{ \begin{aligned} &1.307 \cdot (2.7097 \cdot 10^5 + 10000) + 91942 + 4 \cdot 1.2542 \cdot |23052| / 460 = \\ &7.1059 \cdot 10^5 + 1.307 \cdot (2.7097 \cdot 10^5 + 10000) + 91942 + 4 \cdot 1.2542 \cdot \\ &|23052| / 460 - (-59671) = 7.7026 \cdot 10^5 \end{aligned} \right\} = 7.7026 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Болтовая нагрузка в условиях затяжки:

$$P_{\epsilon}^M = \max\{P_{\epsilon 1}, P_{\epsilon 2}\} = \max\{7.7026 \cdot 10^5; 7.6544 \cdot 10^5\} = 7.7026 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Условие прочности при затяжке:

$$\sigma_{\epsilon 1} = \frac{P_{\epsilon}^M}{A_{\epsilon}} \leq [\sigma]_{\epsilon}^M$$

$$\sigma_{\epsilon 1} = \frac{P_{\epsilon}^M}{A_{\epsilon}} = 7.7026 \cdot 10^5 / 8320 = 92.58 \text{ МПа}$$

Крутящий момент при затяжке болтов (шпилек) без смазки при  $\sigma_{\epsilon 1} < 120 \text{ МПа}$ :

$$M_{\text{кр}} = 0.3 \cdot \frac{P_{\epsilon}^M \cdot d}{n} = 0.3 \cdot 7.7026 \cdot 10^5 \cdot 30 / 16 = 433.27 \text{ Н·м}$$

При наличии смазки величина  $M_{\text{кр}}$  снижается на 25% и составляет  $0.75 \cdot M_{\text{кр}} = 324.95 \text{ Н·м}$

$92.58 \text{ МПа} \leq 358.8 \text{ МПа}$ , **Условие прочности выполнено.**

Допускаемые напряжения для болтов (шпилек) при рабочих условиях:

$$[\sigma]_{\epsilon}^P = K_{\text{уп}} \cdot K_{\text{уз}} \cdot K_{\text{ут}} \cdot [\sigma]_{\epsilon} = 1 \cdot 1 \cdot 1.3 \cdot 230 = 299 \text{ МПа}$$

Болтовая нагрузка в рабочих условиях:

$$P_{\epsilon}^P = P_{\epsilon}^M + (1 - \alpha) \cdot (Q_d + F) + Q_t + \frac{4 \cdot (1 - \alpha_M) \cdot |M|}{D_{\text{ст}}} = 7.6544 \cdot 10^5 + (1 - 1.307) \cdot (2.7097 \cdot 10^5 + 0) + (-59671) + 4 \cdot (1 - 1.2542) \cdot |0| / 460 = 6.2257 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Условие прочности в рабочих условиях:

$$\sigma_{\epsilon 2} = \frac{P_{\epsilon}^P}{A_{\epsilon}} \leq [\sigma]_{\epsilon}^P$$

$$\sigma_{\epsilon 2} = \frac{P_{\epsilon}^P}{A_{\epsilon}} = 6.2257 \cdot 10^5 / 8320 = 74.829 \text{ МПа}$$

$74.829 \text{ МПа} \leq 299 \text{ МПа}$ , **Условие прочности выполнено.**

**Расчёт первого фланца:**

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при затяжке:

$$M^M = C_F \cdot P_{\epsilon}^M \cdot b = 1 \cdot 7.7026 \cdot 10^5 \cdot 45 = 34662 \text{ Н·м}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении  $s_1$ :

Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	90651-20600-AM-02-220 РР	Лист
Взам. инв. №						
Подп. и дата						
Инв. № подл.						157

$$\sigma_1^M = \frac{M^M}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D} = 34662 / (0.95151 \cdot (33 - 3)^2 \cdot 415) = 97.532 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в условиях затяжки :

$$\sigma_R^M = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + 1_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot 1_0 \cdot D} \cdot M^M = (1.33 \cdot 0.83032 \cdot 40 + 82.256) / (0.95151 \cdot 40^2 \cdot 82.256 \cdot 398) \cdot 34662 = 87.925 \text{ МПа}$$

Окружное напряжение в тарелке в условиях затяжки :

$$\sigma_T^M = \frac{\beta_Y \cdot M^M}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^M = 4.763 \cdot 34662 / (40^2 \cdot 398) - 2.4825 \cdot 87.925 = 40.978 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении  $s_1$  (п. 8.5.1):

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^M + \sigma_R^M \right|, \left| \sigma_1^M + \sigma_T^M \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{мк}}^{20}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^M + \sigma_R^M \right|, \left| \sigma_1^M + \sigma_T^M \right| \right\} = \max \{ |97.532 + 87.925|; |97.532 + 40.978| \} = 185.46 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_{\text{мк}}^{20} = 1.5 \cdot [\sigma]_{\text{ф}}^{20} = 1.5 \cdot 164.5 = 246.75 \text{ МПа}$$

Коэффициент учета размеров тарелки фланца:  $K_S = 1.0442$

Коэффициент увеличения допускаемых напряжений при расчёте с учетом стесненности температурных деформаций:  $K_T = 1.3$

$$K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{мк}}^{20} = 1.0442 \cdot 1.3 \cdot 246.75 = 334.96 \text{ МПа}$$

185.46 МПа ≤ 334.96 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Болтовая нагрузка в рабочих условиях :

$$P_6^P = P_6^M + (1 - \alpha) \cdot (Q_{\text{д}} + F) + Q_t + \frac{4 \cdot (1 - \alpha_{\text{м}}) \cdot |M|}{D_{\text{ст}}} = \frac{7.7026 \cdot 10^5 + (1 - 1.307) \cdot (2.7097 \cdot 10^5 + 10000) + (-59671) + 4 \cdot (1 - 1.2542) \cdot |23052| / 460}{1} = 5.7336 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Приведенная нагрузка от внешней силы и момента :

$$Q_{\text{FM}}^+ = F + \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{ст}}} = 10000 + 4 \cdot |23052| / 460 = 2.1045 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

$$Q_{\text{FM}}^- = F - \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{ст}}} = 10000 - 4 \cdot |23052| / 460 = (-1.9045 \cdot 10^5) \text{ Н}$$

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при рабочих условиях:

$$M^P = C_F \cdot \max \left\{ P_6^P \cdot b + (Q_{\text{д}} + Q_{\text{FM}}) \cdot e; |Q_{\text{д}} + Q_{\text{FM}}| \cdot e \right\} = \frac{1 \cdot \max \{ 5.7336 \cdot 10^5 \cdot 45 + (2.7097 \cdot 10^5 + 2.1045 \cdot 10^5) \cdot 19.315; |2.7097 \cdot 10^5 + (-1.9045 \cdot 10^5)| \cdot 19.315 \}}{1} = 35100 \text{ Н·м}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_1$ :

$$\sigma_1^P = \frac{M^P}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D} = 35100 / (0.95151 \cdot (33 - 3)^2 \cdot 415) = 98.766 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в рабочих условиях :

$$\sigma_R^P = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + 1_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot 1_0 \cdot D} \cdot M^P = (1.33 \cdot 0.83032 \cdot 40 + 82.256) / (0.95151 \cdot 40^2 \cdot 82.256 \cdot 398) \cdot 35100 = 89.037 \text{ МПа}$$

Окружное напряжение в тарелке в рабочих условиях :

$$\sigma_T^P = \frac{\beta_Y \cdot M^P}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^P = 4.763 \cdot 35100 / (40^2 \cdot 398) - 2.4825 \cdot 89.037 = 41.496 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_1$  (+):

$$\sigma_{\text{мм}}^{P+} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_1}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = (0.785 \cdot 398^2 \cdot 1.6313 + 10000 + 4 \cdot 23052 / (398 + 33)) / (3.1416 \cdot (398 + 33) \cdot (33 - 3)) = 10.507 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_1$  (п. 8.5.1):

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{мм}}^{P+} + \sigma_R^P \right|, \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{мм}}^{P+} + \sigma_T^P \right|, \left| \sigma_1^P + \sigma_{\text{мм}}^{P+} \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{мк}}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{мм}}^{P+} + \sigma_R^P \right|, \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{мм}}^{P+} + \sigma_T^P \right|, \left| \sigma_1^P + \sigma_{\text{мм}}^{P+} \right| \right\} = \max \{ |98.766 - 10.507 + 89.037|; |98.766 - 10.507 + 41.496|; |98.766 + 10.507| \} = 177.3 \text{ МПа}$$

Взам. инв. №	$\sigma_R = \frac{\lambda \cdot h^2 \cdot l_0 \cdot D}{\lambda \cdot h^2 \cdot l_0 \cdot D} \cdot M^P = (1.33 \cdot 0.83032 \cdot 40 + 82.256) / (0.95151 \cdot 40^2 + 82.256 \cdot 398) \cdot 35100 = 89.037 \text{ МПа}$				
	Окружное напряжение в тарелке в рабочих условиях :				
Подп. и дата	$\sigma_T^P = \frac{\beta_Y \cdot M^P}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^P = 4.763 \cdot 35100 / (40^2 \cdot 398) - 2.4825 \cdot 89.037 = 41.496 \text{ МПа}$				
	Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении S <sub>1</sub> (+):				
Инв. № подл.	$\sigma_{\text{лмм}}^{P+} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_1}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = (0.785 \cdot 398^2 \cdot 1.6313 + 10000 + 4 \cdot 23052 / (398 + 33)) / (3.1416 \cdot (398 + 33) \cdot (33 - 3)) = 10.507 \text{ МПа}$				
	Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении s <sub>1</sub> (п. 8.5.1):				
$\max \left\{ \left  \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^{P+} + \sigma_R^P \right , \left  \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^{P+} + \sigma_T^P \right , \left  \sigma_1^P + \sigma_{\text{лмм}}^{P+} \right  \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{н}}$					
$\max \left\{ \left  \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^{P+} + \sigma_R^P \right , \left  \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^{P+} + \sigma_T^P \right , \left  \sigma_1^P + \sigma_{\text{лмм}}^{P+} \right  \right\} = \max \{  98.766 - 10.507 + 89.037 ;  98.766 - 10.507 + 41.496 ;  98.766 + 10.507  \} = 177.3 \text{ МПа}$					
90651-20600-AM-02-220 РР					Лист
					158
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	



Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_M = 1.5 \cdot [\sigma]_{\Phi} = 1.5 \cdot 144 = 216 \text{ МПа}$$

$$K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_M = 1.0442 \cdot 1.3 \cdot 216 = 293.22 \text{ МПа}$$

177.3 МПа ≤ 293.22 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении S<sub>1</sub> (–):

$$\sigma_{1mm}^{P-} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F - \frac{4 \cdot M}{D + s_1}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = (0.785 \cdot 398^2 \cdot 1.6313 + 10000 - 4 \cdot 23052 / (398 + 33)) / (3.1416 \cdot (398 + 33) \cdot (33 - 3)) = (-0.026732) \text{ МПа}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P-} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P-} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^{P-} \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_M$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P-} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P-} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^{P-} \right| \right\} = \max \{ |98.766 - (-0.026732) + 89.037|; |98.766 - (-0.026732) + 41.496|; |98.766 + (-0.026732)| \} = 187.83 \text{ МПа}$$

187.83 МПа ≤ 293.22 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении S<sub>0</sub>:

$$\sigma_0^M = f \cdot \sigma_1^M = 1.1946 \cdot 97.532 = 116.51 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении S<sub>0</sub> (п. 8.5.2):

$$\sigma_0^M \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R^{20}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_R^{20} = 3 \cdot [\sigma]_{\Phi}^{20} = 3 \cdot 164.5 = 493.5 \text{ МПа}$$

$$1.3 \cdot [\sigma]_R^{20} = 1.3 \cdot 493.5 = 641.55 \text{ МПа}$$

116.51 МПа ≤ 641.55 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении S<sub>0</sub>:

$$\sigma_0^P = f \cdot \sigma_1^P = 1.1946 \cdot 98.766 = 117.99 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении S<sub>0</sub> (+):

$$\sigma_{0mm}^{P+} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_0}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = (0.785 \cdot 398^2 \cdot 1.6313 + 10000 + 4 \cdot 23052 / (398 + 17)) / (3.1416 \cdot (398 + 17) \cdot (17 - 3)) = 23.834 \text{ МПа}$$

Окружное мембранное напряжение от действия давления во втулке в рабочих условиях в сечении S<sub>0</sub>:

$$\sigma_{0mo}^P = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s_0 - c)} = 1.6313 \cdot 398 / (2 \cdot (17 - 3)) = 23.188 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении S<sub>0</sub>:

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P+} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P+} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P+} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P+} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} = \max \{ |117.99 \pm 23.834|; |0.3 \cdot 117.99 \pm 23.188|; |0.7 \cdot 117.99 \pm (23.834 - 23.188)| \} = 141.82 \text{ МПа}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_R = 3 \cdot [\sigma]_{\Phi} = 3 \cdot 144 = 432 \text{ МПа}$$

$$1.3 \cdot [\sigma]_R = 1.3 \cdot 432 = 561.6 \text{ МПа}$$

141.82 МПа ≤ 561.6 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении S<sub>0</sub> (–):

$$\sigma_{0mm}^{P-} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F - \frac{4 \cdot M}{D + s_0}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = (0.785 \cdot 398^2 \cdot 1.6313 + 0 - 4 \cdot 0 / (398 + 17)) / (3.1416 \cdot (398 + 17) \cdot (17 - 3)) = 11.113 \text{ МПа}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P-} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P-} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P-} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P-} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} = \max \{ |111.77 \pm 11.113|; |0.3 \cdot 111.77 \pm 23.188|; |0.7 \cdot 111.77 \pm (11.113 - 23.188)| \} = 122.88 \text{ МПа}$$

122.88 МПа ≤ 561.6 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):					
			$[\sigma]_R=3 \cdot [\sigma]_{\Phi} = 3 \cdot 144 = 432 \text{ МПа}$					
			$1.3 \cdot [\sigma]_R = 1.3 \cdot 432 = 561.6 \text{ МПа}$					
141.82 МПа ≤ 561.6 МПа, <b>Условие прочности выполнено.</b>								
Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении S <sub>0</sub> (–):								
$\sigma_{0mm}^{P-} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F - \frac{4 \cdot M}{D + s_0}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = (0.785 \cdot 398^2 \cdot 1.6313 + 0 - 4 \cdot 0 / (398 + 17)) / (3.1416 \cdot (398 + 17) \cdot (17 - 3)) = 11.113 \text{ МПа}$								
$\max \left\{ \left  \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P-} \right ; \left  0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right ; \left  0.7 \cdot \sigma_0^P \pm \left( \sigma_{0mm}^{P-} - \sigma_{0mo}^P \right) \right  \right\} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R$								
$\max \left\{ \left  \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P-} \right ; \left  0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right ; \left  0.7 \cdot \sigma_0^P \pm \left( \sigma_{0mm}^{P-} - \sigma_{0mo}^P \right) \right  \right\} = \max \{  111.77 \pm 11.113 ;  0.3 \cdot 111.77 \pm 23.188 ;  0.7 \cdot 111.77 \pm (11.113 - 23.188)  \} = 122.88 \text{ МПа}$								
122.88 МПа ≤ 561.6 МПа, <b>Условие прочности выполнено.</b>								
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	90651-20600-AM-02-220 PP			Лист
								159

**Расчет в сечении  $s_0$  в рабочих условиях (п. 8.5.5 ГОСТ 34233.4-2017):**

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0mo}^P \right|; \left| \sigma_{0mm}^P \right| \right\} \leq [\sigma]_{\Phi}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0mo}^P \right|; \left| \sigma_{0mm}^P \right| \right\} = \max \{23.188; |23.834|\} = 23.834 \text{ МПа}$$

23.834 МПа  $\leq$  144 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Условие статической прочности при затяжке для тарелок:

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_T^M \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_{\Phi}^{20}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_T^M \right| \right\} = \max \{87.925; |40.978|\} = 87.925 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_{\Phi}^{20} = 1.3 \cdot 164.5 = 213.85 \text{ МПа}$$

87.925 МПа  $\leq$  213.85 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Условие статической прочности в рабочих условиях для тарелок:

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_T^P \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_{\Phi}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_T^P \right| \right\} = \max \{89.037; |41.496|\} = 89.037 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_{\Phi} = 1.3 \cdot 144 = 187.2 \text{ МПа}$$

89.037 МПа  $\leq$  187.2 МПа, **Условие прочности выполнено.**

**Жёсткость фланца:**

Угол поворота фланца в рабочих условиях:

$$\varpi = M^P \cdot y_{\Phi} \cdot \frac{E^{20}}{E} = 35100 \cdot 0.27566 \cdot 10^{-5} \cdot 1.99 \cdot 10^5 / 1.91 \cdot 10^5 = 0.10081^\circ$$

Условие выполнения жесткости фланцев :

$$\varpi \leq K_{\varpi} \cdot [\varpi] = 1 \cdot 0.34377 = 0.34377^\circ$$

**Условие жёсткости выполнено.**

**Расчёт второго фланца:**

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при затяжке :

$$M^M = C_F \cdot P_6^M \cdot b = 1 \cdot 7.7026 \cdot 10^5 \cdot 45 = 34662 \text{ Н·м}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении  $s_1$ :

$$\sigma_1^M = \frac{M^M}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D} = 34662 / (1.0162 \cdot (33 - 3)^2 \cdot 415) = 91.325 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в условиях затяжки :

$$\sigma_R^M = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + 1_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot 1_0 \cdot D} \cdot M^M = (1.33 \cdot 0.83032 \cdot 44 + 82.256) / (1.0162 \cdot 44^2 \cdot 82.256 \cdot 398) \cdot 34662 = 70.418 \text{ МПа}$$

Окружное напряжение в тарелке в условиях затяжки :

$$\sigma_T^M = \frac{\beta_V \cdot M^M}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^M = 4.763 \cdot 34662 / (44^2 \cdot 398) - 2.4825 \cdot 70.418 = 39.444 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении  $s_1$  (п. 8.5.1):

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^M + \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_1^M + \sigma_T^M \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\Phi}^{20}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^M + \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_1^M + \sigma_T^M \right| \right\} = \max \{91.325 + 70.418; |91.325 + 39.444|\} = 161.74 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_{\Phi}^{20} = 1.5 \cdot [\sigma]_{\Phi}^{20} = 1.5 \cdot 164.5 = 246.75 \text{ МПа}$$

Коэффициент учета размеров тарелки фланца:  $K_S = 1.0442$

$$K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\Phi}^{20} = 1.0442 \cdot 1.3 \cdot 246.75 = 334.96 \text{ МПа}$$

161.74 МПа  $\leq$  334.96 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Взам. инв. №	Подп. и дата	Инв. № подл.	Окружное напряжение в тарелке в условиях затяжки :					
			$\sigma_T^M = \frac{\beta_Y \cdot M^M}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^M = 4.763 \cdot 34662 / (44^2 \cdot 398) - 2.4825 \cdot 70.418 = 39.444 \text{ МПа}$					
Условие статической прочности при затяжке в сечении $s_1$ (п. 8.5.1):								
$\max \{  \sigma_1^M + \sigma_R^M ;  \sigma_1^M + \sigma_T^M  \} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{н}}^{20}$								
$\max \{  \sigma_1^M + \sigma_R^M ;  \sigma_1^M + \sigma_T^M  \} = \max \{  91.325 + 70.418 ;  91.325 + 39.444  \} = 161.74 \text{ МПа}$								
Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):								
$[\sigma]_{\text{н}}^{20} = 1.5 \cdot [\sigma]_{\text{ф}}^{20} = 1.5 \cdot 164.5 = 246.75 \text{ МПа}$								
Коэффициент учета размеров тарелки фланца: $K_S = 1.0442$								
$K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{н}}^{20} = 1.0442 \cdot 1.3 \cdot 246.75 = 334.96 \text{ МПа}$								
161.74 МПа ≤ 334.96 МПа, <b>Условие прочности выполнено.</b>								
					90651-20600-AM-02-220 РР			Лист
								160
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата				

Приведенная нагрузка от внешней силы и момента :

$$Q_{FM}^+ = F + \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{ст}}} = 10000 + 4 \cdot |23052| / 460 = 2.1045 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

$$Q_{FM}^- = F - \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{ст}}} = 10000 - 4 \cdot |23052| / 460 = (-1.9045 \cdot 10^5) \text{ Н}$$

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при рабочих условиях:

$$M^P = C_F \cdot \max \{ P_6^P \cdot b + (Q_d + Q_{FM}) \cdot e; |Q_d + Q_{FM}| \cdot e \} = \frac{1 \cdot \max \{ 5.7336 \cdot 10^5 \cdot 45 + (2.7097 \cdot 10^5 + 2.1045 \cdot 10^5) \cdot 19.315; |2.7097 \cdot 10^5 + (-1.9045 \cdot 10^5)| \cdot 19.315 \}}{2.7097 \cdot 10^5 + (-1.9045 \cdot 10^5)} = 35100 \text{ Н·м}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_1$ :

$$\sigma_1^P = \frac{M^P}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D^*} = 35100 / (1.0162 \cdot (33 - 3)^2 \cdot 415) = 92.48 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в рабочих условиях :

$$\sigma_R^P = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h \cdot l_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot l_0 \cdot D} \cdot M^P = (1.33 \cdot 0.83032 \cdot 44 + 82.256) / (1.0162 \cdot 44^2 \cdot 82.256 \cdot 398) \cdot 35100 = 71.309 \text{ МПа}$$

Окружное напряжение в тарелке в рабочих условиях :

$$\sigma_T^P = \frac{\beta_Y \cdot M^P}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^P = 4.763 \cdot 35100 / (44^2 \cdot 398) - 2.4825 \cdot 71.309 = 39.943 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_1$  (+):

$$\sigma_{1mm}^{P+} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_1}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = (0.785 \cdot 398^2 \cdot 1.6313 + 10000 + 4 \cdot 23052 / (398 + 33)) / (3.1416 \cdot (398 + 33) \cdot (33 - 3)) = 10.507 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_1$  (п. 8.5.1):

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P+} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P+} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^{P+} \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_M$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P+} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P+} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^{P+} \right| \right\} = \max \{ |92.48 - 10.507 + 71.309|; |92.48 - 10.507 + 39.943|; |92.48 + 10.507| \} = 153.28 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_M = 1.5 \cdot [\sigma]_ф = 1.5 \cdot 144 = 216 \text{ МПа}$$

$$K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_M = 1.0442 \cdot 1.3 \cdot 216 = 293.22 \text{ МПа}$$

153.28 МПа ≤ 293.22 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_1$  (-):

$$\sigma_{1mm}^{P-} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F - \frac{4 \cdot M}{D + s_1}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = (0.785 \cdot 398^2 \cdot 1.6313 + 10000 - 4 \cdot 23052 / (398 + 33)) / (3.1416 \cdot (398 + 33) \cdot (33 - 3)) = (-0.026732) \text{ МПа}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P-} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P-} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^{P-} \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_M$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P-} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P-} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^{P-} \right| \right\} = \max \{ |92.48 - (-0.026732) + 71.309|; |92.48 - (-0.026732) + 39.943|; |92.48 + (-0.026732)| \} = 163.82 \text{ МПа}$$

163.82 МПа ≤ 293.22 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_0^M = f \cdot \sigma_1^M = 1.1946 \cdot 91.325 = 109.1 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении  $s_0$  (п. 8.5.2):

$$\sigma_0^M \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R^{20}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_R^{20} = 3 \cdot [\sigma]_ф^{20} = 3 \cdot 164.5 = 493.5 \text{ МПа}$$

$$1.3 \cdot [\sigma]_R^{20} = 1.3 \cdot 493.5 = 641.55 \text{ МПа}$$

109.1 МПа ≤ 641.55 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

Взам. инв. №					
Подп. и дата					
Инв. № подл.					
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	

90651-20600-AM-02-220 РР

Лист

161

$$\sigma_0^P = f \cdot \sigma_1^P = 1.1946 \cdot 92.48 = 110.48 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_0$  (+):

$$\sigma_{0mm}^{P+} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_0}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = (0.785 \cdot 398^2 \cdot 1.6313 + 10000 + 4 \cdot 23052 / (398 + 17)) / (3.1416 \cdot (398 + 17) \cdot (17 - 3)) = 23.834 \text{ МПа}$$

Окружное мембранное напряжение от действия давления во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_0$ :

$$\sigma_{0mo}^P = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s_0 - c)} = 1.6313 \cdot 398 / (2 \cdot (17 - 3)) = 23.188 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $S_0$ :

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P+} \right|, \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|, \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P+} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P+} \right|, \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|, \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P+} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} = \max \{ 110.48 \pm 23.834; |0.3 \cdot 110.48 \pm 23.188|; |0.7 \cdot 110.48 \pm (23.834 - 23.188)| \} = 134.31 \text{ МПа}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_R = 3 \cdot [\sigma]_\Phi = 3 \cdot 144 = 432 \text{ МПа}$$

$$1.3 \cdot [\sigma]_R = 1.3 \cdot 432 = 561.6 \text{ МПа}$$

134.31 МПа ≤ 561.6 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_0$  (-):

$$\sigma_{0mm}^{P-} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F - \frac{4 \cdot M}{D + s_0}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = (0.785 \cdot 398^2 \cdot 1.6313 + 0 - 4 \cdot 0 / (398 + 17)) / (3.1416 \cdot (398 + 17) \cdot (17 - 3)) = 11.113 \text{ МПа}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P-} \right|, \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|, \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P-} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P-} \right|, \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|, \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P-} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} = \max \{ 104.65 \pm 11.113; |0.3 \cdot 104.65 \pm 23.188|; |0.7 \cdot 104.65 \pm (11.113 - 23.188)| \} = 115.77 \text{ МПа}$$

115.77 МПа ≤ 561.6 МПа, **Условие прочности выполнено.**

**Расчет в сечении  $s_0$  в рабочих условиях (п. 8.5.5 ГОСТ 34233.4-2017):**

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $S_0$ :

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0mo}^P \right|, \left| \sigma_{0mm}^P \right| \right\} \leq [\sigma]_\Phi$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0mo}^P \right|, \left| \sigma_{0mm}^P \right| \right\} = \max \{ 23.188; |23.834| \} = 23.834 \text{ МПа}$$

23.834 МПа ≤ 144 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Условие статической прочности при затяжке для тарелок:

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^M \right|, \left| \sigma_T^M \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_\Phi^{20}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^M \right|, \left| \sigma_T^M \right| \right\} = \max \{ 70.418; |39.444| \} = 70.418 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_\Phi^{20} = 1.3 \cdot 164.5 = 213.85 \text{ МПа}$$

70.418 МПа ≤ 213.85 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Условие статической прочности в рабочих условиях для тарелок:

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^P \right|, \left| \sigma_T^P \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_\Phi$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^P \right|, \left| \sigma_T^P \right| \right\} = \max \{ 71.309; |39.943| \} = 71.309 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_\Phi = 1.3 \cdot 144 = 187.2 \text{ МПа}$$

71.309 МПа ≤ 187.2 МПа, **Условие прочности выполнено.**

**Жёсткость фланца:**

Угол поворота фланца в рабочих условиях:

$$\varpi = M^P \cdot y_\Phi \cdot \frac{E^{20}}{E} = 35100 \cdot 0.25812 \cdot 10^{-5} \cdot 1.99 \cdot 10^5 / 1.91 \cdot 10^5 = 0.094396^\circ$$

Взам. инв. №	Подп. и дата	Инв. № подл.					
$K_T \cdot [\sigma]_{\Phi}^{20} = 1.3 \cdot 164.5 = 213.85 \text{ МПа}$ 70.418 МПа ≤ 213.85 МПа, <b>Условие прочности выполнено.</b> Условие статической прочности в рабочих условиях для тарелок: $\max \left\{ \left  \sigma_R^P \right ; \left  \sigma_T^P \right  \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_{\Phi}$ $\max \left\{ \left  \sigma_R^P \right ; \left  \sigma_T^P \right  \right\} = \max \{ 71.309; 39.943 \} = 71.309 \text{ МПа}$ $K_T \cdot [\sigma]_{\Phi} = 1.3 \cdot 144 = 187.2 \text{ МПа}$ 71.309 МПа ≤ 187.2 МПа, <b>Условие прочности выполнено.</b> <b>Жёсткость фланца:</b> Угол поворота фланца в рабочих условиях: $\Theta = M^P \cdot y_{\Phi} \cdot \frac{E^{20}}{E} = 35100 \cdot 0.25812 \cdot 10^{-6} \cdot 1.99 \cdot 10^6 / 1.91 \cdot 10^6 = 0.094396^\circ$							
						90651-20600-AM-02-220 РР	
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата			
					Лист 162		

Условие выполнения жесткости фланцев :

$$\Theta \leq K_m \cdot [\Theta] = 1 * 0.34377 = 0.34377^\circ$$

**Условие жёсткости выполнено.**

## Расчет давления испытаний

Пробное давление при гидравлическом испытании, при работе элемента под внутренним давлением:

$$P_{np} = 1.25 \cdot p \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]_t} = 1.25 \cdot 1.6313 \cdot 164.5 / 144 = 2.3295 \text{ МПа}$$

Пробное давление при гидравлическом испытании, при работе элемента под внутренним давлением:

$$P_{np} = 1.25 \cdot p \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]_t} = 1.25 \cdot 1.6313 \cdot 164.5 / 144 = 2.3295 \text{ МПа}$$

### Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)

**Условия нагружения:**

Расчётное осевое сжимающее усилие, F:	0 Н
Расчётный изгибающий момент, M:	0 Н·м
Расчётное внутреннее избыточное давление, p:	2.2696 МПа

## Расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ 34233.4-2017

Расчётная температура элементов соединения:

Температура фланца (кольца), $t_{\text{ф}}$ :	20 °C
Температура фланца (кольца), $t_{\text{ф}}$ :	20 °C
Температура болтов (шпилек), $t_{\text{б}}$ :	20 °C

### Свойства материала болтов (шпилек)

Допускаемые напряжения для материала 35Х Крепеж при температуре 20 °С (условия гидроиспытаний):

$$[\sigma]^{20}_6 = 230 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 35Х Крепеж при температуре  $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$E_{6}^{20} = 2.18 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Коэффициент линейного расширения для материала 35Х Крепеж при температуре  $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$\alpha_{20}^{20} = 0.134 \cdot 10^{-4} 1/^{\circ}\text{C}$$

### Свойства материала фланца (кольца) 1

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре 20 °С (условия гидроиспытаний):

$$[\sigma]^{20_{\phi 1}} = \frac{R_e / 20}{n_T} = 245 / 1.1 = 222.73 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре  $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$E^{20}_1 = 1.99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре  $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$\alpha^{20}_1 = 0.116 \cdot 10^{-4} 1/^{\circ}\text{C}$$

### Свойства материала фланца (кольца)2

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре 20 °С (условия гидроиспытаний):

$$[\sigma]_{\phi 2}^{20} = \frac{R_e / 20}{n_T} = 245 / 1.1 = 222.73 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре  $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$E^{20}_2 = 1.99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре  $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$\alpha^{20_2} = 0.116 \cdot 10^{-4} 1/^{\circ}\text{C}$$

Взам. инв. №	Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре T = 20 °C: $\alpha^{20}_1= 0.116 \cdot 10^{-4} / ^\circ\text{C}$ <b>Свойства материала фланца (кольца)2</b> Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре 20 °C (условия гидроиспытаний): $[\sigma]^{20}_{\text{ф2}}= \frac{R_{\sigma} / 20}{n_T} = 245 / 1.1= 222.73 \text{ МПа}$ Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре T = 20 °C: $E^{20}_2= 1.99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре T = 20 °C: $\alpha^{20}_2= 0.116 \cdot 10^{-4} / ^\circ\text{C}$					
	Подп. и дата					
Инв. № подл.						
						90651-20600-AM-02-220 PP
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	163	

Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре  $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$\alpha_{20}^{20} = 0.116 \cdot 10^{-4} / ^{\circ}\text{C}$$

### Расчётные параметры первого фланца:

$$\beta = \frac{s_1}{s_0} = 33/17 = 1.9412$$

$$x = \frac{1}{\sqrt{D \cdot s_0}} = 40/(398 \cdot 17)^{1/2} = 0.48629$$

$$\kappa = 1 + (\beta - 1) \cdot \frac{x}{x + \frac{1 + \beta}{4}} = 1 + (1.9412 - 1) \cdot 0.48629 / (0.48629 + (1 + 1.9412) / 4) = 1.3747$$

Эквивалентная толщина втулки для фланца, приварного встык:

$$s_3 = \kappa \cdot s_0 = 1.3747 \cdot 17 = 23.369 \text{ мм}$$

$$l_0 = \sqrt{D \cdot s_0} = (398 \cdot 17)^{1/2} = 82.256 \text{ мм}$$

$$\beta_F = 0.83032$$

$$\beta_T = \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg K) - 1}{(1.05 + 1.945 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} = (1.5327^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg 1.5327) - 1) / ((1.05 + 1.945 \cdot 1.5327^2) \cdot (1.5327 - 1)) = 1.6952$$

$$\beta_V = 0.23798$$

$$\beta_U = \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg K) - 1}{1.36 \cdot (K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = (1.5327^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg 1.5327) - 1) / (1.36 \cdot (1.5327^2 - 1) \cdot (1.5327 - 1)) = 5.1916$$

$$\lambda = \frac{\beta_F \cdot h + l_0}{\beta_T \cdot l_0} + \frac{\beta_V \cdot h^3}{\beta_U \cdot l_0 \cdot s_0^2} = (0.83032 \cdot 40 + 82.256) / (1.6952 \cdot 82.256) + 0.23798 \cdot 40^3 / (5.1916 \cdot 82.256 \cdot 17^2) = 0.95151$$

Угловая податливость фланца при затяжке:

$$y_{\Phi} = \frac{0.91 \cdot \beta_V}{E^{20} \cdot \lambda \cdot s_0^2 \cdot l_0} = 0.91 \cdot 0.23798 / (1.99 \cdot 10^5 \cdot 0.95151 \cdot 17^2 \cdot 82.256) = 0.27566 \cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{H} \cdot \text{м}$$

Угловая податливость фланца, нагруженного внешним изгибающим моментом:

$$y_{\Phi M} = \left( \frac{\pi}{4} \right)^3 \cdot \frac{D_6}{E^{20} \cdot D_K \cdot h^3} = (3.1416 / 4)^3 \cdot 550 / (1.99 \cdot 10^5 \cdot 610 \cdot 40^3) = 0.19651 \cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{H} \cdot \text{м}$$

Плечи моментов:

$$a = 0$$

$$b = 0.5 \cdot (D_6 - D_{\text{сш}}) = 0.5 \cdot (550 - 460) = 45 \text{ мм}$$

$$e = 0.5 \cdot (D_{\text{сш}} - D - s_3) = 0.5 \cdot (460 - 398 - 23.369) = 19.315 \text{ мм}$$

### Расчётные параметры второго фланца:

$$\beta = \frac{s_1}{s_0} = 33/17 = 1.9412$$

$$x = \frac{1}{\sqrt{D \cdot s_0}} = 40/(398 \cdot 17)^{1/2} = 0.48629$$

$$\kappa = 1 + (\beta - 1) \cdot \frac{x}{x + \frac{1 + \beta}{4}} = 1 + (1.9412 - 1) \cdot 0.48629 / (0.48629 + (1 + 1.9412) / 4) = 1.3747$$

Эквивалентная толщина втулки для фланца, приварного встык:

$$s_3 = \kappa \cdot s_0 = 1.3747 \cdot 17 = 23.369 \text{ мм}$$

$$l_0 = \sqrt{D \cdot s_0} = (398 \cdot 17)^{1/2} = 82.256 \text{ мм}$$

$$\beta_F = 0.83032$$

Взам. инв. №		Расчетные параметры второго фланца.					
		$\beta = \frac{s_1}{s_0} = 33/17 = 1.9412$ $x = \frac{1}{\sqrt{D \cdot s_0}} = 40/(398 \cdot 17)^{1/2} = 0.48629$					
Подп. и дата		$\kappa = 1 + (\beta - 1) \cdot \frac{x}{x + \frac{1 + \beta}{4}} = 1 + (1.9412 - 1) \cdot 0.48629 / (0.48629 + (1 + 1.9412) / 4) = 1.3747$ <p>Эквивалентная толщина втулки для фланца, приварного встык:</p> $s_3 = \kappa \cdot s_0 = 1.3747 \cdot 17 = 23.369 \text{ мм}$ $l_0 = \sqrt{D \cdot s_0} = (398 \cdot 17)^{1/2} = 82.256 \text{ мм}$ $\beta_F = 0.83032$					
Инв. № подл.						90651-20600-AM-02-220 РР	Лист
		Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	

$$\beta_T = \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg K) - 1}{(1.05 + 1.945 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} = (1.5327^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg 1.5327) - 1) / ((1.05 + 1.945 \cdot 1.5327^2) \cdot (1.5327 - 1)) = 1.6952$$

$$\beta_w = 0.23798$$

$$\beta_U = \frac{K^2(1+8.55 \cdot \lg K) - 1}{1.36 \cdot (K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = (1.5327^2 \cdot (1+8.55 \cdot \lg 1.5327) - 1) / (1.36 \cdot (1.5327^2 - 1) \cdot (1.5327 - 1)) = 5.1916$$

$$\lambda = \frac{\beta_F \cdot h + 10}{\beta_T \cdot 10} + \frac{\beta_V \cdot h^3}{\beta_U \cdot 10 \cdot s_0^2} = (0.83032 \cdot 44 + 82.256) / (1.6952 \cdot 82.256) + 0.23798 \cdot 44^3 / (5.1916 \cdot 82.256 \cdot 17^2) = 1.0162$$

Угловая податливость фланца при затяжке:

$$y_{\Phi} = \frac{0.91 \cdot \beta_V}{E^{20} \cdot \lambda \cdot s_0^2 \cdot 10} = 0.91 \cdot 0.23798 / (1.99 \cdot 10^5 \cdot 1.0162 \cdot 17^2 \cdot 82.256) = 0.25812 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ/\text{H}\cdot\text{m}$$

Угловая податливость фланца, нагруженного внешним изгибающим моментом:

$$y_{\Phi M} = \left(\frac{\pi}{4}\right)^3 \cdot \frac{D_6}{E^{20} \cdot D_{\text{max}}^3} = (3.1416/4)^3 \cdot 550 / (1.99 \cdot 10^5 \cdot 610 \cdot 44^3) = 0.14764 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ/\text{H} \cdot \text{M}$$

Плечи моментов:

$$a = 0$$

$$b = 0.5 \cdot (D_6 - D_{\text{сш}}) = 0.5 \cdot (550 - 460) = 45 \text{ мм}$$

$$e = 0.5 \cdot (D_{\text{max}} - D - s_s) = 0.5 \cdot (460 - 398 - 23.369) = 19.315 \text{ mm}$$

### 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 :

$$b_0 = 13 \text{ mm}$$

Примечание: 
$$\begin{cases} b_0 = b_{\text{тр}} & \text{при } b_{\text{тр}} \leq 15,0 \text{ мм} \\ b_0 = 3,8 \cdot \sqrt{b_{\text{тр}}} & \text{при } b_{\text{тр}} > 15,0 \text{ мм} \end{cases}$$

Рабочий наружный диаметр прокладки :

$$D_{\text{пнд}} = \min\{D_4; D_{\text{нп}}\} = \min\{473; 473\} = 473 \text{ мм}$$

Средний эффективный диаметр прокладки:

$$D_{\text{ст}} = D_{\text{пер}} - b_0 = 473 - 13 = 460 \text{ мм}$$

Для металлических и асбометаллических прокладок  $\gamma_p = 0$ .

### Расчёт нагрузок:

Равнодействующая давления :

$$Q_{\pi} = 0.785 \cdot D_{\text{ш}}^2 \cdot p = 0.785 \cdot 460^2 \cdot 2.2696 = 3.7699 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Усилие на прокладке в рабочих условиях, необходимое для обеспечения герметичности:

$$R_H = \pi \cdot D_{CH} \cdot b_0 \cdot m \cdot |p| = 3.1416 \cdot 460 \cdot 13 \cdot 3 \cdot |2.2696| = 1.2792 \cdot 10^5 \text{ H}$$

Усилие, необходимое для смятия прокладки при затяжке :

$$P_{\text{обж}} = 0.5 \cdot \pi \cdot D_{\text{ст}} \cdot b_0 \cdot q_{\text{обж}} = 0.5 \cdot 3.1416 \cdot 460 \cdot 13 \cdot 69 = 6.4814 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Взам. инв. №		Подп. и дата		Инв. № подл.		$D_{ст} = D_{тф} - b_0 = 473 - 13 = 460 \text{ мм}$
Для металлических и асбометаллических прокладок $y_n = 0$ .						
<b>Расчёт нагрузок:</b>						
Равнодействующая давления :						
$Q_d = 0.785 \cdot D_{ст}^2 \cdot p = 0.785 \cdot 460^2 \cdot 2.2696 = 3.7699 \cdot 10^5 \text{ Н}$						
Усилие на прокладке в рабочих условиях, необходимое для обеспечения герметичности:						
$F_n = \pi \cdot D_{ст} \cdot b_0 \cdot m \cdot  p  = 3.1416 \cdot 460 \cdot 13 \cdot 3 \cdot  2.2696  = 1.2792 \cdot 10^5 \text{ Н}$						
Усилие, необходимое для смятия прокладки при затяжке :						
$F_{обж} = 0.5 \cdot \pi \cdot D_{ст} \cdot b_0 \cdot q_{обж} = 0.5 \cdot 3.1416 \cdot 460 \cdot 13 \cdot 69 = 6.4814 \cdot 10^5 \text{ Н}$						

НЕФТЕХИМПРОЕКТ NEFTECHIMPROEKT			МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ			РР	
<p>Расчетная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для герметизации в условиях испытаний (нагрузки + давление)</p> <p>Рабочая длина болта (шпильки):</p> <p><math>L_{\text{б0}} = h' + h'' + 2 \cdot h_{\text{п}} + s_{\text{рн}} + h_{\text{ш}}' + h_{\text{ш}}'' = 40 + 44 + 2 \cdot 3.2 + 29 + 0 + 0 = 119.4 \text{ мм}</math></p> <p>Эффективная длина шпильки :</p> <p><math>L_{\text{б}} = L_{\text{б0}} + 0.56 \cdot d = 119.4 + 0.56 \cdot 30 = 136.2 \text{ мм}</math></p> <p>Площадь сечения шпильки (по внутреннему диаметру резьбы):</p> <p><math>f_{\text{б}} = 520 \text{ мм}^2</math></p> <p>Податливость шпилек :</p> <p><math>y_{\text{б}} = \frac{L_{\text{б}}}{E_{\text{б}}^{20} \cdot f_{\text{б}} \cdot n} = 136.2 / (2.18 \cdot 10^5 \cdot 520 \cdot 16) = 0.75093 \cdot 10^{-7} \text{ мм/Н}</math></p> <p><math>\eta = y_{\text{п}} + y_{\text{б}} + y_{\text{ф}}' \cdot b'^2 + y_{\text{ф}}'' \cdot b''^2 = 0 + 0.75093 \cdot 10^{-7} + 0.27566 \cdot 10^{-5} \cdot 45^2 + 0.25812 \cdot 10^{-5} \cdot 45^2 = 0.26375 \cdot 10^{-6} \text{ мм/Н}</math></p> <p>Коэффициенты жёсткости для фланцевого соединения, нагруженного внутренним давлением и внешней осевой силой:</p> <p><math>\alpha = 1 - \frac{y_{\text{п}} - (y_{\text{ф}}' \cdot e' \cdot b' + y_{\text{ф}}'' \cdot e'' \cdot b'')}{\eta}</math></p> <p><math>= 1 - (0 - (0.27566 \cdot 10^{-5} \cdot 19.315 \cdot 45 + 0.25812 \cdot 10^{-5} \cdot 19.315 \cdot 45)) / 0.26375 \cdot 10^{-6}</math></p> <p><math>= 1.307</math></p> <p>Коэффициенты жёсткости для фланцевого соединения, нагруженного внешним изгибающим моментом:</p> <p><math>\alpha_{\text{М}} = \frac{y_{\text{б}} + y_{\text{фМ}}' \cdot b' \cdot \left( b' + e' - \frac{e'^2}{D_{\text{ф}}} \right) + y_{\text{фМ}}'' \cdot b'' \cdot \left( b'' + e'' - \frac{e''^2}{D_{\text{ф}}} \right)}{y_{\text{б}} + y_{\text{п}} \cdot \left( \frac{D_{\text{б}}}{D_{\text{ф}}} \right)^2 + y_{\text{фМ}}' \cdot b'^2 + y_{\text{фМ}}'' \cdot b''^2}</math></p> <p><math>= [0.75093 \cdot 10^{-7} + 0.19651 \cdot 10^{-5} \cdot 45 \cdot (45 + 19.315 - 19.315^2 / 460) + 0.14764 \cdot 10^{-5} \cdot 45 \cdot (45 + 19.315 - 19.315^2 / 460)] / [0.75093 \cdot 10^{-7} + 0 \cdot (550 / 460)^2 + 0.19651 \cdot 10^{-5} \cdot 45^2 + 0.19651 \cdot 10^{-5} \cdot 45^2]</math></p> <p><math>= 1.2542</math></p> <p><math>P_{\text{б1}} = \alpha \cdot (Q_{\text{д}} + F) + R_{\text{п}} + \frac{4 \cdot \alpha_{\text{М}} \cdot  M }{D_{\text{ф}}} = 1.307 \cdot (3.7699 \cdot 10^5 + 0) + 1.2792 \cdot 10^5 + 4 \cdot 1.2542 \cdot  0  / 460 = 6.2066 \cdot 10^5 \text{ Н}</math></p> <p>Расчетная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для герметизации в условиях испытаний (только давление)</p> <p><math>P_{\text{б1}} = \alpha \cdot (Q_{\text{д}} + F) + R_{\text{п}} + \frac{4 \cdot \alpha_{\text{М}} \cdot  M }{D_{\text{ф}}} = 1.307 \cdot (3.7699 \cdot 10^5 + 0) + 1.2792 \cdot 10^5 + 4 \cdot 1.2542 \cdot  0  / 460 = 6.2066 \cdot 10^5 \text{ Н}</math></p> <p>Суммарная площадь сечения болтов (шпилек) по внутреннему диаметру резьбы или сечению наименьшего диаметра:</p> <p><math>A_{\text{б}} = n \cdot f_{\text{б}} = 16 \cdot 520 = 8320 \text{ мм}^2</math></p> <p>Расчётная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для обжатия прокладки и минимального начального натяжения болтов:</p> <p><math>P_{\text{б2}} = \max \{ P_{\text{обж}}; 0.4 \cdot A_{\text{б}} \cdot [\sigma]_{\text{б}}^{20} \} = \max \{ 6.4814 \cdot 10^5; 0.4 \cdot 8320 \cdot 230 = 7.6544 \cdot 10^5 \} = 7.6544 \cdot 10^5 \text{ Н}</math></p> <p>Расчёт без учета стесненности температурных деформаций</p> <p>Расчёт болтов(шпилек):</p> <p>Коэффициент увеличения допускаемых напряжений при затяжке: <math>\xi = 1.2</math></p> <p>Коэффициент условий работы: <math>K_{\text{уп}} = 1.35</math></p> <p>Коэффициент условий затяжки: <math>K_{\text{уз}} = 1</math></p> <p>Коэффициент учета нагрузки от температурных деформаций: <math>K_{\text{ут}} = 1</math></p> <p>Допускаемые напряжения для болтов (шпилек) при затяжке :</p> <p><math>[\sigma]_{\text{б}}^{\text{тк}} = \xi \cdot K_{\text{уп}} \cdot K_{\text{уз}} \cdot K_{\text{ут}} \cdot [\sigma]_{\text{б}}^{20} = 1.2 \cdot 1.35 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 230 = 372.6 \text{ МПа}</math></p> <p>Болтовая нагрузка в условиях затяжки :</p> <p><math>P_{\text{б}}^{\text{тк}} = \max \{ P_{\text{б1}}; P_{\text{б2}} \} = \max \{ 6.2066 \cdot 10^5; 7.6544 \cdot 10^5 \} = 7.6544 \cdot 10^5 \text{ Н}</math></p>							
Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	90651-20600-AM-02-220 РР				Лист
							166
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата			

90651-20600-AM-02-220 РР изм.0.docx

Формат А4



Условие прочности при затяжке:

$$\sigma_{61} = \frac{P_6^M}{A_6} \leq [\sigma]_6^M$$

$$\sigma_{61} = \frac{P_6^M}{A_6} = 7.6544 \cdot 10^5 / 8320 = 92 \text{ МПа}$$

Крутящий момент при затяжке болтов (шпилек) без смазки при  $\sigma_{61} < 120$  МПа:

$$M_{кр} = 0.3 \cdot \frac{P_6^M \cdot d}{n} = 0.3 \cdot 7.6544 \cdot 10^5 \cdot 30 / 16 = 430.56 \text{ Н·м}$$

При наличии смазки величина  $M_{кр}$  снижается на 25% и составляет  $0.75 \cdot M_{кр} = 322.92 \text{ Н·м}$   
 $92 \text{ МПа} \leq 372.6 \text{ МПа}$ , **Условие прочности выполнено.**

Допускаемые напряжения для болтов (шпилек) при рабочих условиях:

$$[\sigma]_6^P = K_{ур} \cdot K_{уз} \cdot K_{ут} \cdot [\sigma]_6 = 1.35 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 230 = 310.5 \text{ МПа}$$

Болтовая нагрузка в рабочих условиях:

$$P_6^P = P_6^M + (1 - \alpha) \cdot (Q_d + F) + \frac{4 \cdot (1 - \alpha_M) \cdot |M|}{D_{ст}} = 7.6544 \cdot 10^5 + (1 - 1.307) \cdot (3.7699 \cdot 10^5 + 0) + 4 \cdot (1 - 1.2542) \cdot |0| / 460 = 6.4969 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Условие прочности в рабочих условиях:

$$\sigma_{62} = \frac{P_6^P}{A_6} \leq [\sigma]_6^P$$

$$\sigma_{62} = \frac{P_6^P}{A_6} = 6.4969 \cdot 10^5 / 8320 = 78.088 \text{ МПа}$$

$78.088 \text{ МПа} \leq 310.5 \text{ МПа}$ , **Условие прочности выполнено.**

### Расчёт первого фланца:

Коэффициент, учитывающий изгиб тарелки фланца между шпильками:

$$C_F = \max \left\{ 1; \frac{\frac{\pi \cdot D_6}{n}}{2 \cdot d + \frac{6 \cdot h}{m + 0.5}} \right\} = \max \{1; (3.1416 \cdot 550 / 16) / (2 \cdot 30 + 6 \cdot 40 / (3 + 0.5))\}^{1/2} = 1$$

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при затяжке:

$$M^M = C_F \cdot P_6^M \cdot b = 1 \cdot 7.6544 \cdot 10^5 \cdot 45 = 34445 \text{ Н·м}$$

$$f = \max \left\{ \frac{C_{36}}{1 + A}; 1.0 \right\} = \max \{2.3189 / (1 + 0.94118); 1.0\} = 1.1946$$

$$D^* = D + c + s_{0 \text{ при } (D + 2 \cdot c) < 20 \cdot (s_1 - c) \text{ и } f > 1} = 398 + 0 + 17 \text{ при } (398 + 2 \cdot 0) < 20 \cdot (33 - 0) \text{ и } f = 1.1946 > 1 = 415 \text{ мм}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении  $s_1$ :

$$\sigma_1^M = \frac{M^M}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D^*} = 34445 / (0.95151 \cdot (33 - 3)^2 \cdot 415) = 96.921 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в условиях затяжки:

$$\sigma_R^M = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + 1_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot 1_0 \cdot D} \cdot M^M = (1.33 \cdot 0.83032 \cdot 40 + 82.256) / (0.95151 \cdot 40^2 \cdot 82.256 \cdot 398) \cdot 34445 = 87.375 \text{ МПа}$$

$$\beta_Y = \frac{1}{K - 1} \cdot \left( 0.69 + 5.72 \cdot \frac{K^2 \cdot \lg K}{K^2 - 1} \right) = 1 / (1.5327 - 1) \cdot (0.69 + 5.72 \cdot 1.5327^2 \cdot \lg 1.5327 / (1.5327^2 - 1)) = 4.763$$

$$\beta_Z = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = (1.5327^2 + 1) / (1.5327^2 - 1) = 2.4825$$

Окружное напряжение в тарелке в условиях затяжки:

$$\sigma_T^M = \frac{\beta_Y \cdot M^M}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^M = 4.763 \cdot 34445 / (40^2 \cdot 398) - 2.4825 \cdot 87.375 = 40.721 \text{ МПа}$$

Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	90651-20600-AM-02-220 РР	Лист 167
Взам. инв. №						
Подп. и дата						
Инв. № подл.						



$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P-} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P-} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^{P-} \right| \right\} = \frac{\max\{|102.75 - 6.9476 + 92.634|; |102.75 - 6.9476 + 43.172|; |102.75 + 6.9476|\}}{1} = 188.44 \text{ МПа}$$

188.44 МПа ≤ 348.86 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_0^M = f \cdot \sigma_1^M = 1.1946 \cdot 96.921 = 115.78 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении  $s_0$  (п. 8.5.2):

$$\sigma_0^M \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R^{20}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_R^{20} = 3 \cdot [\sigma]_\Phi^{20} = 3 \cdot 222.73 = 668.18 \text{ МПа}$$

$$1.3 \cdot [\sigma]_R^{20} = 1.3 \cdot 668.18 = 868.64 \text{ МПа}$$

115.78 МПа ≤ 868.64 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_0^P = f \cdot \sigma_1^P = 1.1946 \cdot 102.75 = 122.75 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_0$  (+):

$$\sigma_{0mm}^{P+} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_0}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = \frac{(0.785 \cdot 398^2 \cdot 2.2696 + 0 + 4 \cdot 0 / (398 + 17)) / (3.1416 \cdot (398 + 17) \cdot (17 - 3))}{1} = 15.462 \text{ МПа}$$

Окружное мембранное напряжение от действия давления во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_{0mo}^P = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s_0 - c)} = \frac{2.2696 \cdot 398 / (2 \cdot (17 - 3))}{1} = 32.261 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P+} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P+} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P+} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P+} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} = \frac{\max\{|122.75 \pm 15.462|; |0.3 \cdot 122.75 \pm 32.261|; |0.7 \cdot 122.75 \pm (15.462 - 32.261)|\}}{1} = 138.21 \text{ МПа}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_R = 3 \cdot [\sigma]_\Phi = 3 \cdot 222.73 = 668.18 \text{ МПа}$$

$$1.3 \cdot [\sigma]_R = 1.3 \cdot 668.18 = 868.64 \text{ МПа}$$

138.21 МПа ≤ 868.64 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_0$  (-):

$$\sigma_{0mm}^{P-} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F - \frac{4 \cdot M}{D + s_0}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = \frac{(0.785 \cdot 398^2 \cdot 2.2696 + 0 - 4 \cdot 0 / (398 + 17)) / (3.1416 \cdot (398 + 17) \cdot (17 - 3))}{1} = 15.462 \text{ МПа}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P-} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P-} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P-} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P-} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} = \frac{\max\{|122.75 \pm 15.462|; |0.3 \cdot 122.75 \pm 32.261|; |0.7 \cdot 122.75 \pm (15.462 - 32.261)|\}}{1} = 138.21 \text{ МПа}$$

138.21 МПа ≤ 868.64 МПа, **Условие прочности выполнено.**

**Расчет в сечении  $s_0$  в рабочих условиях (п. 8.5.5 ГОСТ 34233.4-2017):**

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0mo}^P \right|; \left| \sigma_{0mm}^{P-} \right| \right\} \leq [\sigma]_\Phi$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0mo}^P \right|; \left| \sigma_{0mm}^{P-} \right| \right\} = \max\{|32.261|; |15.462|\} = 32.261 \text{ МПа}$$

32.261 МПа ≤ 222.73 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Условие статической прочности при затяжке для тарелок:

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_T^M \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_\Phi^{20}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_T^M \right| \right\} = \max\{|87.375|; |40.721|\} = 87.375 \text{ МПа}$$

Взам. инв. №	$\max \left\{ \left  \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^P \right ; \left  0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right ; \left  0.7 \cdot \sigma_0^P \pm \left( \sigma_{0mm}^P - \sigma_{0mo}^P \right) \right  \right\} = \frac{\max \{ 122.75 \pm 15.462;   0.3 * 122.75 \pm 32.261  ;   0.7 * 122.75 \pm (15.462 - 32.261)   \}}{122.75 \pm (15.462 - 32.261)} = 138.21 \text{ МПа}$ <p>138.21 МПа ≤ 868.64 МПа, <b>Условие прочности выполнено.</b></p> <p><b>Расчет в сечении s<sub>0</sub> в рабочих условиях (п. 8.5.5 ГОСТ 34233.4-2017):</b></p> <p>Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении s<sub>0</sub>:</p> $\max \left\{ \left  \sigma_{0mo}^P \right ; \left  \sigma_{0mm}^P \right  \right\} \leq [\sigma]_{\Phi}$ $\max \left\{ \left  \sigma_{0mo}^P \right ; \left  \sigma_{0mm}^P \right  \right\} = \max \{   32.261  ;   15.462   \} = 32.261 \text{ МПа}$ <p>32.261 МПа ≤ 222.73 МПа, <b>Условие прочности выполнено.</b></p> <p>Условие статической прочности при затяжке для тарелок:</p> $\max \left\{ \left  \sigma_R^M \right ; \left  \sigma_T^M \right  \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_{\Phi}^{20}$ $\max \left\{ \left  \sigma_R^M \right ; \left  \sigma_T^M \right  \right\} = \max \{   87.375  ;   40.721   \} = 87.375 \text{ МПа}$				
	Подп. и дата				

Инв. № подл.					Лист
	90651-20600-AM-02-220 РР				
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	169

НЕФТЕХИМПРОЕКТ NEFTECHIMPROEKT					МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ					РР	
<p><math>K_T \cdot [\sigma]_{\Phi}^{20} = 1 \cdot 222.73 = 222.73 \text{ МПа}</math></p> <p><math>87.375 \text{ МПа} \leq 222.73 \text{ МПа}</math>, <b>Условие прочности выполнено.</b></p> <p>Условие статической прочности в рабочих условиях для тарелок:</p> $\max \left\{ \left  \sigma_R^P \right ; \left  \sigma_T^P \right  \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_{\Phi}$ $\max \left\{ \left  \sigma_R^P \right ; \left  \sigma_T^P \right  \right\} = \max \{ 92.634; 43.172 \} = 92.634 \text{ МПа}$ <p><math>K_T \cdot [\sigma]_{\Phi} = 1 \cdot 222.73 = 222.73 \text{ МПа}</math></p> <p><math>92.634 \text{ МПа} \leq 222.73 \text{ МПа}</math>, <b>Условие прочности выполнено.</b></p> <p><b>Жёсткость фланца:</b></p> <p>Угол поворота фланца в рабочих условиях:</p> $\Theta = M^P \cdot y_{\Phi} \cdot \frac{E^{20}}{E} = 36518 \cdot 0.27566 \cdot 10^{-5} \cdot 1.99 \cdot 10^5 / 1.99 \cdot 10^5 = 0.10067^{\circ}$ <p>Допускаемый угол поворота фланца:</p> $[\Theta] = 0.34377^{\circ}$ <p>Коэффициент увеличения допускаемого угла поворота фланцев: <math>K_{\Theta} = 1.3</math></p> <p>Условие выполнения жесткости фланцев :</p> $\Theta \leq K_{\Theta} \cdot [\Theta] = 1.3 \cdot 0.34377 = 0.44691^{\circ}$ <p><b>Условие жёсткости выполнено.</b></p> <p><b>Расчёт второго фланца:</b></p> <p>Коэффициент, учитывающий изгиб тарелки фланца между шпильками:</p> $C_F = \max \left\{ 1; \frac{\frac{\pi \cdot D_{\Phi}}{n}}{2 \cdot d + \frac{6 \cdot h}{m + 0.5}} \right\} = \max \{ 1; (3.1416 \cdot 550 / 16 / (2 \cdot 30 + 6 \cdot 44 / (3 + 0.5)))^{1/2} \} = 1$ <p>Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при затяжке :</p> $M^M = C_F \cdot P_{\Phi}^M \cdot b = 1 \cdot 7.6544 \cdot 10^5 \cdot 45 = 34445 \text{ Н} \cdot \text{м}$ $f = \max \left\{ \frac{C_{36}}{1 + A}; 1.0 \right\} = \max \{ 2.3189 / (1 + 0.94118); 1.0 \} = 1.1946$ $D^* = D + c + s_0 \text{ при } (D + 2 \cdot c) < 20 \cdot (s_1 - c) \text{ и } f > 1 = 398 + 0 + 17 \text{ при } (398 + 2 \cdot 0) < 20 \cdot (33 - 0) \text{ и } f = 1.1946 > 1 = 415 \text{ мм}$ <p>Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении <math>s_1</math>:</p> $\sigma_1^M = \frac{M^M}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D^*} = 34445 / (1.0162 \cdot (33 - 3)^2 \cdot 415) = 90.753 \text{ МПа}$ <p>Радиальное напряжение в тарелке в условиях затяжки :</p> $\sigma_R^M = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + 1_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot 1_0 \cdot D} \cdot M^M = (1.33 \cdot 0.83032 \cdot 44 + 82.256) / (1.0162 \cdot 44^2 \cdot 82.256 \cdot 398) \cdot 34445 = 69.977 \text{ МПа}$ $\beta_Y = \frac{1}{K - 1} \cdot \left( 0.69 + 5.72 \cdot \frac{K^2 \cdot \lg K}{K^2 - 1} \right) = 1 / (1.5327 - 1) \cdot (0.69 + 5.72 \cdot 1.5327^2 \cdot \lg 1.5327 / (1.5327^2 - 1)) = 4.763$ $\beta_Z = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = (1.5327^2 + 1) / (1.5327^2 - 1) = 2.4825$ <p>Окружное напряжение в тарелке в условиях затяжки :</p> $\sigma_T^M = \frac{\beta_Y \cdot M^M}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^M = 4.763 \cdot 34445 / (44^2 \cdot 398) - 2.4825 \cdot 69.977 = 39.197 \text{ МПа}$ <p>Условие статической прочности при затяжке в сечении <math>s_1</math> (п. 8.5.1):</p> $\max \left\{ \left  \sigma_1^M + \sigma_R^M \right ; \left  \sigma_1^M + \sigma_T^M \right  \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\Phi}^{20}$											
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	90651-20600-AM-02-220 РР					Лист	
										170	

Этот документ является собственностью "НЕФТЕХИМПРОЕКТ" и не подлежит копированию и распространению без его согласия

90651-20600-AM-02-220 РР изм.0.docx

Формат А4

Этот документ является собственностью "НЕФТЕХИМПРОЕКТ" и не подлежит копированию и распространению без его согласия

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^M + \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_1^M + \sigma_T^M \right| \right\} = \max \{ 90.753 + 69.977; | 90.753 + 39.197 | \} = 160.73 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_{\text{м}}^{20} = 1.5 \cdot [\sigma]_{\text{ф}}^{20} = 1.5 \cdot 222.73 = 334.09 \text{ МПа}$$

$$K = \frac{D_K}{D} = 610 / 398 = 1.5327$$

Коэффициент учета размеров тарелки фланца:  $K_S = 1.0442$

$$K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{м}}^{20} = 1.0442 \cdot 1 \cdot 334.09 = 348.86 \text{ МПа}$$

160.73 МПа ≤ 348.86 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Приведенная нагрузка от внешней силы и момента :

$$Q_{\text{FM}}^+ = F + \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{ст}}} = 0 + 4 \cdot |0| / 460 = 0 \text{ Н}$$

$$Q_{\text{FM}}^- = F - \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{ст}}} = 0 - 4 \cdot |0| / 460 = 0 \text{ Н}$$

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при рабочих условиях:

$$M^P = C_F \cdot \max \left\{ p_E \cdot b + (Q_{\text{д}} + Q_{\text{FM}}) \cdot e; |Q_{\text{д}} + Q_{\text{FM}}| \cdot e \right\} = \frac{1 \cdot \max \{ 6.4969 \cdot 10^5 \cdot 45 + (3.7699 \cdot 10^5 + 0) \cdot 19.315; |3.7699 \cdot 10^5 + 0| \cdot 19.315 \}}{0.19315} = 36518 \text{ Н·м}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_1$ :

$$\sigma_1^P = \frac{M^P}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D^*} = 36518 / (1.0162 \cdot (33 - 3)^2 \cdot 415) = 96.216 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в рабочих условиях :

$$\sigma_R^P = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + 1_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot 1_0 \cdot D} \cdot M^P = (1.33 \cdot 0.83032 \cdot 44 + 82.256) / (1.0162 \cdot 44^2 \cdot 82.256 \cdot 398) \cdot 36518 = 74.189 \text{ МПа}$$

Окружное напряжение в тарелке в рабочих условиях :

$$\sigma_T^P = \frac{\beta_V \cdot M^P}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^P = 4.763 \cdot 36518 / (44^2 \cdot 398) - 2.4825 \cdot 74.189 = 41.557 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_1$  (+):

$$\sigma_{\text{лмм}}^{P+} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_1}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = (0.785 \cdot 398^2 \cdot 2.2696 + 0 + 4 \cdot 0 / (398 + 33)) / (3.1416 \cdot (398 + 33) \cdot (33 - 3)) = 6.9476 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_1$  (п. 8.5.1):

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^{P+} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^{P+} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{\text{лмм}}^{P+} \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{м}}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^{P+} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^{P+} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{\text{лмм}}^{P+} \right| \right\} = \max \{ |96.216 - 6.9476 + 74.189|; |96.216 - 6.9476 + 41.557|; |96.216 + 6.9476| \} = 163.46 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_{\text{м}} = 1.5 \cdot [\sigma]_{\text{ф}} = 1.5 \cdot 222.73 = 334.09 \text{ МПа}$$

$$K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{м}} = 1.0442 \cdot 1 \cdot 334.09 = 348.86 \text{ МПа}$$

163.46 МПа ≤ 348.86 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_1$  (-):

$$\sigma_{\text{лмм}}^{P-} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F - \frac{4 \cdot M}{D + s_1}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = (0.785 \cdot 398^2 \cdot 2.2696 + 0 - 4 \cdot 0 / (398 + 33)) / (3.1416 \cdot (398 + 33) \cdot (33 - 3)) = 6.9476 \text{ МПа}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^{P-} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^{P-} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{\text{лмм}}^{P-} \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{м}}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^{P-} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^{P-} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{\text{лмм}}^{P-} \right| \right\} = \max \{ |96.216 - 6.9476 + 74.189|; |96.216 - 6.9476 + 41.557|; |96.216 + 6.9476| \} = 163.46 \text{ МПа}$$

163.46 МПа ≤ 348.86 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_0^M = f \cdot \sigma_1^M = 1.1946 \cdot 90.753 = 108.41 \text{ МПа}$$

Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	90651-20600-AM-02-220 РР	Лист
Взам. инв. №						
Подп. и дата						
Инв. № подл.						171

Условие статической прочности при затяжке в сечении  $s_0$  (п. 8.5.2):

$$\sigma_0^M \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R^{20}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_R^{20} = 3 \cdot [\sigma]_\Phi^{20} = 3 \cdot 222.73 = 668.18 \text{ МПа}$$

$$1.3 \cdot [\sigma]_R^{20} = 1.3 \cdot 668.18 = 868.64 \text{ МПа}$$

108.41 МПа ≤ 868.64 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_0^P = f \cdot \sigma_1^P = 1.1946 \cdot 96.216 = 114.94 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_0$  (+):

$$\sigma_{0mm}^{P+} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_0}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = (0.785 \cdot 398^2 \cdot 2.2696 + 0 + 4 \cdot 0 / (398 + 17)) / (3.1416 \cdot (398 + 17) \cdot (17 - 3)) = 15.462 \text{ МПа}$$

Окружное мембранное напряжение от действия давления во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_{0mo}^P = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s_0 - c)} = 2.2696 \cdot 398 / (2 \cdot (17 - 3)) = 32.261 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P+} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P+} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P+} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P+} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} = \max \{ |114.94 \pm 15.462|; |0.3 \cdot 114.94 \pm 32.261|; |0.7 \cdot 114.94 \pm (15.462 - 32.261)| \} = 130.4 \text{ МПа}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_R = 3 \cdot [\sigma]_\Phi = 3 \cdot 222.73 = 668.18 \text{ МПа}$$

$$1.3 \cdot [\sigma]_R = 1.3 \cdot 668.18 = 868.64 \text{ МПа}$$

130.4 МПа ≤ 868.64 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_0$  (-):

$$\sigma_{0mm}^{P-} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F - \frac{4 \cdot M}{D + s_0}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = (0.785 \cdot 398^2 \cdot 2.2696 + 0 - 4 \cdot 0 / (398 + 17)) / (3.1416 \cdot (398 + 17) \cdot (17 - 3)) = 15.462 \text{ МПа}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P-} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P-} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P-} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P-} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} = \max \{ |114.94 \pm 15.462|; |0.3 \cdot 114.94 \pm 32.261|; |0.7 \cdot 114.94 \pm (15.462 - 32.261)| \} = 130.4 \text{ МПа}$$

130.4 МПа ≤ 868.64 МПа, **Условие прочности выполнено.**

**Расчет в сечении  $s_0$  в рабочих условиях (п. 8.5.5 ГОСТ 34233.4-2017):**

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0mo}^P \right|; \left| \sigma_{0mm}^P \right| \right\} \leq [\sigma]_\Phi$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0mo}^P \right|; \left| \sigma_{0mm}^P \right| \right\} = \max \{ |32.261|; |15.462| \} = 32.261 \text{ МПа}$$

32.261 МПа ≤ 222.73 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Условие статической прочности при затяжке для тарелок:

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_T^M \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_\Phi^{20}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_T^M \right| \right\} = \max \{ |69.977|; |39.197| \} = 69.977 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_\Phi^{20} = 1 \cdot 222.73 = 222.73 \text{ МПа}$$

69.977 МПа ≤ 222.73 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Условие статической прочности в рабочих условиях для тарелок:

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_T^P \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_\Phi$$

Взам. инв. №					
Подп. и дата					
Инв. № подл.					
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	

90651-20600-AM-02-220 РР

Лист

172









Этот документ является собственностью "НЕФТЕХИМПРОЕКТ" и не подлежит копированию и распространению без его согласия

НЕФТЕХИМПРОЕКТ NEFTECHIMPROEKT		МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ			РР	
Толщина конической части втулки, s1:		20 мм				
Радиус перехода, r:		5 мм				
Данные второго фланца (кольца):						
Материал фланца (кольца):		09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка				
Наружный диаметр фланца (кольца), Dн:		300 мм				
Толщина фланца (кольца) с выступом, h'		28 мм				
Внутренний диаметр фланца (кольца), D:		146 мм				
Сумма прибавок, с:		0 мм				
Длина конической части втулки, l:		31 мм				
Длина цилиндрической части втулки, lc:		12 мм				
Толщина цилиндрической части втулки, s0:		7.5 мм				
Толщина конической части втулки, s1:		20 мм				
Радиус перехода, r:		5 мм				
Расчёт в рабочих условиях						
Условия нагружения:						
Расчётное осевое растягивающее усилие, F:		3100 Н				
Расчётный изгибающий момент, M:		4242.6 Н·м				
Расчётное внутреннее избыточное давление, p:		1.6 МПа				
Расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ 34233.4-2017						
Расчётная температура элементов соединения:						
Температура фланца (кольца), tф:		100 °С				
Температура фланца (кольца), tф:		100 °С				
Температура болтов (шпилек), tб:		100 °С				
Свойства материала болтов (шпилек)						
Допускаемые напряжения для материала 35Х Крепеж при температуре 100 °С (рабочие условия):		[σ]б= 230 МПа				
Модуль продольной упругости для материала 35Х Крепеж при температуре T = 100 °С:		Еб= 2.15·10 <sup>5</sup> МПа				
Коэффициент линейного расширения для материала 35Х Крепеж при температуре T = 100 °С:		αб= 0.134·10 <sup>-4</sup> /°С				
Допускаемые напряжения для материала 35Х Крепеж при температуре 20 °С (рабочие условия):		[σ] <sup>20б</sup> = 230 МПа				
Модуль продольной упругости для материала 35Х Крепеж при температуре T = 20 °С:		Е <sup>20б</sup> = 2.18·10 <sup>5</sup> МПа				
Свойства материала фланца (кольца) 1						
Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре 100 °С (рабочие условия):		[σ]ф1= 144 МПа				
Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре T = 100 °С:		Е1= 1.91·10 <sup>5</sup> МПа				
Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре T = 100 °С:		α1= 0.116·10 <sup>-4</sup> /°С				
Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре 20 °С (рабочие условия):		[σ] <sup>20ф1</sup> = 164.5 МПа				
Взам. инв. №	Подп. и дата	Инв. № подл.				Лист
			90651-20600-AM-02-220 РР			
			175			
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата		

90651-20600-AM-02-220 РР\_изм.0.docx

Формат А4

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка 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 Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре 100 °С (рабочие условия):

$$[\sigma]_{\phi 2} = 144 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре  $T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$E_2 = 1.91 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре  $T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$\alpha_2 = 0.116 \cdot 10^{-4} 1/^{\circ}\text{C}$$

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре 20 °С (рабочие условия):

$$[\sigma]^{20}_{\phi 2} = 164.5 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре  $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$E^{20_2} = 1.99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре  $T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$\alpha_n = 0.116 \cdot 10^{-4} 1/^{\circ}\text{C}$$

### Расчётные параметры болтов (шпилек):

Рабочая длина болта (шпильки):

$$L_{60} = h' + h'' + 2 \cdot h_{\pi} + s_{\pi\pi} + h'_{\pi\pi} + h''_{\pi\pi} = 25 + 28 + 2 \cdot 3.2 + 20 + 0 + 0 = 79.4 \text{ mm}$$

Площадь сечения шпильки (по внутреннему диаметру резьбы):

$$f_6 = 324 \text{ mm}^2$$

Эффективная длина шпильки :

$$L_s = L_{s0} + 0.56 \cdot d = 79.4 + 0.56 \cdot 24 = 92.84 \text{ mm}$$

Податливость шпилек:

$$y_6 = \frac{L_6}{E_6^{20} \cdot f_6 \cdot n} = 92.84 / (2.18 \cdot 10^5 \cdot 324 \cdot 8) = 0.1643 \cdot 10^{-6} \text{ mm/H}$$

### Расчётные параметры первого фланца:

$$\beta = \frac{s_1}{s_0} = 20/7.5 = 2.6667$$

$$x = \frac{1}{\sqrt{D \cdot s_0}} = 31/(146 \cdot 7.5)^{1/2} = 0.93682$$

$$\kappa = 1 + (\beta - 1) \cdot \frac{x}{x + \frac{1 + \beta}{4}} = 1 + (2.6667 - 1) \cdot 0.93682 / (0.93682 + (1 + 2.6667) / 4) = 1.8424$$

Эквивалентная толщина втулки для фланца, приварного встык:

$$S_3 = K \cdot S_0 = 1.8424 \cdot 7.5 = 13.818 \text{ mm}$$

$$l_0 = \sqrt{D \cdot s_0} = (146 \cdot 7.5)^{1/2} = 33.091 \text{ mm}$$

$$\beta_F = 0.71228$$

$$K = \frac{D_H}{D} = 300 / 146 = 2.0548$$

$$\beta_T = \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg K) - 1}{(1.05 + 1.945 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} = (2.0548^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg 2.0548) - 1) / ((1.05 + 1.945 \cdot 2.0548^2) \cdot (2.0548 - 1)) = 1.4855$$

Взам. инв. №		$\sqrt{D \cdot s_0}$					
		$\kappa = 1 + (\beta - 1) \cdot \frac{x}{x + \frac{1 + \beta}{4}} = 1 + (2.6667 - 1) \cdot 0.93682 / (0.93682 + (1 + 2.6667) / 4) = 1.8424$					
Подп. и дата		Эквивалентная толщина втулки для фланца, приварного встык:					
		$s_3 = \kappa \cdot s_0 = 1.8424 \cdot 7.5 = 13.818 \text{ мм}$ $l_0 = \sqrt{D \cdot s_0} = (146 \cdot 7.5)^{1/2} = 33.091 \text{ мм}$ $\beta_F = 0.71228$ $K = \frac{D_H}{D} = 300 / 146 = 2.0548$ $\beta_T = \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg K) - 1}{(1.05 + 1.945 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} = (2.0548^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg 2.0548) - 1) / ((1.05 + 1.945 \cdot 2.0548^2) \cdot (2.0548 - 1)) = 1.4855$					
Инв. № подл.						90651-20600-AM-02-220 PP	Лист
		Изм.	Лист	№ док.	Подп.		

$$\beta_V = 0.10187$$

$$\beta_U = \frac{K^2(1+8.55 \cdot \lg K) - 1}{1.36 \cdot (K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = (2.0548^2 \cdot (1+8.55 \cdot \lg 2.0548) - 1) / (1.36 \cdot (2.0548^2 - 1) \cdot (2.0548 - 1)) = 3.1398$$

$$\lambda = \frac{\beta_F \cdot h + 1_0}{\beta_T \cdot 1_0} + \frac{\beta_V \cdot h^3}{\beta_U \cdot 1_0 \cdot s_0^2} = (0.71228 \cdot 25 + 33.091) / (1.4855 \cdot 33.091) + 0.10187 \cdot 25^3 / (3.1398 \cdot 33.091 \cdot 7.5^2) = 1.3078$$

Угловая податливость фланца при затяжке:

$$y_\Phi = \frac{0.91 \cdot \beta_V}{E^{20} \cdot \lambda \cdot s_0^2 \cdot 1_0} = 0.91 \cdot 0.10187 / (1.99 \cdot 10^5 \cdot 1.3078 \cdot 7.5^2 \cdot 33.091) = 0.10965 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ/\text{Н}\cdot\text{м}$$

Угловая податливость фланца, нагруженного внешним изгибающим моментом:

$$y_{\Phi M} = \left(\frac{\pi}{4}\right)^3 \cdot \frac{D_6}{E^{20} \cdot D_K \cdot h^3} = (3.1416/4)^3 \cdot 250 / (1.99 \cdot 10^5 \cdot 300 \cdot 25^3) = 0.74394 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ/\text{Н}\cdot\text{м}$$

Плечи моментов:

$$a = 0$$

$$b = 0.5 \cdot (D_6 - D_{\text{сп}}) = 0.5 \cdot (250 - 193) = 28.5 \text{ мм}$$

$$e = 0.5 \cdot (D_{\text{сп}} - D - s_3) = 0.5 \cdot (193 - 146 - 13.818) = 16.591 \text{ мм}$$

**Расчётные параметры второго фланца:**

$$\beta = \frac{s_1}{s_0} = 20/7.5 = 2.6667$$

$$x = \frac{1}{\sqrt{D \cdot s_0}} = 31/(146 \cdot 7.5)^{1/2} = 0.93682$$

$$\kappa = 1 + (\beta - 1) \cdot \frac{x}{x + \frac{1 + \beta}{4}} = 1 + (2.6667 - 1) \cdot 0.93682 / (0.93682 + (1 + 2.6667) / 4) = 1.8424$$

Эквивалентная толщина втулки для фланца, приварного встык:

$$s_3 = \kappa \cdot s_0 = 1.8424 \cdot 7.5 = 13.818 \text{ мм}$$

$$1_0 = \sqrt{D \cdot s_0} = (146 \cdot 7.5)^{1/2} = 33.091 \text{ мм}$$

$$\beta_F = 0.71228$$

$$K = \frac{D_K}{D} = 300 / 146 = 2.0548$$

$$\beta_T = \frac{K^2 \cdot (1+8.55 \cdot \lg K) - 1}{(1.05 + 1.945 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} = (2.0548^2 \cdot (1+8.55 \cdot \lg 2.0548) - 1) / ((1.05 + 1.945 \cdot 2.0548^2) \cdot (2.0548 - 1)) = 1.4855$$

$$\beta_V = 0.10187$$

$$\beta_U = \frac{K^2(1+8.55 \cdot \lg K) - 1}{1.36 \cdot (K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = (2.0548^2 \cdot (1+8.55 \cdot \lg 2.0548) - 1) / (1.36 \cdot (2.0548^2 - 1) \cdot (2.0548 - 1)) = 3.1398$$

$$\lambda = \frac{\beta_F \cdot h + 1_0}{\beta_T \cdot 1_0} + \frac{\beta_V \cdot h^3}{\beta_U \cdot 1_0 \cdot s_0^2} = (0.71228 \cdot 28 + 33.091) / (1.4855 \cdot 33.091) + 0.10187 \cdot 28^3 / (3.1398 \cdot 33.091 \cdot 7.5^2) = 1.4615$$

Угловая податливость фланца при затяжке:

$$y_\Phi = \frac{0.91 \cdot \beta_V}{E^{20} \cdot \lambda \cdot s_0^2 \cdot 1_0} = 0.91 \cdot 0.10187 / (1.99 \cdot 10^5 \cdot 1.4615 \cdot 7.5^2 \cdot 33.091) = 0.98115 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ/\text{Н}\cdot\text{м}$$

Угловая податливость фланца, нагруженного внешним изгибающим моментом:

$$y_{\Phi M} = \left(\frac{\pi}{4}\right)^3 \cdot \frac{D_6}{E^{20} \cdot D_K \cdot h^3} = (3.1416/4)^3 \cdot 250 / (1.99 \cdot 10^5 \cdot 300 \cdot 28^3) = 0.52952 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ/\text{Н}\cdot\text{м}$$

Плечи моментов:

$$a = 0$$

$$b = 0.5 \cdot (D_6 - D_{\text{сп}}) = 0.5 \cdot (250 - 193) = 28.5 \text{ мм}$$

Взам. инв. №	$\beta_U = \frac{K}{1.36 \cdot (K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = (2.0548^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg 2.0548) - 1) / (1.36 \cdot (2.0548^2 - 1) \cdot (2.0548 - 1)) = 3.1398$ $\lambda = \frac{\beta_F \cdot h + 1_0}{\beta_T \cdot 1_0} + \frac{\beta_V \cdot h^3}{\beta_U \cdot 1_0 \cdot s_0^2} = (0.71228 \cdot 28 + 33.091) / (1.4855 \cdot 33.091) + 0.10187 \cdot 28^3 / (3.1398 \cdot 33.091 \cdot 7.5^2) = 1.4615$				
	Угловая податливость фланца при затяжке:				
Подп. и дата	$y_\Phi = \frac{0.91 \cdot \beta_V}{E^{20} \cdot \lambda \cdot s_0^2 \cdot 1_0} = 0.91 \cdot 0.10187 / (1.99 \cdot 10^6 \cdot 1.4615 \cdot 7.5^2 \cdot 33.091) = 0.98115 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ/\text{Н}\cdot\text{м}$ Угловая податливость фланца, нагруженного внешним изгибающим моментом:				
	$y_{\Phi M} = \left(\frac{\pi}{4}\right)^3 \cdot \frac{D_6}{E^{20} \cdot D_K \cdot h^3} = (3.1416 / 4)^3 \cdot 250 / (1.99 \cdot 10^6 \cdot 300 \cdot 28^3) = 0.52952 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ/\text{Н}\cdot\text{м}$ Плечи моментов:				
Инв. № подл.	$a = 0$ $b = 0.5 \cdot (D_6 - D_{сш}) = 0.5 \cdot (250 - 193) = 28.5 \text{ мм}$				
	Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата

90651-20600-AM-02-220 РР

Лист  
177

НЕФТЕХИМПРОЕКТ NEFTECHIMPROEKT		МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ			РР
e = 0.5 · (D <sub>ст</sub> - D - s <sub>з</sub> ) = 0.5 · (193 - 146 - 13.818) = 16.591 мм					
Характеристики прокладки:					
Тип и материал прокладки	Коэффициент m	Удельное давление обжатия q <sub>обж</sub> , МПа	Допускаемое удельное давление [q], МПа	Коэффициент обжатия K	Условный модуль сжатия E <sub>n</sub> , МПа
Спирально-навитая с лентой из нержавеющей стали	3	69	-	-	-
Эффективная ширина прокладки : b <sub>0</sub> = 10 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 <sub>нрф</sub> = min{D <sub>4</sub> ; D <sub>нп</sub> } = min{203; 203} = 203 мм					
Средний эффективный диаметр прокладки: D <sub>ст</sub> = D <sub>нрф</sub> - b <sub>0</sub> = 203 - 10 = 193 мм					
Для металлических и асбометаллических прокладок y <sub>n</sub> = 0.					
Расчёт нагрузок:					
Равнодействующая давления : Q <sub>д</sub> = 0.785 · D <sub>ст</sub> <sup>2</sup> · p = 0.785 · 193 <sup>2</sup> · 1.6 = 46785 Н					
Усилие на прокладке в рабочих условиях, необходимое для обеспечения герметичности: R <sub>п</sub> = π · D <sub>ст</sub> · b <sub>0</sub> · m ·  p  = 3.1416 · 193 · 10 · 3 ·  1.6  = 29104 Н					
Усилие, необходимое для смятия прокладки при затяжке : P <sub>обж</sub> = 0.5 · π · D <sub>ст</sub> · b <sub>0</sub> · q <sub>обж</sub> = 0.5 · 3.1416 · 193 · 10 · 69 = 2.0918 · 10 <sup>5</sup> Н					
Расчетная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для герметизации в рабочих условиях (нагрузки + давление, без учета температурной нагрузки) $\eta = y_{\pi} + y_{\phi} + y'_{\phi} \cdot b'^{1/2} + y''_{\phi} \cdot b''^{1/2} = 0 + 0.1643 \cdot 10^{-6} + 0.10965 \cdot 10^{-4} \cdot 28.5^{1/2} + 0.98115 \cdot 10^{-5} \cdot 28.5^{1/2} = 0.45884 \cdot 10^{-6} \text{ мм/Н}$					
Коэффициенты жёсткости для фланцевого соединения, нагруженного внутренним давлением и внешней осевой силой: $\alpha = 1 - \frac{y_{\pi} - (y'_{\phi} \cdot e' \cdot b' + y''_{\phi} \cdot e'' \cdot b'')}{\eta}$ = 1 - (0 - (0.10965 · 10 <sup>-4</sup> · 16.591 · 28.5 + 0.98115 · 10 <sup>-5</sup> · 16.591 · 28.5)) / 0.45884 · 10 <sup>-6</sup> = 1.3737					
Коэффициенты жёсткости для фланцевого соединения, нагруженного внешним изгибающим моментом: $\alpha_M = \frac{y_{\phi} + y'_{\phi M} \cdot b'^{1/2} \cdot \left(b' + e' - \frac{e'^2}{D_{ст}}\right) + y''_{\phi M} \cdot b''^{1/2} \cdot \left(b'' + e'' - \frac{e''^2}{D_{ст}}\right)}{y_{\phi} + y_{\pi} \cdot \left(\frac{D_{\phi}}{D_{ст}}\right)^2 + y'_{\phi M} \cdot b'^{1/2} + y''_{\phi M} \cdot b''^{1/2}}$ = [0.1643 · 10 <sup>-6</sup> + 0.74394 · 10 <sup>-5</sup> · 28.5 · (28.5 + 16.591 - 16.591 <sup>2</sup> / 193) + 0.52952 · 10 <sup>-5</sup> · 28.5 · (28.5 + 16.591 - 16.591 <sup>2</sup> / 193)] / [0.1643 · 10 <sup>-6</sup> + 0 · (250 / 193) <sup>2</sup> + 0.74394 · 10 <sup>-5</sup> · 28.5 <sup>1/2</sup> + 0.74394 · 10 <sup>-5</sup> · 28.5 <sup>1/2</sup> ] = 1.2786					
$P_{\phi 1} = \alpha \cdot (Q_{\text{д}} + F) + R_{\pi} + \frac{4 \cdot \alpha_M \cdot  M }{D_{ст}} = 1.3737 \cdot (46785 + 3100) + 29104 + 4 \cdot 1.2786 \cdot  4242.6  / 193 = 2.1005 \cdot 10^5 \text{ Н}$					
Расчетная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для герметизации в рабочих условиях (только давление, без учета температурной нагрузки)					
90651-20600-AM-02-220 РР					Лист
					178
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	

Взам. инв. №	
Подп. и дата	
Инв. № подл.	

НЕФТЕХИМПРОЕКТ NEFTECHIMPROEKT		МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ		РР	
$P_{\sigma 1} = \alpha \cdot (Q_{\text{д}} + F) + R_{\text{п}} + \frac{4 \cdot \alpha_{\text{м}} \cdot  M }{D_{\text{ст}}} = 1.3737 \cdot (46785 + 0) + 29104 + 4 \cdot 1.2786 \cdot  0  / 193 = 93371 \text{ Н}$					
Суммарная площадь сечения болтов (шпилек) по внутреннему диаметру резьбы или сечению наименьшего диаметра:					
$A_{\sigma} = n \cdot f_{\sigma} = 8 \cdot 324 = 2592 \text{ мм}^2$					
Расчётная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для обжатия прокладки и минимального начального натяжения болтов:					
$P_{\sigma 2} = \max \{ P_{\text{обж}}; 0.4 \cdot A_{\sigma} \cdot [\sigma]_{\sigma}^{20} \} = \max \{ 2.0918 \cdot 10^5; 0.4 \cdot 2592 \cdot 230 = 2.3846 \cdot 10^5 \} = 2.3846 \cdot 10^5 \text{ Н}$					
Расчёт без учета стесненности температурных деформаций					
Расчёт болтов(шпилек):					
Коэффициент увеличения допускаемых напряжений при затяжке: $\xi = 1.2$					
Коэффициент условий работы: $K_{\text{ур}} = 1$					
Коэффициент условий затяжки: $K_{\text{уз}} = 1$					
Коэффициент учета нагрузки от температурных деформаций: $K_{\text{ут}} = 1$					
Допускаемые напряжения для болтов (шпилек) при затяжке :					
$[\sigma]_{\sigma}^{\text{м}} = \xi \cdot K_{\text{ур}} \cdot K_{\text{уз}} \cdot K_{\text{ут}} \cdot [\sigma]_{\sigma}^{20} = 1.2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 230 = 276 \text{ МПа}$					
В соответствии с п.4.4 ГОСТ 34233.4-2017 фланцевые соединения должны отвечать условиям прочности и плотности как в случае учета внешней осевой силы и изгибающего момента, так и при расчете только на дей- ствие давления. Проводятся оба расчета, в отчет выводится худший случай.					
Болтовая нагрузка в условиях затяжки :					
$P_{\sigma}^{\text{м}} = \max \{ P_{\sigma 1}; P_{\sigma 2} \} = \max \{ 2.1005 \cdot 10^5; 2.3846 \cdot 10^5 \} = 2.3846 \cdot 10^5 \text{ Н}$					
Условие прочности при затяжке:					
$\sigma_{\sigma 1} = \frac{P_{\sigma}^{\text{м}}}{A_{\sigma}} \leq [\sigma]_{\sigma}^{\text{м}}$					
$\sigma_{\sigma 1} = \frac{P_{\sigma}^{\text{м}}}{A_{\sigma}} = 2.3846 \cdot 10^5 / 2592 = 92 \text{ МПа}$					
Крутящий момент при затяжке болтов (шпилек) без смазки при $\sigma_{\sigma 1} < 120 \text{ МПа}$ :					
$M_{\text{кр}} = 0.3 \cdot \frac{P_{\sigma}^{\text{м}} \cdot d}{n} = 0.3 \cdot 2.3846 \cdot 10^5 \cdot 24 / 8 = 214.62 \text{ Н} \cdot \text{м}$					
При наличии смазки величина $M_{\text{кр}}$ снижается на 25% и составляет $0.75 \cdot M_{\text{кр}} = 160.96 \text{ Н} \cdot \text{м}$					
$92 \text{ МПа} \leq 276 \text{ МПа}$ , <b>Условие прочности выполнено.</b>					
Допускаемые напряжения для болтов (шпилек) при рабочих условиях:					
$[\sigma]_{\sigma}^{\text{р}} = K_{\text{ур}} \cdot K_{\text{уз}} \cdot K_{\text{ут}} \cdot [\sigma]_{\sigma} = 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 230 = 230 \text{ МПа}$					
Болтовая нагрузка в рабочих условиях :					
$P_{\sigma}^{\text{р}} = P_{\sigma}^{\text{м}} + (1 - \alpha) \cdot (Q_{\text{д}} + F) + \frac{4 \cdot (1 - \alpha_{\text{м}}) \cdot  M }{D_{\text{ст}}} = 2.3846 \cdot 10^5 + (1 - 1.3737) \cdot (46785 + 0) + 4 \cdot (1 - 1.2786) \cdot  0  / 193 = 2.2098 \cdot 10^5 \text{ Н}$					
Условие прочности в рабочих условиях:					
$\sigma_{\sigma 2} = \frac{P_{\sigma}^{\text{р}}}{A_{\sigma}} \leq [\sigma]_{\sigma}^{\text{р}}$					
$\sigma_{\sigma 2} = \frac{P_{\sigma}^{\text{р}}}{A_{\sigma}} = 2.2098 \cdot 10^5 / 2592 = 85.255 \text{ МПа}$					
$85.255 \text{ МПа} \leq 230 \text{ МПа}$ , <b>Условие прочности выполнено.</b>					
90651-20600-AM-02-220 РР					Лист
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	179

### Расчёт первого фланца:

Коэффициент, учитывающий изгиб тарелки фланца между шпильками:

$$C_F = \max \left\{ 1; \sqrt{\frac{\frac{\pi \cdot D_6}{n}}{2 \cdot d + \frac{6 \cdot h}{m + 0.5}}} \right\} = \max \{1; (3.1416 \cdot 250 / 8 / (2 \cdot 24 + 6 \cdot 25 / (3 + 0.5)))^{1/2}\} = 1.0395$$

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при затяжке:

$$M^M = C_F \cdot P_6^M \cdot b = 1.0395 \cdot 2.3846 \cdot 10^5 \cdot 28.5 = 7064.6 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$f = \max \left\{ \frac{C_{36}}{1 + A}; 1.0 \right\} = \max \{1.6922 / (1 + 1.6667); 1.0\} = 1$$

$$D^* = D + c + s_1 \text{ при } (D + 2 \cdot c) < 20 \cdot (s_1 - c) \text{ и } f = 1 = 146 + 0 + 20 \text{ при } 146 < 20 \cdot (20 - 0) \text{ и } f = 1 = 166 \text{ мм}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении  $s_1$ :

$$\sigma_1^M = \frac{M^M}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D^*} = 7064.6 / (1.3078 \cdot (20 - 3)^2 \cdot 166) = 112.6 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в условиях затяжки:

$$\sigma_R^M = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + 1.0}{\lambda \cdot h^2 \cdot 1.0 \cdot D} \cdot M^M = (1.33 \cdot 0.71228 \cdot 25 + 33.091) / (1.3078 \cdot 25^2 \cdot 33.091 \cdot 146) \cdot 7064.6 = 101.57 \text{ МПа}$$

$$\beta_Y = \frac{1}{K - 1} \cdot \left( 0.69 + 5.72 \cdot \frac{K^2 \cdot \lg K}{K^2 - 1} \right) = 1 / (2.0548 - 1) \cdot (0.69 + 5.72 \cdot 2.0548^2 \cdot \lg 2.0548 / (2.0548^2 - 1)) = 2.8766$$

$$\beta_Z = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = (2.0548^2 + 1) / (2.0548^2 - 1) = 1.6207$$

Окружное напряжение в тарелке в условиях затяжки:

$$\sigma_T^M = \frac{\beta_Y \cdot M^M}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^M = 2.8766 \cdot 7064.6 / (25^2 \cdot 146) - 1.6207 \cdot 101.57 = 58.097 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении  $s_1$  (п. 8.5.1):

$$\max \{ |\sigma_1^M + \sigma_R^M|; |\sigma_1^M + \sigma_T^M| \} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{м}}^{20}$$

$$\max \{ |\sigma_1^M + \sigma_R^M|; |\sigma_1^M + \sigma_T^M| \} = \max \{ |112.6 + 101.57|; |112.6 + 58.097| \} = 214.17 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_{\text{м}}^{20} = 1.5 \cdot [\sigma]_{\text{ф}}^{20} = 1.5 \cdot 164.5 = 246.75 \text{ МПа}$$

$$K = \frac{D_H}{D} = 300 / 146 = 2.0548$$

Коэффициент учета размеров тарелки фланца:  $K_S = 1.2$

$$K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{м}}^{20} = 1.2 \cdot 1 \cdot 246.75 = 296.1 \text{ МПа}$$

214.17 МПа ≤ 296.1 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Болтовая нагрузка в рабочих условиях:

$$P_6^P = P_6^M + (1 - \alpha) \cdot (Q_{\text{д}} + F) + \frac{4 \cdot (1 - \alpha_{\text{м}}) \cdot |M|}{D_{\text{от}}} = \frac{2.3846 \cdot 10^5}{193} + (1 - 1.3737) \cdot (46785 + 3100) + 4 \cdot (1 - 1.2786) \cdot |4242.6| / 193 = 1.9533 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Приведенная нагрузка от внешней силы и момента:

$$Q_{\text{FM}}^+ = F + \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{от}}} = 3100 + 4 \cdot |4242.6| / 193 = 91030 \text{ Н}$$

$$Q_{\text{FM}}^- = F - \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{от}}} = 3100 - 4 \cdot |4242.6| / 193 = (-84830) \text{ Н}$$

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при рабочих условиях:

$$M^P = C_F \cdot \max \{ P_6^P \cdot b + (Q_{\text{д}} + Q_{\text{FM}}^-) \cdot e; |Q_{\text{д}} + Q_{\text{FM}}^+| \cdot e \} = \frac{1.0395 \cdot \max \{ 1.9533 \cdot 10^5 \cdot 28.5 + (46785 + 91030) \cdot 16.591; |46785 + (-84830)| \cdot 16.591 \}}{1} = 8163.5 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Взам. инв. №				
Подп. и дата				
Инв. № подл.				
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата

90651-20600-AM-02-220 РР

Лист

180

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_1$ :

$$\sigma_1^P = \frac{M^P}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D} = 8163.5 / (1.3078 \cdot (20 - 3)^2 \cdot 166) = 130.12 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в рабочих условиях :

$$\sigma_R^P = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + 1_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot 1_0 \cdot D} \cdot M^P = (1.33 \cdot 0.71228 \cdot 25 + 33.091) / (1.3078 \cdot 25^2 \cdot 33.091 \cdot 146) \cdot 8163.5 = 117.37 \text{ МПа}$$

Окружное напряжение в тарелке в рабочих условиях :

$$\sigma_T^P = \frac{\beta_V \cdot M^P}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^P = 2.8766 \cdot 8163.5 / (25^2 \cdot 146) - 1.6207 \cdot 117.37 = 67.133 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_1$  (+):

$$\sigma_{1mm}^{P+} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_1}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = (0.785 \cdot 146^2 \cdot 1.6 + 3100 + 4 \cdot 4242.6 / (146 + 20)) / (3.1416 \cdot (146 + 20) \cdot (20 - 3)) = 14.901 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_1$  (п. 8.5.1):

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P+} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P+} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^{P+} \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_M$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P+} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P+} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^{P+} \right| \right\} = \frac{\max\{|130.12 - 14.901 + 117.37|; |130.12 - 14.901 + 67.133|; |130.12 + 14.901|\}}{|130.12 + 14.901|} = 232.58 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_M = 1.5 \cdot [\sigma]_F = 1.5 \cdot 144 = 216 \text{ МПа}$$

$$K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_M = 1.2 \cdot 1 \cdot 216 = 259.2 \text{ МПа}$$

232.58 МПа ≤ 259.2 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_1$  (-):

$$\sigma_{1mm}^{P-} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F - \frac{4 \cdot M}{D + s_1}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = (0.785 \cdot 146^2 \cdot 1.6 + 3100 - 4 \cdot 4242.6 / (146 + 20)) / (3.1416 \cdot (146 + 20) \cdot (20 - 3)) = (-8.1618) \text{ МПа}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P-} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P-} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^{P-} \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_M$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P-} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P-} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^{P-} \right| \right\} = \frac{\max\{|130.12 - (-8.1618) + 117.37|; |130.12 - (-8.1618) + 67.133|; |130.12 + (-8.1618)|\}}{|130.12 + (-8.1618)|} = 255.65 \text{ МПа}$$

255.65 МПа ≤ 259.2 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_0^M = f \cdot \sigma_1^M = 1 \cdot 112.6 = 112.6 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении  $s_0$  (п. 8.5.2):

$$\sigma_0^M \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R^{20}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_R^{20} = 3 \cdot [\sigma]_F^{20} = 3 \cdot 164.5 = 493.5 \text{ МПа}$$

$$1.3 \cdot [\sigma]_R^{20} = 1.3 \cdot 493.5 = 641.55 \text{ МПа}$$

112.6 МПа ≤ 641.55 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_0^P = f \cdot \sigma_1^P = 1 \cdot 130.12 = 130.12 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_0$  (+):

$$\sigma_{0mm}^{P+} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_0}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = (0.785 \cdot 146^2 \cdot 1.6 + 3100 + 4 \cdot 4242.6 / (146 + 7.5)) / (3.1416 \cdot (146 + 7.5) \cdot (7.5 - 3)) = 64.713 \text{ МПа}$$

Окружное мембранное напряжение от действия давления во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_{0mo}^P = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s_0 - c)} = 1.6 \cdot 146 / (2 \cdot (7.5 - 3)) = 25.956 \text{ МПа}$$

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	90651-20600-AM-02-220 РР					Лист
								181
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата				

Этот документ является собственностью "НЕФТЕХИМПРОЕКТ" и не подлежит копированию и распространению без его согласия	НЕФТЕХИМПРОЕКТ NEFTECHIMPROEKT		МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ		РР
	Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении s <sub>0</sub> :				
	$\max \left\{ \left  \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P+} \right ; \left  0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right ; \left  0.7 \cdot \sigma_0^P \pm \left( \sigma_{0mm}^{P+} - \sigma_{0mo}^P \right) \right  \right\} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R$ $\max \left\{ \left  \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P+} \right ; \left  0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right ; \left  0.7 \cdot \sigma_0^P \pm \left( \sigma_{0mm}^{P+} - \sigma_{0mo}^P \right) \right  \right\} = \max \{ 130.12 \pm 64.713;  0.3 * 130.12 \pm 25.956 ;  0.7 * 130.12 \pm (64.713 - 25.956)  \} = 194.83 \text{ МПа}$				
	Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):				
$[\sigma]_R = 3 \cdot [\sigma]_\Phi = 3 * 144 = 432 \text{ МПа}$ $1.3 \cdot [\sigma]_R = 1.3 * 432 = 561.6 \text{ МПа}$ <p>194.83 МПа ≤ 561.6 МПа, <b>Условие прочности выполнено.</b></p>					
Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении S <sub>0</sub> (–):					
$\sigma_{0mm}^{P-} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F - \frac{4 \cdot M}{D + s_0}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = (0.785 * 146^2 * 1.6 + 3100 - 4 * 4242.6 / (146 + 7.5)) / (3.1416 * (146 + 7.5) * (7.5 - 3)) = (-37.181) \text{ МПа}$					
$\max \left\{ \left  \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P-} \right ; \left  0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right ; \left  0.7 \cdot \sigma_0^P \pm \left( \sigma_{0mm}^{P-} - \sigma_{0mo}^P \right) \right  \right\} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R$ $\max \left\{ \left  \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P-} \right ; \left  0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right ; \left  0.7 \cdot \sigma_0^P \pm \left( \sigma_{0mm}^{P-} - \sigma_{0mo}^P \right) \right  \right\} = \max \{ 130.12 \pm (-37.181);  0.3 * 130.12 \pm 25.956 ;  0.7 * 130.12 \pm ((-37.181) - 25.956)  \} = 167.3 \text{ МПа}$					
167.3 МПа ≤ 561.6 МПа, <b>Условие прочности выполнено.</b>					
<b>Расчет в сечении s<sub>0</sub> в рабочих условиях (п. 8.5.5 ГОСТ 34233.4-2017):</b>					
Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении s <sub>0</sub> :					
$\max \left\{ \left  \sigma_{0mo}^P \right ; \left  \sigma_{0mm}^P \right  \right\} \leq [\sigma]_\Phi$ $\max \left\{ \left  \sigma_{0mo}^P \right ; \left  \sigma_{0mm}^P \right  \right\} = \max \{ 25.956;  64.713  \} = 64.713 \text{ МПа}$					
64.713 МПа ≤ 144 МПа, <b>Условие прочности выполнено.</b>					
Условие статической прочности при затяжке для тарелок:					
$\max \left\{ \left  \sigma_R^M \right ; \left  \sigma_T^M \right  \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_\Phi^{20}$ $\max \left\{ \left  \sigma_R^M \right ; \left  \sigma_T^M \right  \right\} = \max \{ 101.57;  58.097  \} = 101.57 \text{ МПа}$ $K_T \cdot [\sigma]_\Phi^{20} = 1 * 164.5 = 164.5 \text{ МПа}$					
101.57 МПа ≤ 164.5 МПа, <b>Условие прочности выполнено.</b>					
Условие статической прочности в рабочих условиях для тарелок:					
$\max \left\{ \left  \sigma_R^P \right ; \left  \sigma_T^P \right  \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_\Phi$ $\max \left\{ \left  \sigma_R^P \right ; \left  \sigma_T^P \right  \right\} = \max \{ 117.37;  67.133  \} = 117.37 \text{ МПа}$ $K_T \cdot [\sigma]_\Phi = 1 * 144 = 144 \text{ МПа}$					
117.37 МПа ≤ 144 МПа, <b>Условие прочности выполнено.</b>					
<b>Жёсткость фланца:</b>					
Угол поворота фланца в рабочих условиях:					
$\varpi = M^P \cdot y_\Phi \cdot \frac{E^{20}}{E} = 8163.5 * 0.10965 \cdot 10^{-4} * 1.99 \cdot 10^5 / 1.91 \cdot 10^5 = 0.093262^\circ$					
Допускаемый угол поворота фланца:					
$[\varpi] = 0.34377^\circ$					
Коэффициент увеличения допускаемого угла поворота фланцев: K <sub>ϖ</sub> = 1					
Условие выполнения жесткости фланцев :					
$\varpi \leq K_\varpi \cdot [\varpi] = 1 * 0.34377 = 0.34377^\circ$					
<b>Условие жёсткости выполнено.</b>					
Взам. инв. №	Подп. и дата	Инв. № подл.	90651-20600-AM-02-220 РР		Лист
					182
			Изм.	Лист	№ док.

90651-20600-AM-02-220 РР изм.0.docx

Формат А4



### Расчёт второго фланца:

Коэффициент, учитывающий изгиб тарелки фланца между шпильками:

$$C_F = \max \left\{ 1; \sqrt{\frac{\frac{\pi \cdot D_6}{n}}{2 \cdot d + \frac{6 \cdot h}{m + 0.5}}} \right\} = \max \{1; (3.1416 \cdot 250 / 8 / (2 \cdot 24 + 6 \cdot 28 / (3 + 0.5)))^{1/2}\} = 1.0113$$

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при затяжке:

$$M^M = C_F \cdot P_6^M \cdot b = 1.0113 \cdot 2.3846 \cdot 10^5 \cdot 28.5 = 6872.8 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

$$f = \max \left\{ \frac{C_{36}}{1 + A}; 1.0 \right\} = \max \{1.6922 / (1 + 1.6667); 1.0\} = 1$$

$$D^* = D + c + s_1 \text{ при } (D + 2 \cdot c) < 20 \cdot (s_1 - c) \text{ и } f = 1 = 146 + 0 + 20 \text{ при } 146 < 20 \cdot (20 - 0) \text{ и } f = 1 = 166 \text{ мм}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении  $s_1$ :

$$\sigma_1^M = \frac{M^M}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D^*} = 6872.8 / (1.4615 \cdot (20 - 0)^2 \cdot 166) = 70.82 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в условиях затяжки:

$$\sigma_R^M = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + 1.0}{\lambda \cdot h^2 \cdot 1.0 \cdot D} \cdot M^M = (1.33 \cdot 0.71228 \cdot 28 + 33.091) / (1.4615 \cdot 28^2 \cdot 33.091 \cdot 146) \cdot 6872.8 = 74.013 \text{ МПа}$$

$$\beta_Y = \frac{1}{K - 1} \cdot \left( 0.69 + 5.72 \cdot \frac{K^2 \cdot \lg K}{K^2 - 1} \right) = 1 / (2.0548 - 1) \cdot (0.69 + 5.72 \cdot 2.0548^2 \cdot \lg 2.0548 / (2.0548^2 - 1)) = 2.8766$$

$$\beta_Z = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = (2.0548^2 + 1) / (2.0548^2 - 1) = 1.6207$$

Окружное напряжение в тарелке в условиях затяжки:

$$\sigma_T^M = \frac{\beta_Y \cdot M^M}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^M = 2.8766 \cdot 6872.8 / (28^2 \cdot 146) - 1.6207 \cdot 74.013 = 52.769 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении  $s_1$  (п. 8.5.1):

$$\max \{ |\sigma_1^M + \sigma_R^M|; |\sigma_1^M + \sigma_T^M| \} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{м}}^{20}$$

$$\max \{ |70.82 + 74.013|; |70.82 + 52.769| \} = \max \{ 144.83; 123.589 \} = 144.83 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_{\text{м}}^{20} = 1.5 \cdot [\sigma]_{\text{ф}}^{20} = 1.5 \cdot 164.5 = 246.75 \text{ МПа}$$

$$K = \frac{D_H}{D} = 300 / 146 = 2.0548$$

Коэффициент учета размеров тарелки фланца:  $K_S = 1.2$

$$K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{м}}^{20} = 1.2 \cdot 1 \cdot 246.75 = 296.1 \text{ МПа}$$

144.83 МПа ≤ 296.1 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Приведенная нагрузка от внешней силы и момента:

$$Q_{FM}^+ = F + \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{от}}} = 3100 + 4 \cdot |4242.6| / 193 = 91030 \text{ Н}$$

$$Q_{FM}^- = F - \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{от}}} = 3100 - 4 \cdot |4242.6| / 193 = (-84830) \text{ Н}$$

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при рабочих условиях:

$$M^P = C_F \cdot \max \{ P_6^P \cdot b + (Q_H + Q_{FM}) \cdot e; |Q_H + Q_{FM}| \cdot e \} = 1.0113 \cdot \max \{ 1.9533 \cdot 10^5 \cdot 28.5 + (46785 + 91030) \cdot 16.591; |46785 + (-84830)| \cdot 16.591 \} = 7941.8 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_1$ :

$$\sigma_1^P = \frac{M^P}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D^*} = 7941.8 / (1.4615 \cdot (20 - 0)^2 \cdot 166) = 81.835 \text{ МПа}$$

Взам. инв. №		$K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{пл}}^{20} = 1.2 \cdot 1 \cdot 246.75 = 296.1 \text{ МПа}$				
		$144.83 \text{ МПа} \leq 296.1 \text{ МПа}, \text{Условие прочности выполнено.}$				
Подп. и дата		Приведенная нагрузка от внешней силы и момента :				
		$Q_{\text{FM}}^+ = F + \frac{4 \cdot  M }{D_{\text{от}}} = 3100 + 4 \cdot  4242.6  / 193 = 91030 \text{ Н}$				
Инв. № подл.		$Q_{\text{FM}}^- = F - \frac{4 \cdot  M }{D_{\text{от}}} = 3100 - 4 \cdot  4242.6  / 193 = (-84830) \text{ Н}$				
		Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при рабочих условиях:				
		$M^P = C_F \cdot \max \left\{ P_6^P \cdot b + (Q_{\text{д}} + Q_{\text{FM}}) \cdot e;  Q_{\text{д}} + Q_{\text{FM}}  \cdot e \right\} = \frac{1.0113 \cdot \max \{ 1.9533 \cdot 10^5 \cdot 28.5 + (46785 + 91030) \cdot 16.591;  46785 + (-84830)  \cdot 16.591 \}}{7941.8 \text{ Н} \cdot \text{м}}$				
		Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении $s_1$ :				
		$\sigma_1^P = \frac{M^P}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D} = 7941.8 / (1.4615 \cdot (20 - 0)^2 \cdot 166) = 81.835 \text{ МПа}$				
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	90651-20600-AM-02-220 РР	Лист
						183

Радиальное напряжение в тарелке в рабочих условиях :

$$\sigma_R^P = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + 1_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot 1_0 \cdot D} \cdot M^P = (1.33 \cdot 0.71228 \cdot 28 + 33.091) / (1.4615 \cdot 28^2 \cdot 33.091 \cdot 146) \cdot 7941.8 = 85.526 \text{ МПа}$$

Окружное напряжение в тарелке в рабочих условиях :

$$\sigma_T^P = \frac{\beta_V \cdot M^P}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^P = 2.8766 \cdot 7941.8 / (28^2 \cdot 146) - 1.6207 \cdot 85.526 = 60.977 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_1$  (+):

$$\sigma_{1mm}^{P+} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_1}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = (0.785 \cdot 146^2 \cdot 1.6 + 3100 + 4 \cdot 4242.6 / (146 + 20)) / (3.1416 \cdot (146 + 20) \cdot (20 - 0)) = 12.666 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_1$  (п. 8.5.1):

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P+} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P+} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^{P+} \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_M$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P+} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P+} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^{P+} \right| \right\} = \max \{ |81.835 - 12.666 + 85.526|; |81.835 - 12.666 + 60.977|; |81.835 + 12.666| \} = 154.7 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_M = 1.5 \cdot [\sigma]_\Phi = 1.5 \cdot 144 = 216 \text{ МПа}$$

$$K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_M = 1.2 \cdot 1 \cdot 216 = 259.2 \text{ МПа}$$

154.7 МПа ≤ 259.2 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_1$  (-):

$$\sigma_{1mm}^{P-} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F - \frac{4 \cdot M}{D + s_1}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = (0.785 \cdot 146^2 \cdot 1.6 + 3100 - 4 \cdot 4242.6 / (146 + 20)) / (3.1416 \cdot (146 + 20) \cdot (20 - 0)) = (-6.9376) \text{ МПа}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P-} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P-} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^{P-} \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_M$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P-} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P-} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^{P-} \right| \right\} = \max \{ |81.835 - (-6.9376) + 85.526|; |81.835 - (-6.9376) + 60.977|; |81.835 + (-6.9376)| \} = 174.3 \text{ МПа}$$

174.3 МПа ≤ 259.2 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_0^M = f \cdot \sigma_1^M = 1 \cdot 70.82 = 70.82 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении  $s_0$  (п. 8.5.2):

$$\sigma_0^M \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R^{20}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_R^{20} = 3 \cdot [\sigma]_\Phi^{20} = 3 \cdot 164.5 = 493.5 \text{ МПа}$$

$$1.3 \cdot [\sigma]_R^{20} = 1.3 \cdot 493.5 = 641.55 \text{ МПа}$$

70.82 МПа ≤ 641.55 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_0^P = f \cdot \sigma_1^P = 1 \cdot 81.835 = 81.835 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_0$  (+):

$$\sigma_{0mm}^{P+} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_0}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = (0.785 \cdot 146^2 \cdot 1.6 + 3100 + 4 \cdot 4242.6 / (146 + 7.5)) / (3.1416 \cdot (146 + 7.5) \cdot (7.5 - 0)) = 38.828 \text{ МПа}$$

Окружное мембранное напряжение от действия давления во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_{0mo}^P = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s_0 - c)} = 1.6 \cdot 146 / (2 \cdot (7.5 - 0)) = 15.573 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P+} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm \left( \sigma_{0mm}^{P+} - \sigma_{0mo}^P \right) \right| \right\} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R$$

Взам. инв. №					
Подп. и дата					
Инв. № подл.					
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	90651-20600-AM-02-220 РР
					Лист
					184

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^P \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm \left( \sigma_{0mm}^P - \sigma_{0mo}^P \right) \right| \right\} = \max \{ 81.835 \pm 38.828; |0.3 * 81.835 \pm 15.573|; |0.7 * 81.835 \pm (38.828 - 15.573)| \} = 120.66 \text{ МПа}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_R = 3 \cdot [\sigma]_\Phi = 3 * 144 = 432 \text{ МПа}$$

$$1.3 \cdot [\sigma]_R = 1.3 * 432 = 561.6 \text{ МПа}$$

120.66 МПа ≤ 561.6 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_0$  (–):

$$\sigma_{0mm}^{P-} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F - \frac{4 \cdot M}{D + s_0}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = (0.785 * 146^2 * 1.6 + 3100 - 4 * 4242.6 / (146 + 7.5)) / (3.1416 * (146 + 7.5) * (7.5 - 0)) = (-22.309) \text{ МПа}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P-} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^{P-} \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm \left( \sigma_{0mm}^{P-} - \sigma_{0mo}^{P-} \right) \right| \right\} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P-} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^{P-} \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm \left( \sigma_{0mm}^{P-} - \sigma_{0mo}^{P-} \right) \right| \right\} = \max \{ 81.835 \pm (-22.309); |0.3 * 81.835 \pm 15.573|; |0.7 * 81.835 \pm ((-22.309) - 15.573)| \} = 104.14 \text{ МПа}$$

104.14 МПа ≤ 561.6 МПа, **Условие прочности выполнено.**

**Расчет в сечении  $s_0$  в рабочих условиях (п. 8.5.5 ГОСТ 34233.4-2017):**

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $S_0$ :

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0mo}^P \right|; \left| \sigma_{0mm}^P \right| \right\} \leq [\sigma]_\Phi$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0mo}^P \right|; \left| \sigma_{0mm}^P \right| \right\} = \max \{ 15.573; |38.828| \} = 38.828 \text{ МПа}$$

38.828 МПа ≤ 144 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Условие статической прочности при затяжке для тарелок:

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_T^M \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_\Phi^{20}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_T^M \right| \right\} = \max \{ 74.013; |52.769| \} = 74.013 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_\Phi^{20} = 1 * 164.5 = 164.5 \text{ МПа}$$

74.013 МПа ≤ 164.5 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Условие статической прочности в рабочих условиях для тарелок:

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_T^P \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_\Phi$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_T^P \right| \right\} = \max \{ 85.526; |60.977| \} = 85.526 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_\Phi = 1 * 144 = 144 \text{ МПа}$$

85.526 МПа ≤ 144 МПа, **Условие прочности выполнено.**

### Жёсткость фланца:

Угол поворота фланца в рабочих условиях:

$$\Theta = M^P \cdot y_\Phi \cdot \frac{E^{20}}{E} = 7941.8 * 0.98115 * 10^{-5} * 1.99 * 10^5 / 1.91 * 10^5 = 0.081184^\circ$$

Допускаемый угол поворота фланца:

$$[\Theta] = 0.34377^\circ$$

Условие выполнения жесткости фланцев :

$$\Theta \leq K_\Theta \cdot [\Theta] = 1 * 0.34377 = 0.34377^\circ$$

**Условие жёсткости выполнено.**

### Расчёт с учетом стесненности температурных деформаций

#### Расчёт болтов(шпилек):

Коэффициент учета нагрузки от температурных деформаций:  $K_{yt} = 1.3$

Допускаемые напряжения для болтов (шпилек) при затяжке :

$$[\sigma]_6^M = \xi \cdot K_{yp} \cdot K_{yz} \cdot K_{yt} \cdot [\sigma]_6^{20} = 1.2 * 1 * 1 * 1.3 * 230 = 358.8 \text{ МПа}$$

Взам. инв. №	Подп. и дата	Изм. № подл.				
$\varpi = M^P \cdot y_{\Phi} \cdot \frac{E^{20}}{E} = 7941.8 \cdot 0.98115 \cdot 10^{-5} \cdot 1.99 \cdot 10^5 / 1.91 \cdot 10^5 = 0.081184^{\circ}$ <p>Допускаемый угол поворота фланца: <math>[\varpi] = 0.34377^{\circ}</math></p> <p>Условие выполнения жесткости фланцев :</p> $\varpi \leq K_{\varpi} \cdot [\varpi] = 1 \cdot 0.34377 = 0.34377^{\circ}$ <p><b>Условие жёсткости выполнено.</b></p> <p><b>Расчёт с учетом стесненности температурных деформаций</b></p> <p><b>Расчёт болтов(шпилек):</b></p> <p>Коэффициент учета нагрузки от температурных деформаций: <math>K_{\text{ут}} = 1.3</math></p> <p>Допускаемые напряжения для болтов (шпилек) при затяжке :</p> $[\sigma]_6^{\text{тк}} = \xi \cdot K_{\text{уп}} \cdot K_{\text{уз}} \cdot K_{\text{ут}} \cdot [\sigma]_6^{20} = 1.2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1.3 \cdot 230 = 358.8 \text{ МПа}$						
			90651-20600-AM-02-220 РР			
			Лист			
			185			
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата		

**Расчетная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для герметизации в рабочих условиях (нагрузки + давление, с учетом температурной нагрузки)**

$$\gamma = \frac{1}{y_{\pi} + y_{\epsilon} \cdot \frac{E_{\epsilon}^{20}}{E_{\epsilon}} + \left( y'_{\Phi} \cdot \frac{E_{\Phi}^{20}}{E_{\Phi}} + y''_{\Phi} \cdot \frac{E_{\Phi}^{20}}{E_{\Phi}} \right) \cdot b^2}$$

$$= 1 / (0 + 0.1643 \cdot 10^{-6} \cdot 2.18 \cdot 10^5 / 2.15 \cdot 10^5 + (0.10965 \cdot 10^{-4} \cdot 1.99 \cdot 10^5 / 1.91 \cdot 10^5 + 0.98115 \cdot 10^{-5} \cdot 1.99 \cdot 10^5 / 1.91 \cdot 10^5) \cdot 28.5^2)$$

$$= 2.1121 \cdot 10^6 \text{ Н/мм}$$

Нагрузка от температурных деформаций:

$$Q_t = \gamma \cdot \left( \begin{aligned} &(\alpha'_{\Phi} \cdot h' + \alpha'_{\text{ш}} \cdot h'_{\text{ш}}) \cdot (t_{\Phi 1} - 20^{\circ} \text{C}) + \\ &+ (\alpha''_{\Phi} \cdot h'' + \alpha''_{\text{ш}} \cdot h''_{\text{ш}}) \cdot (t_{\Phi 2} - 20^{\circ} \text{C}) + \\ &+ \alpha_p \cdot s_{\text{пр}} \cdot (t_p - 20^{\circ} \text{C}) - \\ &- \alpha_{\epsilon} \cdot (h' + h'' + s_{\text{пр}} + h'_{\text{ш}} + h''_{\text{ш}}) \cdot (t_{\epsilon} - 20^{\circ} \text{C}) \end{aligned} \right)$$

$$= 2.1121 \cdot 10^6 \cdot ((0.116 \cdot 10^{-4} \cdot 28 + 0 \cdot 0) \cdot (100 - 20^{\circ} \text{C}) + (0.116 \cdot 10^{-4} \cdot 25 + 0 \cdot 0) \cdot (100 - 20^{\circ} \text{C}) + 0.116 \cdot 10^{-4} \cdot 20 \cdot (100 - 20^{\circ} \text{C}) - 0.134 \cdot 10^{-4} \cdot (28 + 25 + 20 + 0 + 0) \cdot (100 - 20^{\circ} \text{C}))$$

$$= (-22202) \text{ Н}$$

$$P_{\epsilon 1} = \max \left\{ \begin{aligned} &\alpha \cdot (Q_d + F) + R_{\pi} + \frac{4 \cdot \alpha_M \cdot |M|}{D_{\text{ст}}} \\ &\alpha \cdot (Q_d + F) + R_{\pi} + \frac{4 \cdot \alpha_M \cdot |M|}{D_{\text{ст}}} - Q_t \end{aligned} \right\} = \max \left\{ \begin{aligned} &1.3737 \cdot (46785 + 3100) + 29104 + 4 \cdot 1.2786 \cdot |4242.6| / 193 = \\ &2.1005 \cdot 10^5 \cdot 1.3737 \cdot (46785 + 3100) + 29104 + 4 \cdot 1.2786 \cdot |4242.6| / 193 - (-22202) = 2.3226 \cdot 10^5 \end{aligned} \right\} = 2.3226 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Болтовая нагрузка в условиях затяжки:

$$P_{\epsilon}^{\text{м}} = \max\{P_{\epsilon 1}, P_{\epsilon 2}\} = \max\{2.3226 \cdot 10^5; 2.3846 \cdot 10^5\} = 2.3846 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Условие прочности при затяжке:

$$\sigma_{\epsilon 1} = \frac{P_{\epsilon}^{\text{м}}}{A_{\epsilon}} \leq [\sigma]_{\epsilon}^{\text{м}}$$

$$\sigma_{\epsilon 1} = \frac{P_{\epsilon}^{\text{м}}}{A_{\epsilon}} = 2.3846 \cdot 10^5 / 2592 = 92 \text{ МПа}$$

Крутящий момент при затяжке болтов (шпилек) без смазки при  $\sigma_{\epsilon 1} < 120 \text{ МПа}$ :

$$M_{\text{кр}} = 0.3 \cdot \frac{P_{\epsilon}^{\text{м}} \cdot d}{n} = 0.3 \cdot 2.3846 \cdot 10^5 \cdot 24 / 8 = 214.62 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

При наличии смазки величина  $M_{\text{кр}}$  снижается на 25% и составляет  $0.75 \cdot M_{\text{кр}} = 160.96 \text{ Н} \cdot \text{м}$

$92 \text{ МПа} \leq 358.8 \text{ МПа}$ , **Условие прочности выполнено.**

Допускаемые напряжения для болтов (шпилек) при рабочих условиях:

$$[\sigma]_{\epsilon}^{\text{р}} = K_{\text{уп}} \cdot K_{\text{уз}} \cdot K_{\text{ут}} \cdot [\sigma]_{\epsilon} = 1 \cdot 1 \cdot 1.3 \cdot 230 = 299 \text{ МПа}$$

Болтовая нагрузка в рабочих условиях:

$$P_{\epsilon}^{\text{р}} = P_{\epsilon}^{\text{м}} + (1 - \alpha) \cdot (Q_d + F) + Q_t + \frac{4 \cdot (1 - \alpha_M) \cdot |M|}{D_{\text{ст}}} = \frac{2.3846 \cdot 10^5}{101 / 193} + (1 - 1.3737) \cdot (46785 + 0) + (-22202) + 4 \cdot (1 - 1.2786) \cdot |4242.6| / 193 = 1.9878 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Условие прочности в рабочих условиях:

$$\sigma_{\epsilon 2} = \frac{P_{\epsilon}^{\text{р}}}{A_{\epsilon}} \leq [\sigma]_{\epsilon}^{\text{р}}$$

$$\sigma_{\epsilon 2} = \frac{P_{\epsilon}^{\text{р}}}{A_{\epsilon}} = 1.9878 \cdot 10^5 / 2592 = 76.689 \text{ МПа}$$

$76.689 \text{ МПа} \leq 299 \text{ МПа}$ , **Условие прочности выполнено.**

**Расчёт первого фланца:**

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при затяжке:

$$M^{\text{м}} = C_F \cdot P_{\epsilon}^{\text{м}} \cdot b = 1.0395 \cdot 2.3846 \cdot 10^5 \cdot 28.5 = 7064.6 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении  $s_1$ :

Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	90651-20600-AM-02-220 РР	Лист 186
Взам. инв. №						
Подп. и дата						
Инв. № подл.						

$$\sigma_1^M = \frac{M^M}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D} = 7064.6 / (1.3078 \cdot (20 - 3)^2 \cdot 166) = 112.6 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в условиях затяжки :

$$\sigma_R^M = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + 1_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot 1_0 \cdot D} \cdot M^M = (1.33 \cdot 0.71228 \cdot 25 + 33.091) / (1.3078 \cdot 25^2 \cdot 33.091 \cdot 146) \cdot 7064.6 = 101.57 \text{ МПа}$$

Окружное напряжение в тарелке в условиях затяжки :

$$\sigma_T^M = \frac{\beta_Y \cdot M^M}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^M = 2.8766 \cdot 7064.6 / (25^2 \cdot 146) - 1.6207 \cdot 101.57 = 58.097 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении  $s_1$  (п. 8.5.1):

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^M + \sigma_R^M \right|, \left| \sigma_1^M + \sigma_T^M \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{лм}}^{20}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^M + \sigma_R^M \right|, \left| \sigma_1^M + \sigma_T^M \right| \right\} = \max \{112.6 + 101.57; |112.6 + 58.097|\} = 214.17 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_{\text{лм}}^{20} = 1.5 \cdot [\sigma]_{\text{ф}}^{20} = 1.5 \cdot 164.5 = 246.75 \text{ МПа}$$

Коэффициент учета размеров тарелки фланца:  $K_S = 1.2$

Коэффициент увеличения допускаемых напряжений при расчёте с учетом стесненности температурных деформаций:  $K_T = 1.3$

$$K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{лм}}^{20} = 1.2 \cdot 1.3 \cdot 246.75 = 384.93 \text{ МПа}$$

214.17 МПа ≤ 384.93 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Болтовая нагрузка в рабочих условиях :

$$P_6^P = P_6^M + (1 - \alpha) \cdot (Q_{\text{д}} + F) + Q_t + \frac{4 \cdot (1 - \alpha_{\text{л}}) \cdot |M|}{D_{\text{ст}}} = \frac{2.3846 \cdot 10^5 + (1 - 1.3737) \cdot (46785 + 3100) + (-22202) + 4 \cdot (1 - 1.2786) \cdot |4242.6| / 193}{1} = 1.7313 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Приведенная нагрузка от внешней силы и момента :

$$Q_{\text{FM}}^+ = F + \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{ст}}} = 3100 + 4 \cdot |4242.6| / 193 = 91030 \text{ Н}$$

$$Q_{\text{FM}}^- = F - \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{ст}}} = 3100 - 4 \cdot |4242.6| / 193 = (-84830) \text{ Н}$$

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при рабочих условиях:

$$M^P = C_F \cdot \max \left\{ P_6^P \cdot b + (Q_{\text{д}} + Q_{\text{FM}}) \cdot e; |Q_{\text{д}} + Q_{\text{FM}}| \cdot e \right\} = \frac{1.0395 \cdot \max \{1.7313 \cdot 10^5 \cdot 28.5 + (46785 + 91030) \cdot 16.591; |46785 + (-84830)| \cdot 16.591\}}{1} = 7505.7 \text{ Н·м}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_1$ :

$$\sigma_1^P = \frac{M^P}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D} = 7505.7 / (1.3078 \cdot (20 - 3)^2 \cdot 166) = 119.63 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в рабочих условиях :

$$\sigma_R^P = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + 1_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot 1_0 \cdot D} \cdot M^P = (1.33 \cdot 0.71228 \cdot 25 + 33.091) / (1.3078 \cdot 25^2 \cdot 33.091 \cdot 146) \cdot 7505.7 = 107.91 \text{ МПа}$$

Окружное напряжение в тарелке в рабочих условиях :

$$\sigma_T^P = \frac{\beta_Y \cdot M^P}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^P = 2.8766 \cdot 7505.7 / (25^2 \cdot 146) - 1.6207 \cdot 107.91 = 61.724 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_1$  (+):

$$\sigma_{\text{лм}}^{P+} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_1}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = (0.785 \cdot 146^2 \cdot 1.6 + 3100 + 4 \cdot 4242.6 / (146 + 20)) / (3.1416 \cdot (146 + 20) \cdot (20 - 3)) = 14.901 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_1$  (п. 8.5.1):

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лм}}^{P+} + \sigma_R^P \right|, \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лм}}^{P+} + \sigma_T^P \right|, \left| \sigma_1^P + \sigma_{\text{лм}}^{P+} \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{лм}}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лм}}^{P+} + \sigma_R^P \right|, \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лм}}^{P+} + \sigma_T^P \right|, \left| \sigma_1^P + \sigma_{\text{лм}}^{P+} \right| \right\} = \max \{119.63 - 14.901 + 107.91; |119.63 - 14.901 + 61.724|; 119.63 + 14.901\} = 212.64 \text{ МПа}$$

Взам. инв. №					
Подп. и дата					
Инв. № подл.					
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	

90651-20600-AM-02-220 РР

Лист

187

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_M = 1.5 \cdot [\sigma]_{\Phi} = 1.5 \cdot 144 = 216 \text{ МПа}$$

$$K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_M = 1.2 \cdot 1.3 \cdot 216 = 336.96 \text{ МПа}$$

212.64 МПа ≤ 336.96 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении S<sub>1</sub> (–):

$$\sigma_{1mm}^{P-} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F - \frac{4 \cdot M}{D + s_1}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = (0.785 \cdot 146^2 \cdot 1.6 + 3100 - 4 \cdot 4242.6 / (146 + 20)) / (3.1416 \cdot (146 + 20) \cdot (20 - 3)) = (-8.1618) \text{ МПа}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P-} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P-} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^{P-} \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_M$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P-} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P-} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^{P-} \right| \right\} = \frac{\max\{|119.63 - (-8.1618) + 107.91|; |119.63 - (-8.1618) + 61.724|; |119.63 + (-8.1618)|\}}{119.63 + (-8.1618)} = 235.71 \text{ МПа}$$

235.71 МПа ≤ 336.96 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении S<sub>0</sub>:

$$\sigma_0^M = f \cdot \sigma_1^M = 1 \cdot 112.6 = 112.6 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении S<sub>0</sub> (п. 8.5.2):

$$\sigma_0^M \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R^{20}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_R^{20} = 3 \cdot [\sigma]_{\Phi}^{20} = 3 \cdot 164.5 = 493.5 \text{ МПа}$$

$$1.3 \cdot [\sigma]_R^{20} = 1.3 \cdot 493.5 = 641.55 \text{ МПа}$$

112.6 МПа ≤ 641.55 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении S<sub>0</sub>:

$$\sigma_0^P = f \cdot \sigma_1^P = 1 \cdot 119.63 = 119.63 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении S<sub>0</sub> (+):

$$\sigma_{0mm}^{P+} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_0}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = (0.785 \cdot 146^2 \cdot 1.6 + 3100 + 4 \cdot 4242.6 / (146 + 7.5)) / (3.1416 \cdot (146 + 7.5) \cdot (7.5 - 3)) = 64.713 \text{ МПа}$$

Окружное мембранное напряжение от действия давления во втулке в рабочих условиях в сечении S<sub>0</sub>:

$$\sigma_{0mo}^P = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s_0 - c)} = 1.6 \cdot 146 / (2 \cdot (7.5 - 3)) = 25.956 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении S<sub>0</sub>:

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P+} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P+} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P+} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P+} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} = \frac{\max\{|119.63 \pm 64.713|; |0.3 \cdot 119.63 \pm 25.956|; |0.7 \cdot 119.63 \pm (64.713 - 25.956)|\}}{119.63 \pm (64.713 - 25.956)} = 184.35 \text{ МПа}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_R = 3 \cdot [\sigma]_{\Phi} = 3 \cdot 144 = 432 \text{ МПа}$$

$$1.3 \cdot [\sigma]_R = 1.3 \cdot 432 = 561.6 \text{ МПа}$$

184.35 МПа ≤ 561.6 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении S<sub>0</sub> (–):

$$\sigma_{0mm}^{P-} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F - \frac{4 \cdot M}{D + s_0}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = (0.785 \cdot 146^2 \cdot 1.6 + 3100 - 4 \cdot 4242.6 / (146 + 7.5)) / (3.1416 \cdot (146 + 7.5) \cdot (7.5 - 3)) = (-37.181) \text{ МПа}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P-} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P-} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P-} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P-} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} = \frac{\max\{|119.63 \pm (-37.181)|; |0.3 \cdot 119.63 \pm 25.956|; |0.7 \cdot 119.63 \pm ((-37.181) - 25.956)|\}}{119.63 \pm ((-37.181) - 25.956)} = 156.81 \text{ МПа}$$

156.81 МПа ≤ 561.6 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №					90651-20600-AM-02-220 PP		Лист
									188
			Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата		



**Расчет в сечении  $s_0$  в рабочих условиях (п. 8.5.5 ГОСТ 34233.4-2017):**

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0mo}^P \right|; \left| \sigma_{0mm}^P \right| \right\} \leq [\sigma]_{\Phi}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0mo}^P \right|; \left| \sigma_{0mm}^P \right| \right\} = \max \{ 25.956; 64.713 \} = 64.713 \text{ МПа}$$

64.713 МПа ≤ 144 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Условие статической прочности при затяжке для тарелок:

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_T^M \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_{\Phi}^{20}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_T^M \right| \right\} = \max \{ 101.57; 58.097 \} = 101.57 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_{\Phi}^{20} = 1.3 \cdot 164.5 = 213.85 \text{ МПа}$$

101.57 МПа ≤ 213.85 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Условие статической прочности в рабочих условиях для тарелок:

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_T^P \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_{\Phi}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_T^P \right| \right\} = \max \{ 107.91; 61.724 \} = 107.91 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_{\Phi} = 1.3 \cdot 144 = 187.2 \text{ МПа}$$

107.91 МПа ≤ 187.2 МПа, **Условие прочности выполнено.**

**Жёсткость фланца:**

Угол поворота фланца в рабочих условиях:

$$\varpi = M^P \cdot y_{\Phi} \cdot \frac{E^{20}}{E} = 7505.7 \cdot 0.10965 \cdot 10^{-4} \cdot 1.99 \cdot 10^5 / 1.91 \cdot 10^5 = 0.085748^\circ$$

Условие выполнения жесткости фланцев :

$$\varpi \leq K_{\varpi} \cdot [\varpi] = 1 \cdot 0.34377 = 0.34377^\circ$$

**Условие жёсткости выполнено.**

**Расчёт второго фланца:**

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при затяжке :

$$M^M = C_F \cdot P_6^M \cdot b = 1.0113 \cdot 2.3846 \cdot 10^5 \cdot 28.5 = 6872.8 \text{ Н·м}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении  $s_1$ :

$$\sigma_1^M = \frac{M^M}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D} = 6872.8 / (1.4615 \cdot (20 - 0)^2 \cdot 166) = 70.82 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в условиях затяжки :

$$\sigma_R^M = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + 1_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot 1_0 \cdot D} \cdot M^M = (1.33 \cdot 0.71228 \cdot 28 + 33.091) / (1.4615 \cdot 28^2 \cdot 33.091 \cdot 146) \cdot 6872.8 = 74.013 \text{ МПа}$$

Окружное напряжение в тарелке в условиях затяжки :

$$\sigma_T^M = \frac{\beta_V \cdot M^M}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^M = 2.8766 \cdot 6872.8 / (28^2 \cdot 146) - 1.6207 \cdot 74.013 = 52.769 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении  $s_1$  (п. 8.5.1):

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^M + \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_1^M + \sigma_T^M \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\Phi}^{20}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^M + \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_1^M + \sigma_T^M \right| \right\} = \max \{ 70.82 + 74.013; 70.82 + 52.769 \} = 144.83 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_{\Phi}^{20} = 1.5 \cdot [\sigma]_{\Phi}^{20} = 1.5 \cdot 164.5 = 246.75 \text{ МПа}$$

Коэффициент учета размеров тарелки фланца:  $K_S = 1.2$

$$K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\Phi}^{20} = 1.2 \cdot 1.3 \cdot 246.75 = 384.93 \text{ МПа}$$

144.83 МПа ≤ 384.93 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Взам. инв. №	Подп. и дата	Инв. № подл.	Окружное напряжение в тарелке в условиях затяжки :					
			$\sigma_T^M = \frac{\beta_Y \cdot M^M}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^M = 2.8766 \cdot 6872.8 / (28^2 \cdot 146) - 1.6207 \cdot 74.013 = 52.769 \text{ МПа}$					
Условие статической прочности при затяжке в сечении $s_1$ (п. 8.5.1):								
$\max \{  \sigma_1^M + \sigma_R^M ;  \sigma_1^M + \sigma_T^M  \} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{н}}^{20}$								
$\max \{  \sigma_1^M + \sigma_R^M ;  \sigma_1^M + \sigma_T^M  \} = \max \{  70.82 + 74.013 ;  70.82 + 52.769  \} = 144.83 \text{ МПа}$								
Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):								
$[\sigma]_{\text{н}}^{20} = 1.5 \cdot [\sigma]_{\text{ф}}^{20} = 1.5 \cdot 164.5 = 246.75 \text{ МПа}$								
Коэффициент учета размеров тарелки фланца: $K_S = 1.2$								
$K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{н}}^{20} = 1.2 \cdot 1.3 \cdot 246.75 = 384.93 \text{ МПа}$								
144.83 МПа ≤ 384.93 МПа, <b>Условие прочности выполнено.</b>								
			90651-20600-AM-02-220 РР					Лист
								189
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата				

Приведенная нагрузка от внешней силы и момента :

$$Q_{FM}^+ = F + \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{ст}}} = 3100 + 4 \cdot |4242.6| / 193 = 91030 \text{ Н}$$

$$Q_{FM}^- = F - \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{ст}}} = 3100 - 4 \cdot |4242.6| / 193 = (-84830) \text{ Н}$$

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при рабочих условиях:

$$M^P = C_F \cdot \max \{ P_6^P \cdot b + (Q_{\text{д}} + Q_{FM}^-) \cdot e; |Q_{\text{д}} + Q_{FM}^+| \cdot e \} = \frac{1.0113 \cdot \max \{ 1.7313 \cdot 10^5 \cdot 28.5 + (46785 + 91030) \cdot 16.591; |46785 + (-84830)| \cdot 16.591 \}}{7301.9} = 7301.9 \text{ Н·м}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_1$ :

$$\sigma_1^P = \frac{M^P}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D^*} = 7301.9 / (1.4615 \cdot (20 - 0)^2 \cdot 166) = 75.242 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в рабочих условиях :

$$\sigma_R^P = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + l_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot l_0 \cdot D} \cdot M^P = (1.33 \cdot 0.71228 \cdot 28 + 33.091) / (1.4615 \cdot 28^2 \cdot 33.091 \cdot 146) \cdot 7301.9 = 78.635 \text{ МПа}$$

Окружное напряжение в тарелке в рабочих условиях :

$$\sigma_T^P = \frac{\beta_Y \cdot M^P}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^P = 2.8766 \cdot 7301.9 / (28^2 \cdot 146) - 1.6207 \cdot 78.635 = 56.064 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_1$  (+):

$$\sigma_{\text{лмм}}^{P+} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_1}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = (0.785 \cdot 146^2 \cdot 1.6 + 3100 + 4 \cdot 4242.6 / (146 + 20)) / (3.1416 \cdot (146 + 20) \cdot (20 - 0)) = 12.666 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_1$  (п. 8.5.1):

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^{P+} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^{P+} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{\text{лмм}}^{P+} \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{м}}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^{P+} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^{P+} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{\text{лмм}}^{P+} \right| \right\} = \frac{\max \{ |75.242 - 12.666 + 78.635|; |75.242 - 12.666 + 56.064|; |75.242 + 12.666| \}}{141.21} = 141.21 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_{\text{м}} = 1.5 \cdot [\sigma]_{\text{ф}} = 1.5 \cdot 144 = 216 \text{ МПа}$$

$$K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{м}} = 1.2 \cdot 1.3 \cdot 216 = 336.96 \text{ МПа}$$

141.21 МПа ≤ 336.96 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_1$  (-):

$$\sigma_{\text{лмм}}^{P-} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F - \frac{4 \cdot M}{D + s_1}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = (0.785 \cdot 146^2 \cdot 1.6 + 3100 - 4 \cdot 4242.6 / (146 + 20)) / (3.1416 \cdot (146 + 20) \cdot (20 - 0)) = (-6.9376) \text{ МПа}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^{P-} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^{P-} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{\text{лмм}}^{P-} \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{м}}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^{P-} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^{P-} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{\text{лмм}}^{P-} \right| \right\} = \frac{\max \{ |75.242 - (-6.9376) + 78.635|; |75.242 - (-6.9376) + 56.064|; |75.242 + (-6.9376)| \}}{160.81} = 160.81 \text{ МПа}$$

160.81 МПа ≤ 336.96 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_0^M = f \cdot \sigma_1^M = 1 \cdot 70.82 = 70.82 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении  $s_0$  (п. 8.5.2):

$$\sigma_0^M \leq 1.3 \cdot [\sigma]_{\text{Р}}^{20}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_{\text{Р}}^{20} = 3 \cdot [\sigma]_{\text{ф}}^{20} = 3 \cdot 164.5 = 493.5 \text{ МПа}$$

$$1.3 \cdot [\sigma]_{\text{Р}}^{20} = 1.3 \cdot 493.5 = 641.55 \text{ МПа}$$

70.82 МПа ≤ 641.55 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

Взам. инв. №					
Подп. и дата					
Инв. № подл.					
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	90651-20600-AM-02-220 РР
					Лист
					190



$$\sigma_0^P = f \cdot \sigma_1^P = 1 \cdot 75.242 = 75.242 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_0$  (+):

$$\sigma_{0mm}^{P+} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_0}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = (0.785 \cdot 146^2 \cdot 1.6 + 3100 + 4 \cdot 4242.6 / (146 + 7.5)) / (3.1416 \cdot (146 + 7.5) \cdot (7.5 - 0)) = 38.828 \text{ МПа}$$

Окружное мембранное напряжение от действия давления во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_0$ :

$$\sigma_{0mo}^P = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s_0 - c)} = 1.6 \cdot 146 / (2 \cdot (7.5 - 0)) = 15.573 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $S_0$ :

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P+} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P+} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P+} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P+} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} = \max \{ 75.242 \pm 38.828; |0.3 \cdot 75.242 \pm 15.573|; |0.7 \cdot 75.242 \pm (38.828 - 15.573)| \} = 114.07 \text{ МПа}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_R = 3 \cdot [\sigma]_\Phi = 3 \cdot 144 = 432 \text{ МПа}$$

$$1.3 \cdot [\sigma]_R = 1.3 \cdot 432 = 561.6 \text{ МПа}$$

114.07 МПа ≤ 561.6 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_0$  (-):

$$\sigma_{0mm}^{P-} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F - \frac{4 \cdot M}{D + s_0}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = (0.785 \cdot 146^2 \cdot 1.6 + 3100 - 4 \cdot 4242.6 / (146 + 7.5)) / (3.1416 \cdot (146 + 7.5) \cdot (7.5 - 0)) = (-22.309) \text{ МПа}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P-} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P-} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P-} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P-} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} = \max \{ 75.242 \pm (-22.309); |0.3 \cdot 75.242 \pm 15.573|; |0.7 \cdot 75.242 \pm ((-22.309) - 15.573)| \} = 97.55 \text{ МПа}$$

97.55 МПа ≤ 561.6 МПа, **Условие прочности выполнено.**

**Расчет в сечении  $s_0$  в рабочих условиях (п. 8.5.5 ГОСТ 34233.4-2017):**

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $S_0$ :

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0mo}^P \right|; \left| \sigma_{0mm}^P \right| \right\} \leq [\sigma]_\Phi$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0mo}^P \right|; \left| \sigma_{0mm}^P \right| \right\} = \max \{ 15.573; 38.828 \} = 38.828 \text{ МПа}$$

38.828 МПа ≤ 144 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Условие статической прочности при затяжке для тарелок:

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_T^M \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_\Phi^{20}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_T^M \right| \right\} = \max \{ 74.013; 52.769 \} = 74.013 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_\Phi^{20} = 1.3 \cdot 164.5 = 213.85 \text{ МПа}$$

74.013 МПа ≤ 213.85 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Условие статической прочности в рабочих условиях для тарелок:

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_T^P \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_\Phi$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_T^P \right| \right\} = \max \{ 78.635; 56.064 \} = 78.635 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_\Phi = 1.3 \cdot 144 = 187.2 \text{ МПа}$$

78.635 МПа ≤ 187.2 МПа, **Условие прочности выполнено.**

**Жёсткость фланца:**

Угол поворота фланца в рабочих условиях:

$$\varpi = M^P \cdot y_\Phi \cdot \frac{E^{20}}{E} = 7301.9 \cdot 0.98115 \cdot 10^{-5} \cdot 1.99 \cdot 10^5 / 1.91 \cdot 10^5 = 0.074643^\circ$$

Взам. инв. №	Подп. и дата	$K_T \cdot [\sigma]_{\Phi}^{20} = 1.3 \cdot 164.5 = 213.85 \text{ МПа}$ 74.013 МПа ≤ 213.85 МПа, <b>Условие прочности выполнено.</b> Условие статической прочности в рабочих условиях для тарелок: $\max \left\{ \left  \sigma_R^P \right ; \left  \sigma_T^P \right  \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_{\Phi}$ $\max \left\{ \left  \sigma_R^P \right ; \left  \sigma_T^P \right  \right\} = \max \{ 78.635; 56.064 \} = 78.635 \text{ МПа}$ $K_T \cdot [\sigma]_{\Phi} = 1.3 \cdot 144 = 187.2 \text{ МПа}$ 78.635 МПа ≤ 187.2 МПа, <b>Условие прочности выполнено.</b> <b>Жёсткость фланца:</b> Угол поворота фланца в рабочих условиях: $\Theta = M^P \cdot y_{\Phi} \cdot \frac{E^{20}}{E} = 7301.9 \cdot 0.98115 \cdot 10^{-5} \cdot 1.99 \cdot 10^5 / 1.91 \cdot 10^6 = 0.074643^\circ$				
		90651-20600-AM-02-220 РР				
Инв. № подл.						Лист
	Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	191

Условие выполнения жесткости фланцев :

$$\Theta \leq K_m \cdot [\Theta] = 1 * 0.34377 = 0.34377^\circ$$

**Условие жёсткости выполнено.**

## Расчет давления испытаний

Пробное давление при гидравлическом испытании, при работе элемента под внутренним давлением:

$$P_{\text{тп}} = 1.25 \cdot p \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]_t} = 1.25 \cdot 1.6 \cdot 164.5 / 144 = 2.2847 \text{ МПа}$$

Пробное давление при гидравлическом испытании, при работе элемента под внутренним давлением:

$$P_{\text{тп}} = 1.25 \cdot p \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]_{+}} = 1.25 \cdot 1.6 \cdot 164.5 / 144 = 2.2847 \text{ МПа}$$

### Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)

**Условия нагружения:**

Расчётное осевое сжимающее усилие, F:	0 Н
Расчётный изгибающий момент, M:	0 Н·м
Расчётное внутреннее избыточное давление, p:	2.2345 МПа

## Расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ 34233.4-2017

Расчётная температура элементов соединения:

Температура фланца (кольца), $t_{\text{ф}}$ :	20 °C
Температура фланца (кольца), $t_{\text{ф}}$ :	20 °C
Температура болтов (шпилек), $t_{\text{б}}$ :	20 °C

### Свойства материала болтов (шпилек)

Допускаемые напряжения для материала 35Х Крепеж при температуре 20 °С (условия гидроиспытаний):

$$[\sigma]^{20}_6 = 230 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 35Х Крепеж при температуре  $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$E_{6}^{20} = 2.18 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Коэффициент линейного расширения для материала 35Х Крепеж при температуре  $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$\alpha_{20}^{20} = 0.134 \cdot 10^{-4} 1/^{\circ}\text{C}$$

### Свойства материала фланца (кольца) 1

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре 20 °С (условия гидроиспытаний):

$$[\sigma]^{20_{\phi 1}} = \frac{R_e / 20}{n_T} = 245 / 1.1 = 222.73 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре  $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$E^{20}_1 = 1.99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре  $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$\alpha^{20}_1 = 0.116 \cdot 10^{-4} 1/^{\circ}\text{C}$$

### Свойства материала фланца (кольца)2

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре 20 °С (условия гидроиспытаний):

$$[\sigma]_{\phi 2}^{20} = \frac{R_e / 20}{n_T} = 245 / 1.1 = 222.73 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре  $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$E^{20}_2 = 1.99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре  $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$\alpha^{20_2} = 0.116 \cdot 10^{-4} 1/^{\circ}\text{C}$$

Взам. инв. №	Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре T = 20 °C: $\alpha^{20}_1= 0.116 \cdot 10^{-4} / ^\circ\text{C}$ <b>Свойства материала фланца (кольца)2</b> Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре 20 °C (условия гидроиспытаний): $[\sigma]^{20}_{\text{ф2}}= \frac{R_{\sigma} / 20}{n_T} = 245 / 1.1= 222.73 \text{ МПа}$ Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре T = 20 °C: $E^{20}_2= 1.99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре T = 20 °C: $\alpha^{20}_2= 0.116 \cdot 10^{-4} / ^\circ\text{C}$					
	Подп. и дата					
Инв. № подл.						
						90651-20600-AM-02-220 PP
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	192	



$$\beta_T = \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg K) - 1}{(1.05 + 1.945 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} = (2.0548^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg 2.0548) - 1) / ((1.05 + 1.945 \cdot 2.0548^2) \cdot (2.0548 - 1)) = 1.4855$$

$$\beta_w = 0.10187$$

$$\beta_U = \frac{K^2(1+8.55 \cdot \lg K) - 1}{1.36 \cdot (K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = (2.0548^2 \cdot (1+8.55 \cdot \lg 2.0548) - 1) / (1.36 \cdot (2.0548^2 - 1) \cdot (2.0548 - 1)) = 3.1398$$

$$\lambda = \frac{\beta_F \cdot h + 1}{\beta_T \cdot 1} + \frac{\beta_V \cdot h^3}{\beta_U \cdot 1 \cdot s_0^2} = (0.71228 \cdot 28 + 33.091) / (1.4855 \cdot 33.091) + 0.10187 \cdot 28^3 / (3.1398 \cdot 33.091 \cdot 7.5^2) = 1.4615$$

Угловая податливость фланца при затяжке:

$$y_{\Phi} = \frac{0.91 \cdot \beta_W}{E^{20} \cdot \lambda \cdot s_0^2 \cdot 1_0} = 0.91 \cdot 0.10187 / (1.99 \cdot 10^5 \cdot 1.4615 \cdot 7.5^2 \cdot 33.091) = 0.98115 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ/\text{H}\cdot\text{m}$$

Угловая податливость фланца, нагруженного внешним изгибающим моментом:

$$y_{\Phi M} = \left(\frac{\pi}{4}\right)^3 \cdot \frac{D_6}{E^{20} \cdot D_{\text{max}} \cdot h^3} = (3.1416/4)^3 \cdot 250 / (1.99 \cdot 10^5 \cdot 300 \cdot 28^3) = 0.52952 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ/\text{H}\cdot\text{m}$$

Плечи моментов:

$$a = 0$$

$$b = 0.5 \cdot (D_E - D_{\text{сн}}) = 0.5 \cdot (250 - 193) = 28.5 \text{ мм}$$

$$e = 0.5 \cdot (D_{\text{pr}} - D - s_3) = 0.5 \cdot (193 - 146 - 13.818) = 16.591 \text{ mm}$$

### Характеристики прокладки:

Тип и материал прокладки	Коэффициент $m$	Удельное давление обжатия $q_{обж}$ , МПа	Допускаемое удельное дав- ление $[q]$ , МПа	Коэффициент обжатия $K$	Условный мо- дуль сжатия $E_n$ , МПа
Спирально-навитая с лен- той из нержавеющей стали	3	69	-	-	-

Эффективная ширина прокладки :

$$b_0 = 10 \text{ mm}$$

Примечание: 
$$\begin{cases} b_0 = b_{\text{пр}} & \text{при } b_{\text{пр}} \leq 15,0 \text{ мм} \\ b_0 = 3,8 \cdot \sqrt{b_{\text{пр}}} & \text{при } b_{\text{пр}} > 15,0 \text{ мм} \end{cases}$$

Рабочий наружный диаметр прокладки :

$$D_{\text{пнд}} = \min\{D_4; D_{\text{нп}}\} = \min\{203; 203\} = 203 \text{ мм}$$

Средний эффективный диаметр прокладки:

$$D_{\text{ст}} = D_{\text{пер}} - b_0 = 203 - 10 = 193 \text{ мм}$$

Для металлических и асбометаллических прокладок  $\gamma_p = 0$ .

### Расчёт нагрузок:

Равнодействующая давления :

$$Q_{\pi} = 0.785 \cdot D_{\pi}^2 \cdot p = 0.785 \cdot 193^2 \cdot 2.2345 = 65339 \text{ H}$$

Усилие на прокладке в рабочих условиях, необходимое для обеспечения герметичности:

$$R_{\pi} = \pi \cdot D_{\pi} \cdot b_0 \cdot m \cdot |p| = 3.1416 \cdot 193 \cdot 10^{-3} \cdot 2.2345 = 40646 \text{ H}$$

Усилие, необходимое для смятия прокладки при затяжке :

$$P_{\text{обж}} = 0.5 \cdot \pi \cdot D_{\text{ст}} \cdot b_0 \cdot q_{\text{обж}} = 0.5 \cdot 3.1416 \cdot 193 \cdot 10 \cdot 69 = 2.0918 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Взам. инв. №	Подп. и дата	Инв. № подл.						
<p>Для металлических и асбометаллических прокладок <math>y_n = 0</math>.</p> <p><b>Расчёт нагрузок:</b></p> <p>Равнодействующая давления :</p> <p><math>Q_d = 0.785 \cdot D_{ст}^2 \cdot p = 0.785 \cdot 193^2 \cdot 2.2345 = 65339 \text{ Н}</math></p> <p>Усилие на прокладке в рабочих условиях, необходимое для обеспечения герметичности:</p> <p><math>R_n = \pi \cdot D_{ст} \cdot b_0 \cdot m \cdot  p  = 3.1416 \cdot 193 \cdot 10 \cdot 3 \cdot  2.2345  = 40646 \text{ Н}</math></p> <p>Усилие, необходимое для смятия прокладки при затяжке :</p> <p><math>P_{обж} = 0.5 \cdot \pi \cdot D_{ст} \cdot b_0 \cdot q_{обж} = 0.5 \cdot 3.1416 \cdot 193 \cdot 10 \cdot 69 = 2.0918 \cdot 10^5 \text{ Н}</math></p>								
						90651-20600-AM-02-220 PP		Лист
								194
			Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	

**Расчетная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для герметизации в условиях испытаний (нагрузки + давление)**

Рабочая длина болта (шпильки):

$$L_{\text{б0}} = h' + h'' + 2 \cdot h_{\text{п}} + s_{\text{рн}} + h_{\text{ш}}' + h_{\text{ш}}'' = 25 + 28 + 2 \cdot 3.2 + 20 + 0 + 0 = 79.4 \text{ мм}$$

Эффективная длина шпильки :

$$L_{\text{б}} = L_{\text{б0}} + 0.56 \cdot d = 79.4 + 0.56 \cdot 24 = 92.84 \text{ мм}$$

Площадь сечения шпильки (по внутреннему диаметру резьбы):

$$f_{\text{б}} = 324 \text{ мм}^2$$

Податливость шпилек :

$$y_{\text{б}} = \frac{L_{\text{б}}}{E_{\text{б}}^{20} \cdot f_{\text{б}} \cdot n} = \frac{92.84}{(2.18 \cdot 10^5 \cdot 324 \cdot 8)} = 0.1643 \cdot 10^{-6} \text{ мм/Н}$$

$$\eta = y_{\text{п}} + y_{\text{б}} + y_{\text{ф}}' \cdot b'^2 + y_{\text{ф}}'' \cdot b''^2 = 0 + 0.1643 \cdot 10^{-6} + 0.10965 \cdot 10^{-4} \cdot 28.5^2 + 0.98115 \cdot 10^{-5} \cdot 28.5^2 = 0.45884 \cdot 10^{-6} \text{ мм/Н}$$

Коэффициенты жёсткости для фланцевого соединения, нагруженного внутренним давлением и внешней осевой силой:

$$\alpha = 1 - \frac{y_{\text{п}} - (y_{\text{ф}}' \cdot e' \cdot b' + y_{\text{ф}}'' \cdot e'' \cdot b'')}{\eta} = 1 - \frac{(0 - (0.10965 \cdot 10^{-4} \cdot 16.591 \cdot 28.5 + 0.98115 \cdot 10^{-5} \cdot 16.591 \cdot 28.5))}{0.45884 \cdot 10^{-6}} = 1.3737$$

Коэффициенты жёсткости для фланцевого соединения, нагруженного внешним изгибающим моментом:

$$\alpha_{\text{М}} = \frac{y_{\text{б}} + y_{\text{фМ}}' \cdot b'^2 \cdot \left( b' + e' - \frac{e'^2}{D_{\text{ф}}} \right) + y_{\text{фМ}}'' \cdot b''^2 \cdot \left( b'' + e'' - \frac{e''^2}{D_{\text{ф}}} \right)}{y_{\text{б}} + y_{\text{п}} \cdot \left( \frac{D_{\text{б}}}{D_{\text{ф}}} \right)^2 + y_{\text{фМ}}' \cdot b'^2 + y_{\text{фМ}}'' \cdot b''^2} = \frac{[0.1643 \cdot 10^{-6} + 0.74394 \cdot 10^{-5} \cdot 28.5 \cdot (28.5 + 16.591 - 16.591^2 / 193) + 0.52952 \cdot 10^{-5} \cdot 28.5 \cdot (28.5 + 16.591 - 16.591^2 / 193)]}{[0.1643 \cdot 10^{-6} + 0 \cdot (250 / 193)^2 + 0.74394 \cdot 10^{-5} \cdot 28.5^2 + 0.74394 \cdot 10^{-5} \cdot 28.5^2]} = 1.2786$$

$$P_{\text{б1}} = \alpha \cdot (Q_{\text{д}} + F) + R_{\text{п}} + \frac{4 \cdot \alpha_{\text{М}} \cdot |M|}{D_{\text{ф}}} = 1.3737 \cdot (65339 + 0) + 40646 + 4 \cdot 1.2786 \cdot |0| / 193 = 1.304 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

**Расчетная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для герметизации в условиях испытаний (только давление)**

$$P_{\text{б1}} = \alpha \cdot (Q_{\text{д}} + F) + R_{\text{п}} + \frac{4 \cdot \alpha_{\text{М}} \cdot |M|}{D_{\text{ф}}} = 1.3737 \cdot (65339 + 0) + 40646 + 4 \cdot 1.2786 \cdot |0| / 193 = 1.304 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Суммарная площадь сечения болтов (шпилек) по внутреннему диаметру резьбы или сечению наименьшего диаметра:

$$A_{\text{б}} = n \cdot f_{\text{б}} = 8 \cdot 324 = 2592 \text{ мм}^2$$

Расчётная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для обжатия прокладки и минимального начального натяжения болтов:

$$P_{\text{б2}} = \max \{ P_{\text{обж}}; 0.4 \cdot A_{\text{б}} \cdot [\sigma]_{\text{б}}^{20} \} = \max \{ 2.0918 \cdot 10^5; 0.4 \cdot 2592 \cdot 230 = 2.3846 \cdot 10^5 \} = 2.3846 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

**Расчёт без учета стесненности температурных деформаций**

**Расчёт болтов(шпилек):**

Коэффициент увеличения допускаемых напряжений при затяжке:  $\xi = 1.2$

Коэффициент условий работы:  $K_{\text{уп}} = 1.35$

Коэффициент условий затяжки:  $K_{\text{уз}} = 1$

Коэффициент учета нагрузки от температурных деформаций:  $K_{\text{ут}} = 1$

Допускаемые напряжения для болтов (шпилек) при затяжке :

$$[\sigma]_{\text{б}}^{\text{тк}} = \xi \cdot K_{\text{уп}} \cdot K_{\text{уз}} \cdot K_{\text{ут}} \cdot [\sigma]_{\text{б}}^{20} = 1.2 \cdot 1.35 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 230 = 372.6 \text{ МПа}$$

Болтовая нагрузка в условиях затяжки :

$$P_{\text{б}}^{\text{тк}} = \max \{ P_{\text{б1}}; P_{\text{б2}} \} = \max \{ 1.304 \cdot 10^5; 2.3846 \cdot 10^5 \} = 2.3846 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Взам. инв. №	Расчёт без учета стесненности температурных деформаций					Лист
	Расчёт болтов(шпилек):					
Подп. и дата	Коэффициент увеличения допускаемых напряжений при затяжке: $\xi = 1.2$					90651-20600-AM-02-220 РР
	Коэффициент условий работы: $K_{yp} = 1.35$					
Инв. № подл.	Коэффициент условий затяжки: $K_{yz} = 1$					195
	Коэффициент учета нагрузки от температурных деформаций: $K_{yT} = 1$					
	Допускаемые напряжения для болтов (шпилек) при затяжке :					
	$[\sigma]_6^M = \xi \cdot K_{yp} \cdot K_{yz} \cdot K_{yT} \cdot [\sigma]_6^{20} = 1.2 \cdot 1.35 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 230 = 372.6 \text{ МПа}$					
	Болтовая нагрузка в условиях затяжки :					
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата		

Условие прочности при затяжке:

$$\sigma_{61} = \frac{P_6^M}{A_6} \leq [\sigma]_6^M$$

$$\sigma_{61} = \frac{P_6^M}{A_6} = 2.3846 \cdot 10^5 / 2592 = 92 \text{ МПа}$$

Крутящий момент при затяжке болтов (шпилек) без смазки при  $\sigma_{61} < 120$  МПа:

$$M_{кр} = 0.3 \cdot \frac{P_6^M \cdot d}{n} = 0.3 \cdot 2.3846 \cdot 10^5 \cdot 24 / 8 = 214.62 \text{ Н·м}$$

При наличии смазки величина  $M_{кр}$  снижается на 25% и составляет  $0.75 \cdot M_{кр} = 160.96 \text{ Н·м}$

$92 \text{ МПа} \leq 372.6 \text{ МПа}$ , **Условие прочности выполнено.**

Допускаемые напряжения для болтов (шпилек) при рабочих условиях:

$$[\sigma]_6^P = K_{ур} \cdot K_{уз} \cdot K_{ут} \cdot [\sigma]_6 = 1.35 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 230 = 310.5 \text{ МПа}$$

Болтовая нагрузка в рабочих условиях:

$$P_6^P = P_6^M + (1 - \alpha) \cdot (Q_d + F) + \frac{4 \cdot (1 - \alpha_m) \cdot |M|}{D_{ст}} = 2.3846 \cdot 10^5 + (1 - 1.3737) \cdot (65339 + 0) + 4 \cdot (1 - 1.2786) \cdot |0| / 193 = 2.1405 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Условие прочности в рабочих условиях:

$$\sigma_{62} = \frac{P_6^P}{A_6} \leq [\sigma]_6^P$$

$$\sigma_{62} = \frac{P_6^P}{A_6} = 2.1405 \cdot 10^5 / 2592 = 82.58 \text{ МПа}$$

$82.58 \text{ МПа} \leq 310.5 \text{ МПа}$ , **Условие прочности выполнено.**

### Расчёт первого фланца:

Коэффициент, учитывающий изгиб тарелки фланца между шпильками:

$$C_F = \max \left\{ 1; \frac{\frac{\pi \cdot D_6}{n}}{2 \cdot d + \frac{6 \cdot h}{m + 0.5}} \right\} = \max \{1; (3.1416 \cdot 250 / 8) / (2 \cdot 24 + 6 \cdot 25 / (3 + 0.5))^{1/2}\} = 1.0395$$

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при затяжке:

$$M^M = C_F \cdot P_6^M \cdot b = 1.0395 \cdot 2.3846 \cdot 10^5 \cdot 28.5 = 7064.6 \text{ Н·м}$$

$$f = \max \left\{ \frac{C_{36}}{1 + A}; 1.0 \right\} = \max \{1.6922 / (1 + 1.6667); 1.0\} = 1$$

$$D^* = D + c + s_{1 \text{ при } (D + 2 \cdot c) < 20 \cdot (s_1 - c) \text{ и } f = 1} = 146 + 0 + 20 \text{ при } 146 < 20 \cdot (20 - 0) \text{ и } f = 1 = 166 \text{ мм}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении  $s_1$ :

$$\sigma_1^M = \frac{M^M}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D^*} = 7064.6 / (1.3078 \cdot (20 - 3)^2 \cdot 166) = 112.6 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в условиях затяжки:

$$\sigma_R^M = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + 1.0}{\lambda \cdot h^2 \cdot 1.0 \cdot D} \cdot M^M = (1.33 \cdot 0.71228 \cdot 25 + 33.091) / (1.3078 \cdot 25^2 \cdot 33.091 \cdot 146) \cdot 7064.6 = 101.57 \text{ МПа}$$

$$\beta_Y = \frac{1}{K - 1} \cdot \left( 0.69 + 5.72 \cdot \frac{K^2 \cdot \lg K}{K^2 - 1} \right) = 1 / (2.0548 - 1) \cdot (0.69 + 5.72 \cdot 2.0548^2 \cdot \lg 2.0548 / (2.0548^2 - 1)) = 2.8766$$

$$\beta_Z = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = (2.0548^2 + 1) / (2.0548^2 - 1) = 1.6207$$

Окружное напряжение в тарелке в условиях затяжки:

$$\sigma_T^M = \frac{\beta_Y \cdot M^M}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^M = 2.8766 \cdot 7064.6 / (25^2 \cdot 146) - 1.6207 \cdot 101.57 = 58.097 \text{ МПа}$$

Взам. инв. №						
	$\sigma_1^M = \frac{M^M}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D} = 7064.6 / (1.3078 \cdot (20 - 3)^2 \cdot 166) = 112.6 \text{ МПа}$ <p>Радиальное напряжение в тарелке в условиях затяжки :</p> $\sigma_R^M = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + 1_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot 1_0 \cdot D} \cdot M^M = (1.33 \cdot 0.71228 \cdot 25 + 33.091) / (1.3078 \cdot 25^2 \cdot 33.091 \cdot 146) \cdot 7064.6 = 101.57 \text{ МПа}$ $\beta_Y = \frac{1}{K-1} \cdot \left( 0.69 + 5.72 \cdot \frac{K^2 \cdot \lg K}{K^2 - 1} \right) = 1 / (2.0548 - 1) \cdot (0.69 + 5.72 \cdot 2.0548^2 \cdot \lg 2.0548 / (2.0548^2 - 1)) = 2.8766$ $\beta_Z = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = (2.0548^2 + 1) / (2.0548^2 - 1) = 1.6207$ <p>Окружное напряжение в тарелке в условиях затяжки :</p> $\sigma_T^M = \frac{\beta_Y \cdot M^M}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^M = 2.8766 \cdot 7064.6 / (25^2 \cdot 146) - 1.6207 \cdot 101.57 = 58.097 \text{ МПа}$					
Подп. и дата						
Инв. № подл.						
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	90651-20600-AM-02-220 РР	Лист
						196

Условие статической прочности при затяжке в сечении  $s_1$  (п. 8.5.1):

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^M + \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_1^M + \sigma_T^M \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma_M]^{20}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^M + \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_1^M + \sigma_T^M \right| \right\} = \max \{112.6 + 101.57; |112.6 + 58.097\} = 214.17 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_{\text{нл}}^{20} = 1.5 \cdot [\sigma]_{\text{ф}}^{20} = 1.5 \cdot 222.73 = 334.09 \text{ МПа}$$

$$K = \frac{D_H}{D} = 300 / 146 = 2.0548$$

Коэффициент учета размеров тарелки фланца:  $K_S = 1.2$

$$K_s \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{м}}^{20} = 1.2 \cdot 1 \cdot 334.09 = 400.91 \text{ МПа}$$

$$214.17 \text{ МПа} \leq 400.91 \text{ МПа. Условие прочности выполнено.}$$

Болтовая нагрузка в рабочих условиях :

$$P_6^P = P_6^M + (1 - \alpha) \cdot (Q_{\pi} + F) + \frac{4 \cdot (1 - \alpha_{\pi}) \cdot |M|}{D_{\pi}} = 2.3846 \cdot 10^5 + (1 - 1.3737) \cdot (65339 + 0) + 4 \cdot (1 - 1.2786) \cdot |0| / 193 = 2.1405 \cdot 10^5 \text{ H}$$

Приведенная нагрузка от внешней силы и момента :

$$Q_{FM}^+ = F + \frac{4 \cdot |M|}{D_-} = 0 + 4 \cdot |0| / 193 = 0 \text{ H}$$

$$Q_{FM} = F - \frac{4 \cdot |M|}{D_{-}} = 0.4 \cdot |0| / 193 = 0 \text{ H}$$

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при рабочих условиях:

$$M^P = C_F \cdot \max \left\{ P_6^P \cdot b + (Q_d + Q_{FM}) \cdot e; |Q_d + Q_{FM}| \cdot e \right\} = \frac{1.0395 \cdot \max \{ 2.1405 \cdot 10^5 \cdot 28.5 + (65339 + 0) \cdot 16.591; |65339 + 0| \cdot 16.591 \}}{16.591} = 7468.1 \text{ H}\cdot\text{M}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_1$ :

$$\sigma_1^p = \frac{M^p}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D} = 7468.1 / (1.3078 \cdot (20 - 3)^2 \cdot 166) = 119.03 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в рабочих условиях :

$$\sigma_R^p = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + l_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot l_0 \cdot D} \cdot M^p = (1.33 \cdot 0.71228 \cdot 25 + 33.091) / (1.3078 \cdot 25^2 \cdot 33.091 \cdot 146) \cdot 7468.1 = 107.37 \text{ МПа}$$

Окружное напряжение в тарелке в рабочих условиях :

$$\sigma_T^P = \frac{\beta_Y \cdot M^P}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^P = 2.8766 \cdot 7468.1 / (25^2 \cdot 146) - 1.6207 \cdot 107.37 = 61.415 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_1$  (+):

$$\sigma_{\text{lim}}^{\text{p+}} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_1}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = (0.785 \cdot 146^2 \cdot 2.2345 + 0 + 4 \cdot 0 / (146 + 20)) / (3.1416 \cdot (146 + 20) \cdot (20 - 3)) = 4.2175 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_1$  (п. 8.5.1):

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{lim}}^{P+} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{lim}}^{P+} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{\text{lim}}^{P+} \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{пр}}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{lim}}^{P+} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{lim}}^{P+} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{\text{lim}}^{P+} \right| \right\} = \max \{ |119.03 - 4.2175 + 107.37|; |119.03 - 4.2175 + 61.415|; |119.03 + 4.2175| \} = 222.19 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_M = 1.5 \cdot [\sigma]_{\Phi} = 1.5 \cdot 222.73 = 334.09 \text{ МПа}$$

$$K_{\sigma} \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{н}} = 1.2 \cdot 1 \cdot 334.09 = 400.91 \text{ МПа}$$

$222.19 \text{ МПа} \leq 400.91 \text{ МПа}$ , Условие прочности выполнено.

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_1$  (-):

$$\sigma_{\text{lim}}^{\text{p-}} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F - \frac{4 \cdot M}{D + s_1}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = (0.785 \cdot 146^2 \cdot 2.2345 + 0 - 4 \cdot 0 / (146 + 20)) / (3.1416 \cdot (146 + 20) \cdot (20 - 3)) = 4.2175 \text{ МПа}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{lim}}^{P-} + \sigma_R^P \right|, \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{lim}}^{P-} + \sigma_T^P \right|, \left| \sigma_1^P + \sigma_{\text{lim}}^{P-} \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{br}}$$

Взам. инв. №	<p>Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении <math>s_1</math> (п. 8.5.1):</p> $\max \left\{ \left  \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P+} + \sigma_R^P \right ; \left  \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P+} + \sigma_T^P \right ; \left  \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^{P+} \right  \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{м}}$ $\max \left\{ \left  \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P+} + \sigma_R^P \right ; \left  \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P+} + \sigma_T^P \right ; \left  \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^{P+} \right  \right\} = \frac{\max\{119.03 - 4.2175 + 107.37;  119.03 - 4.2175 + 61.415 ;  119.03 + 4.2175 \}}{ 119.03 + 4.2175 } = 222.19 \text{ МПа}$												
	Подп. и дата	<p>Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):</p> $[\sigma]_{\text{м}} = 1.5 \cdot [\sigma]_{\text{ф}} = 1.5 \cdot 222.73 = 334.09 \text{ МПа}$ $K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{м}} = 1.2 \cdot 1 \cdot 334.09 = 400.91 \text{ МПа}$ <p><math>222.19 \text{ МПа} \leq 400.91 \text{ МПа}</math>, <b>Условие прочности выполнено.</b></p> <p>Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении <math>S_1</math> (-):</p> $\sigma_{1mm}^{P-} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F \cdot \frac{4 \cdot M}{D + s_1}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = (0.785 \cdot 146^2 \cdot 2.2345 + 0 - 4 \cdot 0 / (146 + 20)) / (3.1416 \cdot (146 + 20) \cdot (20 - 3)) = 4.2175 \text{ МПа}$											
Инв. № подл.		$\max \left\{ \left  \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P-} + \sigma_R^P \right ; \left  \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P-} + \sigma_T^P \right ; \left  \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^{P-} \right  \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{м}}$											
	<table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>Изм.</td><td>Лист</td><td>№ док.</td><td>Подп.</td><td>Дата</td></tr></table> <div>90651-20600-AM-02-220 PP</div> <div>Лист 197</div>									Изм.	Лист	№ док.	Подп.
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата									







$$\max \left\{ \left| \sigma_1^M + \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_1^M + \sigma_T^M \right| \right\} = \max \{ |70.82 + 74.013|; |70.82 + 52.769| \} = 144.83 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_{\text{м}}^{20} = 1.5 \cdot [\sigma]_{\text{ф}}^{20} = 1.5 \cdot 222.73 = 334.09 \text{ МПа}$$

$$K = \frac{D_K}{D} = 300 / 146 = 2.0548$$

Коэффициент учета размеров тарелки фланца:  $K_S = 1.2$

$$K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{м}}^{20} = 1.2 \cdot 1 \cdot 334.09 = 400.91 \text{ МПа}$$

144.83 МПа ≤ 400.91 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Приведенная нагрузка от внешней силы и момента :

$$Q_{\text{FM}}^+ = F + \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{ст}}} = 0 + 4 \cdot |0| / 193 = 0 \text{ Н}$$

$$Q_{\text{FM}}^- = F - \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{ст}}} = 0 - 4 \cdot |0| / 193 = 0 \text{ Н}$$

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при рабочих условиях:

$$M^P = C_F \cdot \max \left\{ p_e \cdot b + (Q_{\text{д}} + Q_{\text{FM}}) \cdot e; |Q_{\text{д}} + Q_{\text{FM}}| \cdot e \right\} = \frac{1.0113 \cdot \max \{ 2.1405 \cdot 10^5 \cdot 28.5 + (65339 + 0) \cdot 16.591; |65339 + 0| \cdot 16.591 \}}{16.591} = 7265.3 \text{ Н·м}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_1$ :

$$\sigma_1^P = \frac{M^P}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D^*} = 7265.3 / (1.4615 \cdot (20 - 0)^2 \cdot 166) = 74.865 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в рабочих условиях :

$$\sigma_R^P = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + 1.0}{\lambda \cdot h^2 \cdot 1.0 \cdot D} \cdot M^P = (1.33 \cdot 0.71228 \cdot 28 + 33.091) / (1.4615 \cdot 28^2 \cdot 33.091 \cdot 146) \cdot 7265.3 = 78.241 \text{ МПа}$$

Окружное напряжение в тарелке в рабочих условиях :

$$\sigma_T^P = \frac{\beta_V \cdot M^P}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^P = 2.8766 \cdot 7265.3 / (28^2 \cdot 146) - 1.6207 \cdot 78.241 = 55.783 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_1$  (+):

$$\sigma_{\text{лмм}}^{P+} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_1}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = (0.785 \cdot 146^2 \cdot 2.2345 + 0 + 4 \cdot 0 / (146 + 20)) / (3.1416 \cdot (146 + 20) \cdot (20 - 0)) = 3.5849 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_1$  (п. 8.5.1):

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^{P+} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^{P+} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{\text{лмм}}^{P+} \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{м}}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^{P+} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^{P+} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{\text{лмм}}^{P+} \right| \right\} = \max \{ |74.865 - 3.5849 + 78.241|; |74.865 - 3.5849 + 55.783|; |74.865 + 3.5849| \} = 149.52 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_{\text{м}} = 1.5 \cdot [\sigma]_{\text{ф}} = 1.5 \cdot 222.73 = 334.09 \text{ МПа}$$

$$K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{м}} = 1.2 \cdot 1 \cdot 334.09 = 400.91 \text{ МПа}$$

149.52 МПа ≤ 400.91 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_1$  (-):

$$\sigma_{\text{лмм}}^{P-} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F - \frac{4 \cdot M}{D + s_1}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = (0.785 \cdot 146^2 \cdot 2.2345 + 0 - 4 \cdot 0 / (146 + 20)) / (3.1416 \cdot (146 + 20) \cdot (20 - 0)) = 3.5849 \text{ МПа}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^{P-} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^{P-} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{\text{лмм}}^{P-} \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{м}}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^{P-} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^{P-} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{\text{лмм}}^{P-} \right| \right\} = \max \{ |74.865 - 3.5849 + 78.241|; |74.865 - 3.5849 + 55.783|; |74.865 + 3.5849| \} = 149.52 \text{ МПа}$$

149.52 МПа ≤ 400.91 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_0^M = f \cdot \sigma_1^M = 1 \cdot 70.82 = 70.82 \text{ МПа}$$

Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	90651-20600-AM-02-220 РР	Лист 200
Взам. инв. №						
Подп. и дата						
Инв. № подл.						

Условие статической прочности при затяжке в сечении  $s_0$  (п. 8.5.2):

$$\sigma_0^M \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R^{20}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_R^{20} = 3 \cdot [\sigma]_\Phi^{20} = 3 \cdot 222.73 = 668.18 \text{ МПа}$$

$$1.3 \cdot [\sigma]_R^{20} = 1.3 \cdot 668.18 = 868.64 \text{ МПа}$$

70.82 МПа  $\leq$  868.64 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_0^P = f \cdot \sigma_1^P = 1 \cdot 74.865 = 74.865 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_0$  (+):

$$\sigma_{0mm}^{P+} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_0}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = \frac{(0.785 \cdot 146^2 \cdot 2.2345 + 0 + 4 \cdot 0 / (146 + 7.5)) / (3.1416 \cdot (146 + 7.5) \cdot (7.5 - 0))}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = 10.338 \text{ МПа}$$

Окружное мембранное напряжение от действия давления во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_{0mo}^P = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s_0 - c)} = \frac{2.2345 \cdot 146 / (2 \cdot (7.5 - 0))}{2 \cdot (s_0 - c)} = 21.749 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P+} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P+} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P+} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P+} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} = \frac{\max\{74.865 \pm 10.338; |0.3 \cdot 74.865 \pm 21.749|; |0.7 \cdot 74.865 \pm (10.338 - 21.749)|\}}{74.865 \pm (10.338 - 21.749)} = 85.203 \text{ МПа}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_R = 3 \cdot [\sigma]_\Phi = 3 \cdot 222.73 = 668.18 \text{ МПа}$$

$$1.3 \cdot [\sigma]_R = 1.3 \cdot 668.18 = 868.64 \text{ МПа}$$

85.203 МПа  $\leq$  868.64 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_0$  (-):

$$\sigma_{0mm}^{P-} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F - \frac{4 \cdot M}{D + s_0}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = \frac{(0.785 \cdot 146^2 \cdot 2.2345 + 0 - 4 \cdot 0 / (146 + 7.5)) / (3.1416 \cdot (146 + 7.5) \cdot (7.5 - 0))}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = 10.338 \text{ МПа}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P-} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P-} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P-} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P-} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} = \frac{\max\{74.865 \pm 10.338; |0.3 \cdot 74.865 \pm 21.749|; |0.7 \cdot 74.865 \pm (10.338 - 21.749)|\}}{74.865 \pm (10.338 - 21.749)} = 85.203 \text{ МПа}$$

85.203 МПа  $\leq$  868.64 МПа, **Условие прочности выполнено.**

**Расчет в сечении  $s_0$  в рабочих условиях (п. 8.5.5 ГОСТ 34233.4-2017):**

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0mo}^P \right|; \left| \sigma_{0mm}^P \right| \right\} \leq [\sigma]_\Phi$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0mo}^P \right|; \left| \sigma_{0mm}^P \right| \right\} = \max\{21.749; 10.338\} = 21.749 \text{ МПа}$$

21.749 МПа  $\leq$  222.73 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Условие статической прочности при затяжке для тарелок:

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_T^M \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_\Phi^{20}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_T^M \right| \right\} = \max\{74.013; 52.769\} = 74.013 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_\Phi^{20} = 1 \cdot 222.73 = 222.73 \text{ МПа}$$

74.013 МПа  $\leq$  222.73 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Условие статической прочности в рабочих условиях для тарелок:

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_T^P \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_\Phi$$

Взам. инв. №		Условие статической прочности при изгибе в рабочих условиях в соответствии с [6].						
		$\max \left\{ \left  \sigma_{0mo}^P \right ; \left  \sigma_{0mm}^P \right  \right\} \leq [\sigma]_{\Phi}$ $\max \left\{ \left  \sigma_{0mo}^P \right ; \left  \sigma_{0mm}^P \right  \right\} = \max\{21.749; 10.338\} = 21.749 \text{ МПа}$ $21.749 \text{ МПа} \leq 222.73 \text{ МПа, Условие прочности выполнено.}$ <p>Условие статической прочности при затяжке для тарелок:</p> $\max \left\{ \left  \sigma_R^M \right ; \left  \sigma_T^M \right  \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_{\Phi}^{20}$ $\max \left\{ \left  \sigma_R^M \right ; \left  \sigma_T^M \right  \right\} = \max\{74.013; 52.769\} = 74.013 \text{ МПа}$ $K_T \cdot [\sigma]_{\Phi}^{20} = 1 \cdot 222.73 = 222.73 \text{ МПа}$ $74.013 \text{ МПа} \leq 222.73 \text{ МПа, Условие прочности выполнено.}$ <p>Условие статической прочности в рабочих условиях для тарелок:</p> $\max \left\{ \left  \sigma_R^P \right ; \left  \sigma_T^P \right  \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_{\Phi}$						
Подп. и дата								
Инв. № подл.								
						90651-20600-AM-02-220 РР	Лист	
							201	
		Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата		





Этот документ является собственностью "НЕФТЕХИМПРОЕКТ" и не подлежит копированию и распространению без его согласия

НЕФТЕХИМПРОЕКТ NEFTECHIMPROEKT		МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ			РР	
Толщина конической части втулки, s <sub>1</sub> :		16 мм				
Радиус перехода, r:		5 мм				
Данные второго фланца (кольца):						
Материал фланца (кольца):		09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка				
Наружный диаметр фланца (кольца), D <sub>н</sub> :		195 мм				
Толщина фланца (кольца) с выступом, h'		22 мм				
Внутренний диаметр фланца (кольца), D:		78 мм				
Сумма прибавок, с:		3 мм				
Длина конической части втулки, l:		21 мм				
Длина цилиндрической части втулки, l <sub>с</sub> :		12 мм				
Толщина цилиндрической части втулки, s <sub>0</sub> :		6 мм				
Толщина конической части втулки, s <sub>1</sub> :		16 мм				
Радиус перехода, r:		5 мм				
Расчёт в рабочих условиях						
Условия нагружения:						
Расчётное осевое сжимающее усилие, F:		0 Н				
Расчётный изгибающий момент, M:		0 Н·м				
Расчётное внутреннее избыточное давление, p:		1.644 МПа				
Расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ 34233.4-2017						
Расчётная температура элементов соединения:						
Температура фланца (кольца), t <sub>ф</sub> :		100 °С				
Температура фланца (кольца), t <sub>ф</sub> :		100 °С				
Температура болтов (шпилек), t <sub>б</sub> :		100 °С				
Свойства материала болтов (шпилек)						
Допускаемые напряжения для материала 35Х Крепеж при температуре 100 °С (рабочие условия):						
[σ] <sub>6</sub> = 230 МПа						
Модуль продольной упругости для материала 35Х Крепеж при температуре T = 100 °С:						
E <sub>6</sub> = 2.15·10 <sup>5</sup> МПа						
Коэффициент линейного расширения для материала 35Х Крепеж при температуре T = 100 °С:						
α <sub>6</sub> = 0.134·10 <sup>-4</sup> /°С						
Допускаемые напряжения для материала 35Х Крепеж при температуре 20 °С (рабочие условия):						
[σ] <sup>20</sup> <sub>6</sub> = 230 МПа						
Модуль продольной упругости для материала 35Х Крепеж при температуре T = 20 °С:						
E <sup>20</sup> <sub>6</sub> = 2.18·10 <sup>5</sup> МПа						
Свойства материала фланца (кольца) 1						
Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре 100 °С (рабочие условия):						
[σ] <sub>ф1</sub> = 144 МПа						
Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре T = 100 °С:						
E <sub>1</sub> = 1.91·10 <sup>5</sup> МПа						
Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре T = 100 °С:						
α <sub>1</sub> = 0.116·10 <sup>-4</sup> /°С						
Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре 20 °С (рабочие условия):						
[σ] <sup>20</sup> <sub>ф1</sub> = 164.5 МПа						
Взам. инв. №	Подп. и дата	Инв. № подл.				Лист
			90651-20600-AM-02-220 РР			204
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата		

90651-20600-AM-02-220 РР\_изм.0.docx

Формат А4

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка 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 Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре 100 °С (рабочие условия):

$$[\sigma]_{\phi 2} = 144 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре  $T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$E_2 = 1.91 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре  $T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$\alpha_2 = 0.116 \cdot 10^{-4} 1/^{\circ}\text{C}$$

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре 20 °С (рабочие условия):

$$[\sigma]^{20}_{\phi 2} = 164.5 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре  $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$E^{20_2} = 1.99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре  $T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$\alpha_n = 0.116 \cdot 10^{-4} 1/^{\circ}\text{C}$$

### Расчётные параметры болтов (шпилек):

Рабочая длина болта (шпильки):

$$L_{60} = h' + h'' + 2 \cdot h_{\pi} + s_{\pi\pi} + h'_{\pi\pi} + h''_{\pi\pi} = 19 + 22 + 2 \cdot 3.2 + 13 + 0 + 0 = 60.4 \text{ mm}$$

Площадь сечения шпильки (по внутреннему диаметру резьбы):

$$f_6 = 144 \text{ mm}^2$$

Эффективная длина шпильки :

$$L_s = L_{s0} + 0.56 \cdot d = 60.4 + 0.56 \cdot 16 = 69.36 \text{ mm}$$

Податливость шпилек:

$$y_6 = \frac{L_6}{E_6 \cdot f_6 \cdot n} = 69.36 / (2.18 \cdot 10^5 \cdot 144 \cdot 8) = 0.27619 \cdot 10^{-6} \text{ mm/H}$$

**Расчётные параметры первого фланца:**

$$\beta = \frac{s_1}{s_0} = 16/6 = 2.6667$$

$$x = \frac{1}{\sqrt{D \cdot s_0}} = 21/(78 \cdot 6)^{1/2} = 0.97073$$

$$\kappa = 1 + (\beta - 1) \cdot \frac{x}{x + \frac{1 + \beta}{4}} = 1 + (2.6667 - 1) * 0.97073 / (0.97073 + (1 + 2.6667) / 4) = 1.8572$$

Эквивалентная толщина втулки для фланца, приварного встык:

$$s_s = \kappa \cdot s_n = 1.8572 \cdot 6 = 11.143 \text{ mm}$$

$$l_0 = \sqrt{D \cdot s_0} = (78 \cdot 6)^{1/2} = 21.633 \text{ mm}$$

$$\beta_F = 0.70613$$

$$K = \frac{D_H}{D} = 195/78 = 2.5$$

$$\beta_T = \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg K) - 1}{(1.05 + 1.945 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} = (2.5^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg 2.5) - 1) / ((1.05 + 1.945 \cdot 2.5^2) \cdot (2.5 - 1)) = 1.3385$$

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №				
<div><math display="block">\kappa = 1 + (\beta - 1) \cdot \frac{x}{x + \frac{1 + \beta}{4}} = 1 + (2.6667 - 1) \cdot 0.97073 / (0.97073 + (1 + 2.6667) / 4) = 1.8572</math><p>Эквивалентная толщина втулки для фланца, приварного встык:</p><math display="block">s_3 = \kappa \cdot s_0 = 1.8572 \cdot 6 = 11.143 \text{ мм}</math><math display="block">l_0 = \sqrt{D \cdot s_0} = (78 \cdot 6)^{1/2} = 21.633 \text{ мм}</math><math display="block">\beta_F = 0.70613</math><math display="block">K = \frac{D_H}{D} = 195 / 78 = 2.5</math><math display="block">\beta_T = \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg K) - 1}{(1.05 + 1.945 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} = (2.5^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg 2.5) - 1) / ((1.05 + 1.945 \cdot 2.5^2) \cdot (2.5 - 1)) = 1.3385</math></div>						
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	90651-20600-AM-02-220 PP	Лист
						205

$$\beta_v = 0.099015$$

$$\beta_U = \frac{K^2(1+8.55 \cdot \lg K) - 1}{1.36 \cdot (K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = (2.5^2 \cdot (1+8.55 \cdot \lg 2.5) - 1) / (1.36 \cdot (2.5^2 - 1) \cdot (2.5 - 1)) = 2.4757$$

$$\lambda = \frac{\beta_F \cdot h + 1_0}{\beta_T \cdot 1_0} + \frac{\beta_v \cdot h^3}{\beta_U \cdot 1_0 \cdot s_0^2} = (0.70613 \cdot 19 + 21.633) / (1.3385 \cdot 21.633) + 0.099015 \cdot 19^3 / (2.4757 \cdot 21.633 \cdot 6^2) = 1.5627$$

Угловая податливость фланца при затяжке:

$$y_\Phi = \frac{0.91 \cdot \beta_v}{E^{20} \cdot \lambda \cdot s_0^2 \cdot 1_0} = 0.91 \cdot 0.099015 / (1.99 \cdot 10^5 \cdot 1.5627 \cdot 6^2 \cdot 21.633) = 0.21317 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ/\text{Н}\cdot\text{м}$$

Угловая податливость фланца, нагруженного внешним изгибающим моментом:

$$y_{\Phi M} = \left(\frac{\pi}{4}\right)^3 \cdot \frac{D_6}{E^{20} \cdot D_K \cdot h^3} = (3.1416 / 4)^3 \cdot 160 / (1.99 \cdot 10^5 \cdot 195 \cdot 19^3) = 0.16686 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ/\text{Н}\cdot\text{м}$$

Плечи моментов:

$$a = 0$$

$$b = 0.5 \cdot (D_6 - D_{\text{сп}}) = 0.5 \cdot (160 - 113) = 23.5 \text{ мм}$$

$$e = 0.5 \cdot (D_{\text{сп}} - D - s_3) = 0.5 \cdot (113 - 78 - 11.143) = 11.928 \text{ мм}$$

**Расчётные параметры второго фланца:**

$$\beta = \frac{s_1}{s_0} = 16/6 = 2.6667$$

$$x = \frac{1}{\sqrt{D \cdot s_0}} = 21 / (78 \cdot 6)^{1/2} = 0.97073$$

$$\kappa = 1 + (\beta - 1) \cdot \frac{x}{x + \frac{1 + \beta}{4}} = 1 + (2.6667 - 1) \cdot 0.97073 / (0.97073 + (1 + 2.6667) / 4) = 1.8572$$

Эквивалентная толщина втулки для фланца, приварного встык:

$$s_3 = \kappa \cdot s_0 = 1.8572 \cdot 6 = 11.143 \text{ мм}$$

$$1_0 = \sqrt{D \cdot s_0} = (78 \cdot 6)^{1/2} = 21.633 \text{ мм}$$

$$\beta_F = 0.70613$$

$$K = \frac{D_K}{D} = 195 / 78 = 2.5$$

$$\beta_T = \frac{K^2 \cdot (1+8.55 \cdot \lg K) - 1}{(1.05 + 1.945 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} = (2.5^2 \cdot (1+8.55 \cdot \lg 2.5) - 1) / ((1.05 + 1.945 \cdot 2.5^2) \cdot (2.5 - 1)) = 1.3385$$

$$\beta_v = 0.099015$$

$$\beta_U = \frac{K^2(1+8.55 \cdot \lg K) - 1}{1.36 \cdot (K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = (2.5^2 \cdot (1+8.55 \cdot \lg 2.5) - 1) / (1.36 \cdot (2.5^2 - 1) \cdot (2.5 - 1)) = 2.4757$$

$$\lambda = \frac{\beta_F \cdot h + 1_0}{\beta_T \cdot 1_0} + \frac{\beta_v \cdot h^3}{\beta_U \cdot 1_0 \cdot s_0^2} = (0.70613 \cdot 22 + 21.633) / (1.3385 \cdot 21.633) + 0.099015 \cdot 22^3 / (2.4757 \cdot 21.633 \cdot 6^2) = 1.8304$$

Угловая податливость фланца при затяжке:

$$y_\Phi = \frac{0.91 \cdot \beta_v}{E^{20} \cdot \lambda \cdot s_0^2 \cdot 1_0} = 0.91 \cdot 0.099015 / (1.99 \cdot 10^5 \cdot 1.8304 \cdot 6^2 \cdot 21.633) = 0.18199 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ/\text{Н}\cdot\text{м}$$

Угловая податливость фланца, нагруженного внешним изгибающим моментом:

$$y_{\Phi M} = \left(\frac{\pi}{4}\right)^3 \cdot \frac{D_6}{E^{20} \cdot D_K \cdot h^3} = (3.1416 / 4)^3 \cdot 160 / (1.99 \cdot 10^5 \cdot 195 \cdot 22^3) = 0.10749 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ/\text{Н}\cdot\text{м}$$

Плечи моментов:

$$a = 0$$

$$b = 0.5 \cdot (D_6 - D_{\text{сп}}) = 0.5 \cdot (160 - 113) = 23.5 \text{ мм}$$

Взам. инв. №	$\beta_U = \frac{K \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg K) - 1}{1.36 \cdot (K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = (2.5^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg 2.5) - 1) / (1.36 \cdot (2.5^2 - 1) \cdot (2.5 - 1)) = 2.4757$ $\lambda = \frac{\beta_F \cdot h + 1_0}{\beta_T \cdot 1_0} + \frac{\beta_V \cdot h^3}{\beta_U \cdot 1_0 \cdot s_0^2} = (0.70613 \cdot 22 + 21.633) / (1.3385 \cdot 21.633) + 0.099015 \cdot 22^3 / (2.4757 \cdot 21.633 \cdot 6^2) = 1.8304$					
	Угловая податливость фланца при затяжке:					
Подп. и дата	$y_\Phi = \frac{0.91 \cdot \beta_V}{E^{20} \cdot \lambda \cdot s_0^2 \cdot 1_0} = 0.91 \cdot 0.099015 / (1.99 \cdot 10^5 \cdot 1.8304 \cdot 6^2 \cdot 21.633) = 0.18199 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ/\text{Н}\cdot\text{м}$					
	Угловая податливость фланца, нагруженного внешним изгибающим моментом:					
Инв. № подл.	$y_{\Phi M} = \left(\frac{\pi}{4}\right)^3 \cdot \frac{D_6}{E^{20} \cdot D_K \cdot h^3} = (3.1416 / 4)^3 \cdot 160 / (1.99 \cdot 10^5 \cdot 195 \cdot 22^3) = 0.10749 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ/\text{Н}\cdot\text{м}$					
	Плечи моментов:					
	$a = 0$ $b = 0.5 \cdot (D_6 - D_{сш}) = 0.5 \cdot (160 - 113) = 23.5 \text{ мм}$					
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	90651-20600-AM-02-220 РР	Лист
						206



НЕФТЕХИМПРОЕКТ NEFTECHIMPROEKT		МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ			РР
-----------------------------------	--	---------------------	--	--	----

$$e = 0.5 \cdot (D_{\text{ст}} - D - s_s) = 0.5 \cdot (113 - 78 - 11.143) = 11.928 \text{ мм}$$

**Характеристики прокладки:**

Тип и материал прокладки	Коэффициент m	Удельное давление обжатия $q_{\text{обж}}$ , 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 :  
 $b_0 = 7 \text{ мм}$

Примечание: 
$$\begin{cases} b_0 = b_{\text{пр}} & \text{при } b_{\text{пр}} \leq 15.0 \text{ мм} \\ b_0 = 3.8 \cdot \sqrt{b_{\text{пр}}} & \text{при } b_{\text{пр}} > 15.0 \text{ мм} \end{cases}$$

Рабочий наружный диаметр прокладки :  
 $D_{\text{нпр}} = \min\{D_4; D_{\text{нп}}\} = \min\{120; 120\} = 120 \text{ мм}$

Средний эффективный диаметр прокладки:  
 $D_{\text{ст}} = D_{\text{нпр}} - b_0 = 120 - 7 = 113 \text{ мм}$

Для металлических и асбометаллических прокладок  $y_n = 0$ .

**Расчёт нагрузок:**

Равнодействующая давления :  
 $Q_d = 0.785 \cdot D_{\text{ст}}^2 \cdot p = 0.785 \cdot 113^2 \cdot 1.644 = 16479 \text{ Н}$

Усилие на прокладке в рабочих условиях, необходимое для обеспечения герметичности:  
 $R_n = \pi \cdot D_{\text{ст}} \cdot b_0 \cdot m \cdot |p| = 3.1416 \cdot 113 \cdot 7 \cdot 3 \cdot |1.644| = 12256 \text{ Н}$

Усилие, необходимое для смятия прокладки при затяжке :  
 $P_{\text{обж}} = 0.5 \cdot \pi \cdot D_{\text{ст}} \cdot b_0 \cdot q_{\text{обж}} = 0.5 \cdot 3.1416 \cdot 113 \cdot 7 \cdot 69 = 85732 \text{ Н}$

**Расчетная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для герметизации в рабочих условиях (нагрузки + давление, без учета температурной нагрузки)**

$$\eta = y_n + y_6 + y_{\text{ф}}' \cdot b'^{1/2} + y_{\text{ф}}'' \cdot b''^{1/2} = 0 + 0.27619 \cdot 10^{-6} + 0.21317 \cdot 10^{-4} \cdot 23.5^2 + 0.18199 \cdot 10^{-4} \cdot 23.5^2 = 0.65705 \cdot 10^{-6} \text{ мм/Н}$$

Коэффициенты жёсткости для фланцевого соединения, нагруженного внутренним давлением и внешней осевой силой:

$$\alpha = 1 - \frac{y_n - (y_{\text{ф}}' \cdot e' \cdot b' + y_{\text{ф}}'' \cdot e'' \cdot b'')}{\eta}$$

$$= 1 - (0 - (0.21317 \cdot 10^{-4} \cdot 11.928 \cdot 23.5 + 0.18199 \cdot 10^{-4} \cdot 11.928 \cdot 23.5)) / 0.65705 \cdot 10^{-6} = 1.2942$$

Коэффициенты жёсткости для фланцевого соединения, нагруженного внешним изгибающим моментом:

$$\alpha_M = \frac{y_6 + y_{\text{фМ}}' \cdot b' \cdot \left(b' + e' - \frac{e'^2}{D_{\text{ст}}}\right) + y_{\text{фМ}}'' \cdot b'' \cdot \left(b'' + e'' - \frac{e''^2}{D_{\text{ст}}}\right)}{y_6 + y_n \cdot \left(\frac{D_6}{D_{\text{ст}}}\right)^2 + y_{\text{фМ}}' \cdot b'^{1/2} + y_{\text{фМ}}'' \cdot b''^{1/2}}$$

$$= [0.27619 \cdot 10^{-6} + 0.16686 \cdot 10^{-4} \cdot 23.5 \cdot (23.5 + 11.928 - 11.928^2 / 113) + 0.10749 \cdot 10^{-4} \cdot 23.5 \cdot (23.5 + 11.928 - 11.928^2 / 113)] / [0.27619 \cdot 10^{-6} + 0 \cdot (160 / 113)^2 + 0.16686 \cdot 10^{-4} \cdot 23.5^2 + 0.16686 \cdot 10^{-4} \cdot 23.5^2] = 1.2221$$

$$P_{61} = \alpha \cdot (Q_d + F) + R_n + \frac{4 \cdot \alpha_M \cdot |M|}{D_{\text{ст}}} = 1.2942 \cdot (16479 + 0) + 12256 + 4 \cdot 1.2221 \cdot |0| / 113 = 33583 \text{ Н}$$

**Расчетная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для герметизации в рабочих условиях (только давление, без учета температурной нагрузки)**

						90651-20600-AM-02-220 РР	Лист
							207
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата			

НЕФТЕХИМПРОЕКТ NEFTECHIMPROEKT			МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ			РР	
<div>Этот документ является собственностью "НЕФТЕХИМПРОЕКТ" и не подлежит копированию и распространению без его согласия</div> <div><math display="block">P_{\epsilon 1} = \alpha \cdot (Q_{\text{д}} + F) + R_{\text{п}} + \frac{4 \cdot \alpha_{\text{м}} \cdot  M }{D_{\text{от}}} \quad 1.2942 \cdot (16479 + 0) + 12256 + 4 \cdot 1.2221 \cdot  0  / 113 = 33583 \text{ Н}</math><p>Суммарная площадь сечения болтов (шпилек) по внутреннему диаметру резьбы или сечению наименьшего диаметра:</p><math display="block">A_{\epsilon} = n \cdot f_{\epsilon} = 8 \cdot 144 = 1152 \text{ мм}^2</math><p>Расчётная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для обжатия прокладки и минимального начального натяжения болтов:</p><math display="block">P_{\epsilon 2} = \max \{ P_{\text{обж}}; 0.4 \cdot A_{\epsilon} \cdot [\sigma]_{\epsilon}^{20} \} = \max \{ 85732; 0.4 \cdot 1152 \cdot 230 = 1.0598 \cdot 10^5 \} = 1.0598 \cdot 10^5 \text{ Н}</math><p><b>Расчёт без учета стесненности температурных деформаций</b></p><p><b>Расчёт болтов(шпилек):</b></p><p>Коэффициент увеличения допускаемых напряжений при затяжке: <math>\xi = 1.2</math></p><p>Коэффициент условий работы: <math>K_{\text{уп}} = 1</math></p><p>Коэффициент условий затяжки: <math>K_{\text{уз}} = 1</math></p><p>Коэффициент учета нагрузки от температурных деформаций: <math>K_{\text{ут}} = 1</math></p><p>Допускаемые напряжения для болтов (шпилек) при затяжке :</p><math display="block">[\sigma]_{\epsilon}^{\text{м}} = \xi \cdot K_{\text{уп}} \cdot K_{\text{уз}} \cdot K_{\text{ут}} \cdot [\sigma]_{\epsilon}^{20} = 1.2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 230 = 276 \text{ МПа}</math><p>Болтовая нагрузка в условиях затяжки :</p><math display="block">P_{\epsilon}^{\text{м}} = \max \{ P_{\epsilon 1}; P_{\epsilon 2} \} = \max \{ 33583; 1.0598 \cdot 10^5 \} = 1.0598 \cdot 10^5 \text{ Н}</math><p>Условие прочности при затяжке:</p><math display="block">\sigma_{\epsilon 1} = \frac{P_{\epsilon}^{\text{м}}}{A_{\epsilon}} \leq [\sigma]_{\epsilon}^{\text{м}}</math><math display="block">\sigma_{\epsilon 1} = \frac{P_{\epsilon}^{\text{м}}}{A_{\epsilon}} = 1.0598 \cdot 10^5 / 1152 = 92 \text{ МПа}</math><p>Крутящий момент при затяжке болтов (шпилек) без смазки при <math>\sigma_{\epsilon 1} &lt; 120 \text{ МПа}</math>:</p><math display="block">M_{\text{кр}} = 0.3 \cdot \frac{P_{\epsilon}^{\text{м}} \cdot d}{n} = 0.3 \cdot 1.0598 \cdot 10^5 \cdot 16 / 8 = 63.59 \text{ Н} \cdot \text{м}</math><p>При наличии смазки величина <math>M_{\text{кр}}</math> снижается на 25% и составляет <math>0.75 \cdot M_{\text{кр}} = 47.693 \text{ Н} \cdot \text{м}</math></p><p><math>92 \text{ МПа} \leq 276 \text{ МПа}</math>, <b>Условие прочности выполнено.</b></p><p>Допускаемые напряжения для болтов (шпилек) при рабочих условиях:</p><math display="block">[\sigma]_{\epsilon}^{\text{р}} = K_{\text{уп}} \cdot K_{\text{уз}} \cdot K_{\text{ут}} \cdot [\sigma]_{\epsilon} = 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 230 = 230 \text{ МПа}</math><p>Болтовая нагрузка в рабочих условиях :</p><math display="block">P_{\epsilon}^{\text{р}} = P_{\epsilon}^{\text{м}} + (1 - \alpha) \cdot (Q_{\text{д}} + F) + \frac{4 \cdot (1 - \alpha_{\text{м}}) \cdot  M }{D_{\text{от}}} = 1.0598 \cdot 10^5 + (1 - 1.2942) \cdot (16479 + 0) + 4 \cdot (1 - 1.2221) \cdot  0  / 113 = 1.0114 \cdot 10^5 \text{ Н}</math><p>Условие прочности в рабочих условиях:</p><math display="block">\sigma_{\epsilon 2} = \frac{P_{\epsilon}^{\text{р}}}{A_{\epsilon}} \leq [\sigma]_{\epsilon}^{\text{р}}</math><math display="block">\sigma_{\epsilon 2} = \frac{P_{\epsilon}^{\text{р}}}{A_{\epsilon}} = 1.0114 \cdot 10^5 / 1152 = 87.791 \text{ МПа}</math><p><math>87.791 \text{ МПа} \leq 230 \text{ МПа}</math>, <b>Условие прочности выполнено.</b></p><p><b>Расчёт первого фланца:</b></p><p>Коэффициент, учитывающий изгиб тарелки фланца между шпильками:</p><math display="block">C_{\text{ф}} = \max \left\{ 1; \sqrt{\frac{\frac{\pi \cdot D_{\epsilon}}{n}}{2 \cdot d + \frac{6 \cdot h}{m + 0.5}}} \right\} = \max \{ 1; (3.1416 \cdot 160 / 8 / (2 \cdot 16 + 6 \cdot 19 / (3 + 0.5)))^{1/2} \} = 1</math></div>							
Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	90651-20600-AM-02-220 РР				Лист
							208
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата			

90651-20600-AM-02-220 РР. изм.0.docx

Формат А4



Окружное напряжение в тарелке в рабочих условиях :

$$\sigma_T^P = \frac{\beta_Y \cdot M^P}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^P = 2.2665 \cdot 2573.2 / (19^2 \cdot 78) - 1.381 \cdot 106.72 = 59.757 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_1$  (+):

$$\sigma_{1mm}^{P+} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_1}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = (0.785 \cdot 78^2 \cdot 1.644 + 0 + 4 \cdot 0 / (78 + 16)) / (3.1416 \cdot (78 + 16) \cdot (16 - 3)) = 2.0452 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_1$  (п. 8.5.1):

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P+} + \sigma_R^P \right|, \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P+} + \sigma_T^P \right|, \left| \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^{P+} \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_M$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P+} + \sigma_R^P \right|, \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P+} + \sigma_T^P \right|, \left| \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^{P+} \right| \right\} = \max \{ |103.66 - 2.0452 + 106.72|; |103.66 - 2.0452 + 59.757|; |103.66 + 2.0452| \} = 208.33 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_M = 1.5 \cdot [\sigma]_\Phi = 1.5 \cdot 144 = 216 \text{ МПа}$$

$$K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_M = 1.2 \cdot 1 \cdot 216 = 259.2 \text{ МПа}$$

208.33 МПа ≤ 259.2 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_1$  (-):

$$\sigma_{1mm}^{P-} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F - \frac{4 \cdot M}{D + s_1}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = (0.785 \cdot 78^2 \cdot 1.644 + 0 - 4 \cdot 0 / (78 + 16)) / (3.1416 \cdot (78 + 16) \cdot (16 - 3)) = 2.0452 \text{ МПа}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P-} + \sigma_R^P \right|, \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P-} + \sigma_T^P \right|, \left| \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^{P-} \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_M$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P-} + \sigma_R^P \right|, \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P-} + \sigma_T^P \right|, \left| \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^{P-} \right| \right\} = \max \{ |103.66 - 2.0452 + 106.72|; |103.66 - 2.0452 + 59.757|; |103.66 + 2.0452| \} = 208.33 \text{ МПа}$$

208.33 МПа ≤ 259.2 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_0^M = f \cdot \sigma_1^M = 1 \cdot 100.33 = 100.33 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении  $s_0$  (п. 8.5.2):

$$\sigma_0^M \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R^{20}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_R^{20} = 3 \cdot [\sigma]_\Phi^{20} = 3 \cdot 164.5 = 493.5 \text{ МПа}$$

$$1.3 \cdot [\sigma]_R^{20} = 1.3 \cdot 493.5 = 641.55 \text{ МПа}$$

100.33 МПа ≤ 641.55 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_0^P = f \cdot \sigma_1^P = 1 \cdot 103.66 = 103.66 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_0$  (+):

$$\sigma_{0mm}^{P+} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_0}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = (0.785 \cdot 78^2 \cdot 1.644 + 0 + 4 \cdot 0 / (78 + 6)) / (3.1416 \cdot (78 + 6) \cdot (6 - 3)) = 9.9175 \text{ МПа}$$

Окружное мембранное напряжение от действия давления во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_{0mo}^P = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s_0 - c)} = 1.644 \cdot 78 / (2 \cdot (6 - 3)) = 21.372 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P+} \right|, \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|, \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P+} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P+} \right|, \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|, \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P+} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} = \max \{ |103.66 \pm 9.9175|; |0.3 \cdot 103.66 \pm 21.372|; |0.7 \cdot 103.66 \pm (9.9175 - 21.372)| \} = 113.57 \text{ МПа}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_R = 3 \cdot [\sigma]_\Phi = 3 \cdot 144 = 432 \text{ МПа}$$

Взам. инв. №					
Подп. и дата					
Инв. № подл.					
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	90651-20600-AM-02-220 РР
					Лист
					210

$$1.3 \cdot [\sigma]_R = 1.3 \cdot 432 = 561.6 \text{ МПа}$$

113.57 МПа ≤ 561.6 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_0$  (–):

$$\sigma_{0mm}^{P-} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F - \frac{4 \cdot M}{D + s_0}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = (0.785 \cdot 78^2 \cdot 1.644 + 0 - 4 \cdot 0 / (78 + 6)) / (3.1416 \cdot (78 + 6) \cdot (6 - 3)) = 9.9175 \text{ МПа}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P-} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P-} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P-} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P-} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} = \max \{ |103.66 \pm 9.9175|; |0.3 \cdot 103.66 \pm 21.372|; |0.7 \cdot 103.66 \pm (9.9175 - 21.372)| \}$$

$$= 113.57 \text{ МПа}$$

113.57 МПа ≤ 561.6 МПа, **Условие прочности выполнено.**

**Расчет в сечении  $s_0$  в рабочих условиях (п. 8.5.5 ГОСТ 34233.4-2017):**

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $S_0$ :

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0mo}^P \right|; \left| \sigma_{0mm}^P \right| \right\} \leq [\sigma]_\Phi$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0mo}^P \right|; \left| \sigma_{0mm}^P \right| \right\} = \max \{ |21.372|; |9.9175| \} = 21.372 \text{ МПа}$$

21.372 МПа ≤ 144 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Условие статической прочности при затяжке для тарелок:

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_T^M \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_\Phi^{20}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_T^M \right| \right\} = \max \{ |103.29|; |57.838| \} = 103.29 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_\Phi^{20} = 1 \cdot 164.5 = 164.5 \text{ МПа}$$

103.29 МПа ≤ 164.5 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Условие статической прочности в рабочих условиях для тарелок:

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_T^P \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_\Phi$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_T^P \right| \right\} = \max \{ |106.72|; |59.757| \} = 106.72 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_\Phi = 1 \cdot 144 = 144 \text{ МПа}$$

106.72 МПа ≤ 144 МПа, **Условие прочности выполнено.**

### Жёсткость фланца:

Угол поворота фланца в рабочих условиях:

$$\Theta = M^P \cdot y_\Phi \cdot \frac{E^{20}}{E} = 2573.2 \cdot 0.21317 \cdot 10^{-4} \cdot 1.99 \cdot 10^5 / 1.91 \cdot 10^5 = 0.057150^\circ$$

Допускаемый угол поворота фланца:

$$[\Theta] = 0.34377^\circ$$

Коэффициент увеличения допускаемого угла поворота фланцев:  $K_\Theta = 1$

Условие выполнения жесткости фланцев:

$$\Theta \leq K_\Theta \cdot [\Theta] = 1 \cdot 0.34377 = 0.34377^\circ$$

**Условие жёсткости выполнено.**

### Расчёт второго фланца:

Коэффициент, учитывающий изгиб тарелки фланца между шпильками:

$$C_F = \max \left\{ 1; \sqrt{\frac{\frac{\pi \cdot D_\Phi}{n} \cdot \frac{6 \cdot h}{m + 0.5}}{2 \cdot d + \frac{6 \cdot h}{m + 0.5}}} \right\} = \max \{ 1; (3.1416 \cdot 160 / 8 / (2 \cdot 16 + 6 \cdot 22 / (3 + 0.5)))^{1/2} \} = 1$$

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при затяжке:

$$M^M = C_F \cdot P_\Phi^M \cdot b = 1 \cdot 1.0598 \cdot 10^5 \cdot 23.5 = 2490.6 \text{ Н·м}$$

Взам. инв. №	Коэффициент увеличения допускаемого угла поворота фланцев. $K_{\Theta} = 1$ Условие выполнения жесткости фланцев : $\Theta \leq K_{\Theta} \cdot [\Theta] = 1 * 0.34377 = 0.34377^{\circ}$ <b>Условие жёсткости выполнено.</b>				
	<b>Расчёт второго фланца:</b> Коэффициент, учитывающий изгиб тарелки фланца между шпильками: $C_F = \max \left\{ 1; \sqrt{\frac{\frac{\pi \cdot D_6}{n}}{2 \cdot d + \frac{6 \cdot h}{m + 0.5}}} \right\} = \max\{1; (3.1416 * 160 / 8 / (2 * 16 + 6 * 22 / (3 + 0.5)))^{1/2}\} = 1$ Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при затяжке : $M^M = C_F \cdot P_g^M \cdot b = 1 * 1.0598 \cdot 10^5 * 23.5 = 2490.6 \text{ Н}\cdot\text{м}$				
Подп. и дата					
Инв. № подл.					
90651-20600-AM-02-220 PP					
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	Лист
					211

$$f = \max \left\{ \frac{C_{36}}{1+A}, 1.0 \right\} = \max\{1.5034 / (1 + 1.6667); 1.0\} = 1$$

$$D^* = D + c + s_1 \text{ при } (D + 2 \cdot c) < 20 \cdot (s_1 - c) \text{ и } f = 1 = 78 + 0 + 16 \text{ при } 78 < 20 \cdot (16 - 0) \text{ и } f = 1 = 94 \text{ мм}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении  $s_1$ :

$$\sigma_1^M = \frac{M^M}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D^*} = 2490.6 / (1.8304 \cdot (16 - 3)^2 \cdot 94) = 85.653 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в условиях затяжки :

$$\sigma_R^M = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + 1.0}{\lambda \cdot h^2 \cdot 1.0 \cdot D} \cdot M^M = (1.33 \cdot 0.70613 \cdot 22 + 21.633) / (1.8304 \cdot 22^2 \cdot 21.633 \cdot 78) \cdot 2490.6 = 70.466 \text{ МПа}$$

$$\beta_Y = \frac{1}{K-1} \cdot \left( 0.69 + 5.72 \cdot \frac{K^2 \cdot \lg K}{K^2 - 1} \right) = 1 / (2.5 - 1) \cdot (0.69 + 5.72 \cdot 2.5^2 \cdot \lg 2.5 / (2.5^2 - 1)) = 2.2665$$

$$\beta_Z = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = (2.5^2 + 1) / (2.5^2 - 1) = 1.381$$

Окружное напряжение в тарелке в условиях затяжки :

$$\sigma_T^M = \frac{\beta_Y \cdot M^M}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^M = 2.2665 \cdot 2490.6 / (22^2 \cdot 78) - 1.381 \cdot 70.466 = 52.219 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении  $s_1$  (п. 8.5.1):

$$\max \{ |\sigma_1^M + \sigma_R^M|; |\sigma_1^M + \sigma_T^M| \} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_M^{20}$$

$$\max \{ |\sigma_1^M + \sigma_R^M|; |\sigma_1^M + \sigma_T^M| \} = \max\{|85.653 + 70.466|; |85.653 + 52.219|\} = 156.12 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_M^{20} = 1.5 \cdot [\sigma]_F^{20} = 1.5 \cdot 164.5 = 246.75 \text{ МПа}$$

$$K = \frac{D_H}{D} = 195 / 78 = 2.5$$

Коэффициент учета размеров тарелки фланца:  $K_S = 1.2$

$$K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_M^{20} = 1.2 \cdot 1 \cdot 246.75 = 296.1 \text{ МПа}$$

156.12 МПа ≤ 296.1 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Приведенная нагрузка от внешней силы и момента :

$$Q_{FM}^+ = F + \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{фл}}} = 0 + 4 \cdot |0| / 113 = 0 \text{ Н}$$

$$Q_{FM}^- = F - \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{фл}}} = 0 - 4 \cdot |0| / 113 = 0 \text{ Н}$$

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при рабочих условиях:

$$M^P = C_F \cdot \max \{ F_F^P \cdot b + (Q_{\text{д}} + Q_{FM}) \cdot e; |Q_{\text{д}} + Q_{FM}| \cdot e \} = \frac{1 \cdot \max\{1.0114 \cdot 10^5 \cdot 23.5 + (16479 + 0) \cdot 11.928; |16479 + 0| \cdot 11.928\}}{11.928} = 2573.2 \text{ Н·м}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_1$ :

$$\sigma_1^P = \frac{M^P}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D^*} = 2573.2 / (1.8304 \cdot (16 - 3)^2 \cdot 94) = 88.495 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в рабочих условиях :

$$\sigma_R^P = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + 1.0}{\lambda \cdot h^2 \cdot 1.0 \cdot D} \cdot M^P = (1.33 \cdot 0.70613 \cdot 22 + 21.633) / (1.8304 \cdot 22^2 \cdot 21.633 \cdot 78) \cdot 2573.2 = 72.804 \text{ МПа}$$

Окружное напряжение в тарелке в рабочих условиях :

$$\sigma_T^P = \frac{\beta_Y \cdot M^P}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^P = 2.2665 \cdot 2573.2 / (22^2 \cdot 78) - 1.381 \cdot 72.804 = 53.952 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_1$  (+):

Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	90651-20600-AM-02-220 РР	Лист
Взам. инв. №						
Подп. и дата						
Инв. № подл.						212

$$\sigma_{\text{Iмм}}^{P+} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_1}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = (0.785 \cdot 78^2 \cdot 1.644 + 0 + 4 \cdot 0 / (78 + 16)) / (3.1416 \cdot (78 + 16) \cdot (16 - 3)) = 2.0452 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_1$  (п. 8.5.1):

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{Iмм}}^{P+} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{Iмм}}^{P+} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{\text{Iмм}}^{P+} \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{м}}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{Iмм}}^{P+} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{Iмм}}^{P+} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{\text{Iмм}}^{P+} \right| \right\} = \frac{\max\{88.495 - 2.0452 + 72.804; |88.495 - 2.0452 + 53.952|; |88.495 + 2.0452|\}}{1} = 159.25 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_{\text{м}} = 1.5 \cdot [\sigma]_{\text{ф}} = 1.5 \cdot 144 = 216 \text{ МПа}$$

$$K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{м}} = 1.2 \cdot 1 \cdot 216 = 259.2 \text{ МПа}$$

159.25 МПа ≤ 259.2 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_1$  (–):

$$\sigma_{\text{Iмм}}^{P-} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F - \frac{4 \cdot M}{D + s_1}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = (0.785 \cdot 78^2 \cdot 1.644 + 0 - 4 \cdot 0 / (78 + 16)) / (3.1416 \cdot (78 + 16) \cdot (16 - 3)) = 2.0452 \text{ МПа}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{Iмм}}^{P-} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{Iмм}}^{P-} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{\text{Iмм}}^{P-} \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{м}}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{Iмм}}^{P-} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{Iмм}}^{P-} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{\text{Iмм}}^{P-} \right| \right\} = \frac{\max\{88.495 - 2.0452 + 72.804; |88.495 - 2.0452 + 53.952|; |88.495 + 2.0452|\}}{1} = 159.25 \text{ МПа}$$

159.25 МПа ≤ 259.2 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_0^M = f \cdot \sigma_1^M = 1 \cdot 85.653 = 85.653 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении  $s_0$  (п. 8.5.2):

$$\sigma_0^M \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R^{20}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_R^{20} = 3 \cdot [\sigma]_{\text{ф}}^{20} = 3 \cdot 164.5 = 493.5 \text{ МПа}$$

$$1.3 \cdot [\sigma]_R^{20} = 1.3 \cdot 493.5 = 641.55 \text{ МПа}$$

85.653 МПа ≤ 641.55 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_0^P = f \cdot \sigma_1^P = 1 \cdot 88.495 = 88.495 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_0$  (+):

$$\sigma_{0\text{мм}}^{P+} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_0}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = (0.785 \cdot 78^2 \cdot 1.644 + 0 + 4 \cdot 0 / (78 + 6)) / (3.1416 \cdot (78 + 6) \cdot (6 - 3)) = 9.9175 \text{ МПа}$$

Окружное мембранное напряжение от действия давления во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_{0\text{мо}}^P = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s_0 - c)} = 1.644 \cdot 78 / (2 \cdot (6 - 3)) = 21.372 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0\text{мм}}^{P+} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0\text{мо}}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0\text{мм}}^{P+} - \sigma_{0\text{мо}}^P) \right| \right\} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0\text{мм}}^{P+} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0\text{мо}}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0\text{мм}}^{P+} - \sigma_{0\text{мо}}^P) \right| \right\} = \frac{\max\{88.495 \pm 9.9175; |0.3 \cdot 88.495 \pm 21.372|; |0.7 \cdot 88.495 \pm (9.9175 - 21.372)|\}}{1} = 98.412 \text{ МПа}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_R = 3 \cdot [\sigma]_{\text{ф}} = 3 \cdot 144 = 432 \text{ МПа}$$

$$1.3 \cdot [\sigma]_R = 1.3 \cdot 432 = 561.6 \text{ МПа}$$

98.412 МПа ≤ 561.6 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_0$  (–):

Взам. инв. №					
Подп. и дата					
Инв. № подл.					
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	

90651-20600-AM-02-220 РР

Лист

213







Нагрузка от температурных деформаций :

$$Q_t = \gamma \cdot \left( \begin{aligned} &(\alpha'_{\Phi} \cdot h' + \alpha'_{\text{ш}} \cdot h'_{\text{ш}}) \cdot (t_{\Phi 1} - 20^{\circ}\text{C}) + \\ &+ (\alpha''_{\Phi} \cdot h'' + \alpha''_{\text{ш}} \cdot h''_{\text{ш}}) \cdot (t_{\Phi 2} - 20^{\circ}\text{C}) + \\ &+ \alpha_p \cdot s_{\text{pn}} \cdot (t_p - 20^{\circ}\text{C}) - \\ &- \alpha_{\varepsilon} \cdot (h' + h'' + s_{\text{pn}} + h'_{\text{ш}} + h''_{\text{ш}}) \cdot (t_{\varepsilon} - 20^{\circ}\text{C}) \end{aligned} \right)$$

$$P_{61} = \max \left\{ \begin{array}{l} \alpha \cdot (Q_{\pi} + F) + R_{\pi} + \frac{4 \cdot \alpha_M \cdot |M|}{D_{\pi}} \\ \alpha \cdot (Q_{\pi} + F) + R_{\pi} + \frac{4 \cdot \alpha_M \cdot |M|}{D_{\pi}} - Q_t \end{array} \right\} = \max \left\{ \begin{array}{l} 1.2942 \cdot (16479 + 0) + 12256 + 4 \cdot 1.2221 \cdot |0| / 113 = 335831.2942 \\ (16479 + 0) + 12256 + 4 \cdot 1.2221 \cdot |0| / 113 - (-11488) = 45071 \end{array} \right\} = 45071 \text{ H}$$

Болтовая нагрузка в условиях затяжки :

$$P_s^M = \max\{P_{b1}; P_{b2}\} = \max\{45071; 1.0598 \cdot 10^5\} = 1.0598 \cdot 10^5 \text{ H}$$

Условие прочности при затяжке:

$$\sigma_{61} = \frac{P_6^m}{A_6} \leq [\sigma]_6^m$$

$$\sigma_{61} = \frac{P_6^M}{A_6} = 1.0598 \cdot 10^5 / 1152 = 92 \text{ МПа}$$

Крутящий момент при затяжке болтов (шпилек) без смазки при  $\sigma_{61} < 120$  МПа:

$$M_{\text{sp}} = 0.3 \cdot \frac{P_{\varepsilon}^m \cdot d}{n} = 0.3 \cdot 1.0598 \cdot 10^5 \cdot 16 / 8 = 63.59 \text{ H} \cdot \text{M}$$

При наличии смазки величина  $M_{кр}$  снижается на 25% и составляет  $0.75 \cdot M_{кр} = 47.693 \text{ Н} \cdot \text{м}$

$92 \text{ МПа} \leq 358.8 \text{ МПа}$ , **Условие прочности выполнено.**

Допускаемые напряжения для болтов (шпилек) при рабочих условиях:

$$[\sigma]_6^p = K_{\text{yn}} \cdot K_{\text{вз}} \cdot K_{\text{вг}} \cdot [\sigma]_6 = 1 * 1 * 1.3 * 230 = 299 \text{ МПа}$$

Болтовая нагрузка в рабочих условиях :

$$P_6^P = P_6^M + (1 - \alpha) \cdot (Q_{\pi} + F) + Q_t + \frac{4 \cdot (1 - \alpha_{\pi}) \cdot |M|}{D_{\pi}} = \frac{1.0598 \cdot 10^5}{113} + (1 - 1.2942) \cdot (16479 + 0) + (-11488) + 4 \cdot (1 - 1.2221) \cdot |0| / = 89647 \text{ H}$$

Условие прочности в рабочих условиях:

$$\sigma_{62} = \frac{P_6^P}{A_6} \leq [\sigma]_6^P$$

$$\sigma_{62} = \frac{P_6^p}{A_6} = 89647 / 1152 = 77.819 \text{ МПа}$$

$77.819 \text{ МПа} \leq 299 \text{ МПа}$ , **Условие прочности выполнено.**

### Расчёт первого фланца:

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при затяжке :

$$M^M = C_F \cdot P_6^M \cdot b = 1 \cdot 1.0598 \cdot 10^5 \cdot 23.5 = 2490.6 \text{ H} \cdot \text{m}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении  $s_1$ :

$$\sigma_1^{\pi} = \frac{M^{\pi}}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D^*} = \frac{2490.6}{1.5627 \cdot (16 - 3)^2 \cdot 94} = 100.33 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в условиях затяжки :

$$\sigma_R^M = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + l_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot l_0 \cdot D} \cdot M^M = (1.33 \cdot 0.70613 \cdot 19 + 21.633) / (1.5627 \cdot 19^2 \cdot 21.633 \cdot 78) \cdot 2490.6 = 103.29 \text{ МПа}$$

Взам. инв. №	77.819 МПа ≤ 299 МПа, <b>Условие прочности выполнено.</b>			
	<p><b>Расчёт первого фланца:</b></p> <p>Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при затяжке :</p> $M^M = C_F \cdot P_6^M \cdot b = 1 \cdot 1.0598 \cdot 10^5 \cdot 23.5 = 2490.6 \text{ Н} \cdot \text{м}$ <p>Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении s<sub>1</sub>:</p> $\sigma_1^M = \frac{M^M}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D} = 2490.6 / (1.5627 \cdot (16 - 3)^2 \cdot 94) = 100.33 \text{ МПа}$ <p>Радиальное напряжение в тарелке в условиях затяжки :</p> $\sigma_R^M = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + 1_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot 1_0 \cdot D} \cdot M^M = (1.33 \cdot 0.70613 \cdot 19 + 21.633) / (1.5627 \cdot 19^2 \cdot 21.633 \cdot 78) \cdot 2490.6 = 103.29 \text{ МПа}$			
Подп. и дата				
Инв. № подл.				

Окружное напряжение в тарелке в условиях затяжки :

$$\sigma_T^M = \frac{\beta_Y \cdot M^M}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^M = 2.2665 \cdot 2490.6 / (19^2 \cdot 78) - 1.381 \cdot 103.29 = 57.838 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении  $s_1$  (п. 8.5.1):

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^M + \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_1^M + \sigma_T^M \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_M^M$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^M + \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_1^M + \sigma_T^M \right| \right\} = \max \{100.33 + 103.29; |100.33 + 57.838|\} = 203.62 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_M^M = 1.5 \cdot [\sigma]_F^M = 1.5 \cdot 164.5 = 246.75 \text{ МПа}$$

Коэффициент учета размеров тарелки фланца:  $K_S = 1.2$

Коэффициент увеличения допускаемых напряжений при расчёте с учетом стесненности температурных деформаций:  $K_T = 1.3$

$$K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_M^M = 1.2 \cdot 1.3 \cdot 246.75 = 384.93 \text{ МПа}$$

203.62 МПа  $\leq$  384.93 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Болтовая нагрузка в рабочих условиях :

$$P_6^P = P_6^M + (1 - \alpha) \cdot (Q_d + F) + Q_t + \frac{4 \cdot (1 - \alpha_M) \cdot |M|}{D_{\text{от}}} = \frac{1.0598 \cdot 10^5}{113} + (1 - 1.2942) \cdot (16479 + 0) + (-11488) + 4 \cdot (1 - 1.2221) \cdot |0| / 113 = 89647 \text{ Н}$$

Приведенная нагрузка от внешней силы и момента :

$$Q_{FM}^+ = F + \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{от}}} = 0 + 4 \cdot |0| / 113 = 0 \text{ Н}$$

$$Q_{FM}^- = F - \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{от}}} = 0 - 4 \cdot |0| / 113 = 0 \text{ Н}$$

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при рабочих условиях:

$$M^P = C_F \cdot \max \{ P_6^P \cdot b + (Q_d + Q_{FM}^-) \cdot e; |Q_d + Q_{FM}^-| \cdot e \} = 1 \cdot \max \{ 89647 \cdot 23.5 + (16479 + 0) \cdot 11.928; |16479 + 0| \cdot 11.928 \} = 2303.3 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_1$ :

$$\sigma_1^P = \frac{M^P}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D} = 2303.3 / (1.5627 \cdot (16 - 3)^2 \cdot 94) = 92.781 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в рабочих условиях :

$$\sigma_R^P = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + 1_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot 1_0 \cdot D} \cdot M^P = (1.33 \cdot 0.70613 \cdot 19 + 21.633) / (1.5627 \cdot 19^2 \cdot 21.633 \cdot 78) \cdot 2303.3 = 95.521 \text{ МПа}$$

Окружное напряжение в тарелке в рабочих условиях :

$$\sigma_T^P = \frac{\beta_Y \cdot M^P}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^P = 2.2665 \cdot 2303.3 / (19^2 \cdot 78) - 1.381 \cdot 95.521 = 53.487 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_1$  (+):

$$\sigma_{1mm}^{P+} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_1}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = (0.785 \cdot 78^2 \cdot 1.644 + 0 + 4 \cdot 0 / (78 + 16)) / (3.1416 \cdot (78 + 16) \cdot (16 - 3)) = 2.0452 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_1$  (п. 8.5.1):

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P+} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P+} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^{P+} \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_M$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P+} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P+} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^{P+} \right| \right\} = \max \{ |92.781 - 2.0452 + 95.521|; |92.781 - 2.0452 + 53.487|; |92.781 + 2.0452| \} = 186.26 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_M = 1.5 \cdot [\sigma]_F = 1.5 \cdot 144 = 216 \text{ МПа}$$

$$K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_M = 1.2 \cdot 1.3 \cdot 216 = 336.96 \text{ МПа}$$

186.26 МПа  $\leq$  336.96 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_1$  (-):

Взам. инв. №					
Подп. и дата					
Инв. № подл.					
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	

90651-20600-AM-02-220 РР

Лист

216

$$\sigma_{\text{Iмм}}^{\text{P-}} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F - \frac{4 \cdot M}{D + s_1}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = (0.785 \cdot 78^2 \cdot 1.644 + 0 - 4 \cdot 0 / (78 + 16)) / (3.1416 \cdot (78 + 16) \cdot (16 - 3)) = 2.0452 \text{ МПа}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^{\text{P}} - \sigma_{\text{Iмм}}^{\text{P-}} + \sigma_{\text{R}}^{\text{P}} \right|, \left| \sigma_1^{\text{P}} - \sigma_{\text{Iмм}}^{\text{P-}} + \sigma_{\text{T}}^{\text{P}} \right|, \left| \sigma_1^{\text{P}} + \sigma_{\text{Iмм}}^{\text{P-}} \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{R}}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^{\text{P}} - \sigma_{\text{Iмм}}^{\text{P-}} + \sigma_{\text{R}}^{\text{P}} \right|, \left| \sigma_1^{\text{P}} - \sigma_{\text{Iмм}}^{\text{P-}} + \sigma_{\text{T}}^{\text{P}} \right|, \left| \sigma_1^{\text{P}} + \sigma_{\text{Iмм}}^{\text{P-}} \right| \right\} = \frac{\max\{92.781 - 2.0452 + 95.521; |92.781 - 2.0452 + 53.487|; |92.781 + 2.0452|\}}{|92.781 + 2.0452|} = 186.26 \text{ МПа}$$

186.26 МПа ≤ 336.96 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_0^{\text{M}} = f \cdot \sigma_1^{\text{M}} = 1 \cdot 100.33 = 100.33 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении  $s_0$  (п. 8.5.2):

$$\sigma_0^{\text{M}} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_{\text{R}}^{20}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_{\text{R}}^{20} = 3 \cdot [\sigma]_{\text{ф}}^{20} = 3 \cdot 164.5 = 493.5 \text{ МПа}$$

$$1.3 \cdot [\sigma]_{\text{R}}^{20} = 1.3 \cdot 493.5 = 641.55 \text{ МПа}$$

100.33 МПа ≤ 641.55 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_0^{\text{P}} = f \cdot \sigma_1^{\text{P}} = 1 \cdot 92.781 = 92.781 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_0$  (+):

$$\sigma_{0\text{мм}}^{\text{P+}} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_0}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = (0.785 \cdot 78^2 \cdot 1.644 + 0 + 4 \cdot 0 / (78 + 6)) / (3.1416 \cdot (78 + 6) \cdot (6 - 3)) = 9.9175 \text{ МПа}$$

Окружное мембранное напряжение от действия давления во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_{0\text{мо}}^{\text{P}} = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s_0 - c)} = 1.644 \cdot 78 / (2 \cdot (6 - 3)) = 21.372 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^{\text{P}} \pm \sigma_{0\text{мм}}^{\text{P+}} \right|, \left| 0.3 \cdot \sigma_0^{\text{P}} \pm \sigma_{0\text{мо}}^{\text{P}} \right|, \left| 0.7 \cdot \sigma_0^{\text{P}} \pm (\sigma_{0\text{мм}}^{\text{P+}} - \sigma_{0\text{мо}}^{\text{P}}) \right| \right\} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_{\text{R}}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^{\text{P}} \pm \sigma_{0\text{мм}}^{\text{P+}} \right|, \left| 0.3 \cdot \sigma_0^{\text{P}} \pm \sigma_{0\text{мо}}^{\text{P}} \right|, \left| 0.7 \cdot \sigma_0^{\text{P}} \pm (\sigma_{0\text{мм}}^{\text{P+}} - \sigma_{0\text{мо}}^{\text{P}}) \right| \right\} = \frac{\max\{92.781 \pm 9.9175; |0.3 \cdot 92.781 \pm 21.372|; |0.7 \cdot 92.781 \pm (9.9175 - 21.372)|\}}{|9.9175 - 21.372|} = 102.7 \text{ МПа}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_{\text{R}} = 3 \cdot [\sigma]_{\text{ф}} = 3 \cdot 144 = 432 \text{ МПа}$$

$$1.3 \cdot [\sigma]_{\text{R}} = 1.3 \cdot 432 = 561.6 \text{ МПа}$$

102.7 МПа ≤ 561.6 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_0$  (-):

$$\sigma_{0\text{мм}}^{\text{P-}} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F - \frac{4 \cdot M}{D + s_0}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = (0.785 \cdot 78^2 \cdot 1.644 + 0 - 4 \cdot 0 / (78 + 6)) / (3.1416 \cdot (78 + 6) \cdot (6 - 3)) = 9.9175 \text{ МПа}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^{\text{P}} \pm \sigma_{0\text{мм}}^{\text{P-}} \right|, \left| 0.3 \cdot \sigma_0^{\text{P}} \pm \sigma_{0\text{мо}}^{\text{P}} \right|, \left| 0.7 \cdot \sigma_0^{\text{P}} \pm (\sigma_{0\text{мм}}^{\text{P-}} - \sigma_{0\text{мо}}^{\text{P}}) \right| \right\} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_{\text{R}}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^{\text{P}} \pm \sigma_{0\text{мм}}^{\text{P-}} \right|, \left| 0.3 \cdot \sigma_0^{\text{P}} \pm \sigma_{0\text{мо}}^{\text{P}} \right|, \left| 0.7 \cdot \sigma_0^{\text{P}} \pm (\sigma_{0\text{мм}}^{\text{P-}} - \sigma_{0\text{мо}}^{\text{P}}) \right| \right\} = \frac{\max\{92.781 \pm 9.9175; |0.3 \cdot 92.781 \pm 21.372|; |0.7 \cdot 92.781 \pm (9.9175 - 21.372)|\}}{|9.9175 - 21.372|} = 102.7 \text{ МПа}$$

102.7 МПа ≤ 561.6 МПа, **Условие прочности выполнено.**

**Расчет в сечении  $s_0$  в рабочих условиях (п. 8.5.5 ГОСТ 34233.4-2017):**

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0\text{мо}}^{\text{P}} \right|, \left| \sigma_{0\text{мм}}^{\text{P}} \right| \right\} \leq [\sigma]_{\text{ф}}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0\text{мо}}^{\text{P}} \right|, \left| \sigma_{0\text{мм}}^{\text{P}} \right| \right\} = \max\{21.372; |9.9175|\} = 21.372 \text{ МПа}$$

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	<p>90651-20600-AM-02-220 РР</p>					Лист
								217
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата				

21.372 МПа ≤ 144 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Условие статической прочности при затяжке для тарелок:

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_T^M \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_{\Phi}^{20}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_T^M \right| \right\} = \max \{103.29; |57.838|\} = 103.29 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_{\Phi}^{20} = 1.3 \cdot 164.5 = 213.85 \text{ МПа}$$

103.29 МПа ≤ 213.85 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Условие статической прочности в рабочих условиях для тарелок:

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_T^P \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_{\Phi}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_T^P \right| \right\} = \max \{95.521; |53.487|\} = 95.521 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_{\Phi} = 1.3 \cdot 144 = 187.2 \text{ МПа}$$

95.521 МПа ≤ 187.2 МПа, **Условие прочности выполнено.**

### Жёсткость фланца:

Угол поворота фланца в рабочих условиях:

$$\Theta = M^P \cdot y_{\Phi} \cdot \frac{E^{20}}{E} = 2303.3 \cdot 0.21317 \cdot 10^{-4} \cdot 1.99 \cdot 10^5 / 1.91 \cdot 10^5 = 0.051154^{\circ}$$

Условие выполнения жесткости фланцев :

$$\Theta \leq K_{\Theta} \cdot [\Theta] = 1 \cdot 0.34377 = 0.34377^{\circ}$$

**Условие жёсткости выполнено.**

### Расчёт второго фланца:

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при затяжке :

$$M^M = C_F \cdot P_6^M \cdot b = 1 \cdot 1.0598 \cdot 10^5 \cdot 23.5 = 2490.6 \text{ Н·м}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении s<sub>1</sub>:

$$\sigma_1^M = \frac{M^M}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D} = 2490.6 / (1.8304 \cdot (16 - 3)^2 \cdot 94) = 85.653 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в условиях затяжки :

$$\sigma_R^M = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + 1_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot 1_0 \cdot D} \cdot M^M = (1.33 \cdot 0.70613 \cdot 22 + 21.633) / (1.8304 \cdot 22^2 \cdot 21.633 \cdot 78) \cdot 2490.6 = 70.466 \text{ МПа}$$

Окружное напряжение в тарелке в условиях затяжки :

$$\sigma_T^M = \frac{\beta_Y \cdot M^M}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^M = 2.2665 \cdot 2490.6 / (22^2 \cdot 78) - 1.381 \cdot 70.466 = 52.219 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении s<sub>1</sub> (п. 8.5.1):

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^M + \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_1^M + \sigma_T^M \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\Phi}^{20}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^M + \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_1^M + \sigma_T^M \right| \right\} = \max \{85.653 + 70.466; |85.653 + 52.219|\} = 156.12 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_{\Phi}^{20} = 1.5 \cdot [\sigma]_{\Phi}^{20} = 1.5 \cdot 164.5 = 246.75 \text{ МПа}$$

Коэффициент учета размеров тарелки фланца: K<sub>S</sub> = 1.2

$$K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\Phi}^{20} = 1.2 \cdot 1.3 \cdot 246.75 = 384.93 \text{ МПа}$$

156.12 МПа ≤ 384.93 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Приведенная нагрузка от внешней силы и момента :

$$Q_{FM}^+ = F + \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{ст}}} = 0 + 4 \cdot |0| / 113 = 0 \text{ Н}$$

$$Q_{FM}^- = F - \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{ст}}} = 0 - 4 \cdot |0| / 113 = 0 \text{ Н}$$

Взам. инв. №					
Подп. и дата					
Инв. № подл.					
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	

90651-20600-AM-02-220 РР

Лист

218

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при рабочих условиях:

$$M^P = C_F \cdot \max \{ P_F^P \cdot b + (Q_{\pi} + Q_{FM}) \cdot e; |Q_{\pi} + Q_{FM}| \cdot e \} = 1 \cdot \max \{ 89647 \cdot 23.5 + (16479 + 0) \cdot 11.928; |16479 + 0| \cdot 11.928 \} = 2303.3 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_1$ :

$$\sigma_1^P = \frac{M^P}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D} = \frac{2303.3}{1.8304 \cdot (16 - 3)^2 \cdot 94} = 79.21 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в рабочих условиях:

$$\sigma_R^P = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + 1_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot 1_0 \cdot D} \cdot M^P = \frac{(1.33 \cdot 0.70613 \cdot 22 + 21.633)}{(1.8304 \cdot 22^2 \cdot 21.633 \cdot 78)} \cdot 2303.3 = 65.166 \text{ МПа}$$

Окружное напряжение в тарелке в рабочих условиях:

$$\sigma_T^P = \frac{\beta_V \cdot M^P}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^P = \frac{2.2665 \cdot 2303.3}{(22^2 \cdot 78)} - 1.381 \cdot 65.166 = 48.291 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_1 (+)$ :

$$\sigma_{1mm}^{P+} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_1}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = \frac{(0.785 \cdot 78^2 \cdot 1.644 + 0 + 4 \cdot 0 / (78 + 16)) / (3.1416 \cdot (78 + 16) \cdot (16 - 3))}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = 2.0452 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_1$  (п. 8.5.1):

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P+} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P+} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^{P+} \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{ж}}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P+} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P+} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^{P+} \right| \right\} = \frac{\max \{ |79.21 - 2.0452 + 65.166|; |79.21 - 2.0452 + 48.291|; |79.21 + 2.0452| \}}{2.0452} = 142.33 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_{\text{ж}} = 1.5 \cdot [\sigma]_{\text{ф}} = 1.5 \cdot 144 = 216 \text{ МПа}$$

$$K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{ж}} = 1.2 \cdot 1.3 \cdot 216 = 336.96 \text{ МПа}$$

142.33 МПа ≤ 336.96 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_1 (-)$ :

$$\sigma_{1mm}^{P-} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F - \frac{4 \cdot M}{D + s_1}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = \frac{(0.785 \cdot 78^2 \cdot 1.644 + 0 - 4 \cdot 0 / (78 + 16)) / (3.1416 \cdot (78 + 16) \cdot (16 - 3))}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = 2.0452 \text{ МПа}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P-} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P-} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^{P-} \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{ж}}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P-} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P-} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^{P-} \right| \right\} = \frac{\max \{ |79.21 - 2.0452 + 65.166|; |79.21 - 2.0452 + 48.291|; |79.21 + 2.0452| \}}{2.0452} = 142.33 \text{ МПа}$$

142.33 МПа ≤ 336.96 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_0^M = f \cdot \sigma_1^M = 1 \cdot 85.653 = 85.653 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении  $s_0$  (п. 8.5.2):

$$\sigma_0^M \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R^{20}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_R^{20} = 3 \cdot [\sigma]_{\text{ф}}^{20} = 3 \cdot 164.5 = 493.5 \text{ МПа}$$

$$1.3 \cdot [\sigma]_R^{20} = 1.3 \cdot 493.5 = 641.55 \text{ МПа}$$

85.653 МПа ≤ 641.55 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_0^P = f \cdot \sigma_1^P = 1 \cdot 79.21 = 79.21 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_0 (+)$ :

$$\sigma_{0mm}^{P+} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_0}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = \frac{(0.785 \cdot 78^2 \cdot 1.644 + 0 + 4 \cdot 0 / (78 + 6)) / (3.1416 \cdot (78 + 6) \cdot (6 - 3))}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = 9.9175 \text{ МПа}$$

Взам. инв. №					
Подп. и дата					
Инв. № подл.					
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	

90651-20600-AM-02-220 РР

Лист

219

Окружное мембранное напряжение от действия давления во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_{0mo}^P = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s_0 - c)} = \frac{1.644 \cdot 78 / (2 \cdot (6 - 3))}{2 \cdot (6 - 3)} = 21.372 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P+} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P+} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P+} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P+} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} = \frac{\max\{79.21 \pm 9.9175; |0.3 \cdot 79.21 \pm 21.372|; |0.7 \cdot 79.21 \pm (9.9175 - 21.372)|\}}{(9.9175 - 21.372)} = 89.128 \text{ МПа}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_R = 3 \cdot [\sigma]_\Phi = 3 \cdot 144 = 432 \text{ МПа}$$

$$1.3 \cdot [\sigma]_R = 1.3 \cdot 432 = 561.6 \text{ МПа}$$

89.128 МПа ≤ 561.6 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_0$  (—):

$$\sigma_{0mm}^{P-} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F - \frac{4 \cdot M}{D + s_0}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = \frac{(0.785 \cdot 78^2 \cdot 1.644 + 0 - 4 \cdot 0 / (78 + 6)) / (3.1416 \cdot (78 + 6) \cdot (6 - 3))}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = 9.9175 \text{ МПа}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P-} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P-} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P-} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P-} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} = \frac{\max\{79.21 \pm 9.9175; |0.3 \cdot 79.21 \pm 21.372|; |0.7 \cdot 79.21 \pm (9.9175 - 21.372)|\}}{(9.9175 - 21.372)} = 89.128 \text{ МПа}$$

89.128 МПа ≤ 561.6 МПа, **Условие прочности выполнено.**

**Расчет в сечении  $s_0$  в рабочих условиях (п. 8.5.5 ГОСТ 34233.4-2017):**

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0mo}^P \right|; \left| \sigma_{0mm}^{P-} \right| \right\} \leq [\sigma]_\Phi$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0mo}^P \right|; \left| \sigma_{0mm}^{P-} \right| \right\} = \max\{21.372; |9.9175|\} = 21.372 \text{ МПа}$$

21.372 МПа ≤ 144 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Условие статической прочности при затяжке для тарелок:

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_T^M \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_\Phi^{20}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_T^M \right| \right\} = \max\{70.466; |52.219|\} = 70.466 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_\Phi^{20} = 1.3 \cdot 164.5 = 213.85 \text{ МПа}$$

70.466 МПа ≤ 213.85 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Условие статической прочности в рабочих условиях для тарелок:

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_T^P \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_\Phi$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_T^P \right| \right\} = \max\{65.166; |48.291|\} = 65.166 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_\Phi = 1.3 \cdot 144 = 187.2 \text{ МПа}$$

65.166 МПа ≤ 187.2 МПа, **Условие прочности выполнено.**

### Жёсткость фланца:

Угол поворота фланца в рабочих условиях:

$$\Theta = M^P \cdot y_\Phi \cdot \frac{E^{20}}{E} = 2303.3 \cdot 0.18199 \cdot 10^{-4} \cdot 1.99 \cdot 10^5 / 1.91 \cdot 10^5 = 0.043672^\circ$$

Условие выполнения жесткости фланцев:

$$\Theta \leq K_\Theta \cdot [\Theta] = 1 \cdot 0.34377 = 0.34377^\circ$$

**Условие жёсткости выполнено.**

### Расчет давления испытаний

Пробное давление при гидравлическом испытании, при работе элемента под внутренним давлением:

Взам. инв. №		$\max \{ [\sigma_R], [\sigma_T] \} = \max \{ 65.166, 146.291 \} = 65.166 \text{ МПа}$ $K_T \cdot [\sigma]_p = 1.3 \cdot 144 = 187.2 \text{ МПа}$ $65.166 \text{ МПа} \leq 187.2 \text{ МПа}$ , <b>Условие прочности выполнено.</b> <b>Жёсткость фланца:</b> Угол поворота фланца в рабочих условиях: $\Theta = M^p \cdot y_\Phi \cdot \frac{E^{20}}{E} = 2303.3 \cdot 0.18199 \cdot 10^{-4} \cdot 1.99 \cdot 10^5 / 1.91 \cdot 10^5 = 0.043672^\circ$ Условие выполнения жесткости фланцев : $\Theta \leq K_\Theta \cdot [\Theta] = 1 \cdot 0.34377 = 0.34377^\circ$ <b>Условие жёсткости выполнено.</b> <b>Расчет давления испытаний</b> Пробное давление при гидравлическом испытании, при работе элемента под внутренним давлением:				
		Подп. и дата				
Изм. № подл.		90651-20600-AM-02-220 РР				
		Лист				
		220				
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата		

Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата

Взам. инв. №

Подп. и дата

Изм. № подл.

Этот документ является собственностью "НЕФТЕХИМПРОЕКТ" и не подлежит копированию и распространению без его согласия

$$P_{\text{гп}} = 1.25 \cdot p \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]_t} = 1.25 \cdot 1.644 \cdot 164.5 / 144 = 2.3475 \text{ МПа}$$

Пробное давление при гидравлическом испытании, при работе элемента под внутренним давлением:

$$P_{\text{гп}} = 1.25 \cdot p \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]_t} = 1.25 \cdot 1.644 \cdot 164.5 / 144 = 2.3475 \text{ МПа}$$

### Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)

#### Условия нагружения:

Расчётное осевое сжимающее усилие, F: 0 Н  
Расчётный изгибающий момент, M: 0 Н·м  
Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 2.2825 МПа

### Расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ 34233.4-2017

Расчётная температура элементов соединения:

Температура фланца (кольца), t<sub>ф</sub>: 20 °C  
Температура фланца (кольца), t<sub>ф</sub>: 20 °C  
Температура болтов (шпилек), t<sub>б</sub>: 20 °C

#### Свойства материала болтов (шпилек)

Допускаемые напряжения для материала 35Х Крепеж при температуре 20 °C (условия гидроиспытаний):

$$[\sigma]_{20б} = 230 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 35Х Крепеж при температуре T = 20 °C:

$$E_{20б} = 2.18 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Коэффициент линейного расширения для материала 35Х Крепеж при температуре T = 20 °C:

$$\alpha_{20б} = 0.134 \cdot 10^{-4} / ^\circ\text{C}$$

#### Свойства материала фланца (кольца) 1

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре 20 °C (условия гидроиспытаний):

$$[\sigma]_{20ф1} = \frac{R_e / 20}{n_T} = 245 / 1.1 = 222.73 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре T = 20 °C:

$$E_{20_1} = 1.99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре T = 20 °C:

$$\alpha_{20_1} = 0.116 \cdot 10^{-4} / ^\circ\text{C}$$

#### Свойства материала фланца (кольца) 2

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре 20 °C (условия гидроиспытаний):

$$[\sigma]_{20ф2} = \frac{R_e / 20}{n_T} = 245 / 1.1 = 222.73 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре T = 20 °C:

$$E_{20_2} = 1.99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре T = 20 °C:

$$\alpha_{20_2} = 0.116 \cdot 10^{-4} / ^\circ\text{C}$$

Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре T = 20 °C:

$$\alpha_{20_p} = 0.116 \cdot 10^{-4} / ^\circ\text{C}$$

#### Расчётные параметры первого фланца:

90651-20600-AM-02-220 РР

Лист

221

$$\beta = \frac{s_1}{s_0} = 16/6 = 2.6667$$

$$x = \frac{1}{\sqrt{D \cdot s_0}} = 21/(78 \cdot 6)^{1/2} = 0.97073$$

$$\kappa = 1 + (\beta - 1) \cdot \frac{x}{x + \frac{1 + \beta}{4}} = 1 + (2.6667 - 1) \cdot 0.97073 / (0.97073 + (1 + 2.6667) / 4) = 1.8572$$

Эквивалентная толщина втулки для фланца, приварного встык:

$$s_3 = \kappa \cdot s_0 = 1.8572 \cdot 6 = 11.143 \text{ мм}$$

$$l_0 = \sqrt{D \cdot s_0} = (78 \cdot 6)^{1/2} = 21.633 \text{ мм}$$

$$\beta_F = 0.70613$$

$$\beta_T = \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg K) - 1}{(1.05 + 1.945 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} = (2.5^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg 2.5) - 1) / ((1.05 + 1.945 \cdot 2.5^2) \cdot (2.5 - 1)) = 1.3385$$

$$\beta_V = 0.099015$$

$$\beta_U = \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg K) - 1}{1.36 \cdot (K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = (2.5^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg 2.5) - 1) / (1.36 \cdot (2.5^2 - 1) \cdot (2.5 - 1)) = 2.4757$$

$$\lambda = \frac{\beta_F \cdot h + l_0}{\beta_T \cdot l_0} + \frac{\beta_V \cdot h^3}{\beta_U \cdot l_0 \cdot s_0^2} = (0.70613 \cdot 19 + 21.633) / (1.3385 \cdot 21.633) + 0.099015 \cdot 19^3 / (2.4757 \cdot 21.633 \cdot 6^2) = 1.5627$$

Угловая податливость фланца при затяжке:

$$y_\Phi = \frac{0.91 \cdot \beta_V}{E^{20} \cdot \lambda \cdot s_0^2 \cdot l_0} = 0.91 \cdot 0.099015 / (1.99 \cdot 10^6 \cdot 1.5627 \cdot 6^2 \cdot 21.633) = 0.21317 \cdot 10^{-4} \text{ °/Н·м}$$

Угловая податливость фланца, нагруженного внешним изгибающим моментом:

$$y_{\Phi M} = \left( \frac{\pi}{4} \right)^3 \cdot \frac{D_6}{E^{20} \cdot D_K \cdot h^3} = (3.1416 / 4)^3 \cdot 160 / (1.99 \cdot 10^6 \cdot 195 \cdot 19^3) = 0.16686 \cdot 10^{-4} \text{ °/Н·м}$$

Плечи моментов:

$$a = 0$$

$$b = 0.5 \cdot (D_6 - D_{\text{сп}}) = 0.5 \cdot (160 - 113) = 23.5 \text{ мм}$$

$$e = 0.5 \cdot (D_{\text{сп}} - D - s_3) = 0.5 \cdot (113 - 78 - 11.143) = 11.928 \text{ мм}$$

**Расчётные параметры второго фланца:**

$$\beta = \frac{s_1}{s_0} = 16/6 = 2.6667$$

$$x = \frac{1}{\sqrt{D \cdot s_0}} = 21/(78 \cdot 6)^{1/2} = 0.97073$$

$$\kappa = 1 + (\beta - 1) \cdot \frac{x}{x + \frac{1 + \beta}{4}} = 1 + (2.6667 - 1) \cdot 0.97073 / (0.97073 + (1 + 2.6667) / 4) = 1.8572$$

Эквивалентная толщина втулки для фланца, приварного встык:

$$s_3 = \kappa \cdot s_0 = 1.8572 \cdot 6 = 11.143 \text{ мм}$$

$$l_0 = \sqrt{D \cdot s_0} = (78 \cdot 6)^{1/2} = 21.633 \text{ мм}$$

$$\beta_F = 0.70613$$

$$\beta_T = \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg K) - 1}{(1.05 + 1.945 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} = (2.5^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg 2.5) - 1) / ((1.05 + 1.945 \cdot 2.5^2) \cdot (2.5 - 1)) = 1.3385$$

$$\beta_V = 0.099015$$

Взам. инв. №	
Подп. и дата	
Инв. № подл.	

Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата

90651-20600-AM-02-220 РР

Лист

222



$$\beta_U = \frac{K^2(1+8.55 \cdot \lg K) - 1}{1.36 \cdot (K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = (2.5^2 \cdot (1+8.55 \cdot \lg 2.5) - 1) / (1.36 \cdot (2.5^2 - 1) \cdot (2.5 - 1)) = 2.4757$$

$$\lambda = \frac{\beta_F \cdot h + 10}{\beta_T \cdot 1_0} + \frac{\beta_V \cdot h^3}{\beta_U \cdot 1_0 \cdot s_0^2} = (0.70613 \cdot 22 + 21.633) / (1.3385 \cdot 21.633) + 0.099015 \cdot 22^3 / (2.4757 \cdot 21.633 \cdot 6^2) = 1.8304$$

Угловая податливость фланца при затяжке:

$$y_\Phi = \frac{0.91 \cdot \beta_V}{E^{20} \cdot \lambda \cdot s_0^2 \cdot 1_0} = 0.91 \cdot 0.099015 / (1.99 \cdot 10^5 \cdot 1.8304 \cdot 6^2 \cdot 21.633) = 0.18199 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ/\text{Н}\cdot\text{м}$$

Угловая податливость фланца, нагруженного внешним изгибающим моментом:

$$y_{\Phi M} = \left(\frac{\pi}{4}\right)^3 \cdot \frac{D_6}{E^{20} \cdot D_H \cdot h^3} = (3.1416/4)^3 \cdot 160 / (1.99 \cdot 10^5 \cdot 195 \cdot 22^3) = 0.10749 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ/\text{Н}\cdot\text{м}$$

Плечи моментов:

$$a = 0$$

$$b = 0.5 \cdot (D_6 - D_{\text{сп}}) = 0.5 \cdot (160 - 113) = 23.5 \text{ мм}$$

$$e = 0.5 \cdot (D_{\text{сп}} - D - s_3) = 0.5 \cdot (113 - 78 - 11.143) = 11.928 \text{ мм}$$

### Характеристики прокладки:

Тип и материал прокладки	Коэффициент m	Удельное давление обжатия q <sub>обж</sub> , МПа	Допускаемое удельное давление [q], МПа	Коэффициент обжатия K	Условный модуль сжатия E <sub>n</sub> , МПа
Спирально-навитая с лентой из нержавеющей стали	3	69	-	-	-

Эффективная ширина прокладки :

$$b_0 = 7 \text{ мм}$$

$$\text{Примечание: } \begin{cases} b_0 = b_{\text{тп}} & \text{при } b_{\text{тп}} \leq 15.0 \text{ мм} \\ b_0 = 3.8 \cdot \sqrt{b_{\text{тп}}} & \text{при } b_{\text{тп}} > 15.0 \text{ мм} \end{cases}$$

Рабочий наружный диаметр прокладки :

$$D_{\text{тпф}} = \min\{D_4; D_{\text{нп}}\} = \min\{120; 120\} = 120 \text{ мм}$$

Средний эффективный диаметр прокладки:

$$D_{\text{ст}} = D_{\text{тпф}} - b_0 = 120 - 7 = 113 \text{ мм}$$

Для металлических и асбометаллических прокладок  $y_n = 0$ .

### Расчёт нагрузок:

Равнодействующая давления :

$$Q_d = 0.785 \cdot D_{\text{ст}}^2 \cdot p = 0.785 \cdot 113^2 \cdot 2.2825 = 22879 \text{ Н}$$

Усилие на прокладке в рабочих условиях, необходимое для обеспечения герметичности:

$$R_{\text{п}} = \pi \cdot D_{\text{ст}} \cdot b_0 \cdot m \cdot [p] = 3.1416 \cdot 113 \cdot 7 \cdot 3 \cdot [2.2825] = 17016 \text{ Н}$$

Усилие, необходимое для смятия прокладки при затяжке :

$$P_{\text{обж}} = 0.5 \cdot \pi \cdot D_{\text{ст}} \cdot b_0 \cdot q_{\text{обж}} = 0.5 \cdot 3.1416 \cdot 113 \cdot 7 \cdot 69 = 85732 \text{ Н}$$

**Расчетная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для герметизации в условиях испытаний (нагрузки + давление)**

Рабочая длина болта (шпильки):

$$L_{60} = h' + h'' + 2 \cdot h_{\text{п}} + s_{\text{рп}} + h'_{\text{ш}} + h''_{\text{ш}} = 19 + 22 + 2 \cdot 3.2 + 13 + 0 + 0 = 60.4 \text{ мм}$$

Эффективная длина шпильки :

$$L_6 = L_{60} + 0.56 \cdot d = 60.4 + 0.56 \cdot 16 = 69.36 \text{ мм}$$

Взам. инв. №		Подп. и дата		Инв. № подл.		90651-20600-AM-02-220 РР	Лист
							223
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата			

Площадь сечения шпильки (по внутреннему диаметру резьбы):

$$f_6 = 144 \text{ мм}^2$$

Податливость шпилек :

$$y_6 = \frac{L_6}{E_6 \cdot f_6 \cdot n} = 69.36 / (2.18 \cdot 10^5 \cdot 144 \cdot 8) = 0.27619 \cdot 10^{-6} \text{ мм/Н}$$

$$\eta = y_{\pi} + y_6 + y'_{\Phi} \cdot b'^2 + y''_{\Phi} \cdot b''^2 = 0 + 0.27619 \cdot 10^{-6} + 0.21317 \cdot 10^{-4} \cdot 23.5^2 + 0.18199 \cdot 10^{-4} \cdot 23.5^2 = 0.65705 \cdot 10^{-6} \text{ мм/Н}$$

Коэффициенты жёсткости для фланцевого соединения, нагруженного внутренним давлением и внешней осевой силой:

$$\alpha = 1 - \frac{y_{\pi} - (y'_{\Phi} \cdot e' \cdot b' + y''_{\Phi} \cdot e'' \cdot b'')}{\eta}$$

$$= 1 - (0 - (0.21317 \cdot 10^{-4} \cdot 11.928 \cdot 23.5 + 0.18199 \cdot 10^{-4} \cdot 11.928 \cdot 23.5)) / 0.65705 \cdot 10^{-6}$$

$$= 1.2942$$

Коэффициенты жёсткости для фланцевого соединения, нагруженного внешним изгибающим моментом:

$$\alpha_M = \frac{y_6 + y'_{\Phi M} \cdot b' \cdot \left( b' + e' - \frac{e'^2}{D_{\text{фл}}} \right) + y''_{\Phi M} \cdot b'' \cdot \left( b'' + e'' - \frac{e''^2}{D_{\text{фл}}} \right)}{y_6 + y_{\pi} \cdot \left( \frac{D_6}{D_{\text{фл}}} \right)^2 + y'_{\Phi M} \cdot b'^2 + y''_{\Phi M} \cdot b''^2}$$

$$= [0.27619 \cdot 10^{-6} + 0.16686 \cdot 10^{-4} \cdot 23.5 \cdot (23.5 + 11.928 - 11.928^2 / 113) + 0.10749 \cdot 10^{-4} \cdot 23.5 \cdot (23.5 + 11.928 - 11.928^2 / 113)] / [0.27619 \cdot 10^{-6} + 0 \cdot (160 / 113)^2 + 0.16686 \cdot 10^{-4} \cdot 23.5^2 + 0.16686 \cdot 10^{-4} \cdot 23.5^2]$$

$$= 1.2221$$

$$P_{61} = \alpha \cdot (Q_{\text{д}} + F) + R_{\pi} + \frac{4 \cdot \alpha_M \cdot |M|}{D_{\text{фл}}} = 1.2942 \cdot (22879 + 0) + 17016 + 4 \cdot 1.2221 \cdot |0| / 113 = 46627 \text{ Н}$$

**Расчетная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для герметизации в условиях испытаний (только давление)**

$$P_{61} = \alpha \cdot (Q_{\text{д}} + F) + R_{\pi} + \frac{4 \cdot \alpha_M \cdot |M|}{D_{\text{фл}}} = 1.2942 \cdot (22879 + 0) + 17016 + 4 \cdot 1.2221 \cdot |0| / 113 = 46627 \text{ Н}$$

Суммарная площадь сечения болтов (шпилек) по внутреннему диаметру резьбы или сечению наименьшего диаметра:

$$A_6 = n \cdot f_6 = 8 \cdot 144 = 1152 \text{ мм}^2$$

Расчётная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для обжатия прокладки и минимального начального натяжения болтов:

$$P_{62} = \max \{ P_{\text{обж}}, 0.4 \cdot A_6 \cdot [\sigma]_6^{20} \} = \max \{ 85732; 0.4 \cdot 1152 \cdot 230 = 1.0598 \cdot 10^5 \} = 1.0598 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

**Расчёт без учета стесненности температурных деформаций**

**Расчёт болтов(шпилек):**

Коэффициент увеличения допускаемых напряжений при затяжке:  $\xi = 1.2$

Коэффициент условий работы:  $K_{\text{уп}} = 1.35$

Коэффициент условий затяжки:  $K_{\text{уз}} = 1$

Коэффициент учета нагрузки от температурных деформаций:  $K_{\text{ут}} = 1$

Допускаемые напряжения для болтов (шпилек) при затяжке :

$$[\sigma]_6^{\text{м}} = \xi \cdot K_{\text{уп}} \cdot K_{\text{уз}} \cdot K_{\text{ут}} \cdot [\sigma]_6^{20} = 1.2 \cdot 1.35 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 230 = 372.6 \text{ МПа}$$

Болтовая нагрузка в условиях затяжки :

$$P_6^{\text{м}} = \max \{ P_{61}, P_{62} \} = \max \{ 46627; 1.0598 \cdot 10^5 \} = 1.0598 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Условие прочности при затяжке:

$$\sigma_{61} = \frac{P_6^{\text{м}}}{A_6} \leq [\sigma]_6^{\text{м}}$$

$$\sigma_{61} = \frac{P_6^{\text{м}}}{A_6} = 1.0598 \cdot 10^5 / 1152 = 92 \text{ МПа}$$

Взам. инв. №					
Подп. и дата					
Инв. № подл.					
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	

90651-20600-AM-02-220 РР

Лист

224

Крутящий момент при затяжке болтов (шпилек) без смазки при  $\sigma_{61} < 120$  МПа:

$$M_{кр} = 0.3 \cdot \frac{P_6^M \cdot d}{n} = 0.3 \cdot 1.0598 \cdot 10^5 \cdot 16 / 8 = 63.59 \text{ Н·м}$$

При наличии смазки величина  $M_{кр}$  снижается на 25% и составляет  $0.75 \cdot M_{кр} = 47.693 \text{ Н·м}$

92 МПа  $\leq$  372.6 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Допускаемые напряжения для болтов (шпилек) при рабочих условиях:

$$[\sigma]_6^P = K_{ур} \cdot K_{уз} \cdot K_{ут} \cdot [\sigma]_6 = 1.35 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 230 = 310.5 \text{ МПа}$$

Болтовая нагрузка в рабочих условиях:

$$P_6^P = P_6^M + (1 - \alpha) \cdot (Q_d + F) + \frac{4 \cdot (1 - \alpha_m) \cdot |M|}{D_{от}} = 1.0598 \cdot 10^5 + (1 - 1.2942) \cdot (22879 + 0) + 4 \cdot (1 - 1.2221) \cdot |0| / 113 = 99252 \text{ Н}$$

Условие прочности в рабочих условиях:

$$\sigma_{62} = \frac{P_6^P}{A_6} \leq [\sigma]_6^P$$

$$\sigma_{62} = \frac{P_6^P}{A_6} = 99252 / 1152 = 86.156 \text{ МПа}$$

86.156 МПа  $\leq$  310.5 МПа, **Условие прочности выполнено.**

### Расчёт первого фланца:

Коэффициент, учитывающий изгиб тарелки фланца между шпильками:

$$C_F = \max \left\{ 1; \sqrt{\frac{\frac{\pi \cdot D_6}{n}}{2 \cdot d + \frac{6 \cdot h}{m + 0.5}}} \right\} = \max \{1; (3.1416 \cdot 160 / 8 / (2 \cdot 16 + 6 \cdot 19 / (3 + 0.5)))^{1/2}\} = 1$$

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при затяжке:

$$M^M = C_F \cdot P_6^M \cdot b = 1 \cdot 1.0598 \cdot 10^5 \cdot 23.5 = 2490.6 \text{ Н·м}$$

$$f = \max \left\{ \frac{C_{36}}{1 + A}; 1.0 \right\} = \max \{1.5034 / (1 + 1.6667); 1.0\} = 1$$

$$D^* = D + c + s_1 \text{ при } (D + 2 \cdot c) < 20 \cdot (s_1 - c) \text{ и } f = 1 = 78 + 0 + 16 \text{ при } 78 < 20 \cdot (16 - 0) \text{ и } f = 1 = 94 \text{ мм}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении  $s_1$ :

$$\sigma_1^M = \frac{M^M}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D^*} = 2490.6 / (1.5627 \cdot (16 - 3)^2 \cdot 94) = 100.33 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в условиях затяжки:

$$\sigma_R^M = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + 1.0}{\lambda \cdot h^2 \cdot 1.0 \cdot D} \cdot M^M = (1.33 \cdot 0.70613 \cdot 19 + 21.633) / (1.5627 \cdot 19^2 \cdot 21.633 \cdot 78) \cdot 2490.6 = 103.29 \text{ МПа}$$

$$\beta_Y = \frac{1}{K - 1} \cdot \left( 0.69 + 5.72 \cdot \frac{K^2 \cdot \lg K}{K^2 - 1} \right) = 1 / (2.5 - 1) \cdot (0.69 + 5.72 \cdot 2.5^2 \cdot \lg 2.5 / (2.5^2 - 1)) = 2.2665$$

$$\beta_Z = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = (2.5^2 + 1) / (2.5^2 - 1) = 1.381$$

Окружное напряжение в тарелке в условиях затяжки:

$$\sigma_T^M = \frac{\beta_Y \cdot M^M}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^M = 2.2665 \cdot 2490.6 / (19^2 \cdot 78) - 1.381 \cdot 103.29 = 57.838 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении  $s_1$  (п. 8.5.1):

$$\max \{ |\sigma_1^M + \sigma_R^M|; |\sigma_1^M + \sigma_T^M| \} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_M^{20}$$

$$\max \{ |\sigma_1^M + \sigma_R^M|; |\sigma_1^M + \sigma_T^M| \} = \max \{ |100.33 + 103.29|; |100.33 + 57.838| \} = 203.62 \text{ МПа}$$

Взам. инв. №	$\beta_Y = \frac{1}{K-1} \cdot \left( 0.69 + 5.72 \cdot \frac{K^2 \cdot \lg K}{K^2 - 1} \right) = 1 / (2.5-1) * (0.69+5.72 * 2.5^2 * \lg 2.5 / (2.5^2-1)) = 2.2665$ $\beta_Z = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = (2.5^2 + 1) / (2.5^2 - 1) = 1.381$					
	Окружное напряжение в тарелке в условиях затяжки :					
Подп. и дата	$\sigma_T^M = \frac{\beta_Y \cdot M^M}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^M = 2.2665 * 2490.6 / (19^2 * 78) - 1.381 * 103.29 = 57.838 \text{ МПа}$					
	Условие статической прочности при затяжке в сечении $s_1$ (п. 8.5.1):					
Инв. № подл.	$\max \left\{ \left  \sigma_1^M + \sigma_R^M \right ; \left  \sigma_1^M + \sigma_T^M \right  \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_M^{20}$					
	$\max \left\{ \left  \sigma_1^M + \sigma_R^M \right ; \left  \sigma_1^M + \sigma_T^M \right  \right\} = \max \{ 100.33 + 103.29;   100.33 + 57.838   \} = 203.62 \text{ МПа}$					
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	90651-20600-AM-02-220 РР	Лист
						225

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_{\text{м}}^{20} = 1.5 \cdot [\sigma]_{\text{ф}}^{20} = 1.5 \cdot 222.73 = 334.09 \text{ МПа}$$

$$K = \frac{D_{\text{ж}}}{D} = 195/78 = 2.5$$

Коэффициент учета размеров тарелки фланца:  $K_S = 1.2$

$$K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{м}}^{20} = 1.2 \cdot 1 \cdot 334.09 = 400.91 \text{ МПа}$$

203.62 МПа ≤ 400.91 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Болтовая нагрузка в рабочих условиях:

$$P_6^P = P_6^M + (1 - \alpha) \cdot (Q_{\text{д}} + F) + \frac{4 \cdot (1 - \alpha_{\text{м}}) \cdot |M|}{D_{\text{ст}}} = 1.0598 \cdot 10^5 + (1 - 1.2942) \cdot (22879 + 0) + 4 \cdot (1 - 1.2221) \cdot |0| / 113 = 99252 \text{ Н}$$

Приведенная нагрузка от внешней силы и момента:

$$Q_{\text{FM}}^+ = F + \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{ст}}} = 0 + 4 \cdot |0| / 113 = 0 \text{ Н}$$

$$Q_{\text{FM}}^- = F - \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{ст}}} = 0 - 4 \cdot |0| / 113 = 0 \text{ Н}$$

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при рабочих условиях:

$$M^P = C_F \cdot \max \{ P_6^P \cdot b + (Q_{\text{д}} + Q_{\text{FM}}^-) \cdot e; |Q_{\text{д}} + Q_{\text{FM}}^-| \cdot e \} = 1 \cdot \max \{ 99252 \cdot 23.5 + (22879 + 0) \cdot 11.928; |22879 + 0| \cdot 11.928 \} = 2605.3 \text{ Н·м}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_1$ :

$$\sigma_1^P = \frac{M^P}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D} = 2605.3 / (1.5627 \cdot (16 - 3)^2 \cdot 94) = 104.95 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в рабочих условиях:

$$\sigma_R^P = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + 1_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot 1_0 \cdot D} \cdot M^P = (1.33 \cdot 0.70613 \cdot 19 + 21.633) / (1.5627 \cdot 19^2 \cdot 21.633 \cdot 78) \cdot 2605.3 = 108.05 \text{ МПа}$$

Окружное напряжение в тарелке в рабочих условиях:

$$\sigma_T^P = \frac{\beta_Y \cdot M^P}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^P = 2.2665 \cdot 2605.3 / (19^2 \cdot 78) - 1.381 \cdot 108.05 = 60.502 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_1$  (+):

$$\sigma_{\text{лмм}}^{P+} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_1}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = (0.785 \cdot 78^2 \cdot 2.2825 + 0 + 4 \cdot 0 / (78 + 16)) / (3.1416 \cdot (78 + 16) \cdot (16 - 3)) = 2.8395 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_1$  (п. 8.5.1):

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^{P+} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^{P+} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{\text{лмм}}^{P+} \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{м}}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^{P+} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^{P+} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{\text{лмм}}^{P+} \right| \right\} = \max \{ |104.95 - 2.8395 + 108.05|; |104.95 - 2.8395 + 60.502|; |104.95 + 2.8395| \} = 210.16 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_{\text{м}} = 1.5 \cdot [\sigma]_{\text{ф}} = 1.5 \cdot 222.73 = 334.09 \text{ МПа}$$

$$K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{м}} = 1.2 \cdot 1 \cdot 334.09 = 400.91 \text{ МПа}$$

210.16 МПа ≤ 400.91 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_1$  (-):

$$\sigma_{\text{лмм}}^{P-} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F - \frac{4 \cdot M}{D + s_1}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = (0.785 \cdot 78^2 \cdot 2.2825 + 0 - 4 \cdot 0 / (78 + 16)) / (3.1416 \cdot (78 + 16) \cdot (16 - 3)) = 2.8395 \text{ МПа}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^{P-} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^{P-} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{\text{лмм}}^{P-} \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{м}}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^{P-} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^{P-} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{\text{лмм}}^{P-} \right| \right\} = \max \{ |104.95 - 2.8395 + 108.05|; |104.95 - 2.8395 + 60.502|; |104.95 + 2.8395| \} = 210.16 \text{ МПа}$$

210.16 МПа ≤ 400.91 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении  $s_0$ :

Взам. инв. №					
Подп. и дата					
Инв. № подл.					
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	

$$\sigma_0^M = f \cdot \sigma_1^M = 1 \cdot 100.33 = 100.33 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении  $s_0$  (п. 8.5.2):

$$\sigma_0^M \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R^{20}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_R^{20} = 3 \cdot [\sigma]_\Phi^{20} = 3 \cdot 222.73 = 668.18 \text{ МПа}$$

$$1.3 \cdot [\sigma]_R^{20} = 1.3 \cdot 668.18 = 868.64 \text{ МПа}$$

100.33 МПа ≤ 868.64 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_0^P = f \cdot \sigma_1^P = 1 \cdot 104.95 = 104.95 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_0$  (+):

$$\sigma_{0mm}^{P+} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_0}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = (0.785 \cdot 78^2 \cdot 2.2825 + 0 + 4 \cdot 0 / (78 + 6)) / (3.1416 \cdot (78 + 6) \cdot (6 - 3)) = 13.77 \text{ МПа}$$

Окружное мембранное напряжение от действия давления во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_{0mo}^P = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s_0 - c)} = 2.2825 \cdot 78 / (2 \cdot (6 - 3)) = 29.673 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P+} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P+} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P+} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P+} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} = \max \{ |104.95 \pm 13.77|; |0.3 \cdot 104.95 \pm 29.673|; |0.7 \cdot 104.95 \pm (13.77 - 29.673)| \} = 118.72 \text{ МПа}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_R = 3 \cdot [\sigma]_\Phi = 3 \cdot 222.73 = 668.18 \text{ МПа}$$

$$1.3 \cdot [\sigma]_R = 1.3 \cdot 668.18 = 868.64 \text{ МПа}$$

118.72 МПа ≤ 868.64 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_0$  (-):

$$\sigma_{0mm}^{P-} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F - \frac{4 \cdot M}{D + s_0}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = (0.785 \cdot 78^2 \cdot 2.2825 + 0 - 4 \cdot 0 / (78 + 6)) / (3.1416 \cdot (78 + 6) \cdot (6 - 3)) = 13.77 \text{ МПа}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P-} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P-} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P-} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P-} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} = \max \{ |104.95 \pm 13.77|; |0.3 \cdot 104.95 \pm 29.673|; |0.7 \cdot 104.95 \pm (13.77 - 29.673)| \} = 118.72 \text{ МПа}$$

118.72 МПа ≤ 868.64 МПа, **Условие прочности выполнено.**

**Расчет в сечении  $s_0$  в рабочих условиях (п. 8.5.5 ГОСТ 34233.4-2017):**

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0mo}^P \right|; \left| \sigma_{0mm}^P \right| \right\} \leq [\sigma]_\Phi$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0mo}^P \right|; \left| \sigma_{0mm}^P \right| \right\} = \max \{ |29.673|; |13.77| \} = 29.673 \text{ МПа}$$

29.673 МПа ≤ 222.73 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Условие статической прочности при затяжке для тарелок:

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_T^M \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_\Phi^{20}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_T^M \right| \right\} = \max \{ |103.29|; |57.838| \} = 103.29 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_\Phi^{20} = 1 \cdot 222.73 = 222.73 \text{ МПа}$$

103.29 МПа ≤ 222.73 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Условие статической прочности в рабочих условиях для тарелок:

Взам. инв. №					
Подп. и дата					
Инв. № подл.					
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	

90651-20600-AM-02-220 РР

Лист

227

Этот документ является собственностью "НЕФТЕХИМПРОЕКТ" и не подлежит копированию и распространению без его согласия	НЕФТЕХИМПРОЕКТ NEFTECHIMPROEKT		МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ		РР
	$\max \left\{ \left  \sigma_R^P \right ; \left  \sigma_T^P \right  \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_{\Phi}$ $\max \left\{ \left  \sigma_R^P \right ; \left  \sigma_T^P \right  \right\} = \max\{108.05; 60.502\} = 108.05 \text{ МПа}$ $K_T \cdot [\sigma]_{\Phi} = 1 \cdot 222.73 = 222.73 \text{ МПа}$ $108.05 \text{ МПа} \leq 222.73 \text{ МПа, Условие прочности выполнено.}$ <p><b>Жёсткость фланца:</b> Угол поворота фланца в рабочих условиях:</p> $\Theta = M^P \cdot y_{\Phi} \cdot \frac{E^{20}}{E} = 2605.3 \cdot 0.21317 \cdot 10^{-4} \cdot 1.99 \cdot 10^5 / 1.99 \cdot 10^5 = 0.055537^{\circ}$ <p>Допускаемый угол поворота фланца:</p> $[\Theta] = 0.34377^{\circ}$ <p>Коэффициент увеличения допускаемого угла поворота фланцев: <math>K_{\Theta} = 1.3</math> Условие выполнения жесткости фланцев :</p> $\Theta \leq K_{\Theta} \cdot [\Theta] = 1.3 \cdot 0.34377 = 0.44691^{\circ}$ <p><b>Условие жёсткости выполнено.</b></p> <p><b>Расчёт второго фланца:</b> Коэффициент, учитывающий изгиб тарелки фланца между шпильками:</p> $C_F = \max \left\{ 1; \sqrt{\frac{\frac{\pi \cdot D_6}{n}}{2 \cdot d + \frac{6 \cdot h}{m + 0.5}}} \right\} = \max\{1; (3.1416 \cdot 160 / 8 / (2 \cdot 16 + 6 \cdot 22 / (3 + 0.5)))^{1/2}\} = 1$ <p>Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при затяжке :</p> $M^M = C_F \cdot P_6^M \cdot b = 1 \cdot 1.0598 \cdot 10^5 \cdot 23.5 = 2490.6 \text{ Н·м}$ $f = \max \left\{ \frac{C_{36}}{1 + A}; 1.0 \right\} = \max\{1.5034 / (1 + 1.6667); 1.0\} = 1$ $D^* = D + c + s_{1 \text{ при } (D + 2 \cdot c) < 20 \cdot (s_1 - c) \text{ и } f = 1} = 78 + 0 + 16 \text{ при } 78 < 20 \cdot (16 - 0) \text{ и } f = 1 = 94 \text{ мм}$ <p>Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении <math>s_1</math>:</p> $\sigma_1^M = \frac{M^M}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D^*} = 2490.6 / (1.8304 \cdot (16 - 3)^2 \cdot 94) = 85.653 \text{ МПа}$ <p>Радиальное напряжение в тарелке в условиях затяжки :</p> $\sigma_R^M = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + 1_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot 1_0 \cdot D} \cdot M^M = (1.33 \cdot 0.70613 \cdot 22 + 21.633) / (1.8304 \cdot 22^2 \cdot 21.633 \cdot 78) \cdot 2490.6 = 70.466 \text{ МПа}$ $\beta_Y = \frac{1}{K - 1} \cdot \left( 0.69 + 5.72 \cdot \frac{K^2 \cdot \lg K}{K^2 - 1} \right) = 1 / (2.5 - 1) \cdot (0.69 + 5.72 \cdot 2.5^2 \cdot \lg 2.5 / (2.5^2 - 1)) = 2.2665$ $\beta_Z = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = (2.5^2 + 1) / (2.5^2 - 1) = 1.381$ <p>Окружное напряжение в тарелке в условиях затяжки :</p> $\sigma_T^M = \frac{\beta_Y \cdot M^M}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^M = 2.2665 \cdot 2490.6 / (22^2 \cdot 78) - 1.381 \cdot 70.466 = 52.219 \text{ МПа}$ <p>Условие статической прочности при затяжке в сечении <math>s_1</math> (п. 8.5.1):</p> $\max \left\{ \left  \sigma_1^M + \sigma_R^M \right ; \left  \sigma_1^M + \sigma_T^M \right  \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{м}}^{20}$ $\max \left\{ \left  \sigma_1^M + \sigma_R^M \right ; \left  \sigma_1^M + \sigma_T^M \right  \right\} = \max\{85.653 + 70.466; 85.653 + 52.219\} = 156.12 \text{ МПа}$ <p>Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):</p> $[\sigma]_{\text{м}}^{20} = 1.5 \cdot [\sigma]_{\Phi}^{20} = 1.5 \cdot 222.73 = 334.09 \text{ МПа}$				
	90651-20600-AM-02-220 РР				Лист
					228
	Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата

$$K = \frac{D_K}{D} = 195 / 78 = 2.5$$

Коэффициент учета размеров тарелки фланца:  $K_S = 1.2$

$$K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_M^{20} = 1.2 \cdot 1 \cdot 334.09 = 400.91 \text{ МПа}$$

156.12 МПа ≤ 400.91 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Приведенная нагрузка от внешней силы и момента :

$$Q_{FM}^+ = F + \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{фл}}} = 0 + 4 \cdot |0| / 113 = 0 \text{ Н}$$

$$Q_{FM}^- = F - \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{фл}}} = 0 - 4 \cdot |0| / 113 = 0 \text{ Н}$$

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при рабочих условиях:

$$M^P = C_F \cdot \max \{ p_F^P \cdot b + (Q_{\text{д}} + Q_{FM}) \cdot e; |Q_{\text{д}} + Q_{FM}| \cdot e \} = 1 \cdot \max \{ 99252 \cdot 23.5 + (22879 + 0) \cdot 11.928; |22879 + 0| \cdot 11.928 \} = 2605.3 \text{ Н·м}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_1$ :

$$\sigma_1^P = \frac{M^P}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D} = 2605.3 / (1.8304 \cdot (16 - 3)^2 \cdot 94) = 89.598 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в рабочих условиях :

$$\sigma_R^P = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + l_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot l_0 \cdot D} \cdot M^P = (1.33 \cdot 0.70613 \cdot 22 + 21.633) / (1.8304 \cdot 22^2 \cdot 21.633 \cdot 78) \cdot 2605.3 = 73.712 \text{ МПа}$$

Окружное напряжение в тарелке в рабочих условиях :

$$\sigma_T^P = \frac{\beta_Y \cdot M^P}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^P = 2.2665 \cdot 2605.3 / (22^2 \cdot 78) - 1.381 \cdot 73.712 = 54.624 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_1$  (+):

$$\sigma_{\text{лмм}}^{P+} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_1}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = (0.785 \cdot 78^2 \cdot 2.2825 + 0 + 4 \cdot 0 / (78 + 16)) / (3.1416 \cdot (78 + 16) \cdot (16 - 3)) = 2.8395 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_1$  (п. 8.5.1):

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^{P+} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^{P+} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{\text{лмм}}^{P+} \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_M$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^{P+} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^{P+} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{\text{лмм}}^{P+} \right| \right\} = \max \{ |89.598 - 2.8395 + 73.712|; |89.598 - 2.8395 + 54.624|; |89.598 + 2.8395| \} = 160.47 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_M = 1.5 \cdot [\sigma]_{\text{ф}} = 1.5 \cdot 222.73 = 334.09 \text{ МПа}$$

$$K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_M = 1.2 \cdot 1 \cdot 334.09 = 400.91 \text{ МПа}$$

160.47 МПа ≤ 400.91 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_1$  (-):

$$\sigma_{\text{лмм}}^{P-} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F - \frac{4 \cdot M}{D + s_1}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = (0.785 \cdot 78^2 \cdot 2.2825 + 0 - 4 \cdot 0 / (78 + 16)) / (3.1416 \cdot (78 + 16) \cdot (16 - 3)) = 2.8395 \text{ МПа}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^{P-} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^{P-} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{\text{лмм}}^{P-} \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_M$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^{P-} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^{P-} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{\text{лмм}}^{P-} \right| \right\} = \max \{ |89.598 - 2.8395 + 73.712|; |89.598 - 2.8395 + 54.624|; |89.598 + 2.8395| \} = 160.47 \text{ МПа}$$

160.47 МПа ≤ 400.91 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_0^M = f \cdot \sigma_1^M = 1 \cdot 85.653 = 85.653 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении  $s_0$  (п. 8.5.2):

$$\sigma_0^M \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R^{20}$$

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	$\sigma_{\text{lim}}^{\text{p-}} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F \cdot \frac{4 \cdot M}{D + s_1}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = (0.785 \cdot 78^2 \cdot 2.2825 + 0 - 4 \cdot 0 / (78 + 16)) / (3.1416 \cdot (78 + 16) \cdot (16 - 3)) = 2.8395 \text{ МПа}$ $\max \left\{ \left  \sigma_1^{\text{p}} - \sigma_{\text{lim}}^{\text{p-}} + \sigma_{\text{R}}^{\text{p}} \right , \left  \sigma_1^{\text{p}} - \sigma_{\text{lim}}^{\text{p-}} + \sigma_{\text{T}}^{\text{p}} \right , \left  \sigma_1^{\text{p}} + \sigma_{\text{lim}}^{\text{p-}} \right  \right\} \leq K_{\text{S}} \cdot K_{\text{T}} \cdot [\sigma]_{\text{лп}}$ $\max \left\{ \left  \sigma_1^{\text{p}} - \sigma_{\text{lim}}^{\text{p-}} + \sigma_{\text{R}}^{\text{p}} \right , \left  \sigma_1^{\text{p}} - \sigma_{\text{lim}}^{\text{p-}} + \sigma_{\text{T}}^{\text{p}} \right , \left  \sigma_1^{\text{p}} + \sigma_{\text{lim}}^{\text{p-}} \right  \right\} = \frac{\max\{ 89.598 - 2.8395 + 73.712 ;  89.598 - 2.8395 + 54.624 ;  89.598 + 2.8395 \}}{ 89.598 + 2.8395 } = 160.47 \text{ МПа}$ <p>160.47 МПа ≤ 400.91 МПа, <b>Условие прочности выполнено.</b></p> <p>Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении <math>s_0</math>:</p> $\sigma_0^{\text{м}} = f \cdot \sigma_1^{\text{м}} = 1 \cdot 85.653 = 85.653 \text{ МПа}$ <p>Условие статической прочности при затяжке в сечении <math>s_0</math> (п. 8.5.2):</p> $\sigma_0^{\text{м}} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_{\text{R}}^{120}$				
			<div>90651-20600-AM-02-220 РР</div>				
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	Лист		
					229		

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_R^{20} = 3 \cdot [\sigma]_{\Phi}^{20} = 3 \cdot 222.73 = 668.18 \text{ МПа}$$

$$1.3 \cdot [\sigma]_R^{20} = 1.3 \cdot 668.18 = 868.64 \text{ МПа}$$

85.653 МПа ≤ 868.64 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_0^P = f \cdot \sigma_1^P = 1 \cdot 89.598 = 89.598 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_0$  (+):

$$\sigma_{0mm}^{P+} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_0}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = (0.785 \cdot 78^2 \cdot 2.2825 + 0 + 4 \cdot 0 / (78 + 6)) / (3.1416 \cdot (78 + 6) \cdot (6 - 3)) = 13.77 \text{ МПа}$$

Окружное мембранное напряжение от действия давления во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_{0mo}^P = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s_0 - c)} = 2.2825 \cdot 78 / (2 \cdot (6 - 3)) = 29.673 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P+} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P+} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P+} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P+} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} = \max \{ 89.598 \pm 13.77; |0.3 \cdot 89.598 \pm 29.673|; |0.7 \cdot 89.598 \pm (13.77 - 29.673)| \} = 103.37 \text{ МПа}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_R = 3 \cdot [\sigma]_{\Phi} = 3 \cdot 222.73 = 668.18 \text{ МПа}$$

$$1.3 \cdot [\sigma]_R = 1.3 \cdot 668.18 = 868.64 \text{ МПа}$$

103.37 МПа ≤ 868.64 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_0$  (-):

$$\sigma_{0mm}^{P-} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F - \frac{4 \cdot M}{D + s_0}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = (0.785 \cdot 78^2 \cdot 2.2825 + 0 - 4 \cdot 0 / (78 + 6)) / (3.1416 \cdot (78 + 6) \cdot (6 - 3)) = 13.77 \text{ МПа}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P-} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P-} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P-} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P-} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} = \max \{ 89.598 \pm 13.77; |0.3 \cdot 89.598 \pm 29.673|; |0.7 \cdot 89.598 \pm (13.77 - 29.673)| \} = 103.37 \text{ МПа}$$

103.37 МПа ≤ 868.64 МПа, **Условие прочности выполнено.**

**Расчет в сечении  $s_0$  в рабочих условиях (п. 8.5.5 ГОСТ 34233.4-2017):**

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0mo}^P \right|; \left| \sigma_{0mm}^P \right| \right\} \leq [\sigma]_{\Phi}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0mo}^P \right|; \left| \sigma_{0mm}^P \right| \right\} = \max \{ 29.673; |13.77| \} = 29.673 \text{ МПа}$$

29.673 МПа ≤ 222.73 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Условие статической прочности при затяжке для тарелок:

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_T^M \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_{\Phi}^{20}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_T^M \right| \right\} = \max \{ 70.466; |52.219| \} = 70.466 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_{\Phi}^{20} = 1 \cdot 222.73 = 222.73 \text{ МПа}$$

70.466 МПа ≤ 222.73 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Условие статической прочности в рабочих условиях для тарелок:

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_T^P \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_{\Phi}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_T^P \right| \right\} = \max \{ 73.712; |54.624| \} = 73.712 \text{ МПа}$$

Взам. инв. №	Подп. и дата	Инв. № подл.	$\max \left\{ \left  \sigma_{0\text{мо}}^P \right ; \left  \sigma_{0\text{мм}}^P \right  \right\} = \max \{ 29.673;   13.77 \} = 29.673 \text{ МПа}$ 29.673 МПа ≤ 222.73 МПа, <b>Условие прочности выполнено.</b> Условие статической прочности при затяжке для тарелок: $\max \left\{ \left  \sigma_R^M \right ; \left  \sigma_T^M \right  \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_{\Phi}^{20}$ $\max \left\{ \left  \sigma_R^M \right ; \left  \sigma_T^M \right  \right\} = \max \{ 70.466;   52.219 \} = 70.466 \text{ МПа}$ $K_T \cdot [\sigma]_{\Phi}^{20} = 1 \cdot 222.73 = 222.73 \text{ МПа}$ 70.466 МПа ≤ 222.73 МПа, <b>Условие прочности выполнено.</b> Условие статической прочности в рабочих условиях для тарелок: $\max \left\{ \left  \sigma_R^P \right ; \left  \sigma_T^P \right  \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_{\Phi}$ $\max \left\{ \left  \sigma_R^P \right ; \left  \sigma_T^P \right  \right\} = \max \{ 73.712;   54.624 \} = 73.712 \text{ МПа}$											
			<table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>Изм.</td><td>Лист</td><td>№ док.</td><td>Подп.</td><td>Дата</td></tr></table>										Изм.	Лист
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата										

90651-20600-AM-02-220 РР					Лист
					230



Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №

Этот документ является собственностью "НЕФТЕХИМПРОЕКТ" и не подлежит копированию и распространению без его согласия

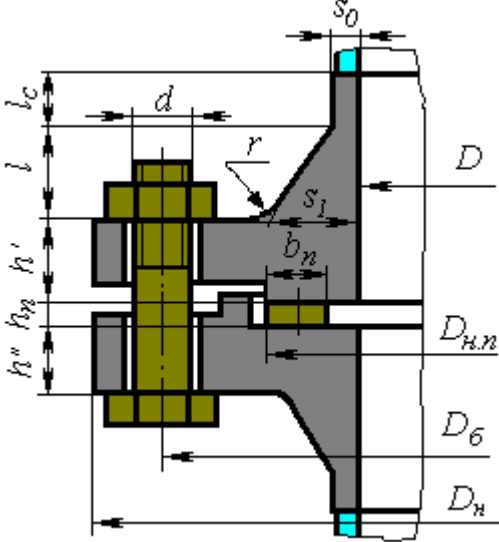
НЕФТЕХИМПРОЕКТ NEFTECHIMPROEKT			МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ			РР	
<div><div><div><math>K_T \cdot [\sigma]_{\Phi} = 1 \cdot 222.73 = 222.73 \text{ МПа}</math> <math>73.712 \text{ МПа} \leq 222.73 \text{ МПа}</math>,<b>Условие прочности выполнено.</b></div><div><div><b>Жёсткость фланца:</b></div><div>Угол поворота фланца в рабочих условиях:</div><div><math display="block">\varphi = M^P \cdot y_{\Phi} \cdot \frac{E^{20}}{E} = 2605.3 \cdot 0.18199 \cdot 10^{-4} \cdot 1.99 \cdot 10^5 / 1.99 \cdot 10^5 = 0.047413 \text{ }^{\circ}</math></div><div>Допускаемый угол поворота фланца:</div><div><math display="block">[\varphi] = 0.34377 \text{ }^{\circ}</math></div><div>Условие выполнения жесткости фланцев :</div><div><math display="block">\varphi \leq K_{\varphi} \cdot [\varphi] = 1.3 \cdot 0.34377 = 0.44691 \text{ }^{\circ}</math></div><div><b>Условие жёсткости выполнено.</b></div></div></div></div>							
					90651-20600-AM-02-220 РР		Лист
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата			231

Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата
Изм. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №		

Этот документ является собственностью "НЕФТЕХИМПРОЕКТ" и не подлежит копированию и распространению без его согласия

# Фланцевое соединение L1-L4

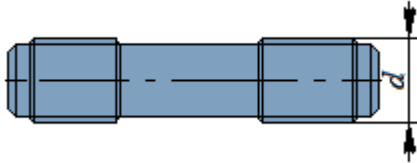
Расчет выполнен на примере фланцевого соединения L1



## Исходные данные

Тип фланцев: Приварные встык  
 Исполнение: Выступ-впадина  
 Диаметр болтовой окружности, D<sub>б</sub>: 125 мм

## Шпильки:



Материал: 35X Крепеж  
 Наружный диаметр, d: 16 мм  
 Количество, n: 4  
 Контроль затяжки: Без контроля затяжки

## Прокладка:

Материал прокладки: Спирально-навитая с лентой из нержавеющей стали  
 Толщина, h<sub>п</sub>: 3.2 мм  
 Наружный диаметр, D<sub>н.п</sub>: 87 мм  
 Ширина, b<sub>п</sub>: 6.5 мм

## Данные первого фланца (кольца):

Материал фланца (кольца): 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 По-ковка  
 Наружный диаметр фланца (кольца), D<sub>н</sub>: 160 мм  
 Толщина фланца (кольца) с впадиной, h'': 17 мм  
 Внутренний диаметр фланца (кольца), D: 48 мм  
 Сумма прибавок, c: 3 мм  
 Длина конической части втулки, l: 20 мм  
 Длина цилиндрической части втулки, l<sub>с</sub>: 8 мм  
 Толщина цилиндрической части втулки, s<sub>0</sub>: 5 мм  
 Толщина конической части втулки, s<sub>1</sub>: 14 мм  
 Радиус перехода, r: 5 мм

## Данные второго фланца (кольца):

90651-20600-AM-02-220 РР

Лист  
232

Этот документ является собственностью "НЕФТЕХИМПРОЕКТ" и не подлежит копированию и распространению без его согласия

НЕФТЕХИМПРОЕКТ NEFTECHIMPROEKT		МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ			РР	
Материал фланца (кольца):		09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка				
Наружный диаметр фланца (кольца), D <sub>н</sub> :		160 мм				
Толщина фланца (кольца) с выступом, h'		20 мм				
Внутренний диаметр фланца (кольца), D:		48 мм				
Сумма прибавок, с:		3 мм				
Длина конической части втулки, l:		20 мм				
Длина цилиндрической части втулки, l <sub>с</sub> :		8 мм				
Толщина цилиндрической части втулки, s <sub>0</sub> :		5 мм				
Толщина конической части втулки, s <sub>1</sub> :		14 мм				
Радиус перехода, r:		5 мм				
Расчёт в рабочих условиях						
Условия нагружения:						
Расчётное осевое сжимающее усилие, F:		0 Н				
Расчётный изгибающий момент, M:		0 Н·м				
Расчётное внутреннее избыточное давление, p:		1.6001 МПа				
Расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ 34233.4-2017						
Расчётная температура элементов соединения:						
Температура фланца (кольца), t <sub>ф</sub> :		100 °С				
Температура фланца (кольца), t <sub>ф</sub> :		100 °С				
Температура болтов (шпилек), t <sub>б</sub> :		97 °С				
Свойства материала болтов (шпилек)						
Допускаемые напряжения для материала 35Х Крепеж при температуре 97 °С (рабочие условия):						
[σ] <sub>6</sub> = 230 МПа						
Модуль продольной упругости для материала 35Х Крепеж при температуре T = 97 °С:						
E <sub>6</sub> = 2.1511·10 <sup>5</sup> МПа						
Коэффициент линейного расширения для материала 35Х Крепеж при температуре T = 97 °С:						
α <sub>6</sub> = 0.134·10 <sup>-4</sup> /°С						
Допускаемые напряжения для материала 35Х Крепеж при температуре 20 °С (рабочие условия):						
[σ] <sup>20</sup> <sub>6</sub> = 230 МПа						
Модуль продольной упругости для материала 35Х Крепеж при температуре T = 20 °С:						
E <sup>20</sup> <sub>6</sub> = 2.18·10 <sup>5</sup> МПа						
Свойства материала фланца (кольца) 1						
Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре 100 °С (рабочие условия):						
[σ] <sub>ф1</sub> = 144 МПа						
Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре T = 100 °С:						
E <sub>1</sub> = 1.91·10 <sup>5</sup> МПа						
Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре T = 100 °С:						
α <sub>1</sub> = 0.116·10 <sup>-4</sup> /°С						
Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре 20 °С (рабочие условия):						
[σ] <sup>20</sup> <sub>ф1</sub> = 164.5 МПа						
Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре T = 20 °С:						
E <sup>20</sup> <sub>1</sub> = 1.99·10 <sup>5</sup> МПа						
Свойства материала фланца (кольца)2						
Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре 100 °С (рабочие условия):						
[σ] <sub>ф2</sub> = 144 МПа						
Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре T = 100 °С:						
E <sub>2</sub> = 1.91·10 <sup>5</sup> МПа						
Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре T = 100 °С:						
α <sub>2</sub> = 0.116·10 <sup>-4</sup> /°С						
Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре 20 °С (рабочие условия):						
[σ] <sup>20</sup> <sub>ф2</sub> = 164.5 МПа						
Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре T = 20 °С:						
E <sup>20</sup> <sub>2</sub> = 1.99·10 <sup>5</sup> МПа						
Взам. инв. №	Подп. и дата	Инв. № подл.				Лист
			90651-20600-AM-02-220 РР			
			233			
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата		

90651-20600-AM-02-220 РР\_изм.0.docx

Формат А4

Этот документ является собственностью "НЕФТЕХИМПРОЕКТ" и не подлежит копированию и распространению без его согласия

НЕФТЕХИМПРОЕКТ NEFTECHIMPROEKT		МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ			РР		
<p>бочие условия):</p> <p><math>[\sigma]_{\varphi 2} = 144 \text{ МПа}</math></p> <p>Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре <math>T = 100 \text{ }^{\circ}\text{C}</math>:</p> <p><math>E_2 = 1.91 \cdot 10^5 \text{ МПа}</math></p> <p>Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре <math>T = 100 \text{ }^{\circ}\text{C}</math>:</p> <p><math>\alpha_2 = 0.116 \cdot 10^{-4} / ^{\circ}\text{C}</math></p> <p>Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре <math>20 \text{ }^{\circ}\text{C}</math> (рабочие условия):</p> <p><math>[\sigma]_{\varphi 2}^{20} = 164.5 \text{ МПа}</math></p> <p>Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре <math>T = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}</math>:</p> <p><math>E_{20} = 1.99 \cdot 10^5 \text{ МПа}</math></p> <p><b>Расчётные параметры болтов (шпилек):</b></p> <p>Рабочая длина болта (шпильки):</p> <p><math>L_{\epsilon 0} = h' + h'' + h_{\pi} + h_{\text{ш}}' + h_{\text{ш}}'' = 17 + 20 + 3.2 + 0 + 0 = 40.2 \text{ мм}</math></p> <p>Площадь сечения шпильки (по внутреннему диаметру резьбы):</p> <p><math>f_{\epsilon} = 144 \text{ мм}^2</math></p> <p>Эффективная длина шпильки :</p> <p><math>L_{\epsilon} = L_{\epsilon 0} + 0.56 \cdot d = 40.2 + 0.56 \cdot 16 = 49.16 \text{ мм}</math></p> <p>Податливость шпилек :</p> <p><math>y_{\epsilon} = \frac{L_{\epsilon}}{E_{\epsilon}^{20} \cdot f_{\epsilon} \cdot n} = \frac{49.16}{(2.18 \cdot 10^5 \cdot 144 \cdot 4)} = 0.3915 \cdot 10^{-6} \text{ мм/Н}</math></p> <p><b>Расчётные параметры первого фланца:</b></p> <p><math>\beta = \frac{s_1}{s_0} = 14/5 = 2.8</math></p> <p><math>x = \frac{1}{\sqrt{D} \cdot s_0} = 20/(48 \cdot 5)^{1/2} = 1.291</math></p> <p><math>\kappa = 1 + (\beta - 1) \cdot \frac{x}{x + \frac{1 + \beta}{4}} = 1 + (2.8 - 1) \cdot 1.291 / (1.291 + (1 + 2.8) / 4) = 2.0369</math></p> <p>Эквивалентная толщина втулки для фланца, приварного встык:</p> <p><math>s_3 = \kappa \cdot s_0 = 2.0369 \cdot 5 = 10.185 \text{ мм}</math></p> <p><math>l_0 = \sqrt{D \cdot s_0} = (48 \cdot 5)^{1/2} = 15.492 \text{ мм}</math></p> <p><math>\beta_F = 0.65336</math></p> <p><math>K = \frac{D_K}{D} = 160 / 48 = 3.3333</math></p> <p><math>\beta_T = \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg K) - 1}{(1.05 + 1.945 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} = (3.3333^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg 3.3333) - 1) / ((1.05 + 1.945 \cdot 3.3333^2) \cdot (3.3333 - 1)) = 1.1307</math></p> <p><math>\beta_V = 0.074265</math></p> <p><math>\beta_U = \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg K) - 1}{1.36 \cdot (K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = (3.3333^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg 3.3333) - 1) / (1.36 \cdot (3.3333^2 - 1) \cdot (3.3333 - 1)) = 1.8633</math></p> <p><math>\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} = (0.65336 \cdot 17 + 15.492) / (1.1307 \cdot 15.492) + 0.074265 \cdot 17^3 / (1.8633 \cdot 15.492 \cdot 5^2) = 2.0242</math></p> <p>Угловая податливость фланца при затяжке:</p>							
Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №					Лист 234
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	90651-20600-AM-02-220 РР		

90651-20600-AM-02-220 РР\_изм.0.docx

Формат А4



Характеристики прокладки:

Тип и материал прокладки	Коэффициент m	Удельное давление обжатия q <sub>обж</sub> , МПа	Допускаемое удельное давление [q], МПа	Коэффициент обжатия К	Условный модуль сжатия E <sub>п</sub> , МПа
Спирально-навитая с лентой из нержавеющей стали	3	69	-	-	-

Эффективная ширина прокладки :

b<sub>0</sub> = 6.5 мм

Примечание: 
$$\begin{cases} b_0 = b_{\text{пф}} & \text{при } b_{\text{пф}} \leq 15.0 \text{ мм} \\ b_0 = 3.8 \cdot \sqrt{b_{\text{пф}}} & \text{при } b_{\text{пф}} > 15.0 \text{ мм} \end{cases}$$

Рабочий наружный диаметр прокладки :

D<sub>пф</sub> = min{D<sub>4</sub>; D<sub>нп</sub>} = min{87; 87} = 87 мм

Средний эффективный диаметр прокладки:

D<sub>ст</sub> = D<sub>пф</sub> - b<sub>0</sub> = 87 - 6.5 = 80.5 мм

Для металлических и асбометаллических прокладок у<sub>п</sub> = 0.

Расчёт нагрузок:

Равнодействующая давления :

Q<sub>д</sub> = 0.785 · D<sub>ст</sub><sup>2</sup> · p = 0.785 · 80.5<sup>2</sup> · 1.6001 = 8139.9 Н

Усилие на прокладке в рабочих условиях, необходимое для обеспечения герметичности:

R<sub>п</sub> = π · D<sub>ст</sub> · b<sub>0</sub> · m · |p| = 3.1416 · 80.5 · 6.5 · 3 · |1.6001| = 7891.1 Н

Усилие, необходимое для смятия прокладки при затяжке :

P<sub>обж</sub> = 0.5 · π · D<sub>ст</sub> · b<sub>0</sub> · q<sub>обж</sub> = 0.5 · 3.1416 · 80.5 · 6.5 · 69 = 56712 Н

Расчетная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для герметизации в рабочих условиях (нагрузки + давление, без учета температурной нагрузки)

η = y<sub>п</sub> + y<sub>б</sub> + y<sub>ф</sub><sup>I</sup> · b<sup>I/2</sup> + y<sub>ф</sub><sup>II</sup> · b<sup>II/2</sup> = 0 + 0.3915 · 10<sup>-6</sup> + 0.2482 · 10<sup>-4</sup> · 22.25<sup>2</sup> + 0.20475 · 10<sup>-4</sup> · 22.25<sup>2</sup> = 0.78287 · 10<sup>-6</sup> мм/Н

Коэффициенты жёсткости для фланцевого соединения, нагруженного внутренним давлением и внешней осевой силой:

$$\alpha = 1 - \frac{y_{\text{п}} - (y_{\text{ф}}^I \cdot e^I \cdot b^I + y_{\text{ф}}^{II} \cdot e^{II} \cdot b^{II})}{\eta}$$
  
= 1 - (0 - (0.2482 · 10<sup>-4</sup> · 11.158 · 22.25 + 0.20475 · 10<sup>-4</sup> · 11.158 · 22.25)) / 0.78287 · 10<sup>-6</sup>  
= 1.2507

Коэффициенты жёсткости для фланцевого соединения, нагруженного внешним изгибающим моментом:

$$\alpha_{\text{М}} = \frac{y_{\text{б}} + y_{\text{фМ}}^I \cdot b^I \cdot \left( b^I + e^I - \frac{e^{I/2}}{D_{\text{ст}}} \right) + y_{\text{фМ}}^{II} \cdot b^{II} \cdot \left( b^{II} + e^{II} - \frac{e^{II/2}}{D_{\text{ст}}} \right)}{y_{\text{б}} + y_{\text{п}} \cdot \left( \frac{D_{\text{б}}}{D_{\text{ст}}} \right)^2 + y_{\text{фМ}}^I \cdot b^I/2 + y_{\text{фМ}}^{II} \cdot b^{II/2}}$$
  
= [0.3915 · 10<sup>-6</sup> + 0.22181 · 10<sup>-4</sup> · 22.25 · (22.25 + 11.158 - 11.158<sup>2</sup> / 80.5) + 0.13622 · 10<sup>-4</sup> · 22.25 · (22.25 + 11.158 - 11.158<sup>2</sup> / 80.5)] / [0.3915 · 10<sup>-6</sup> + 0 · (125 / 80.5)<sup>2</sup> + 0.22181 · 10<sup>-4</sup> · 22.25<sup>2</sup> + 0.22181 · 10<sup>-4</sup> · 22.25<sup>2</sup>]  
= 1.1907

P<sub>б1</sub> = α · (Q<sub>д</sub> + F) + R<sub>п</sub> +  $\frac{4 \cdot \alpha_{\text{М}} \cdot |M|}{D_{\text{ст}}}$  = 1.2507 · (8139.9 + 0) + 7891.1 + 4 · 1.1907 · |0| / 80.5 = 18072 Н

Расчетная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для герметизации в рабочих условиях (только давление, без учета температурной нагрузки)

Взам. инв. №		Подп. и дата		Инв. № подл.		90651-20600-AM-02-220 РР	Лист
							236
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата			

Этот документ является собственностью "НЕФТЕХИМПРОЕКТ" и не подлежит копированию и распространению без его согласия	НЕФТЕХИМПРОЕКТ NEFTECHIMPROEKT		МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ		РР
	$P_{б1} = \alpha \cdot (Q_{д} + F) + R_{п} + \frac{4 \cdot \alpha_{м} \cdot  M }{D_{ст}} \quad 1.2507 \cdot (8139.9 + 0) + 7891.1 + 4 \cdot 1.1907 \cdot  0  / 80.5 = 18072 \text{ Н}$ <p>Суммарная площадь сечения болтов (шпилек) по внутреннему диаметру резьбы или сечению наименьшего диаметра:</p> $A_{б} = n \cdot f_{б} = 4 \cdot 144 = 576 \text{ мм}^2$ <p>Расчётная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для обжатия прокладки и минимального начального натяжения болтов:</p> $P_{б2} = \max \{ P_{обж}; 0.4 \cdot A_{б} \cdot [\sigma]_{б}^{20} \} = \max \{ 56712; 0.4 \cdot 576 \cdot 230 = 52992 \} = 56712 \text{ Н}$ <p><b>Расчёт без учета стесненности температурных деформаций</b></p> <p><b>Расчёт болтов(шпилек):</b></p> <p>Коэффициент увеличения допускаемых напряжений при затяжке: <math>\xi = 1.2</math></p> <p>Коэффициент условий работы: <math>K_{ур} = 1</math></p> <p>Коэффициент условий затяжки: <math>K_{уз} = 1</math></p> <p>Коэффициент учета нагрузки от температурных деформаций: <math>K_{ут} = 1</math></p> <p>Допускаемые напряжения для болтов (шпилек) при затяжке :</p> $[\sigma]_{б}^м = \xi \cdot K_{ур} \cdot K_{уз} \cdot K_{ут} \cdot [\sigma]_{б}^{20} = 1.2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 230 = 276 \text{ МПа}$ <p>Болтовая нагрузка в условиях затяжки :</p> $P_{б}^м = \max \{ P_{б1}; P_{б2} \} = \max \{ 18072; 56712 \} = 56712 \text{ Н}$ <p>Условие прочности при затяжке:</p> $\sigma_{б1} = \frac{P_{б}^м}{A_{б}} \leq [\sigma]_{б}^м$ $\sigma_{б1} = \frac{P_{б}^м}{A_{б}} = 56712 / 576 = 98.459 \text{ МПа}$ <p>Крутящий момент при затяжке болтов (шпилек) без смазки при <math>\sigma_{б1} &lt; 120 \text{ МПа}</math>:</p> $M_{кр} = 0.3 \cdot \frac{P_{б}^м \cdot d}{n} = 0.3 \cdot 56712 \cdot 16 / 4 = 68.055 \text{ Н·м}$ <p>При наличии смазки величина <math>M_{кр}</math> снижается на 25% и составляет <math>0.75 \cdot M_{кр} = 51.041 \text{ Н·м}</math></p> <p><math>98.459 \text{ МПа} \leq 276 \text{ МПа}</math>, <b>Условие прочности выполнено.</b></p> <p>Допускаемые напряжения для болтов (шпилек) при рабочих условиях:</p> $[\sigma]_{б}^р = K_{ур} \cdot K_{уз} \cdot K_{ут} \cdot [\sigma]_{б} = 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 230 = 230 \text{ МПа}$ <p>Болтовая нагрузка в рабочих условиях :</p> $P_{б}^р = P_{б}^м + (1 - \alpha) \cdot (Q_{д} + F) + \frac{4 \cdot (1 - \alpha_{м}) \cdot  M }{D_{ст}} = 56712 + (1 - 1.2507) \cdot (8139.9 + 0) + 4 \cdot (1 - 1.1907) \cdot  0  / 80.5 = 54672 \text{ Н}$ <p>Условие прочности в рабочих условиях:</p> $\sigma_{б2} = \frac{P_{б}^р}{A_{б}} \leq [\sigma]_{б}^р$ $\sigma_{б2} = \frac{P_{б}^р}{A_{б}} = 54672 / 576 = 94.916 \text{ МПа}$ <p><math>94.916 \text{ МПа} \leq 230 \text{ МПа}</math>, <b>Условие прочности выполнено.</b></p> <p><b>Расчёт первого фланца:</b></p> <p>Коэффициент, учитывающий изгиб тарелки фланца между шпильками:</p> $C_F = \max \left\{ 1; \sqrt[3]{\frac{\frac{\pi \cdot D_{б}}{n}}{2 \cdot d + \frac{6 \cdot h}{m + 0.5}}} \right\} = \max \{ 1; (3.1416 \cdot 125 / 4 / (2 \cdot 16 + 6 \cdot 17 / (3 + 0.5)))^{1/3} \} = 1.2671$				
	90651-20600-AM-02-220 РР				
	Изм. Лист № док. Подп. Дата				
Лист 237					

90651-20600-AM-02-220 РР изм.0.docx

Формат А4





Окружное напряжение в тарелке в рабочих условиях :

$$\sigma_T^P = \frac{\beta_Y \cdot M^P}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^P = 1.7043 \cdot 1656.5 / (17^2 \cdot 48) - 1.1978 \cdot 115.25 = 65.47 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_1$  (+):

$$\sigma_{1mm}^{P+} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_1}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = (0.785 \cdot 48^2 \cdot 1.6001 + 0 + 4 \cdot 0 / (48 + 14)) / (3.1416 \cdot (48 + 14) \cdot (14 - 3)) = 1.3508 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_1$  (п. 8.5.1):

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P+} + \sigma_R^P \right|, \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P+} + \sigma_T^P \right|, \left| \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^{P+} \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_M$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P+} + \sigma_R^P \right|, \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P+} + \sigma_T^P \right|, \left| \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^{P+} \right| \right\} = \frac{\max\{109.09 - 1.3508 + 115.25; |109.09 - 1.3508 + 65.47|; |109.09 + 1.3508|\}}{1.3508} = 222.98 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_M = 1.5 \cdot [\sigma]_\Phi = 1.5 \cdot 144 = 216 \text{ МПа}$$

$$K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_M = 1.2 \cdot 1 \cdot 216 = 259.2 \text{ МПа}$$

222.98 МПа ≤ 259.2 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_1$  (-):

$$\sigma_{1mm}^{P-} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F - \frac{4 \cdot M}{D + s_1}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = (0.785 \cdot 48^2 \cdot 1.6001 + 0 - 4 \cdot 0 / (48 + 14)) / (3.1416 \cdot (48 + 14) \cdot (14 - 3)) = 1.3508 \text{ МПа}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P-} + \sigma_R^P \right|, \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P-} + \sigma_T^P \right|, \left| \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^{P-} \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_M$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P-} + \sigma_R^P \right|, \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P-} + \sigma_T^P \right|, \left| \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^{P-} \right| \right\} = \frac{\max\{109.09 - 1.3508 + 115.25; |109.09 - 1.3508 + 65.47|; |109.09 + 1.3508|\}}{1.3508} = 222.98 \text{ МПа}$$

222.98 МПа ≤ 259.2 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_0^M = f \cdot \sigma_1^M = 1 \cdot 105.3 = 105.3 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении  $s_0$  (п. 8.5.2):

$$\sigma_0^M \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R^{20}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_R^{20} = 3 \cdot [\sigma]_\Phi^{20} = 3 \cdot 164.5 = 493.5 \text{ МПа}$$

$$1.3 \cdot [\sigma]_R^{20} = 1.3 \cdot 493.5 = 641.55 \text{ МПа}$$

105.3 МПа ≤ 641.55 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_0^P = f \cdot \sigma_1^P = 1 \cdot 109.09 = 109.09 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_0$  (+):

$$\sigma_{0mm}^{P+} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_0}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = (0.785 \cdot 48^2 \cdot 1.6001 + 0 + 4 \cdot 0 / (48 + 5)) / (3.1416 \cdot (48 + 5) \cdot (5 - 3)) = 8.6907 \text{ МПа}$$

Окружное мембранное напряжение от действия давления во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_{0mo}^P = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s_0 - c)} = 1.6001 \cdot 48 / (2 \cdot (5 - 3)) = 19.202 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P+} \right|, \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|, \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P+} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P+} \right|, \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|, \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P+} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} = \frac{\max\{109.09 \pm 8.6907; |0.3 \cdot 109.09 \pm 19.202|; |0.7 \cdot 109.09 \pm (8.6907 - 19.202)|\}}{1} = 117.78 \text{ МПа}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_R = 3 \cdot [\sigma]_\Phi = 3 \cdot 144 = 432 \text{ МПа}$$

Взам. инв. №	Меридиональное мембранное напряжение в втулке в рабочих условиях в сечении S <sub>0</sub> (+):					
	$\sigma_{0mm}^{P+} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_0}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = (0.785 \cdot 48^2 \cdot 1.6001 + 0 + 4 \cdot 0 / (48 + 5)) / (3.1416 \cdot (48 + 5) \cdot (5 - 3)) = 8.6907 \text{ МПа}$					
Подп. и дата	Окружное мембранное напряжение от действия давления во втулке в рабочих условиях в сечении s <sub>0</sub> :					
	$\sigma_{0mo}^P = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s_0 - c)} = 1.6001 \cdot 48 / (2 \cdot (5 - 3)) = 19.202 \text{ МПа}$					
Инв. № подл.	Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении s <sub>0</sub> :					
	$\max \left\{ \left  \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P+} \right ; \left  0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right ; \left  0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P+} - \sigma_{0mo}^P) \right  \right\} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R$ $\max \left\{ \left  \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P+} \right ; \left  0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right ; \left  0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P+} - \sigma_{0mo}^P) \right  \right\} = \frac{\max\{ 109.09 \pm 8.6907 ;  0.3 \cdot 109.09 \pm 19.202 ;  0.7 \cdot 109.09 \pm (8.6907 - 19.202) \}}{109.09 \pm (8.6907 - 19.202)} = 117.78 \text{ МПа}$					
Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):						
[σ] <sub>R</sub> =3·[σ] <sub>ф</sub> =3*144 = 432 МПа						
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	90651-20600-AM-02-220 РР	
						Лист

$$1.3 \cdot [\sigma]_R = 1.3 \cdot 432 = 561.6 \text{ МПа}$$

117.78 МПа ≤ 561.6 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_0$  (–):

$$\sigma_{0mm}^{P-} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F - \frac{4 \cdot M}{D + s_0}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = (0.785 \cdot 48^2 \cdot 1.6001 + 0 - 4 \cdot 0 / (48 + 5)) / (3.1416 \cdot (48 + 5) \cdot (5 - 3)) = 8.6907 \text{ МПа}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P-} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P-} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P-} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P-} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} = \max \{ |109.09 \pm 8.6907|; |0.3 \cdot 109.09 \pm 19.202|; |0.7 \cdot 109.09 \pm (8.6907 - 19.202)| \}$$

$$= 117.78 \text{ МПа}$$

117.78 МПа ≤ 561.6 МПа, **Условие прочности выполнено.**

**Расчет в сечении  $s_0$  в рабочих условиях (п. 8.5.5 ГОСТ 34233.4-2017):**

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $S_0$ :

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0mo}^P \right|; \left| \sigma_{0mm}^P \right| \right\} \leq [\sigma]_\Phi$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0mo}^P \right|; \left| \sigma_{0mm}^P \right| \right\} = \max \{ |19.202|; |8.6907| \} = 19.202 \text{ МПа}$$

19.202 МПа ≤ 144 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Условие статической прочности при затяжке для тарелок:

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_T^M \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_\Phi^{20}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_T^M \right| \right\} = \max \{ |111.24|; |63.195| \} = 111.24 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_\Phi^{20} = 1 \cdot 164.5 = 164.5 \text{ МПа}$$

111.24 МПа ≤ 164.5 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Условие статической прочности в рабочих условиях для тарелок:

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_T^P \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_\Phi$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_T^P \right| \right\} = \max \{ |115.25|; |65.47| \} = 115.25 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_\Phi = 1 \cdot 144 = 144 \text{ МПа}$$

115.25 МПа ≤ 144 МПа, **Условие прочности выполнено.**

### Жёсткость фланца:

Угол поворота фланца в рабочих условиях:

$$\Theta = M^P \cdot y_\Phi \cdot \frac{E^{20}}{E} = 1656.5 \cdot 0.2482 \cdot 10^{-4} \cdot 1.99 \cdot 10^5 / 1.91 \cdot 10^5 = 0.042837^\circ$$

Допускаемый угол поворота фланца:

$$[\Theta] = 0.34377^\circ$$

Коэффициент увеличения допускаемого угла поворота фланцев:  $K_\Theta = 1$

Условие выполнения жесткости фланцев:

$$\Theta \leq K_\Theta \cdot [\Theta] = 1 \cdot 0.34377 = 0.34377^\circ$$

**Условие жёсткости выполнено.**

### Расчёт второго фланца:

Коэффициент, учитывающий изгиб тарелки фланца между шпильками:

$$C_F = \max \left\{ 1; \sqrt{\frac{\frac{\pi \cdot D_\Phi}{n}}{2 \cdot d + \frac{6 \cdot h}{m + 0.5}}} \right\} = \max \{ 1; (3.1416 \cdot 125 / 4 / (2 \cdot 16 + 6 \cdot 20 / (3 + 0.5)))^{1/2} \} = 1.217$$

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при затяжке:

$$M^M = C_F \cdot P_\Phi^M \cdot b = 1.217 \cdot 56712 \cdot 22.25 = 1535.7 \text{ Н·м}$$

Взам. инв. №	Коэффициент увеличения допускаемого угла поворота фланцев. $K_{\Theta} = 1$ Условие выполнения жесткости фланцев : $\Theta \leq K_{\Theta} \cdot [\Theta] = 1 * 0.34377 = 0.34377^{\circ}$ <b>Условие жёсткости выполнено.</b>				
	Подп. и дата	<b>Расчёт второго фланца:</b> Коэффициент, учитывающий изгиб тарелки фланца между шпильками: $C_F = \max \left\{ 1; \sqrt{\frac{\frac{\pi \cdot D_6}{n}}{2 \cdot d + \frac{6 \cdot h}{m + 0.5}}} \right\} = \max\{1; (3.1416 * 125 / 4 / (2 * 16 + 6 * 20 / (3 + 0.5)))^{1/2}\} = 1.217$ Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при затяжке : $M^M = C_F \cdot P_6^M \cdot b = 1.217 * 56712 * 22.25 = 1535.7 \text{ Н}\cdot\text{м}$			
Инв. № подл.					
	Изм. Лист № док. Подп. Дата				Лист 240

$$f = \max \left\{ \frac{C_{36}}{1+A}, 1.0 \right\} = \max\{0.44314 / (1+1.8); 1.0\} = 1$$

$$D^* = D + c + s_1 \text{ при } (D + 2 \cdot c) < 20 \cdot (s_1 - c) \text{ и } f = 1 = 48 + 0 + 14 \text{ при } 48 < 20 \cdot (14 - 0) \text{ и } f = 1 = 62 \text{ мм}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении  $s_1$ :

$$\sigma_1^M = \frac{M^M}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D^*} = 1535.7 / (2.4537 \cdot (14 - 3)^2 \cdot 62) = 83.424 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в условиях затяжки:

$$\sigma_R^M = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + 1.0}{\lambda \cdot h^2 \cdot 1.0 \cdot D} \cdot M^M = (1.33 \cdot 0.65336 \cdot 20 + 15.492) / (2.4537 \cdot 20^2 \cdot 15.492 \cdot 48) \cdot 1535.7 = 69.164 \text{ МПа}$$

$$\beta_Y = \frac{1}{K-1} \cdot \left( 0.69 + 5.72 \cdot \frac{K^2 \cdot \lg K}{K^2 - 1} \right) = 1 / (3.3333 - 1) \cdot (0.69 + 5.72 \cdot 3.3333^2 \cdot \lg 3.3333 / (3.3333^2 - 1)) = 1.7043$$

$$\beta_Z = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = (3.3333^2 + 1) / (3.3333^2 - 1) = 1.1978$$

Окружное напряжение в тарелке в условиях затяжки:

$$\sigma_T^M = \frac{\beta_Y \cdot M^M}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^M = 1.7043 \cdot 1535.7 / (20^2 \cdot 48) - 1.1978 \cdot 69.164 = 53.469 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении  $s_1$  (п. 8.5.1):

$$\max \{ |\sigma_1^M + \sigma_R^M|; |\sigma_1^M + \sigma_T^M| \} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{м}}^{20}$$

$$\max \{ |\sigma_1^M + \sigma_R^M|; |\sigma_1^M + \sigma_T^M| \} = \max\{|83.424 + 69.164|; |83.424 + 53.469|\} = 152.59 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_{\text{м}}^{20} = 1.5 \cdot [\sigma]_{\text{ф}}^{20} = 1.5 \cdot 164.5 = 246.75 \text{ МПа}$$

$$K = \frac{D_{\text{н}}}{D} = 160 / 48 = 3.3333$$

Коэффициент учета размеров тарелки фланца:  $K_S = 1.2$

$$K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{м}}^{20} = 1.2 \cdot 1 \cdot 246.75 = 296.1 \text{ МПа}$$

152.59 МПа ≤ 296.1 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Приведенная нагрузка от внешней силы и момента:

$$Q_{\text{FM}}^+ = F + \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{сн}}} = 0 + 4 \cdot |0| / 80.5 = 0 \text{ Н}$$

$$Q_{\text{FM}}^- = F - \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{сн}}} = 0 - 4 \cdot |0| / 80.5 = 0 \text{ Н}$$

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при рабочих условиях:

$$M^P = C_F \cdot \max \{ F_6^P \cdot b + (Q_{\text{д}} + Q_{\text{FM}}) \cdot e; |Q_{\text{д}} + Q_{\text{FM}}| \cdot e \} = \frac{1.217 \cdot \max\{54672 \cdot 22.25 + (8139.9 + 0) \cdot 11.158; |8139.9 + 0| \cdot 11.158\}}{11.158} = 1590.9 \text{ Н·м}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_1$ :

$$\sigma_1^P = \frac{M^P}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D^*} = 1590.9 / (2.4537 \cdot (14 - 3)^2 \cdot 62) = 86.427 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в рабочих условиях:

$$\sigma_R^P = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + 1.0}{\lambda \cdot h^2 \cdot 1.0 \cdot D} \cdot M^P = (1.33 \cdot 0.65336 \cdot 20 + 15.492) / (2.4537 \cdot 20^2 \cdot 15.492 \cdot 48) \cdot 1590.9 = 71.653 \text{ МПа}$$

Окружное напряжение в тарелке в рабочих условиях:

$$\sigma_T^P = \frac{\beta_Y \cdot M^P}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^P = 1.7043 \cdot 1590.9 / (20^2 \cdot 48) - 1.1978 \cdot 71.653 = 55.394 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_1$  (+):

Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	90651-20600-AM-02-220 РР	Лист
Взам. инв. №						
Подп. и дата						
Инв. № подл.						241

$$\sigma_{\text{Imm}}^{P+} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_1}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = (0.785 \cdot 48^2 \cdot 1.6001 + 0 + 4 \cdot 0 / (48 + 14)) / (3.1416 \cdot (48 + 14) \cdot (14 - 3)) = 1.3508 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_1$  (п. 8.5.1):

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{Imm}}^{P+} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{Imm}}^{P+} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{\text{Imm}}^{P+} \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{м}}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{Imm}}^{P+} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{Imm}}^{P+} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{\text{Imm}}^{P+} \right| \right\} = \max \{ |86.427 - 1.3508 + 71.653|; |86.427 - 1.3508 + 55.394|; |86.427 + 1.3508| \} = 156.73 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_{\text{м}} = 1.5 \cdot [\sigma]_{\text{ф}} = 1.5 \cdot 144 = 216 \text{ МПа}$$

$$K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{м}} = 1.2 \cdot 1 \cdot 216 = 259.2 \text{ МПа}$$

156.73 МПа ≤ 259.2 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_1$  (–):

$$\sigma_{\text{Imm}}^{P-} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F - \frac{4 \cdot M}{D + s_1}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = (0.785 \cdot 48^2 \cdot 1.6001 + 0 - 4 \cdot 0 / (48 + 14)) / (3.1416 \cdot (48 + 14) \cdot (14 - 3)) = 1.3508 \text{ МПа}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{Imm}}^{P-} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{Imm}}^{P-} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{\text{Imm}}^{P-} \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{м}}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{Imm}}^{P-} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{Imm}}^{P-} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{\text{Imm}}^{P-} \right| \right\} = \max \{ |86.427 - 1.3508 + 71.653|; |86.427 - 1.3508 + 55.394|; |86.427 + 1.3508| \} = 156.73 \text{ МПа}$$

156.73 МПа ≤ 259.2 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_0^{\text{м}} = f \cdot \sigma_1^{\text{м}} = 1 \cdot 83.424 = 83.424 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении  $s_0$  (п. 8.5.2):

$$\sigma_0^{\text{м}} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_{\text{R}}^{20}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_{\text{R}}^{20} = 3 \cdot [\sigma]_{\text{ф}}^{20} = 3 \cdot 164.5 = 493.5 \text{ МПа}$$

$$1.3 \cdot [\sigma]_{\text{R}}^{20} = 1.3 \cdot 493.5 = 641.55 \text{ МПа}$$

83.424 МПа ≤ 641.55 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_0^P = f \cdot \sigma_1^P = 1 \cdot 86.427 = 86.427 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_0$  (+):

$$\sigma_{0\text{mm}}^{P+} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_0}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = (0.785 \cdot 48^2 \cdot 1.6001 + 0 + 4 \cdot 0 / (48 + 5)) / (3.1416 \cdot (48 + 5) \cdot (5 - 3)) = 8.6907 \text{ МПа}$$

Окружное мембранное напряжение от действия давления во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_{0\text{mo}}^P = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s_0 - c)} = 1.6001 \cdot 48 / (2 \cdot (5 - 3)) = 19.202 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0\text{mm}}^{P+} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0\text{mo}}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0\text{mm}}^{P+} - \sigma_{0\text{mo}}^P) \right| \right\} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_{\text{R}}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0\text{mm}}^{P+} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0\text{mo}}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0\text{mm}}^{P+} - \sigma_{0\text{mo}}^P) \right| \right\} = \max \{ |86.427 \pm 8.6907|; |0.3 \cdot 86.427 \pm 19.202|; |0.7 \cdot 86.427 \pm (8.6907 - 19.202)| \} = 95.118 \text{ МПа}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_{\text{R}} = 3 \cdot [\sigma]_{\text{ф}} = 3 \cdot 144 = 432 \text{ МПа}$$

$$1.3 \cdot [\sigma]_{\text{R}} = 1.3 \cdot 432 = 561.6 \text{ МПа}$$

95.118 МПа ≤ 561.6 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_0$  (–):

Взам. инв. №					
Подп. и дата					
Инв. № подл.					
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	

90651-20600-AM-02-220 РР

Лист

242



Нагрузка от температурных деформаций :

$$Q_t = \gamma \cdot \left[ \begin{aligned} &(\alpha_{\Phi}' \cdot h' + \alpha_{\text{ш}}' \cdot h_{\text{ш}}') \cdot (t_{\Phi 1} - 20^{\circ}\text{C}) + \\ &+ (\alpha_{\Phi}'' \cdot h'' + \alpha_{\text{ш}}'' \cdot h_{\text{ш}}'') \cdot (t_{\Phi 2} - 20^{\circ}\text{C}) - \\ &- \alpha_{\text{с}} \cdot (h' + h'' + h_{\text{ш}}' + h_{\text{ш}}'') \cdot (t_{\text{с}} - 20^{\circ}\text{C}) \end{aligned} \right]$$

$$= 1.243 \cdot 10^6 \cdot ((0.116 \cdot 10^{-4} \cdot 20 + 0 \cdot 0) \cdot (100 - 20^{\circ}\text{C}) + ((0.116 \cdot 10^{-4} \cdot 17 + 0 \cdot 0) \cdot (100 - 20^{\circ}\text{C}) - 0.134 \cdot 10^{-4} \cdot (20 + 17 + 0 + 0) \cdot (97 - 20^{\circ}\text{C}))$$

$$= (-4773.8) \text{ Н}$$

$$P_{\text{с1}} = \max \left\{ \begin{aligned} &\alpha \cdot (Q_{\text{п}} + F) + R_{\text{п}} + \frac{4 \cdot \alpha_{\text{м}} \cdot |M|}{D_{\text{ст}}} \\ &\alpha \cdot (Q_{\text{п}} + F) + R_{\text{п}} + \frac{4 \cdot \alpha_{\text{м}} \cdot |M|}{D_{\text{ст}}} - Q_t \end{aligned} \right\} = \max \{ 1.2507 \cdot (8139.9 + 0) + 7891.1 + 4 \cdot 1.1907 \cdot |0| / 80.5 = 180721.2507 \cdot (8139.9 + 0) + 7891.1 + 4 \cdot 1.1907 \cdot |0| / 80.5 - (-4773.8) = 22845 \} = 22845 \text{ Н}$$

Болтовая нагрузка в условиях затяжки :

$$P_{\text{с}}^{\text{м}} = \max\{P_{\text{с1}}; P_{\text{с2}}\} = \max\{22845; 56712\} = 56712 \text{ Н}$$

Условие прочности при затяжке:

$$\sigma_{\text{с1}} = \frac{P_{\text{с}}^{\text{м}}}{A_{\text{с}}} \leq [\sigma]_{\text{с}}^{\text{м}}$$

$$\sigma_{\text{с1}} = \frac{P_{\text{с}}^{\text{м}}}{A_{\text{с}}} = 56712 / 576 = 98.459 \text{ МПа}$$

Крутящий момент при затяжке болтов (шпилек) без смазки при  $\sigma_{\text{с1}} < 120 \text{ МПа}$ :

$$M_{\text{кр}} = 0.3 \cdot \frac{P_{\text{с}}^{\text{м}} \cdot d}{n} = 0.3 \cdot 56712 \cdot 16 / 4 = 68.055 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

При наличии смазки величина  $M_{\text{кр}}$  снижается на 25% и составляет  $0.75 \cdot M_{\text{кр}} = 51.041 \text{ Н}\cdot\text{м}$

$98.459 \text{ МПа} \leq 358.8 \text{ МПа}$ , **Условие прочности выполнено.**

Допускаемые напряжения для болтов (шпилек) при рабочих условиях:

$$[\sigma]_{\text{с}}^{\text{р}} = K_{\text{уп}} \cdot K_{\text{уз}} \cdot K_{\text{ут}} \cdot [\sigma]_{\text{с}} = 1 \cdot 1 \cdot 1.3 \cdot 230 = 299 \text{ МПа}$$

Болтовая нагрузка в рабочих условиях :

$$P_{\text{с}}^{\text{р}} = P_{\text{с}}^{\text{м}} + (1 - \alpha) \cdot (Q_{\text{п}} + F) + Q_t + \frac{4 \cdot (1 - \alpha_{\text{м}}) \cdot |M|}{D_{\text{ст}}} = 56712 + (1 - 1.2507) \cdot (8139.9 + 0) + (-4773.8) + 4 \cdot (1 - 1.1907) \cdot |0| / 80.5 = 49898 \text{ Н}$$

Условие прочности в рабочих условиях:

$$\sigma_{\text{с2}} = \frac{P_{\text{с}}^{\text{р}}}{A_{\text{с}}} \leq [\sigma]_{\text{с}}^{\text{р}}$$

$$\sigma_{\text{с2}} = \frac{P_{\text{с}}^{\text{р}}}{A_{\text{с}}} = 49898 / 576 = 86.629 \text{ МПа}$$

$86.629 \text{ МПа} \leq 299 \text{ МПа}$ , **Условие прочности выполнено.**

### Расчёт первого фланца:

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при затяжке :

$$M^{\text{м}} = C_{\text{ф}} \cdot P_{\text{с}}^{\text{м}} \cdot b = 1.2671 \cdot 56712 \cdot 22.25 = 1599 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении  $s_1$ :

$$\sigma_1^{\text{м}} = \frac{M^{\text{м}}}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D} = 1599 / (2.0242 \cdot (14 - 3)^2 \cdot 62) = 105.3 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в условиях затяжки :

$$\sigma_{\text{R}}^{\text{м}} = \frac{1.33 \cdot \beta_{\text{ф}} \cdot h + 1.0}{\lambda \cdot h^2 \cdot 1.0 \cdot D} \cdot M^{\text{м}} = (1.33 \cdot 0.65336 \cdot 17 + 15.492) / (2.0242 \cdot 17^2 \cdot 15.492 \cdot 48) \cdot 1599 = 111.24 \text{ МПа}$$

Окружное напряжение в тарелке в условиях затяжки :

$$\sigma_{\text{T}}^{\text{м}} = \frac{\beta_{\text{в}} \cdot M^{\text{м}}}{h^2 \cdot D} - \beta_{\text{з}} \cdot \sigma_{\text{R}}^{\text{м}} = 1.7043 \cdot 1599 / (17^2 \cdot 48) - 1.1978 \cdot 111.24 = 63.195 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении  $s_1$  (п. 8.5.1):

Взам. инв. №					
Подп. и дата					
Инв. № подл.					
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	

90651-20600-AM-02-220 РР

Лист

244





$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^P + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^P + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^P \right| \right\} = \frac{\max\{|100.22 - 1.3508 + 105.88|; |100.22 - 1.3508 + 60.15|; |100.22 + 1.3508|\}}{1.3508} = 204.76 \text{ МПа}$$

204.76 МПа ≤ 336.96 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_0^M = f \cdot \sigma_1^M = 1 \cdot 105.3 = 105.3 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении  $s_0$  (п. 8.5.2):

$$\sigma_0^M \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R^{20}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_R^{20} = 3 \cdot [\sigma]_\Phi^{20} = 3 \cdot 164.5 = 493.5 \text{ МПа}$$

$$1.3 \cdot [\sigma]_R^{20} = 1.3 \cdot 493.5 = 641.55 \text{ МПа}$$

105.3 МПа ≤ 641.55 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_0^P = f \cdot \sigma_1^P = 1 \cdot 100.22 = 100.22 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_0$  (+):

$$\sigma_{0mm}^{P+} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_0}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = \frac{(0.785 \cdot 48^2 \cdot 1.6001 + 0 + 4 \cdot 0 / (48 + 5)) / (3.1416 \cdot (48 + 5) \cdot (5 - 3))}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = 8.6907 \text{ МПа}$$

Окружное мембранное напряжение от действия давления во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_{0mo}^P = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s_0 - c)} = \frac{1.6001 \cdot 48 / (2 \cdot (5 - 3))}{2 \cdot (s_0 - c)} = 19.202 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P+} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P+} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P+} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P+} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} = \frac{\max\{|100.22 \pm 8.6907|; |0.3 \cdot 100.22 \pm 19.202|; |0.7 \cdot 100.22 \pm (8.6907 - 19.202)|\}}{1.3508} = 108.91 \text{ МПа}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_R = 3 \cdot [\sigma]_\Phi = 3 \cdot 144 = 432 \text{ МПа}$$

$$1.3 \cdot [\sigma]_R = 1.3 \cdot 432 = 561.6 \text{ МПа}$$

108.91 МПа ≤ 561.6 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_0$  (-):

$$\sigma_{0mm}^{P-} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F - \frac{4 \cdot M}{D + s_0}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = \frac{(0.785 \cdot 48^2 \cdot 1.6001 + 0 - 4 \cdot 0 / (48 + 5)) / (3.1416 \cdot (48 + 5) \cdot (5 - 3))}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = 8.6907 \text{ МПа}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P-} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P-} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P-} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P-} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} = \frac{\max\{|100.22 \pm 8.6907|; |0.3 \cdot 100.22 \pm 19.202|; |0.7 \cdot 100.22 \pm (8.6907 - 19.202)|\}}{1.3508} = 108.91 \text{ МПа}$$

108.91 МПа ≤ 561.6 МПа, **Условие прочности выполнено.**

**Расчет в сечении  $s_0$  в рабочих условиях (п. 8.5.5 ГОСТ 34233.4-2017):**

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0mo}^P \right|; \left| \sigma_{0mm}^P \right| \right\} \leq [\sigma]_\Phi$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0mo}^P \right|; \left| \sigma_{0mm}^P \right| \right\} = \max\{|19.202|; |8.6907|\} = 19.202 \text{ МПа}$$

19.202 МПа ≤ 144 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Условие статической прочности при затяжке для тарелок:

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_T^M \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_\Phi^{20}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_T^M \right| \right\} = \max\{|111.24|; |63.195|\} = 111.24 \text{ МПа}$$

Взам. инв. №		$\max \left\{ \left  \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^P \right ; \left  0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right ; \left  0.7 \cdot \sigma_0^P \pm \left( \sigma_{0mm}^P - \sigma_{0mo}^P \right) \right  \right\} = \frac{\max\{100.22 \pm 8.6907;  0.3 * 100.22 \pm 19.202 ;  0.7 * 100.22 \pm (8.6907 - 19.202) \}}{100.22 \pm (8.6907 - 19.202)} =$	
		108.91 МПа	
Подп. и дата		108.91 МПа ≤ 561.6 МПа, <b>Условие прочности выполнено.</b>	
		<b>Расчет в сечении s<sub>0</sub> в рабочих условиях (п. 8.5.5 ГОСТ 34233.4-2017):</b>	
Инв. № подл.		Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении s <sub>0</sub> :	
		$\max \left\{ \left  \sigma_{0mo}^P \right ; \left  \sigma_{0mm}^P \right  \right\} \leq [\sigma]_{\Phi}$ $\max \left\{ \left  \sigma_{0mo}^P \right ; \left  \sigma_{0mm}^P \right  \right\} = \max\{19.202;  8.6907 \} = 19.202 \text{ МПа}$ $19.202 \text{ МПа} \leq 144 \text{ МПа, Условие прочности выполнено.}$ $\max \left\{ \left  \sigma_R^M \right ; \left  \sigma_T^M \right  \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_{\Phi}^{20}$ $\max \left\{ \left  \sigma_R^M \right ; \left  \sigma_T^M \right  \right\} = \max\{111.24;  63.195 \} = 111.24 \text{ МПа}$	
		90651-20600-AM-02-220 РР	
		Лист	
		246	
		Изм. Лист № док. Подп. Дата	





$$\sigma_1^P = \frac{M^P}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D} = 1461.7 / (2.4537 \cdot (14 - 3)^2 \cdot 62) = 79.405 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в рабочих условиях :

$$\sigma_R^P = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + l_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot l_0 \cdot D} \cdot M^P = (1.33 \cdot 0.65336 \cdot 20 + 15.492) / (2.4537 \cdot 20^2 \cdot 15.492 \cdot 48) \cdot 1461.7 = 65.831 \text{ МПа}$$

Окружное напряжение в тарелке в рабочих условиях :

$$\sigma_T^P = \frac{\beta_Y \cdot M^P}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^P = 1.7043 \cdot 1461.7 / (20^2 \cdot 48) - 1.1978 \cdot 65.831 = 50.893 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_1$  (+):

$$\sigma_{1mm}^{P+} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_1}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = (0.785 \cdot 48^2 \cdot 1.6001 + 0 + 4 \cdot 0 / (48 + 14)) / (3.1416 \cdot (48 + 14) \cdot (14 - 3)) = 1.3508 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_1$  (п. 8.5.1):

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P+} + \sigma_R^P \right|, \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P+} + \sigma_T^P \right|, \left| \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^{P+} \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{м}}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P+} + \sigma_R^P \right|, \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P+} + \sigma_T^P \right|, \left| \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^{P+} \right| \right\} = \frac{\max\{|79.405 - 1.3508 + 65.831|; |79.405 - 1.3508 + 50.893|; |79.405 + 1.3508|\}}{1.3508} = 143.89 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_{\text{м}} = 1.5 \cdot [\sigma]_{\text{ф}} = 1.5 \cdot 144 = 216 \text{ МПа}$$

$$K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{м}} = 1.2 \cdot 1.3 \cdot 216 = 336.96 \text{ МПа}$$

143.89 МПа ≤ 336.96 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_1$  (-):

$$\sigma_{1mm}^{P-} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F - \frac{4 \cdot M}{D + s_1}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = (0.785 \cdot 48^2 \cdot 1.6001 + 0 - 4 \cdot 0 / (48 + 14)) / (3.1416 \cdot (48 + 14) \cdot (14 - 3)) = 1.3508 \text{ МПа}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P-} + \sigma_R^P \right|, \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P-} + \sigma_T^P \right|, \left| \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^{P-} \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{м}}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P-} + \sigma_R^P \right|, \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P-} + \sigma_T^P \right|, \left| \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^{P-} \right| \right\} = \frac{\max\{|79.405 - 1.3508 + 65.831|; |79.405 - 1.3508 + 50.893|; |79.405 + 1.3508|\}}{1.3508} = 143.89 \text{ МПа}$$

143.89 МПа ≤ 336.96 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_0^M = f \cdot \sigma_1^M = 1 \cdot 83.424 = 83.424 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении  $s_0$  (п. 8.5.2):

$$\sigma_0^M \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R^{20}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_R^{20} = 3 \cdot [\sigma]_{\text{ф}}^{20} = 3 \cdot 164.5 = 493.5 \text{ МПа}$$

$$1.3 \cdot [\sigma]_R^{20} = 1.3 \cdot 493.5 = 641.55 \text{ МПа}$$

83.424 МПа ≤ 641.55 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_0^P = f \cdot \sigma_1^P = 1 \cdot 79.405 = 79.405 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_0$  (+):

$$\sigma_{0mm}^{P+} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_0}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = (0.785 \cdot 48^2 \cdot 1.6001 + 0 + 4 \cdot 0 / (48 + 5)) / (3.1416 \cdot (48 + 5) \cdot (5 - 3)) = 8.6907 \text{ МПа}$$

Окружное мембранное напряжение от действия давления во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_{0mo}^P = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s_0 - c)} = 1.6001 \cdot 48 / (2 \cdot (5 - 3)) = 19.202 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

Взам. инв. №					
Подп. и дата					
Инв. № подл.					
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P+} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm \left( \sigma_{0mm}^{P+} - \sigma_{0mo}^P \right) \right| \right\} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P+} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm \left( \sigma_{0mm}^{P+} - \sigma_{0mo}^P \right) \right| \right\} = \max \{ 79.405 \pm 8.6907; |0.3 * 79.405 \pm 19.202|; |0.7 * 79.405 \pm (8.6907 - 19.202)| \} = 88.095 \text{ МПа}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_R = 3 \cdot [\sigma]_{\Phi} = 3 * 144 = 432 \text{ МПа}$$

$$1.3 \cdot [\sigma]_R = 1.3 * 432 = 561.6 \text{ МПа}$$

88.095 МПа ≤ 561.6 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_0$  (–):

$$\sigma_{0mm}^{P-} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F - \frac{4 \cdot M}{D + s_0}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = (0.785 * 48^2 * 1.6001 + 0 - 4 * 0 / (48 + 5)) / (3.1416 * (48 + 5) * (5 - 3)) = 8.6907 \text{ МПа}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P-} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm \left( \sigma_{0mm}^{P-} - \sigma_{0mo}^P \right) \right| \right\} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P-} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm \left( \sigma_{0mm}^{P-} - \sigma_{0mo}^P \right) \right| \right\} = \max \{ 79.405 \pm 8.6907; |0.3 * 79.405 \pm 19.202|; |0.7 * 79.405 \pm (8.6907 - 19.202)| \} = 88.095 \text{ МПа}$$

88.095 МПа ≤ 561.6 МПа, **Условие прочности выполнено.**

**Расчет в сечении  $s_0$  в рабочих условиях (п. 8.5.5 ГОСТ 34233.4-2017):**

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0mo}^P \right|; \left| \sigma_{0mm}^P \right| \right\} \leq [\sigma]_{\Phi}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0mo}^P \right|; \left| \sigma_{0mm}^P \right| \right\} = \max \{ 19.202; |8.6907| \} = 19.202 \text{ МПа}$$

19.202 МПа ≤ 144 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Условие статической прочности при затяжке для тарелок:

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_T^M \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_{\Phi}^{20}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_T^M \right| \right\} = \max \{ 69.164; |53.469| \} = 69.164 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_{\Phi}^{20} = 1.3 * 164.5 = 213.85 \text{ МПа}$$

69.164 МПа ≤ 213.85 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Условие статической прочности в рабочих условиях для тарелок:

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_T^P \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_{\Phi}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_T^P \right| \right\} = \max \{ 65.831; |50.893| \} = 65.831 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_{\Phi} = 1.3 * 144 = 187.2 \text{ МПа}$$

65.831 МПа ≤ 187.2 МПа, **Условие прочности выполнено.**

### Жёсткость фланца:

Угол поворота фланца в рабочих условиях:

$$\Theta = M^P \cdot y_{\Phi} \cdot \frac{E^{20}}{E} = 1461.7 * 0.20475 \cdot 10^{-4} * 1.99 \cdot 10^5 / 1.91 \cdot 10^5 = 0.031181^\circ$$

Условие выполнения жесткости фланцев :

$$\Theta \leq K_{\Theta} \cdot [\Theta] = 1 * 0.34377 = 0.34377^\circ$$

**Условие жёсткости выполнено.**

### Расчет давления испытаний

Пробное давление при гидравлическом испытании, при работе элемента под внутренним давлением:

$$P_{\text{пр}} = 1.25 \cdot p \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]_{\text{т}}} = 1.25 * 1.6001 * 164.5 / 144 = 2.2849 \text{ МПа}$$

Пробное давление при гидравлическом испытании, при работе элемента под внутренним давлением:

Взам. инв. №		<b>Жесткость фланца:</b> Угол поворота фланца в рабочих условиях: $\Theta = M^P \cdot y_{\Phi} \cdot \frac{E^{20}}{E} = 1461.7 * 0.20475 \cdot 10^{-4} * 1.99 \cdot 10^5 / 1.91 \cdot 10^5 = 0.031181^{\circ}$ Условие выполнения жесткости фланцев : $\Theta \leq K_{\Theta} \cdot [\Theta] = 1 * 0.34377 = 0.34377^{\circ}$ <b>Условие жёсткости выполнено.</b>  <b>Расчет давления испытаний</b> Пробное давление при гидравлическом испытании, при работе элемента под внутренним давлением: $P_{\text{пр}} = 1.25 \cdot p \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]_t} = 1.25 * 1.6001 * 164.5 / 144 = 2.2849 \text{ МПа}$ Пробное давление при гидравлическом испытании, при работе элемента под внутренним давлением:					
		Подп. и дата					Лист
90651-20600-AM-02-220 РР				249			
Инв. № подл.							Лист
		90651-20600-AM-02-220 РР					
		Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	

Этот документ является собственностью "НЕФТЕХИМПРОЕКТ" и не подлежит копированию и распространению без его согласия

НЕФТЕХИМПРОЕКТ NEFTECHIMPROEKT		МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ			РР						
<div><div><math display="block">P_{\text{тп}} = 1.25 \cdot p \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]_t} = 1.25 \cdot 1.6001 \cdot 164.5 / 144 = 2.2849 \text{ МПа}</math></div><div><div>Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)</div><div>Условия нагружения:</div><div><div>Расчётное осевое сжимающее усилие, F:</div><div>0 Н</div></div><div><div>Расчётный изгибающий момент, M:</div><div>0 Н·м</div></div><div><div>Расчётное внутреннее избыточное давление, p:</div><div>2.2378 МПа</div></div></div><div><div>Расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ 34233.4-2017</div><div>Расчётная температура элементов соединения:</div><div><div>Температура фланца (кольца), t<sub>ф</sub>:</div><div>20 °С</div></div><div><div>Температура фланца (кольца), t<sub>ф</sub>:</div><div>20 °С</div></div><div><div>Температура болтов (шпилек), t<sub>б</sub>:</div><div>20 °С</div></div></div><div><div>Свойства материала болтов (шпилек)</div><div>Допускаемые напряжения для материала 35Х Крепеж при температуре 20 °С (условия гидроиспытаний):</div><div><math display="block">[\sigma]^{20}_b = 230 \text{ МПа}</math></div><div>Модуль продольной упругости для материала 35Х Крепеж при температуре T = 20 °С:</div><div><math display="block">E^{20}_b = 2.18 \cdot 10^5 \text{ МПа}</math></div><div>Коэффициент линейного расширения для материала 35Х Крепеж при температуре T = 20 °С:</div><div><math display="block">\alpha^{20}_b = 0.134 \cdot 10^{-4} / ^\circ\text{С}</math></div></div><div><div>Свойства материала фланца (кольца) 1</div><div>Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре 20 °С (условия гидроиспытаний):</div><div><math display="block">[\sigma]^{20}_{\phi 1} = \frac{R_{\phi} / 20}{n_T} = 245 / 1.1 = 222.73 \text{ МПа}</math></div><div>Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре T = 20 °С:</div><div><math display="block">E^{20}_1 = 1.99 \cdot 10^5 \text{ МПа}</math></div><div>Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре T = 20 °С:</div><div><math display="block">\alpha^{20}_1 = 0.116 \cdot 10^{-4} / ^\circ\text{С}</math></div></div><div><div>Свойства материала фланца (кольца)2</div><div>Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре 20 °С (условия гидроиспытаний):</div><div><math display="block">[\sigma]^{20}_{\phi 2} = \frac{R_{\phi} / 20}{n_T} = 245 / 1.1 = 222.73 \text{ МПа}</math></div><div>Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре T = 20 °С:</div><div><math display="block">E^{20}_2 = 1.99 \cdot 10^5 \text{ МПа}</math></div><div>Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре T = 20 °С:</div><div><math display="block">\alpha^{20}_2 = 0.116 \cdot 10^{-4} / ^\circ\text{С}</math></div></div><div><div>Расчётные параметры первого фланца:</div><div><math display="block">\beta = \frac{s_1}{s_0} = 14/5 = 2.8</math></div><div><math display="block">x = \frac{1}{\sqrt{D \cdot s_0}} = 20/(48 \cdot 5)^{1/2} = 1.291</math></div></div></div>							90651-20600-AM-02-220 РР		Лист		
Изм.		Лист		№ док.		Подп.		Дата		250	

90651-20600-AM-02-220 РР\_изм.0.docx

Формат А4

$$\kappa = 1 + (\beta - 1) \cdot \frac{x}{x + \frac{1 + \beta}{4}} = 1 + (2.8 - 1) * 1.291 / (1.291 + (1 + 2.8) / 4) = 2.0369$$

Эквивалентная толщина втулки для фланца, приварного встык:

$$s_3 = \kappa \cdot s_0 = 2.0369 \cdot 5 = 10.185 \text{ mm}$$

$$l_0 = \sqrt{D \cdot s_0} = (48 \cdot 5)^{1/2} = 15.492 \text{ mm}$$

$$\beta_F = 0.65336$$

$$\beta_T = \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg K) - 1}{(1.05 + 1.945 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} = (3.3333^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg 3.3333) - 1) / ((1.05 + 1.945 \cdot 3.3333^2) \cdot (3.3333 - 1)) = 1.1307$$

$$\beta_v = 0.074265$$

$$\beta_U = \frac{K^2(1+8.55 \cdot \lg K) - 1}{1.36 \cdot (K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = (3.3333^2 \cdot (1+8.55 \cdot \lg 3.3333) - 1) / (1.36 \cdot (3.3333^2 - 1) \cdot (3.3333 - 1)) = 1.8633$$

$$\lambda = \frac{\beta_F \cdot h + 10}{\beta_T \cdot 10} + \frac{\beta_V \cdot h^3}{\beta_W \cdot 10 \cdot s^2} = (0.65336 \cdot 17 + 15.492) / (1.1307 \cdot 15.492) + 0.074265 \cdot 17^3 / (1.8633 \cdot 15.492 \cdot 5^2) = 2.0242$$

Угловая податливость фланца при затяжке:

$$y_{\Phi} = \frac{0.91 \cdot \beta_v}{E^{20} \cdot \lambda \cdot s_0^2 \cdot l_0} = 0.91 \cdot 0.074265 / (1.99 \cdot 10^5 \cdot 2.0242 \cdot 5^2 \cdot 15.492) = 0.2482 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ/\text{H}\cdot\text{m}$$

Угловая податливость фланца, нагруженного внешним изгибающим моментом:

$$y_{\Phi M} = \left(\frac{\pi}{4}\right)^3 \cdot \frac{D_6}{E^{20} \cdot D_{\text{max}} \cdot h^3} = (3.1416/4)^3 \cdot 125 / (1.99 \cdot 10^5 \cdot 160 \cdot 17^3) = 0.22181 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ/\text{H} \cdot \text{M}$$

Плечи моментов:

$$a = 0$$

$$b = 0.5 \cdot (D_E - D_{\text{сп}}) = 0.5 \cdot (125 - 80.5) = 22.25 \text{ мм}$$

$$e = 0.5 \cdot (D_{\text{m}} - D - s_s) = 0.5 \cdot (80.5 - 48 - 10.185) = 11.158 \text{ mm}$$

### Расчётные параметры второго фланца:

$$\beta = \frac{s_1}{s_0} = 14/5 = 2.8$$

$$x = \frac{1}{\sqrt{D \cdot s_0}} = 20/(48 \cdot 5)^{1/2} = 1.291$$

$$\kappa = 1 + (\beta - 1) \cdot \frac{x}{x + \frac{1 + \beta}{4}} = 1 + (2.8 - 1) \cdot 1.291 / (1.291 + (1 + 2.8) / 4) = 2.0369$$

Эквивалентная толщина втулки для фланца, приварного встык:

$$s_3 = \kappa \cdot s_0 = 2.0369 \cdot 5 = 10.185 \text{ mm}$$

$$l_0 = \sqrt{D \cdot s_0} = (48 \cdot 5)^{1/2} = 15.492 \text{ mm}$$

$$\beta_F = 0.65336$$

$$\beta_T = \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg K) - 1}{(1.05 + 1.945 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} = (3.3333^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg 3.3333) - 1) / ((1.05 + 1.945 \cdot 3.3333^2) \cdot (3.3333 - 1)) = 1.1307$$

$$\beta_W = 0.074265$$

$$\beta_U = \frac{K^2(1+8.55 \cdot \lg K) - 1}{1.36 \cdot (K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = (3.3333^2 \cdot (1+8.55 \cdot \lg 3.3333) - 1) / (1.36 \cdot (3.3333^2 - 1) \cdot (3.3333 - 1)) = 1.8633$$

$$\lambda = \frac{\beta_F \cdot h + 10}{\beta_T \cdot 10} + \frac{\beta_V \cdot h^3}{\beta_U \cdot 10 \cdot s_0^2} = (0.65336 \cdot 20 + 15.492) / (1.1307 \cdot 15.492) + 0.074265 \cdot 20^3 / (1.8633 \cdot 15.492 \cdot 5^2) = 2.4537$$

Угловая податливость фланца при затяжке:

Взам. инв. №	$s_3 = \kappa \cdot s_0 = 2.0369 \cdot 5 = 10.185 \text{ мм}$ $l_0 = \sqrt{D \cdot s_0} = (48 \cdot 5)^{1/2} = 15.492 \text{ мм}$ $\beta_F = 0.65336$ $\beta_T = \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg K) - 1}{(1.05 + 1.945 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} = (3.3333^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg 3.3333) - 1) / ((1.05 + 1.945 \cdot 3.3333^2) \cdot (3.3333 - 1)) = 1.1307$ $\beta_V = 0.074265$ $\beta_U = \frac{K^2(1 + 8.55 \cdot \lg K) - 1}{1.36 \cdot (K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = (3.3333^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg 3.3333) - 1) / (1.36 \cdot (3.3333^2 - 1) \cdot (3.3333 - 1)) = 1.8633$ $\lambda = \frac{\beta_F \cdot h + l_0}{\beta_T \cdot l_0} + \frac{\beta_V \cdot h^3}{\beta_U \cdot l_0 \cdot s_0^2} = (0.65336 \cdot 20 + 15.492) / (1.1307 \cdot 15.492) + 0.074265 \cdot 20^3 / (1.8633 \cdot 15.492 \cdot 5^2) = 2.4537$			
	Угловая податливость фланца при затяжке:			
Подп. и дата				
Инв. № подл.				
<div> <div> <div>Изм.</div> <div>Лист</div> <div>№ док.</div> <div>Подп.</div> <div>Дата</div> </div> <div> <div>90651-20600-AM-02-220 PP</div> <div>Лист</div> <div>251</div> </div> </div>				

НЕФТЕХИМПРОЕКТ NEFTECHIMPROEKT		МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ			РР
-----------------------------------	--	---------------------	--	--	----

$$y_{\Phi} = \frac{0.91 \cdot \beta_y}{E^{20} \cdot \lambda \cdot s_0^2 \cdot l_0} = 0.91 \cdot 0.074265 / (1.99 \cdot 10^6 \cdot 2.4537 \cdot 5^2 \cdot 15.492) = 0.20475 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ/\text{Н}\cdot\text{м}$$

Угловая податливость фланца, нагруженного внешним изгибающим моментом:

$$y_{\Phi M} = \left(\frac{\pi}{4}\right)^3 \cdot \frac{D_6}{E^{20} \cdot D_{\text{н}} \cdot h^3} = (3.1416/4)^3 \cdot 125 / (1.99 \cdot 10^6 \cdot 160 \cdot 20^3) = 0.13622 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ/\text{Н}\cdot\text{м}$$

Плечи моментов:

$a = 0$

$b = 0.5 \cdot (D_6 - D_{\text{сп}}) = 0.5 \cdot (125 - 80.5) = 22.25 \text{ мм}$

$e = 0.5 \cdot (D_{\text{сп}} - D - s_z) = 0.5 \cdot (80.5 - 48 - 10.185) = 11.158 \text{ мм}$

**Характеристики прокладки:**

Тип и материал прокладки	Коэффициент m	Удельное давление обжатия q <sub>обж</sub> , МПа	Допускаемое удельное давление [q], МПа	Коэффициент обжатия K	Условный модуль сжатия E <sub>n</sub> , МПа
Спирально-навитая с лентой из нержавеющей стали	3	69	-	-	-

Эффективная ширина прокладки :

$b_0 = 6.5 \text{ мм}$

Примечание:

$$\begin{cases} b_0 = b_{\text{тп}} & \text{при } b_{\text{тп}} \leq 15.0 \text{ мм} \\ b_0 = 3.8 \cdot \sqrt{b_{\text{тп}}} & \text{при } b_{\text{тп}} > 15.0 \text{ мм} \end{cases}$$

Рабочий наружный диаметр прокладки :

$D_{\text{тпф}} = \min\{D_4; D_{\text{нп}}\} = \min\{87; 87\} = 87 \text{ мм}$

Средний эффективный диаметр прокладки:

$D_{\text{ст}} = D_{\text{тпф}} - b_0 = 87 - 6.5 = 80.5 \text{ мм}$

Для металлических и асбометаллических прокладок  $y_{\text{п}} = 0$ .

**Расчёт нагрузок:**

Равнодействующая давления :

$Q_{\text{д}} = 0.785 \cdot D_{\text{ст}}^2 \cdot p = 0.785 \cdot 80.5^2 \cdot 2.2378 = 11384 \text{ Н}$

Усилие на прокладке в рабочих условиях, необходимое для обеспечения герметичности:

$R_{\text{п}} = \pi \cdot D_{\text{ст}} \cdot b_0 \cdot m \cdot |p| = 3.1416 \cdot 80.5 \cdot 6.5 \cdot 3 \cdot |2.2378| = 11036 \text{ Н}$

Усилие, необходимое для смятия прокладки при затяжке :

$P_{\text{обж}} = 0.5 \cdot \pi \cdot D_{\text{ст}} \cdot b_0 \cdot q_{\text{обж}} = 0.5 \cdot 3.1416 \cdot 80.5 \cdot 6.5 \cdot 69 = 56712 \text{ Н}$

**Расчетная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для герметизации в условиях испытаний (нагрузки + давление)**

Рабочая длина болта (шпильки):

$L_{\text{б0}} = h' + h'' + h_{\text{п}} + h_{\text{ш}}' + h_{\text{ш}}'' = 17 + 20 + 3.2 + 0 + 0 = 40.2 \text{ мм}$

Эффективная длина шпильки :

$L_{\text{б}} = L_{\text{б0}} + 0.56 \cdot d = 40.2 + 0.56 \cdot 16 = 49.16 \text{ мм}$

Площадь сечения шпильки (по внутреннему диаметру резьбы):

$f_{\text{б}} = 144 \text{ мм}^2$

Податливость шпилек :

$y_{\text{б}} = \frac{L_{\text{б}}}{E_{\text{б}}^{20} \cdot f_{\text{б}} \cdot n} = 49.16 / (2.18 \cdot 10^5 \cdot 144 \cdot 4) = 0.3915 \cdot 10^{-6} \text{ мм/Н}$

$\eta = y_{\text{п}} + y_{\text{б}} + y_{\Phi}' \cdot b'^{1/2} + y_{\Phi}'' \cdot b''^{1/2} = 0 + 0.3915 \cdot 10^{-6} + 0.2482 \cdot 10^{-4} \cdot 22.25^{1/2} + 0.20475 \cdot 10^{-4} \cdot 22.25^{1/2} = 0.78287 \cdot 10^{-6} \text{ мм/Н}$

					90651-20600-AM-02-220 РР	Лист
						252
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата		

Коэффициенты жёсткости для фланцевого соединения, нагруженного внутренним давлением и внешней осевой силой:

$$\alpha = 1 - \frac{y_{\pi} - (y'_{\Phi} \cdot e' \cdot b' + y''_{\Phi} \cdot e'' \cdot b'')}{\eta}$$

$$= 1 - (0 - (0.2482 \cdot 10^{-4} \cdot 11.158 \cdot 22.25 + 0.20475 \cdot 10^{-4} \cdot 11.158 \cdot 22.25)) / 0.78287 \cdot 10^{-6}$$

$$= 1.2507$$

Коэффициенты жёсткости для фланцевого соединения, нагруженного внешним изгибающим моментом:

$$\alpha_M = \frac{y_{\Phi} + y'_{\Phi M} \cdot b' \cdot \left( b' + e' - \frac{e'^2}{D_{\Phi}} \right) + y''_{\Phi M} \cdot b'' \cdot \left( b'' + e'' - \frac{e''^2}{D_{\Phi}} \right)}{y_{\Phi} + y_{\pi} \cdot \left( \frac{D_{\Phi}}{D_{\pi}} \right)^2 + y'_{\Phi M} \cdot b'^2 + y''_{\Phi M} \cdot b''^2}$$

$$= [0.3915 \cdot 10^{-6} + 0.22181 \cdot 10^{-4} \cdot 22.25 \cdot (22.25 + 11.158 - 11.158^2 / 80.5) + 0.13622 \cdot 10^{-4} \cdot 22.25 \cdot (22.25 + 11.158 - 11.158^2 / 80.5)] / [0.3915 \cdot 10^{-6} + 0 \cdot (125 / 80.5)^2 + 0.22181 \cdot 10^{-4} \cdot 22.25^2 + 0.22181 \cdot 10^{-4} \cdot 22.25^2]$$

$$= 1.1907$$

$$P_{\Phi 1} = \alpha \cdot (Q_{\pi} + F) + R_{\pi} + \frac{4 \cdot \alpha_M \cdot |M|}{D_{\pi}} = 1.2507 \cdot (11384 + 0) + 11036 + 4 \cdot 1.1907 \cdot |0| / 80.5 = 25273 \text{ Н}$$

**Расчетная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для герметизации в условиях испытаний (только давление)**

$$P_{\Phi 1} = \alpha \cdot (Q_{\pi} + F) + R_{\pi} + \frac{4 \cdot \alpha_M \cdot |M|}{D_{\pi}} = 1.2507 \cdot (11384 + 0) + 11036 + 4 \cdot 1.1907 \cdot |0| / 80.5 = 25273 \text{ Н}$$

Суммарная площадь сечения болтов (шпилек) по внутреннему диаметру резьбы или сечению наименьшего диаметра:

$$A_{\Phi} = n \cdot f_{\Phi} = 4 \cdot 144 = 576 \text{ мм}^2$$

Расчётная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для обжатия прокладки и минимального начального натяжения болтов:

$$P_{\Phi 2} = \max \{ P_{\text{обж}}, 0.4 \cdot A_{\Phi} \cdot [\sigma]_{\Phi}^{20} \} = \max \{ 56712; 0.4 \cdot 576 \cdot 230 = 52992 \} = 56712 \text{ Н}$$

**Расчёт без учета стесненности температурных деформаций**

**Расчёт болтов(шпилек):**

Коэффициент увеличения допускаемых напряжений при затяжке:  $\xi = 1.2$

Коэффициент условий работы:  $K_{\text{yp}} = 1.35$

Коэффициент условий затяжки:  $K_{\text{уз}} = 1$

Коэффициент учета нагрузки от температурных деформаций:  $K_{\text{ут}} = 1$

Допускаемые напряжения для болтов (шпилек) при затяжке :

$$[\sigma]_{\Phi}^M = \xi \cdot K_{\text{yp}} \cdot K_{\text{уз}} \cdot K_{\text{ут}} \cdot [\sigma]_{\Phi}^{20} = 1.2 \cdot 1.35 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 230 = 372.6 \text{ МПа}$$

Болтовая нагрузка в условиях затяжки :

$$P_{\Phi}^M = \max \{ P_{\Phi 1}; P_{\Phi 2} \} = \max \{ 25273; 56712 \} = 56712 \text{ Н}$$

Условие прочности при затяжке:

$$\sigma_{\Phi 1} = \frac{P_{\Phi}^M}{A_{\Phi}} \leq [\sigma]_{\Phi}^M$$

$$\sigma_{\Phi 1} = \frac{P_{\Phi}^M}{A_{\Phi}} = 56712 / 576 = 98.459 \text{ МПа}$$

Крутящий момент при затяжке болтов (шпилек) без смазки при  $\sigma_{\Phi 1} < 120 \text{ МПа}$ :

$$M_{\text{кр}} = 0.3 \cdot \frac{P_{\Phi}^M \cdot d}{n} = 0.3 \cdot 56712 \cdot 16 / 4 = 68.055 \text{ Н·м}$$

При наличии смазки величина  $M_{\text{кр}}$  снижается на 25% и составляет  $0.75 \cdot M_{\text{кр}} = 51.041 \text{ Н·м}$

$98.459 \text{ МПа} \leq 372.6 \text{ МПа}$ , **Условие прочности выполнено.**

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Условие прочности при затяжке:																		
			$P_6^m = \max\{P_{b1}; P_{b2}\} = \max\{25273; 56712\} = 56712 \text{ Н}$ <p>Условие прочности при затяжке:</p> $\sigma_{61} = \frac{P_6^m}{A_6} \leq [\sigma]_6$ $\sigma_{61} = \frac{P_6^m}{A_6} = 56712 / 576 = 98.459 \text{ МПа}$ <p>Крутящий момент при затяжке болтов (шпилек) без смазки при <math>\sigma_{61} &lt; 120 \text{ МПа}</math>:</p> $M_{кр} = 0.3 \cdot \frac{P_6^m \cdot d}{n} = 0.3 \cdot 56712 \cdot 16 / 4 = 68.055 \text{ Н·м}$ <p>При наличии смазки величина <math>M_{кр}</math> снижается на 25% и составляет <math>0.75 \cdot M_{кр} = 51.041 \text{ Н·м}</math></p> <p><math>98.459 \text{ МПа} \leq 372.6 \text{ МПа}</math>, <b>Условие прочности выполнено.</b></p>																		
<table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td colspan="2" rowspan="2">90651-20600-AM-02-220 PP</td><td>Лист</td></tr><tr><td>Изм.</td><td>Лист</td><td>№ док.</td><td>Подп.</td><td>Дата</td><td>253</td></tr></table>													90651-20600-AM-02-220 PP		Лист	Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	253
					90651-20600-AM-02-220 PP		Лист														
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата			253														

Допускаемые напряжения для болтов (шпилек) при рабочих условиях:

$$[\sigma]_6^p = K_{\text{vp}} \cdot K_{\text{vz}} \cdot K_{\text{vt}} \cdot [\sigma]_6 = 1.35 * 1 * 1 * 230 = 310.5 \text{ МПа}$$

Болтовая нагрузка в рабочих условиях :

$$P_6^P = P_6^M + (1 - \alpha) \cdot (Q_{\pi} + F) + \frac{4 \cdot (1 - \alpha_M) \cdot |M|}{D_{\pi}} = 56712 + (1 - 1.2507) \cdot (11384 + 0) + 4 \cdot (1 - 1.1907) \cdot |0| / 80.5 = 53859 \text{ H}$$

Условие прочности в рабочих условиях:

$$\sigma_{62} = \frac{P_6^P}{A_6} \leq [\sigma]_6^P$$

$$\sigma_{62} = \frac{P_6^P}{A_6} = 53859 / 576 = 93.505 \text{ МПа}$$

$93.505 \text{ МПа} \leq 310.5 \text{ МПа}$ , **Условие прочности выполнено.**

### Расчёт первого фланца:

Коэффициент, учитывающий изгиб тарелки фланца между шпильками:

$$C_F = \max \left\{ 1; \sqrt[3]{\frac{\frac{\pi \cdot D_6}{n}}{2 \cdot d + \frac{6 \cdot h}{m + 0.5}}} \right\} = \max \{ 1; (3.1416 \cdot 125 / 4 / (2 \cdot 16 + 6 \cdot 17 / (3 + 0.5)))^{1/3} \} = 1.2671$$

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при затяжке :

$$M^M = C_F \cdot P_6^M \cdot b = 1.2671 \cdot 56712 \cdot 22.25 = 1599 \text{ H}\cdot\text{M}$$

$$f = \max \left\{ \frac{C_{36}}{1+A}, 1.0 \right\} = \max \{ 0.44314 / (1 + 1.8); 1.0 \} = 1$$

$$D^* = D + c + s_{\text{нпн}}(D + 2 \cdot c) < 20 \cdot (s_1 - c)_{u \neq 1} = 48 + 0 + 14 \text{ нпн } 48 < 20 \cdot (14 - 0)_{u \neq 1} = 62 \text{ мм}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении  $S_1$ :

$$\sigma_1^M = \frac{M^M}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D^*} = 1599 / (2.0242 \cdot (14 - 3)^2 \cdot 62) = 105.3 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в условиях затяжки :

$$\sigma_R^M = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + 1_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot 1_0 \cdot D} \cdot M^M = (1.33 \cdot 0.65336 \cdot 17 + 15.492) / (2.0242 \cdot 17^2 \cdot 15.492 \cdot 48) \cdot 1599 = 111.24 \text{ МПа}$$

$$\beta_Y = \frac{1}{K-1} \cdot \left( 0.69 + 5.72 \cdot \frac{K^2 \cdot \lg K}{K^2 - 1} \right) = 1 / (3.3333 - 1) * (0.69 + 5.72 * 3.3333^2 * \lg 3.3333 / (3.3333^2 - 1)) = 1.7043$$

$$\beta_z = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = (3.3333^2 + 1) / (3.3333^2 - 1) = 1.1978$$

Окружное напряжение в тарелке в условиях затяжки :

$$\sigma_T^M = \frac{\beta_Y \cdot M^M}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^M = 1.7043 \cdot 1599 / (17^2 \cdot 48) - 1.1978 \cdot 111.24 = 63.195 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении  $s_1$  (п. 8.5.1):

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^M + \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_1^M + \sigma_T^M \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_M^{20}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^M + \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_1^M + \sigma_T^M \right| \right\} = \max \{ 105.3 + 111.24; | 105.3 + 63.195 \} = 216.54 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_{\text{м}}^{20} = 1.5 \cdot [\sigma]_{\text{н}}^{20} = 1.5 \cdot 222.73 = 334.09 \text{ МПа}$$

$$K = \frac{D_H}{D} = 160/48 = 3.3333$$

Коэффициент учета размеров тарелки фланца:  $K_S = 1.2$

$$K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{max}}^{20} = 1.2 \cdot 1 \cdot 334.09 = 400.91 \text{ МПа}$$

Взам. инв. №	Окружное напряжение в тарелке в условиях затяжки :				
	$\sigma_T^M = \frac{\beta_Y \cdot M^M}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^M = 1.7043 \cdot 1599 / (17^2 \cdot 48) - 1.1978 \cdot 111.24 = 63.195 \text{ МПа}$				
Подп. и дата	Условие статической прочности при затяжке в сечении $s_1$ (п. 8.5.1):				
	$\max \left\{ \left  \sigma_1^M + \sigma_R^M \right ; \left  \sigma_1^M + \sigma_T^M \right  \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{лм}}^{20}$ $\max \left\{ \left  \sigma_1^M + \sigma_R^M \right ; \left  \sigma_1^M + \sigma_T^M \right  \right\} = \max \{ 105.3 + 111.24;   105.3 + 63.195   \} = 216.54 \text{ МПа}$				
Инв. № подл.	Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):				
	$[\sigma]_{\text{лм}}^{20} = 1.5 \cdot [\sigma]_{\text{ф}}^{20} = 1.5 \cdot 222.73 = 334.09 \text{ МПа}$ $K = \frac{D_{\text{н}}}{D} = 160 / 48 = 3.3333$				
Коэффициент учета размеров тарелки фланца: $K_S = 1.2$					
$K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{лм}}^{20} = 1.2 \cdot 1 \cdot 334.09 = 400.91 \text{ МПа}$					
90651-20600-AM-02-220 PP					Лист
					254
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	







### Жёсткость фланца:

Угол поворота фланца в рабочих условиях:

$$\varpi = M^P \cdot y_{\Phi} \cdot \frac{E^{20}}{E} = 1679.4 \cdot 0.2482 \cdot 10^{-4} \cdot 1.99 \cdot 10^5 / 1.99 \cdot 10^5 = 0.041684^{\circ}$$

Допускаемый угол поворота фланца:

$$[\varpi] = 0.34377^{\circ}$$

Коэффициент увеличения допускаемого угла поворота фланцев:  $K_{\varpi} = 1.3$

Условие выполнения жесткости фланцев:

$$\varpi \leq K_{\varpi} \cdot [\varpi] = 1.3 \cdot 0.34377 = 0.44691^{\circ}$$

**Условие жёсткости выполнено.**

### Расчёт второго фланца:

Коэффициент, учитывающий изгиб тарелки фланца между шпильками:

$$C_F = \max \left\{ 1; \sqrt{\frac{\frac{\pi \cdot D_6}{n} \cdot \frac{6 \cdot h}{2 \cdot d + \frac{m}{0.5}}}{m + 0.5}} \right\} = \max \{ 1; (3.1416 \cdot 125 / 4 / (2 \cdot 16 + 6 \cdot 20 / (3 + 0.5)))^{1/2} \} = 1.217$$

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при затяжке:

$$M^M = C_F \cdot P_6^M \cdot b = 1.217 \cdot 56712 \cdot 22.25 = 1535.7 \text{ Н·м}$$

$$f = \max \left\{ \frac{C_{36}}{1 + A}; 1.0 \right\} = \max \{ 0.44314 / (1 + 1.8); 1.0 \} = 1$$

$$D^* = D + c + s_{1 \text{ при } (D + 2 \cdot c) < 20 \cdot (s_1 - c) \text{ и } f = 1} = 48 + 0 + 14 \text{ при } 48 < 20 \cdot (14 - 0) \text{ и } f = 1 = 62 \text{ мм}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении  $s_1$ :

$$\sigma_1^M = \frac{M^M}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D^*} = 1535.7 / (2.4537 \cdot (14 - 3)^2 \cdot 62) = 83.424 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в условиях затяжки:

$$\sigma_R^M = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + l_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot l_0 \cdot D} \cdot M^M = (1.33 \cdot 0.65336 \cdot 20 + 15.492) / (2.4537 \cdot 20^2 \cdot 15.492 \cdot 48) \cdot 1535.7 = 69.164 \text{ МПа}$$

$$\beta_Y = \frac{1}{K - 1} \cdot \left( 0.69 + 5.72 \cdot \frac{K^2 \cdot \lg K}{K^2 - 1} \right) = 1 / (3.3333 - 1) \cdot (0.69 + 5.72 \cdot 3.3333^2 \cdot \lg 3.3333 / (3.3333^2 - 1)) = 1.7043$$

$$\beta_Z = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = (3.3333^2 + 1) / (3.3333^2 - 1) = 1.1978$$

Окружное напряжение в тарелке в условиях затяжки:

$$\sigma_T^M = \frac{\beta_Y \cdot M^M}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^M = 1.7043 \cdot 1535.7 / (20^2 \cdot 48) - 1.1978 \cdot 69.164 = 53.469 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении  $s_1$  (п. 8.5.1):

$$\max \{ |\sigma_1^M + \sigma_R^M|; |\sigma_1^M + \sigma_T^M| \} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{м}}^{20}$$

$$\max \{ |\sigma_1^M + \sigma_R^M|; |\sigma_1^M + \sigma_T^M| \} = \max \{ 83.424 + 69.164; 83.424 + 53.469 \} = 152.59 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_{\text{м}}^{20} = 1.5 \cdot [\sigma]_{\text{ф}}^{20} = 1.5 \cdot 222.73 = 334.09 \text{ МПа}$$

$$K = \frac{D_{\text{н}}}{D} = 160 / 48 = 3.3333$$

Коэффициент учета размеров тарелки фланца:  $K_S = 1.2$

$$K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{м}}^{20} = 1.2 \cdot 1 \cdot 334.09 = 400.91 \text{ МПа}$$

$152.59 \text{ МПа} \leq 400.91 \text{ МПа}$ , **Условие прочности выполнено.**

Взам. инв. №		$\sigma_T = \frac{F_T}{h^2 \cdot D} = p_Z \cdot \sigma_R = \frac{1.7043 \cdot 1535.77}{(20^2 \cdot 40)} = \frac{1.1976 \cdot 69.164}{1} = 53.469 \text{ МПа}$					
		Условие статической прочности при затяжке в сечении $s_1$ (п. 8.5.1): $\max \left\{ \left  \sigma_1^M + \sigma_R^M \right ; \left  \sigma_1^M + \sigma_T^M \right  \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{м}}^{20}$ $\max \left\{ \left  \sigma_1^M + \sigma_R^M \right ; \left  \sigma_1^M + \sigma_T^M \right  \right\} = \max \{ 83.424 + 69.164;   83.424 + 53.469   \} = 152.59 \text{ МПа}$					
Подп. и дата		Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1): $[\sigma]_{\text{м}}^{20} = 1.5 \cdot [\sigma]_{\text{ф}}^{20} = 1.5 \cdot 222.73 = 334.09 \text{ МПа}$ $K = \frac{D_{\text{н}}}{D} = 160 / 48 = 3.3333$ Коэффициент учета размеров тарелки фланца: $K_S = 1.2$ $K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{м}}^{20} = 1.2 \cdot 1 \cdot 334.09 = 400.91 \text{ МПа}$ $152.59 \text{ МПа} \leq 400.91 \text{ МПа}$ , <b>Условие прочности выполнено.</b>					
Инв. № подл.						90651-20600-AM-02-220 РР	Лист 257
		Изм.	Лист	№ док.	Подп.		

Приведенная нагрузка от внешней силы и момента :

$$Q_{FM}^+ = F + \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{сп}}} = 0 + 4 \cdot |0| / 80.5 = 0 \text{ Н}$$

$$Q_{FM}^- = F - \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{сп}}} = 0 - 4 \cdot |0| / 80.5 = 0 \text{ Н}$$

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при рабочих условиях:

$$M^P = C_F \cdot \max \{ P_6^P \cdot b + (Q_d + Q_{FM}) \cdot e; |Q_d + Q_{FM}| \cdot e \} = \frac{1.217 \cdot \max \{ 53859 \cdot 22.25 + (11384 + 0) \cdot 11.158; |11384 + 0| \cdot 11.158 \}}{11.158} = 1613 \text{ Н·м}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_1$ :

$$\sigma_1^P = \frac{M^P}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D} = 1613 / (2.4537 \cdot (14 - 3)^2 \cdot 62) = 87.623 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в рабочих условиях :

$$\sigma_R^P = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + l_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot l_0 \cdot D} \cdot M^P = (1.33 \cdot 0.65336 \cdot 20 + 15.492) / (2.4537 \cdot 20^2 \cdot 15.492 \cdot 48) \cdot 1613 = 72.645 \text{ МПа}$$

Окружное напряжение в тарелке в рабочих условиях :

$$\sigma_T^P = \frac{\beta_Y \cdot M^P}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^P = 1.7043 \cdot 1613 / (20^2 \cdot 48) - 1.1978 \cdot 72.645 = 56.161 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_1$  (+):

$$\sigma_{1mm}^{P+} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_1}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = (0.785 \cdot 48^2 \cdot 2.2378 + 0 + 4 \cdot 0 / (48 + 14)) / (3.1416 \cdot (48 + 14) \cdot (14 - 3)) = 1.889 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_1$  (п. 8.5.1):

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P+} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P+} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^{P+} \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_M$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P+} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P+} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^{P+} \right| \right\} = \max \{ |87.623 - 1.889 + 72.645|; |87.623 - 1.889 + 56.161|; |87.623 + 1.889| \} = 158.38 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_M = 1.5 \cdot [\sigma]_ф = 1.5 \cdot 222.73 = 334.09 \text{ МПа}$$

$$K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_M = 1.2 \cdot 1 \cdot 334.09 = 400.91 \text{ МПа}$$

158.38 МПа ≤ 400.91 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_1$  (-):

$$\sigma_{1mm}^{P-} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F - \frac{4 \cdot M}{D + s_1}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = (0.785 \cdot 48^2 \cdot 2.2378 + 0 - 4 \cdot 0 / (48 + 14)) / (3.1416 \cdot (48 + 14) \cdot (14 - 3)) = 1.889 \text{ МПа}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P-} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P-} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^{P-} \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_M$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P-} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P-} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^{P-} \right| \right\} = \max \{ |87.623 - 1.889 + 72.645|; |87.623 - 1.889 + 56.161|; |87.623 + 1.889| \} = 158.38 \text{ МПа}$$

158.38 МПа ≤ 400.91 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_0^M = f \cdot \sigma_1^M = 1 \cdot 83.424 = 83.424 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении  $s_0$  (п. 8.5.2):

$$\sigma_0^M \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R^{20}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_R^{20} = 3 \cdot [\sigma]_ф^{20} = 3 \cdot 222.73 = 668.18 \text{ МПа}$$

$$1.3 \cdot [\sigma]_R^{20} = 1.3 \cdot 668.18 = 868.64 \text{ МПа}$$

83.424 МПа ≤ 868.64 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

МПа				
Взам. инв. №	158.38 МПа ≤ 400.91 МПа, <b>Условие прочности выполнено.</b> Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении s <sub>0</sub> : $\sigma_0^M = f \cdot \sigma_1^M = 1 \cdot 83.424 = 83.424 \text{ МПа}$ Условие статической прочности при затяжке в сечении s <sub>0</sub> (п. 8.5.2): $\sigma_0^M \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R^{20}$ Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1): $[\sigma]_R^{20} = 3 \cdot [\sigma]_{\Phi}^{20} = 3 \cdot 222.73 = 668.18 \text{ МПа}$ $1.3 \cdot [\sigma]_R^{20} = 1.3 \cdot 668.18 = 868.64 \text{ МПа}$ 83.424 МПа ≤ 868.64 МПа, <b>Условие прочности выполнено.</b> Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении s <sub>0</sub> :			
Подп. и дата				
Инв. № подл.				
90651-20600-AM-02-220 РР				
Лист				
258				
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата

$$\sigma_0^P = f \cdot \sigma_1^P = 1 \cdot 87.623 = 87.623 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_0$  (+):

$$\sigma_{0mm}^{P+} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_0}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = (0.785 \cdot 48^2 \cdot 2.2378 + 0 + 4 \cdot 0 / (48 + 5)) / (3.1416 \cdot (48 + 5) \cdot (5 - 3)) = 12.154 \text{ МПа}$$

Окружное мембранное напряжение от действия давления во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_0$ :

$$\sigma_{0mo}^P = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s_0 - c)} = 2.2378 \cdot 48 / (2 \cdot (5 - 3)) = 26.853 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $S_0$ :

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P+} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P+} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P+} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P+} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} = \max \{ 87.623 \pm 12.154; |0.3 \cdot 87.623 \pm 26.853|; |0.7 \cdot 87.623 \pm (12.154 - 26.853)| \} = 99.777 \text{ МПа}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_R = 3 \cdot [\sigma]_\Phi = 3 \cdot 222.73 = 668.18 \text{ МПа}$$

$$1.3 \cdot [\sigma]_R = 1.3 \cdot 668.18 = 868.64 \text{ МПа}$$

99.777 МПа ≤ 868.64 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_0$  (-):

$$\sigma_{0mm}^{P-} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F - \frac{4 \cdot M}{D + s_0}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = (0.785 \cdot 48^2 \cdot 2.2378 + 0 - 4 \cdot 0 / (48 + 5)) / (3.1416 \cdot (48 + 5) \cdot (5 - 3)) = 12.154 \text{ МПа}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P-} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P-} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P-} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P-} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} = \max \{ 87.623 \pm 12.154; |0.3 \cdot 87.623 \pm 26.853|; |0.7 \cdot 87.623 \pm (12.154 - 26.853)| \} = 99.777 \text{ МПа}$$

99.777 МПа ≤ 868.64 МПа, **Условие прочности выполнено.**

**Расчет в сечении  $s_0$  в рабочих условиях (п. 8.5.5 ГОСТ 34233.4-2017):**

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $S_0$ :

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0mo}^P \right|; \left| \sigma_{0mm}^P \right| \right\} \leq [\sigma]_\Phi$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0mo}^P \right|; \left| \sigma_{0mm}^P \right| \right\} = \max \{ 26.853; |12.154| \} = 26.853 \text{ МПа}$$

26.853 МПа ≤ 222.73 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Условие статической прочности при затяжке для тарелок:

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_T^M \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_\Phi^{20}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_T^M \right| \right\} = \max \{ 69.164; |53.469| \} = 69.164 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_\Phi^{20} = 1 \cdot 222.73 = 222.73 \text{ МПа}$$

69.164 МПа ≤ 222.73 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Условие статической прочности в рабочих условиях для тарелок:

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_T^P \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_\Phi$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_T^P \right| \right\} = \max \{ 72.645; |56.161| \} = 72.645 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_\Phi = 1 \cdot 222.73 = 222.73 \text{ МПа}$$

72.645 МПа ≤ 222.73 МПа, **Условие прочности выполнено.**

**Жёсткость фланца:**

Угол поворота фланца в рабочих условиях:

$$\varpi = M^P \cdot y_\Phi \cdot \frac{E^{20}}{E} = 1613 \cdot 0.20475 \cdot 10^{-4} \cdot 1.99 \cdot 10^5 / 1.99 \cdot 10^5 = 0.033025^\circ$$

Взам. инв. №		$K_T \cdot [\sigma]_{\Phi}^{20} = 1 * 222.73 = 222.73 \text{ МПа}$ 69.164 МПа ≤ 222.73 МПа, <b>Условие прочности выполнено.</b> Условие статической прочности в рабочих условиях для тарелок: $\max \left\{ \left  \sigma_R^P \right ; \left  \sigma_T^P \right  \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_{\Phi}$ $\max \left\{ \left  \sigma_R^P \right ; \left  \sigma_T^P \right  \right\} = \max \{ 72.645; 56.161 \} = 72.645 \text{ МПа}$ $K_T \cdot [\sigma]_{\Phi} = 1 * 222.73 = 222.73 \text{ МПа}$ 72.645 МПа ≤ 222.73 МПа, <b>Условие прочности выполнено.</b> <b>Жёсткость фланца:</b> Угол поворота фланца в рабочих условиях: $\Theta = M^P \cdot y_{\Phi} \cdot \frac{E^{20}}{E} = 1613 * 0.20475 \cdot 10^{-4} * 1.99 \cdot 10^5 / 1.99 \cdot 10^5 = 0.033025^\circ$					
		Подп. и дата		Инв. № подл.			
90651-20600-AM-02-220 РР							Лист
							259

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №

Этот документ является собственностью "НЕФТЕХИМПРОЕКТ" и не подлежит копированию и распространению без его согласия

НЕФТЕХИМПРОЕКТ NEFTECHIMPROEKT					МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ					РР	
<p>Допускаемый угол поворота фланца: <math>[\varphi] = 0.34377^\circ</math></p> <p>Условие выполнения жесткости фланцев : <math>\varphi \leq K_{\varphi} \cdot [\varphi] = 1.3 * 0.34377 = 0.44691^\circ</math></p> <p>Условие жёсткости выполнено.</p>											
					90651-20600-AM-02-220 РР					Лист	
										260	
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата							



Этот документ является собственностью "НЕФТЕХИМПРОЕКТ" и не подлежит копированию и распространению без его согласия

НЕФТЕХИМПРОЕКТ NEFTECHIMPROEKT		МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ			РР		
Толщина конической части втулки, s <sub>1</sub> :		20 мм					
Радиус перехода, r:		5 мм					
Данные второго фланца (кольца):							
Материал фланца (кольца):		09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка					
Наружный диаметр фланца (кольца), D <sub>н</sub> :		300 мм					
Толщина фланца (кольца) с выступом, h'		28 мм					
Внутренний диаметр фланца (кольца), D:		146 мм					
Сумма прибавок, с:		3 мм					
Длина конической части втулки, l:		31 мм					
Длина цилиндрической части втулки, l <sub>с</sub> :		12 мм					
Толщина цилиндрической части втулки, s <sub>0</sub> :		7.5 мм					
Толщина конической части втулки, s <sub>1</sub> :		20 мм					
Радиус перехода, r:		5 мм					
Расчёт в рабочих условиях							
Условия нагружения:							
Расчётное осевое сжимающее усилие, F:		0 Н					
Расчётный изгибающий момент, M:		0 Н·м					
Расчётное внутреннее избыточное давление, p:		1.6 МПа					
Расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ 34233.4-2017							
Расчётная температура элементов соединения:							
Температура фланца (кольца), t <sub>ф</sub> :		100 °С					
Температура фланца (кольца), t <sub>ф</sub> :		100 °С					
Температура болтов (шпилек), t <sub>б</sub> :		100 °С					
Свойства материала болтов (шпилек)							
Допускаемые напряжения для материала 35Х Крепеж при температуре 100 °С (рабочие условия):		[σ] <sub>6</sub> = 230 МПа					
Модуль продольной упругости для материала 35Х Крепеж при температуре T = 100 °С:		E <sub>6</sub> = 2.15·10 <sup>5</sup> МПа					
Коэффициент линейного расширения для материала 35Х Крепеж при температуре T = 100 °С:		α <sub>6</sub> = 0.134·10 <sup>-4</sup> /°С					
Допускаемые напряжения для материала 35Х Крепеж при температуре 20 °С (рабочие условия):		[σ] <sup>20</sup> <sub>6</sub> = 230 МПа					
Модуль продольной упругости для материала 35Х Крепеж при температуре T = 20 °С:		E <sup>20</sup> <sub>6</sub> = 2.18·10 <sup>5</sup> МПа					
Свойства материала фланца (кольца) 1							
Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре 100 °С (рабочие условия):		[σ] <sub>ф1</sub> = 144 МПа					
Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре T = 100 °С:		E <sub>1</sub> = 1.91·10 <sup>5</sup> МПа					
Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре T = 100 °С:		α <sub>1</sub> = 0.116·10 <sup>-4</sup> /°С					
Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре 20 °С (рабочие условия):		[σ] <sup>20</sup> <sub>ф1</sub> = 164.5 МПа					
Взам. инв. №	Подп. и дата	Инв. № подл.				Лист	
							262
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	90651-20600-AM-02-220 РР		

90651-20600-AM-02-220 РР\_изм.0.docx

Формат А4



Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка 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 Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре 100 °С (рабочие условия):

$$[\sigma]_{\phi 2} = 144 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре  $T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$E_2 = 1.91 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре  $T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$\alpha_2 = 0.116 \cdot 10^{-4} 1/^{\circ}\text{C}$$

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре 20 °С (рабочие условия):

$$[\sigma]^{20}_{\phi 2} = 164.5 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре  $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$E^{20_2} = 1.99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре  $T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$\alpha_n = 0.116 \cdot 10^{-4} / ^\circ\text{C}$$

### Расчётные параметры болтов (шпилек):

Рабочая длина болта (шпильки):

$$L_{60} = h' + h'' + 2 \cdot h_{II} + s_{pm} + h'_{III} + h''_{III} = 25 + 28 + 2 \cdot 3.2 + 20 + 0 + 0 = 79.4 \text{ mm}$$

Площадь сечения шпильки (по внутреннему диаметру резьбы):

$$f_6 = 324 \text{ mm}^2$$

Эффективная длина шпильки :

$$L_s = L_{s0} + 0.56 \cdot d = 79.4 + 0.56 \cdot 24 = 92.84 \text{ mm}$$

Податливость шпилек:

$$y_6 = \frac{L_6}{E_6^{20} \cdot f_6 \cdot n} = 92.84 / (2.18 \cdot 10^5 \cdot 324 \cdot 8) = 0.1643 \cdot 10^{-6} \text{ mm/H}$$

### Расчётные параметры первого фланца:

$$\beta = \frac{s_1}{s_0} = 20/7.5 = 2.6667$$

$$x = \frac{1}{\sqrt{D \cdot s_0}} = 31/(146 \cdot 7.5)^{1/2} = 0.93682$$

$$\kappa = 1 + (\beta - 1) \cdot \frac{x}{x + \frac{1 + \beta}{4}} = 1 + (2.6667 - 1) * 0.93682 / (0.93682 + (1 + 2.6667) / 4) = 1.8424$$

Эквивалентная толщина втулки для фланца, приварного встык:

$$S_3 = K \cdot S_0 = 1.8424 \cdot 7.5 = 13.818 \text{ mm}$$

$$l_0 = \sqrt{D \cdot s_0} = (146 \cdot 7.5)^{1/2} = 33.091 \text{ mm}$$

$$\beta_F = 0.71228$$

$$K = \frac{D_H}{D} = 300 / 146 = 2.0548$$

$$\beta_T = \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg K) - 1}{(1.05 + 1.945 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} = (2.0548^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg 2.0548) - 1) / ((1.05 + 1.945 \cdot 2.0548^2) \cdot (2.0548 - 1)) = 1.4855$$

Взам. инв. №	$\kappa = 1 + (\beta - 1) \cdot \frac{x}{x + \frac{1 + \beta}{4}} = 1 + (2.6667 - 1) \cdot 0.93682 / (0.93682 + (1 + 2.6667) / 4) = 1.8424$				
	<p>Эквивалентная толщина втулки для фланца, приварного встык:</p> $s_3 = \kappa \cdot s_0 = 1.8424 \cdot 7.5 = 13.818 \text{ мм}$ $l_0 = \sqrt{D \cdot s_0} = (146 \cdot 7.5)^{1/2} = 33.091 \text{ мм}$ $\beta_F = 0.71228$ $K = \frac{D_H}{D} = 300 / 146 = 2.0548$ $\beta_T = \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg K) - 1}{(1.05 + 1.945 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} = (2.0548^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg 2.0548) - 1) / ((1.05 + 1.945 \cdot 2.0548^2) \cdot (2.0548 - 1)) = 1.4855$				
Подп. и дата					
Инв. № подл.					
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	<div>90651-20600-AM-02-220 PP</div> <div>Лист 263</div>

$$\beta_V = 0.10187$$

$$\beta_U = \frac{K^2(1+8.55 \cdot \lg K) - 1}{1.36 \cdot (K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = (2.0548^2 \cdot (1+8.55 \cdot \lg 2.0548) - 1) / (1.36 \cdot (2.0548^2 - 1) \cdot (2.0548 - 1)) = 3.1398$$

$$\lambda = \frac{\beta_F \cdot h + 1_0}{\beta_T \cdot 1_0} + \frac{\beta_V \cdot h^3}{\beta_U \cdot 1_0 \cdot s_0^2} = (0.71228 \cdot 25 + 33.091) / (1.4855 \cdot 33.091) + 0.10187 \cdot 25^3 / (3.1398 \cdot 33.091 \cdot 7.5^2) = 1.3078$$

Угловая податливость фланца при затяжке:

$$y_\Phi = \frac{0.91 \cdot \beta_V}{E^{20} \cdot \lambda \cdot s_0^2 \cdot 1_0} = 0.91 \cdot 0.10187 / (1.99 \cdot 10^5 \cdot 1.3078 \cdot 7.5^2 \cdot 33.091) = 0.10965 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ/\text{Н}\cdot\text{м}$$

Угловая податливость фланца, нагруженного внешним изгибающим моментом:

$$y_{\Phi M} = \left(\frac{\pi}{4}\right)^3 \cdot \frac{D_6}{E^{20} \cdot D_K \cdot h^3} = (3.1416/4)^3 \cdot 250 / (1.99 \cdot 10^5 \cdot 300 \cdot 25^3) = 0.74394 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ/\text{Н}\cdot\text{м}$$

Плечи моментов:

$$a = 0$$

$$b = 0.5 \cdot (D_6 - D_{\text{сп}}) = 0.5 \cdot (250 - 193) = 28.5 \text{ мм}$$

$$e = 0.5 \cdot (D_{\text{сп}} - D - s_3) = 0.5 \cdot (193 - 146 - 13.818) = 16.591 \text{ мм}$$

**Расчётные параметры второго фланца:**

$$\beta = \frac{s_1}{s_0} = 20/7.5 = 2.6667$$

$$x = \frac{1}{\sqrt{D \cdot s_0}} = 31/(146 \cdot 7.5)^{1/2} = 0.93682$$

$$\kappa = 1 + (\beta - 1) \cdot \frac{x}{x + \frac{1 + \beta}{4}} = 1 + (2.6667 - 1) \cdot 0.93682 / (0.93682 + (1 + 2.6667) / 4) = 1.8424$$

Эквивалентная толщина втулки для фланца, приварного встык:

$$s_3 = \kappa \cdot s_0 = 1.8424 \cdot 7.5 = 13.818 \text{ мм}$$

$$1_0 = \sqrt{D \cdot s_0} = (146 \cdot 7.5)^{1/2} = 33.091 \text{ мм}$$

$$\beta_F = 0.71228$$

$$K = \frac{D_K}{D} = 300 / 146 = 2.0548$$

$$\beta_T = \frac{K^2 \cdot (1+8.55 \cdot \lg K) - 1}{(1.05 + 1.945 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} = (2.0548^2 \cdot (1+8.55 \cdot \lg 2.0548) - 1) / ((1.05 + 1.945 \cdot 2.0548^2) \cdot (2.0548 - 1)) = 1.4855$$

$$\beta_V = 0.10187$$

$$\beta_U = \frac{K^2(1+8.55 \cdot \lg K) - 1}{1.36 \cdot (K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = (2.0548^2 \cdot (1+8.55 \cdot \lg 2.0548) - 1) / (1.36 \cdot (2.0548^2 - 1) \cdot (2.0548 - 1)) = 3.1398$$

$$\lambda = \frac{\beta_F \cdot h + 1_0}{\beta_T \cdot 1_0} + \frac{\beta_V \cdot h^3}{\beta_U \cdot 1_0 \cdot s_0^2} = (0.71228 \cdot 28 + 33.091) / (1.4855 \cdot 33.091) + 0.10187 \cdot 28^3 / (3.1398 \cdot 33.091 \cdot 7.5^2) = 1.4615$$

Угловая податливость фланца при затяжке:

$$y_\Phi = \frac{0.91 \cdot \beta_V}{E^{20} \cdot \lambda \cdot s_0^2 \cdot 1_0} = 0.91 \cdot 0.10187 / (1.99 \cdot 10^5 \cdot 1.4615 \cdot 7.5^2 \cdot 33.091) = 0.98115 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ/\text{Н}\cdot\text{м}$$

Угловая податливость фланца, нагруженного внешним изгибающим моментом:

$$y_{\Phi M} = \left(\frac{\pi}{4}\right)^3 \cdot \frac{D_6}{E^{20} \cdot D_K \cdot h^3} = (3.1416/4)^3 \cdot 250 / (1.99 \cdot 10^5 \cdot 300 \cdot 28^3) = 0.52952 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ/\text{Н}\cdot\text{м}$$

Плечи моментов:

$$a = 0$$

$$b = 0.5 \cdot (D_6 - D_{\text{сп}}) = 0.5 \cdot (250 - 193) = 28.5 \text{ мм}$$

Взам. инв. №	$\beta_U = \frac{K}{1.36 \cdot (K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = (2.0548^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot 10^{-5} \cdot 2.0548) - 1) / (1.36 \cdot (2.0548^2 - 1) \cdot (2.0548 - 1)) = 3.1398$ $\lambda = \frac{\beta_F \cdot h + 1_0}{\beta_T \cdot 1_0} + \frac{\beta_V \cdot h^3}{\beta_U \cdot 1_0 \cdot s_0^2} = (0.71228 \cdot 28 + 33.091) / (1.4855 \cdot 33.091) + 0.10187 \cdot 28^3 / (3.1398 \cdot 33.091 \cdot 7.5^2) = 1.4615$					
	Угловая податливость фланца при затяжке:					
Подп. и дата	$y_\Phi = \frac{0.91 \cdot \beta_V}{E^{20} \cdot \lambda \cdot s_0^2 \cdot 1_0} = 0.91 \cdot 0.10187 / (1.99 \cdot 10^5 \cdot 1.4615 \cdot 7.5^2 \cdot 33.091) = 0.98115 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ/\text{Н}\cdot\text{м}$					
	Угловая податливость фланца, нагруженного внешним изгибающим моментом:					
Инв. № подл.	$y_{\Phi M} = \left(\frac{\pi}{4}\right)^3 \cdot \frac{D_6}{E^{20} \cdot D_K \cdot h^3} = (3.1416 / 4)^3 \cdot 250 / (1.99 \cdot 10^5 \cdot 300 \cdot 28^3) = 0.52952 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ/\text{Н}\cdot\text{м}$					
	Плечи моментов:					
	$a = 0$ $b = 0.5 \cdot (D_6 - D_{\text{сш}}) = 0.5 \cdot (250 - 193) = 28.5 \text{ мм}$					
Изм. Лист	№ док.	Подп.	Дата	90651-20600-AM-02-220 РР		Лист
						264

НЕФТЕХИМПРОЕКТ NEFTECHIMPROEKT		МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ			РР
e = 0.5 · (D <sub>ст</sub> - D - s <sub>з</sub> ) = 0.5 · (193 - 146 - 13.818) = 16.591 мм					
Характеристики прокладки:					
Тип и материал прокладки	Коэффициент m	Удельное давление обжатия q <sub>обж</sub> , МПа	Допускаемое удельное давление [q], МПа	Коэффициент обжатия K	Условный модуль сжатия E <sub>n</sub> , МПа
Спирально-навитая с лентой из нержавеющей стали	3	69	-	-	-
Эффективная ширина прокладки : b <sub>0</sub> = 10 мм					
Примечание: $\begin{cases} b_0 = b_{\text{пр}} & \text{при } b_{\text{пр}} \leq 15.0 \text{ мм} \\ b_0 = 3.8 \cdot \sqrt{b_{\text{пр}}} & \text{при } b_{\text{пр}} > 15.0 \text{ мм} \end{cases}$					
Рабочий наружный диаметр прокладки : D <sub>пнр</sub> = min{D <sub>4</sub> ; D <sub>нп</sub> } = min{203; 203} = 203 мм					
Средний эффективный диаметр прокладки: D <sub>ст</sub> = D <sub>пнр</sub> - b <sub>0</sub> = 203 - 10 = 193 мм					
Для металлических и асбометаллических прокладок y <sub>n</sub> = 0.					
Расчёт нагрузок:					
Равнодействующая давления : Q <sub>д</sub> = 0.785 · D <sub>ст</sub> <sup>2</sup> · p = 0.785 · 193 <sup>2</sup> · 1.6 = 46785 Н					
Усилие на прокладке в рабочих условиях, необходимое для обеспечения герметичности: R <sub>п</sub> = π · D <sub>ст</sub> · b <sub>0</sub> · m ·  p  = 3.1416 · 193 · 10 · 3 ·  1.6  = 29104 Н					
Усилие, необходимое для смятия прокладки при затяжке : P <sub>обж</sub> = 0.5 · π · D <sub>ст</sub> · b <sub>0</sub> · q <sub>обж</sub> = 0.5 · 3.1416 · 193 · 10 · 69 = 2.0918 · 10 <sup>5</sup> Н					
Расчетная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для герметизации в рабочих условиях (нагрузки + давление, без учета температурной нагрузки) $\eta = y_{\text{п}} + y_{\text{б}} + y'_{\text{ф}} \cdot b'^{1/2} + y''_{\text{ф}} \cdot b''^{1/2} = 0 + 0.1643 \cdot 10^{-6} + 0.10965 \cdot 10^{-4} \cdot 28.5^{1/2} + 0.98115 \cdot 10^{-5} \cdot 28.5^{1/2} = 0.45884 \cdot 10^{-6} \text{ мм/Н}$					
Коэффициенты жёсткости для фланцевого соединения, нагруженного внутренним давлением и внешней осевой силой: $\alpha = 1 - \frac{y_{\text{п}} - (y'_{\text{ф}} \cdot e' \cdot b' + y''_{\text{ф}} \cdot e'' \cdot b'')}{\eta}$ = 1 - (0 - (0.10965 · 10 <sup>-4</sup> · 16.591 · 28.5 + 0.98115 · 10 <sup>-5</sup> · 16.591 · 28.5)) / 0.45884 · 10 <sup>-6</sup> = 1.3737					
Коэффициенты жёсткости для фланцевого соединения, нагруженного внешним изгибающим моментом: $\alpha_{\text{М}} = \frac{y_{\text{б}} + y'_{\text{фМ}} \cdot b' \cdot \left(b' + e' - \frac{e'^2}{D_{\text{ст}}}\right) + y''_{\text{фМ}} \cdot b'' \cdot \left(b'' + e'' - \frac{e''^2}{D_{\text{ст}}}\right)}{y_{\text{б}} + y_{\text{п}} \cdot \left(\frac{D_{\text{б}}}{D_{\text{ст}}}\right)^2 + y'_{\text{фМ}} \cdot b'^{1/2} + y''_{\text{фМ}} \cdot b''^{1/2}}$ = [0.1643 · 10 <sup>-6</sup> + 0.74394 · 10 <sup>-5</sup> · 28.5 · (28.5 + 16.591 - 16.591 <sup>2</sup> / 193) + 0.52952 · 10 <sup>-5</sup> · 28.5 · (28.5 + 16.591 - 16.591 <sup>2</sup> / 193)] / [0.1643 · 10 <sup>-6</sup> + 0 · (250 / 193) <sup>2</sup> + 0.74394 · 10 <sup>-5</sup> · 28.5 <sup>1/2</sup> + 0.74394 · 10 <sup>-5</sup> · 28.5 <sup>1/2</sup> ] = 1.2786					
P <sub>б1</sub> = α · (Q <sub>д</sub> + F) + R <sub>п</sub> + $\frac{4 \cdot \alpha_{\text{М}} \cdot  M }{D_{\text{ст}}}$ = 1.3737 · (46785 + 0) + 29104 + 4 · 1.2786 ·  0  / 193 = 93371 Н					
Расчетная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для герметизации в рабочих условиях (только давление, без учета температурной нагрузки)					
90651-20600-AM-02-220 РР					Лист
					265
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	

Этот документ является собственностью "НЕФТЕХИМПРОЕКТ" и не подлежит копированию и распространению без его согласия	НЕФТЕХИМПРОЕКТ NEFTECHIMPROEKT				МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ				PP		
	$P_{\epsilon 1} = \alpha \cdot (Q_{\text{д}} + F) + R_{\text{п}} + \frac{4 \cdot \alpha_{\text{м}} \cdot  M }{D_{\text{от}}} = 1.3737 \cdot (46785 + 0) + 29104 + 4 \cdot 1.2786 \cdot  0  / 193 = 93371 \text{ Н}$										
	Суммарная площадь сечения болтов (шпилек) по внутреннему диаметру резьбы или сечению наименьшего диаметра:										
	$A_{\epsilon} = n \cdot f_{\epsilon} = 8 \cdot 324 = 2592 \text{ мм}^2$										
	Расчётная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для обжатия прокладки и минимального начального натяжения болтов:										
$P_{\epsilon 2} = \max \{ P_{\text{обж}}; 0.4 \cdot A_{\epsilon} \cdot [\sigma]_{\epsilon}^{20} \} = \max \{ 2.0918 \cdot 10^5; 0.4 \cdot 2592 \cdot 230 = 2.3846 \cdot 10^5 \} = 2.3846 \cdot 10^5 \text{ Н}$											
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: $K_{\text{уз}} = 1$											
Коэффициент учета нагрузки от температурных деформаций: $K_{\text{ут}} = 1$											
Допускаемые напряжения для болтов (шпилек) при затяжке :											
$[\sigma]_{\epsilon}^{\text{м}} = \xi \cdot K_{\text{уп}} \cdot K_{\text{уз}} \cdot K_{\text{ут}} \cdot [\sigma]_{\epsilon}^{20} = 1.2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 230 = 276 \text{ МПа}$											
Болтовая нагрузка в условиях затяжки :											
$P_{\epsilon}^{\text{м}} = \max \{ P_{\epsilon 1}; P_{\epsilon 2} \} = \max \{ 93371; 2.3846 \cdot 10^5 \} = 2.3846 \cdot 10^5 \text{ Н}$											
Условие прочности при затяжке:											
$\sigma_{\epsilon 1} = \frac{P_{\epsilon}^{\text{м}}}{A_{\epsilon}} \leq [\sigma]_{\epsilon}^{\text{м}}$											
$\sigma_{\epsilon 1} = \frac{P_{\epsilon}^{\text{м}}}{A_{\epsilon}} = 2.3846 \cdot 10^5 / 2592 = 92 \text{ МПа}$											
Крутящий момент при затяжке болтов (шпилек) без смазки при $\sigma_{\epsilon 1} < 120 \text{ МПа}$ :											
$M_{\text{кр}} = 0.3 \cdot \frac{P_{\epsilon}^{\text{м}} \cdot d}{n} = 0.3 \cdot 2.3846 \cdot 10^5 \cdot 24 / 8 = 214.62 \text{ Н} \cdot \text{м}$											
При наличии смазки величина $M_{\text{кр}}$ снижается на 25% и составляет $0.75 \cdot M_{\text{кр}} = 160.96 \text{ Н} \cdot \text{м}$											
92 МПа ≤ 276 МПа, <b>Условие прочности выполнено.</b>											
Допускаемые напряжения для болтов (шпилек) при рабочих условиях:											
$[\sigma]_{\epsilon}^{\text{р}} = K_{\text{уп}} \cdot K_{\text{уз}} \cdot K_{\text{ут}} \cdot [\sigma]_{\epsilon} = 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 230 = 230 \text{ МПа}$											
Болтовая нагрузка в рабочих условиях :											
$P_{\epsilon}^{\text{р}} = P_{\epsilon}^{\text{м}} + (1 - \alpha) \cdot (Q_{\text{д}} + F) + \frac{4 \cdot (1 - \alpha_{\text{м}}) \cdot  M }{D_{\text{от}}} = 2.3846 \cdot 10^5 + (1 - 1.3737) \cdot (46785 + 0) + 4 \cdot (1 - 1.2786) \cdot  0  / 193 = 2.2098 \cdot 10^5 \text{ Н}$											
Условие прочности в рабочих условиях:											
$\sigma_{\epsilon 2} = \frac{P_{\epsilon}^{\text{р}}}{A_{\epsilon}} \leq [\sigma]_{\epsilon}^{\text{р}}$											
$\sigma_{\epsilon 2} = \frac{P_{\epsilon}^{\text{р}}}{A_{\epsilon}} = 2.2098 \cdot 10^5 / 2592 = 85.255 \text{ МПа}$											
85.255 МПа ≤ 230 МПа, <b>Условие прочности выполнено.</b>											
Расчёт первого фланца:											
Коэффициент, учитывающий изгиб тарелки фланца между шпильками:											
$C_{\text{ф}} = \max \left\{ 1; \sqrt{\frac{\frac{\pi \cdot D_{\epsilon}}{n}}{2 \cdot d + \frac{6 \cdot h}{m + 0.5}}} \right\} = \max \{ 1; (3.1416 \cdot 250 / 8 / (2 \cdot 24 + 6 \cdot 25 / (3 + 0.5)))^{1/2} \} = 1.0395$											
Взам. инв. №									Лист		
Подп. и дата									266		
Инв. № подл.									Формат А4		
				90651-20600-AM-02-220 PP							
Изм.	Лист	№ док.			Подп.	Дата					

90651-20600-AM-02-220 PP.izm.0.docx

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при затяжке :

$$M^M = C_F \cdot P_6^M \cdot b = 1.0395 \cdot 2.3846 \cdot 10^5 \cdot 28.5 = 7064.6 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$f = \max \left\{ \frac{C_{36}}{1+A}, 1.0 \right\} = \max \{ 1.6922 / (1 + 1.6667); 1.0 \} = 1$$

$$D^* = D + c + s_1 \text{ при } (D + 2 \cdot c) < 20 \cdot (s_1 - c) \text{ и } f = 1 = 146 + 0 + 20 \text{ при } 146 < 20 \cdot (20 - 0) \text{ и } f = 1 = 166 \text{ мм}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении  $s_1$ :

$$\sigma_1^M = \frac{M^M}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D^*} = 7064.6 / (1.3078 \cdot (20 - 3)^2 \cdot 166) = 112.6 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в условиях затяжки :

$$\sigma_R^M = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + 1.0}{\lambda \cdot h^2 \cdot 1.0 \cdot D} \cdot M^M = (1.33 \cdot 0.71228 \cdot 25 + 33.091) / (1.3078 \cdot 25^2 \cdot 33.091 \cdot 146) \cdot 7064.6 = 101.57 \text{ МПа}$$

$$\beta_Y = \frac{1}{K-1} \cdot \left( 0.69 + 5.72 \cdot \frac{K^2 \cdot \lg K}{K^2 - 1} \right) = 1 / (2.0548 - 1) \cdot (0.69 + 5.72 \cdot 2.0548^2 \cdot \lg 2.0548 / (2.0548^2 - 1)) = 2.8766$$

$$\beta_Z = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = (2.0548^2 + 1) / (2.0548^2 - 1) = 1.6207$$

Окружное напряжение в тарелке в условиях затяжки :

$$\sigma_T^M = \frac{\beta_Y \cdot M^M}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^M = 2.8766 \cdot 7064.6 / (25^2 \cdot 146) - 1.6207 \cdot 101.57 = 58.097 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении  $s_1$  (п. 8.5.1):

$$\max \{ |\sigma_1^M + \sigma_R^M|; |\sigma_1^M + \sigma_T^M| \} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{ст}}^{20}$$

$$\max \{ |\sigma_1^M + \sigma_R^M|; |\sigma_1^M + \sigma_T^M| \} = \max \{ |112.6 + 101.57|; |112.6 + 58.097| \} = 214.17 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_{\text{ст}}^{20} = 1.5 \cdot [\sigma]_{\text{ф}}^{20} = 1.5 \cdot 164.5 = 246.75 \text{ МПа}$$

$$K = \frac{D_{\text{н}}}{D} = 300 / 146 = 2.0548$$

Коэффициент учета размеров тарелки фланца:  $K_S = 1.2$

$$K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{ст}}^{20} = 1.2 \cdot 1 \cdot 246.75 = 296.1 \text{ МПа}$$

214.17 МПа ≤ 296.1 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Болтовая нагрузка в рабочих условиях :

$$P_6^P = P_6^M + (1 - \alpha) \cdot (Q_{\text{д}} + F) + \frac{4 \cdot (1 - \alpha_{\text{м}}) \cdot |M|}{D_{\text{ст}}} = 2.3846 \cdot 10^5 + (1 - 1.3737) \cdot (46785 + 0) + 4 \cdot (1 - 1.2786) \cdot |0| / 193 = 2.2098 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Приведенная нагрузка от внешней силы и момента :

$$Q_{\text{FM}}^+ = F + \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{ст}}} = 0 + 4 \cdot |0| / 193 = 0 \text{ Н}$$

$$Q_{\text{FM}}^- = F - \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{ст}}} = 0 - 4 \cdot |0| / 193 = 0 \text{ Н}$$

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при рабочих условиях:

$$M^P = C_F \cdot \max \{ P_6^P \cdot b + (Q_{\text{д}} + Q_{\text{FM}}^-) \cdot e; |Q_{\text{д}} + Q_{\text{FM}}^+| \cdot e \} = \frac{1.0395 \cdot \max \{ 2.2098 \cdot 10^5 \cdot 28.5 + (46785 + 0) \cdot 16.591; |46785 + 0| \cdot 16.591 \}}{16.591} = 7353.5 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_1$ :

$$\sigma_1^P = \frac{M^P}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D^*} = 7353.5 / (1.3078 \cdot (20 - 3)^2 \cdot 166) = 117.21 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в рабочих условиях :

$$\sigma_R^P = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + 1.0}{\lambda \cdot h^2 \cdot 1.0 \cdot D} \cdot M^P = (1.33 \cdot 0.71228 \cdot 25 + 33.091) / (1.3078 \cdot 25^2 \cdot 33.091 \cdot 146) \cdot 7353.5 = 105.72 \text{ МПа}$$

Взам. инв. №					
Подп. и дата					
Инв. № подл.					
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	90651-20600-AM-02-220 РР
					Лист
					267

Окружное напряжение в тарелке в рабочих условиях :

$$\sigma_T^P = \frac{\beta_Y \cdot M^P}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^P = 2.8766 \cdot 7353.5 / (25^2 \cdot 146) - 1.6207 \cdot 105.72 = 60.472 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_1$  (+):

$$\sigma_{1mm}^{P+} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_1}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = (0.785 \cdot 146^2 \cdot 1.6 + 0 + 4 \cdot 0 / (146 + 20)) / (3.1416 \cdot (146 + 20) \cdot (20 - 3)) = 3.0199 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_1$  (п. 8.5.1):

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P+} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P+} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^{P+} \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_M$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P+} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P+} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^{P+} \right| \right\} = \frac{\max\{117.21 - 3.0199 + 105.72; |117.21 - 3.0199 + 60.472|; 117.21 + 3.0199\}}{117.21 + 3.0199} = 219.91 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_M = 1.5 \cdot [\sigma]_\Phi = 1.5 \cdot 144 = 216 \text{ МПа}$$

$$K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_M = 1.2 \cdot 1 \cdot 216 = 259.2 \text{ МПа}$$

219.91 МПа ≤ 259.2 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_1$  (-):

$$\sigma_{1mm}^{P-} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F - \frac{4 \cdot M}{D + s_1}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = (0.785 \cdot 146^2 \cdot 1.6 + 0 - 4 \cdot 0 / (146 + 20)) / (3.1416 \cdot (146 + 20) \cdot (20 - 3)) = 3.0199 \text{ МПа}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P-} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P-} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^{P-} \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_M$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P-} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P-} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^{P-} \right| \right\} = \frac{\max\{117.21 - 3.0199 + 105.72; |117.21 - 3.0199 + 60.472|; 117.21 + 3.0199\}}{117.21 + 3.0199} = 219.91 \text{ МПа}$$

219.91 МПа ≤ 259.2 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_0^M = f \cdot \sigma_1^M = 1 \cdot 112.6 = 112.6 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении  $s_0$  (п. 8.5.2):

$$\sigma_0^M \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R^{20}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_R^{20} = 3 \cdot [\sigma]_\Phi^{20} = 3 \cdot 164.5 = 493.5 \text{ МПа}$$

$$1.3 \cdot [\sigma]_R^{20} = 1.3 \cdot 493.5 = 641.55 \text{ МПа}$$

112.6 МПа ≤ 641.55 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_0^P = f \cdot \sigma_1^P = 1 \cdot 117.21 = 117.21 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_0$  (+):

$$\sigma_{0mm}^{P+} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_0}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = (0.785 \cdot 146^2 \cdot 1.6 + 0 + 4 \cdot 0 / (146 + 7.5)) / (3.1416 \cdot (146 + 7.5) \cdot (7.5 - 3)) = 12.337 \text{ МПа}$$

Окружное мембранное напряжение от действия давления во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_{0mo}^P = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s_0 - c)} = 1.6 \cdot 146 / (2 \cdot (7.5 - 3)) = 25.956 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P+} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P+} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P+} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P+} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} = \frac{\max\{117.21 \pm 12.337; |0.3 \cdot 117.21 \pm 25.956|; |0.7 \cdot 117.21 \pm (12.337 - 25.956)|\}}{117.21 \pm 12.337} = 129.54 \text{ МПа}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_R = 3 \cdot [\sigma]_\Phi = 3 \cdot 144 = 432 \text{ МПа}$$

Взам. инв. №					
Подп. и дата					
Инв. № подл.					
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	

90651-20600-AM-02-220 РР

Лист

268

$$1.3 \cdot [\sigma]_R = 1.3 \cdot 432 = 561.6 \text{ МПа}$$

129.54 МПа ≤ 561.6 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_0$  (–):

$$\sigma_{0mm}^{P-} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F - \frac{4 \cdot M}{D + s_0}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = (0.785 \cdot 146^2 \cdot 1.6 + 0 - 4 \cdot 0 / (146 + 7.5)) / (3.1416 \cdot (146 + 7.5) \cdot (7.5 - 3)) = 12.337 \text{ МПа}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P-} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P-} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P-} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P-} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} = \max \{ |117.21 \pm 12.337|; |0.3 \cdot 117.21 \pm 25.956|; |0.7 \cdot 117.21 \pm (12.337 - 25.956)| \} = 129.54 \text{ МПа}$$

129.54 МПа ≤ 561.6 МПа, **Условие прочности выполнено.**

**Расчет в сечении  $s_0$  в рабочих условиях (п. 8.5.5 ГОСТ 34233.4-2017):**

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0mo}^P \right|; \left| \sigma_{0mm}^P \right| \right\} \leq [\sigma]_\Phi$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0mo}^P \right|; \left| \sigma_{0mm}^P \right| \right\} = \max \{ |25.956|; |12.337| \} = 25.956 \text{ МПа}$$

25.956 МПа ≤ 144 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Условие статической прочности при затяжке для тарелок:

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_T^M \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_\Phi^{20}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_T^M \right| \right\} = \max \{ |101.57|; |58.097| \} = 101.57 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_\Phi^{20} = 1 \cdot 164.5 = 164.5 \text{ МПа}$$

101.57 МПа ≤ 164.5 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Условие статической прочности в рабочих условиях для тарелок:

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_T^P \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_\Phi$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_T^P \right| \right\} = \max \{ |105.72|; |60.472| \} = 105.72 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_\Phi = 1 \cdot 144 = 144 \text{ МПа}$$

105.72 МПа ≤ 144 МПа, **Условие прочности выполнено.**

### Жёсткость фланца:

Угол поворота фланца в рабочих условиях:

$$\Theta = M^P \cdot y_\Phi \cdot \frac{E^{20}}{E} = 7353.5 \cdot 0.10965 \cdot 10^{-4} \cdot 1.99 \cdot 10^5 / 1.91 \cdot 10^5 = 0.084009^\circ$$

Допускаемый угол поворота фланца:

$$[\Theta] = 0.34377^\circ$$

Коэффициент увеличения допускаемого угла поворота фланцев:  $K_\Theta = 1$

Условие выполнения жесткости фланцев:

$$\Theta \leq K_\Theta \cdot [\Theta] = 1 \cdot 0.34377 = 0.34377^\circ$$

**Условие жёсткости выполнено.**

### Расчёт второго фланца:

Коэффициент, учитывающий изгиб тарелки фланца между шпильками:

$$C_F = \max \left\{ 1; \sqrt{\frac{\frac{\pi \cdot D_\Phi}{n}}{2 \cdot d + \frac{6 \cdot h}{m + 0.5}}} \right\} = \max \{ 1; (3.1416 \cdot 250 / 8 / (2 \cdot 24 + 6 \cdot 28 / (3 + 0.5)))^{1/2} \} = 1.0113$$

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при затяжке:

$$M^M = C_F \cdot P_\Phi^M \cdot b = 1.0113 \cdot 2.3846 \cdot 10^5 \cdot 28.5 = 6872.8 \text{ Н·м}$$

Взам. инв. №					
Подп. и дата					
Инв. № подл.					

Коэффициент увеличения допускаемого угла поворота фланцев:  $K_{\Theta} = 1$

Условие выполнения жесткости фланцев :

$\Theta \leq K_{\Theta} \cdot [\Theta] = 1 * 0.34377 = 0.34377 ^\circ$

Условие жёсткости выполнено.

**Расчёт второго фланца:**

Коэффициент, учитывающий изгиб тарелки фланца между шпильками:

$$C_F = \max \left\{ 1; \sqrt{\frac{\frac{\pi \cdot D_6}{n}}{2 \cdot d + \frac{6 \cdot h}{m + 0.5}}} \right\} = \max \{ 1; (3.1416 * 250 / 8 / (2 * 24 + 6 * 28 / (3 + 0.5)))^{1/2} \} = 1.0113$$

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при затяжке :

$M^M = C_F \cdot P_6^M \cdot b = 1.0113 * 2.3846 \cdot 10^5 * 28.5 = 6872.8 \text{ Н}\cdot\text{м}$

					90651-20600-AM-02-220 PP	Лист
						269
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата		

$$f = \max \left\{ \frac{C_{36}}{1+A}, 1.0 \right\} = \max \{ 1.6922 / (1 + 1.6667); 1.0 \} = 1$$

$$D^* = D + c + s_1 \text{ при } (D + 2 \cdot c) < 20 \cdot (s_1 - c) \text{ и } f = 1 = 146 + 0 + 20 \text{ при } 146 < 20 \cdot (20 - 0) \text{ и } f = 1 = 166 \text{ мм}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении  $s_1$ :

$$\sigma_1^M = \frac{M^M}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D^*} = 6872.8 / (1.4615 \cdot (20 - 3)^2 \cdot 166) = 98.02 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в условиях затяжки:

$$\sigma_R^M = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + 1.0}{\lambda \cdot h^2 \cdot 1.0 \cdot D} \cdot M^M = (1.33 \cdot 0.71228 \cdot 28 + 33.091) / (1.4615 \cdot 28^2 \cdot 33.091 \cdot 146) \cdot 6872.8 = 74.013 \text{ МПа}$$

$$\beta_Y = \frac{1}{K-1} \cdot \left( 0.69 + 5.72 \cdot \frac{K^2 \cdot \lg K}{K^2 - 1} \right) = 1 / (2.0548 - 1) \cdot (0.69 + 5.72 \cdot 2.0548^2 \cdot \lg 2.0548 / (2.0548^2 - 1)) = 2.8766$$

$$\beta_Z = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = (2.0548^2 + 1) / (2.0548^2 - 1) = 1.6207$$

Окружное напряжение в тарелке в условиях затяжки:

$$\sigma_T^M = \frac{\beta_Y \cdot M^M}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^M = 2.8766 \cdot 6872.8 / (28^2 \cdot 146) - 1.6207 \cdot 74.013 = 52.769 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении  $s_1$  (п. 8.5.1):

$$\max \{ |\sigma_1^M + \sigma_R^M|; |\sigma_1^M + \sigma_T^M| \} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_M^{20}$$

$$\max \{ |\sigma_1^M + \sigma_R^M|; |\sigma_1^M + \sigma_T^M| \} = \max \{ |98.02 + 74.013|; |98.02 + 52.769| \} = 172.03 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_M^{20} = 1.5 \cdot [\sigma]_F^{20} = 1.5 \cdot 164.5 = 246.75 \text{ МПа}$$

$$K = \frac{D_H}{D} = 300 / 146 = 2.0548$$

Коэффициент учета размеров тарелки фланца:  $K_S = 1.2$

$$K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_M^{20} = 1.2 \cdot 1 \cdot 246.75 = 296.1 \text{ МПа}$$

172.03 МПа ≤ 296.1 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Приведенная нагрузка от внешней силы и момента:

$$Q_{FM}^+ = F + \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{ст}}} = 0 + 4 \cdot |0| / 193 = 0 \text{ Н}$$

$$Q_{FM}^- = F - \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{ст}}} = 0 - 4 \cdot |0| / 193 = 0 \text{ Н}$$

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при рабочих условиях:

$$M^P = C_F \cdot \max \{ F_F^P \cdot b + (Q_H + Q_{FM}) \cdot e; |Q_H + Q_{FM}| \cdot e \} = \frac{1.0113 \cdot \max \{ 2.2098 \cdot 10^5 \cdot 28.5 + (46785 + 0) \cdot 16.591; |46785 + 0| \cdot 16.591 \}}{16.591} = 7153.8 \text{ Н·м}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_1$ :

$$\sigma_1^P = \frac{M^P}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D^*} = 7153.8 / (1.4615 \cdot (20 - 3)^2 \cdot 166) = 102.03 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в рабочих условиях:

$$\sigma_R^P = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + 1.0}{\lambda \cdot h^2 \cdot 1.0 \cdot D} \cdot M^P = (1.33 \cdot 0.71228 \cdot 28 + 33.091) / (1.4615 \cdot 28^2 \cdot 33.091 \cdot 146) \cdot 7153.8 = 77.04 \text{ МПа}$$

Окружное напряжение в тарелке в рабочих условиях:

$$\sigma_T^P = \frac{\beta_Y \cdot M^P}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^P = 2.8766 \cdot 7153.8 / (28^2 \cdot 146) - 1.6207 \cdot 77.04 = 54.927 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_1$  (+):

Взам. инв. №					
Подп. и дата					
Инв. № подл.					
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	

90651-20600-AM-02-220 РР

Лист

270



$$\sigma_{1mm}^{P+} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_1}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = (0.785 \cdot 146^2 \cdot 1.6 + 0 + 4 \cdot 0 / (146 + 20)) / (3.1416 \cdot (146 + 20) \cdot (20 - 3)) = 3.0199 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_1$  (п. 8.5.1):

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P+} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P+} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^{P+} \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_M$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P+} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P+} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^{P+} \right| \right\} = \max \{ |102.03 - 3.0199 + 77.04|; |102.03 - 3.0199 + 54.927|; |102.03 + 3.0199| \} = 176.05 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_M = 1.5 \cdot [\sigma]_\Phi = 1.5 \cdot 144 = 216 \text{ МПа}$$

$$K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_M = 1.2 \cdot 1 \cdot 216 = 259.2 \text{ МПа}$$

176.05 МПа ≤ 259.2 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_1$  (–):

$$\sigma_{1mm}^{P-} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F - \frac{4 \cdot M}{D + s_1}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = (0.785 \cdot 146^2 \cdot 1.6 + 0 - 4 \cdot 0 / (146 + 20)) / (3.1416 \cdot (146 + 20) \cdot (20 - 3)) = 3.0199 \text{ МПа}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P-} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P-} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^{P-} \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_M$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P-} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P-} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^{P-} \right| \right\} = \max \{ |102.03 - 3.0199 + 77.04|; |102.03 - 3.0199 + 54.927|; |102.03 + 3.0199| \} = 176.05 \text{ МПа}$$

176.05 МПа ≤ 259.2 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_0^M = f \cdot \sigma_1^M = 1 \cdot 98.02 = 98.02 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении  $s_0$  (п. 8.5.2):

$$\sigma_0^M \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R^{20}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_R^{20} = 3 \cdot [\sigma]_\Phi^{20} = 3 \cdot 164.5 = 493.5 \text{ МПа}$$

$$1.3 \cdot [\sigma]_R^{20} = 1.3 \cdot 493.5 = 641.55 \text{ МПа}$$

98.02 МПа ≤ 641.55 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_0^P = f \cdot \sigma_1^P = 1 \cdot 102.03 = 102.03 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_0$  (+):

$$\sigma_{0mm}^{P+} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_0}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = (0.785 \cdot 146^2 \cdot 1.6 + 0 + 4 \cdot 0 / (146 + 7.5)) / (3.1416 \cdot (146 + 7.5) \cdot (7.5 - 3)) = 12.337 \text{ МПа}$$

Окружное мембранное напряжение от действия давления во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_{0mo}^P = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s_0 - c)} = 1.6 \cdot 146 / (2 \cdot (7.5 - 3)) = 25.956 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P+} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P+} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P+} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P+} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} = \max \{ |102.03 \pm 12.337|; |0.3 \cdot 102.03 \pm 25.956|; |0.7 \cdot 102.03 \pm (12.337 - 25.956)| \} = 114.37 \text{ МПа}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_R = 3 \cdot [\sigma]_\Phi = 3 \cdot 144 = 432 \text{ МПа}$$

$$1.3 \cdot [\sigma]_R = 1.3 \cdot 432 = 561.6 \text{ МПа}$$

114.37 МПа ≤ 561.6 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_0$  (–):

Взам. инв. №					
Подп. и дата					
Инв. № подл.					
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	

90651-20600-AM-02-220 РР

Лист

271

$$\sigma_{0mm}^{P-} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F - \frac{4 \cdot M}{D + s_0}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = (0.785 \cdot 146^2 \cdot 1.6 + 0 - 4 \cdot 0 / (146 + 7.5)) / (3.1416 \cdot (146 + 7.5) \cdot (7.5 - 3)) = 12.337 \text{ МПа}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P-} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P-} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P-} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P-} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} = \max \{ |102.03 \pm 12.337|; |0.3 \cdot 102.03 \pm 25.956|; |0.7 \cdot 102.03 \pm (12.337 - 25.956)| \} = 114.37 \text{ МПа}$$

114.37 МПа ≤ 561.6 МПа, **Условие прочности выполнено.**

**Расчет в сечении  $s_0$  в рабочих условиях (п. 8.5.5 ГОСТ 34233.4-2017):**

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0mo}^P \right|; \left| \sigma_{0mm}^P \right| \right\} \leq [\sigma]_\Phi$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0mo}^P \right|; \left| \sigma_{0mm}^P \right| \right\} = \max \{ |25.956|; |12.337| \} = 25.956 \text{ МПа}$$

25.956 МПа ≤ 144 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Условие статической прочности при затяжке для тарелок:

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_T^M \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_\Phi^{20}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_T^M \right| \right\} = \max \{ |74.013|; |52.769| \} = 74.013 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_\Phi^{20} = 1 \cdot 164.5 = 164.5 \text{ МПа}$$

74.013 МПа ≤ 164.5 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Условие статической прочности в рабочих условиях для тарелок:

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_T^P \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_\Phi$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_T^P \right| \right\} = \max \{ |77.04|; |54.927| \} = 77.04 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_\Phi = 1 \cdot 144 = 144 \text{ МПа}$$

77.04 МПа ≤ 144 МПа, **Условие прочности выполнено.**

### Жёсткость фланца:

Угол поворота фланца в рабочих условиях:

$$\varpi = M^P \cdot y_\Phi \cdot \frac{E^{20}}{E} = 7153.8 \cdot 0.98115 \cdot 10^{-5} \cdot 1.99 \cdot 10^5 / 1.91 \cdot 10^5 = 0.073130^\circ$$

Допускаемый угол поворота фланца:

$$[\varpi] = 0.34377^\circ$$

Условие выполнения жесткости фланцев:

$$\varpi \leq K_\varpi \cdot [\varpi] = 1 \cdot 0.34377 = 0.34377^\circ$$

**Условие жёсткости выполнено.**

### Расчёт с учетом стесненности температурных деформаций

#### Расчёт болтов(шпилек):

Коэффициент учета нагрузки от температурных деформаций:  $K_{yt} = 1.3$

Допускаемые напряжения для болтов (шпилек) при затяжке:

$$[\sigma]_6^M = \xi \cdot K_{yp} \cdot K_{yz} \cdot K_{yz} \cdot [\sigma]_6^{20} = 1.2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1.3 \cdot 230 = 358.8 \text{ МПа}$$

**Расчетная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для герметизации в рабочих условиях (только давление, с учетом температурной нагрузки)**

$$\gamma = \frac{1}{y_\Pi + y_6 \cdot \frac{E_6^{20}}{E_6} + \left( y_\Phi' \cdot \frac{E_\Phi'^{20}}{E_\Phi'} + y_\Phi'' \cdot \frac{E_\Phi''^{20}}{E_\Phi''} \right) \cdot b^2}$$

$$= 1 / (0 + 0.1643 \cdot 10^{-6} \cdot 2.18 \cdot 10^5 / 2.15 \cdot 10^5 + (0.10965 \cdot 10^{-4} \cdot 1.99 \cdot 10^5 / 1.91 \cdot 10^5 + 0.98115 \cdot 10^{-5} \cdot 1.99 \cdot 10^5 / 1.91 \cdot 10^5) \cdot 28.5^2)$$

$$= 2.1121 \cdot 10^6 \text{ Н/мм}$$

Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	90651-20600-AM-02-220 РР	Лист
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата		272

Нагрузка от температурных деформаций :

$$Q_t = \gamma \cdot \left( \begin{aligned} &(\alpha_{\Phi}' \cdot h' + \alpha_{\text{ш}}' \cdot h_{\text{ш}}') \cdot (t_{\Phi 1} - 20^{\circ}\text{C}) + \\ &+ (\alpha_{\Phi}'' \cdot h'' + \alpha_{\text{ш}}'' \cdot h_{\text{ш}}'') \cdot (t_{\Phi 2} - 20^{\circ}\text{C}) + \\ &+ \alpha_p \cdot s_{\text{pm}} \cdot (t_p - 20^{\circ}\text{C}) - \\ &- \alpha_{\epsilon} \cdot (h' + h'' + s_{\text{pm}} + h_{\text{ш}}' + h_{\text{ш}}'') \cdot (t_{\epsilon} - 20^{\circ}\text{C}) \end{aligned} \right)$$

$$= 2.1121 \cdot 10^6 \cdot ((0.116 \cdot 10^{-4} \cdot 28 + 0 \cdot 0) \cdot (100 - 20^{\circ}\text{C}) + (0.116 \cdot 10^{-4} \cdot 25 + 0 \cdot 0) \cdot (100 - 20^{\circ}\text{C}) + 0.116 \cdot 10^{-4} \cdot 20 \cdot (100 - 20^{\circ}\text{C}) - 0.134 \cdot 10^{-4} \cdot (28 + 25 + 20 + 0 + 0) \cdot (100 - 20^{\circ}\text{C}))$$

$$= (-22202) \text{ Н}$$

$$P_{\epsilon 1} = \max \left\{ \begin{aligned} &\alpha \cdot (Q_{\text{д}} + F) + R_{\text{п}} + \frac{4 \cdot \alpha_{\text{м}} \cdot |M|}{D_{\text{ст}}} \\ &\alpha \cdot (Q_{\text{д}} + F) + R_{\text{п}} + \frac{4 \cdot \alpha_{\text{м}} \cdot |M|}{D_{\text{ст}}} - Q_t \end{aligned} \right\} = \max \left\{ \begin{aligned} &1.3737 \cdot (46785 + 0) + 29104 + 4 \cdot 1.2786 \cdot |0| / 193 = 933711.3737 \cdot \\ &(46785 + 0) + 29104 + 4 \cdot 1.2786 \cdot |0| / 193 - (-22202) = 1.1557 \cdot 10^5 \end{aligned} \right\} = 1.1557 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Болтовая нагрузка в условиях затяжки :

$$P_{\epsilon}^{\text{м}} = \max\{P_{\epsilon 1}, P_{\epsilon 2}\} = \max\{1.1557 \cdot 10^5; 2.3846 \cdot 10^5\} = 2.3846 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Условие прочности при затяжке:

$$\sigma_{\epsilon 1} = \frac{P_{\epsilon}^{\text{м}}}{A_{\epsilon}} \leq [\sigma]_{\epsilon}^{\text{м}}$$

$$\sigma_{\epsilon 1} = \frac{P_{\epsilon}^{\text{м}}}{A_{\epsilon}} = 2.3846 \cdot 10^5 / 2592 = 92 \text{ МПа}$$

Крутящий момент при затяжке болтов (шпилек) без смазки при  $\sigma_{\epsilon 1} < 120 \text{ МПа}$ :

$$M_{\text{кр}} = 0.3 \cdot \frac{P_{\epsilon}^{\text{м}} \cdot d}{n} = 0.3 \cdot 2.3846 \cdot 10^5 \cdot 24 / 8 = 214.62 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

При наличии смазки величина  $M_{\text{кр}}$  снижается на 25% и составляет  $0.75 \cdot M_{\text{кр}} = 160.96 \text{ Н} \cdot \text{м}$

$92 \text{ МПа} \leq 358.8 \text{ МПа}$ , **Условие прочности выполнено.**

Допускаемые напряжения для болтов (шпилек) при рабочих условиях:

$$[\sigma]_{\epsilon}^{\text{р}} = K_{\text{уп}} \cdot K_{\text{уз}} \cdot K_{\text{ут}} \cdot [\sigma]_{\epsilon} = 1 \cdot 1 \cdot 1.3 \cdot 230 = 299 \text{ МПа}$$

Болтовая нагрузка в рабочих условиях :

$$P_{\epsilon}^{\text{р}} = P_{\epsilon}^{\text{м}} + (1 - \alpha) \cdot (Q_{\text{д}} + F) + Q_t + \frac{4 \cdot (1 - \alpha_{\text{м}}) \cdot |M|}{D_{\text{ст}}} = \frac{2.3846 \cdot 10^5}{|0| / 193} + (1 - 1.3737) \cdot (46785 + 0) + (-22202) + 4 \cdot (1 - 1.2786) \cdot \frac{|0|}{193} = 1.9878 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Условие прочности в рабочих условиях:

$$\sigma_{\epsilon 2} = \frac{P_{\epsilon}^{\text{р}}}{A_{\epsilon}} \leq [\sigma]_{\epsilon}^{\text{р}}$$

$$\sigma_{\epsilon 2} = \frac{P_{\epsilon}^{\text{р}}}{A_{\epsilon}} = 1.9878 \cdot 10^5 / 2592 = 76.689 \text{ МПа}$$

$76.689 \text{ МПа} \leq 299 \text{ МПа}$ , **Условие прочности выполнено.**

### Расчёт первого фланца:

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при затяжке :

$$M^{\text{м}} = C_F \cdot P_{\epsilon}^{\text{м}} \cdot b = 1.0395 \cdot 2.3846 \cdot 10^5 \cdot 28.5 = 7064.6 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении  $s_1$ :

$$\sigma_1^{\text{м}} = \frac{M^{\text{м}}}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D} = 7064.6 / (1.3078 \cdot (20 - 3)^2 \cdot 166) = 112.6 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в условиях затяжки :

$$\sigma_R^{\text{м}} = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h \cdot l_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot l_0 \cdot D} \cdot M^{\text{м}} = (1.33 \cdot 0.71228 \cdot 25 + 33.091) / (1.3078 \cdot 25^2 \cdot 33.091 \cdot 146) \cdot 7064.6 = 101.57 \text{ МПа}$$

Взам. инв. №		76.689 МПа ≤ 299 МПа, <b>Условие прочности выполнено.</b>					
		<b>Расчёт первого фланца:</b>					
Подп. и дата		Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при затяжке :					
		$M^M = C_F \cdot P_E^M \cdot b = 1.0395 \cdot 2.3846 \cdot 10^5 \cdot 28.5 = 7064.6 \text{ Н}\cdot\text{м}$					
		Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении s <sub>1</sub> :					
		$\sigma_1^M = \frac{M^M}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D} = 7064.6 / (1.3078 \cdot (20 - 3)^2 \cdot 166) = 112.6 \text{ МПа}$					
		Радиальное напряжение в тарелке в условиях затяжки :					
		$\sigma_R^M = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + 1_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot 1_0 \cdot D} \cdot M^M = (1.33 \cdot 0.71228 \cdot 25 + 33.091) / (1.3078 \cdot 25^2 \cdot 33.091 \cdot 146) \cdot 7064.6 = 101.57 \text{ МПа}$					
Инв. № подл.						90651-20600-AM-02-220 РР	Лист
		Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	273

Окружное напряжение в тарелке в условиях затяжки :

$$\sigma_T^M = \frac{\beta_Y \cdot M^M}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^M = 2.8766 \cdot 7064.6 / (25^2 \cdot 146) - 1.6207 \cdot 101.57 = 58.097 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении  $s_1$  (п. 8.5.1):

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^M + \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_1^M + \sigma_T^M \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_M$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^M + \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_1^M + \sigma_T^M \right| \right\} = \max \{ |112.6 + 101.57|; |112.6 + 58.097| \} = 214.17 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_M^{20} = 1.5 \cdot [\sigma]_F^{20} = 1.5 \cdot 164.5 = 246.75 \text{ МПа}$$

Коэффициент учета размеров тарелки фланца:  $K_S = 1.2$

Коэффициент увеличения допускаемых напряжений при расчёте с учетом стесненности температурных деформаций:  $K_T = 1.3$

$$K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_M^{20} = 1.2 \cdot 1.3 \cdot 246.75 = 384.93 \text{ МПа}$$

214.17 МПа  $\leq$  384.93 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Болтовая нагрузка в рабочих условиях :

$$P_6^P = P_6^M + (1 - \alpha) \cdot (Q_{\text{д}} + F) + Q_t + \frac{4 \cdot (1 - \alpha_M) \cdot |M|}{D_{\text{от}}} = \frac{2.3846 \cdot 10^5}{|Q| / 193} + (1 - 1.3737) \cdot (46785 + 0) + (-22202) + 4 \cdot (1 - 1.2786) \cdot \frac{|M|}{|Q| / 193} = 1.9878 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Приведенная нагрузка от внешней силы и момента :

$$Q_{FM}^+ = F + \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{от}}} = 0 + 4 \cdot |Q| / 193 = 0 \text{ Н}$$

$$Q_{FM}^- = F - \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{от}}} = 0 - 4 \cdot |Q| / 193 = 0 \text{ Н}$$

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при рабочих условиях:

$$M^P = C_F \cdot \max \left\{ P_6^P \cdot b + (Q_{\text{д}} + Q_{FM}^-) \cdot e; |Q_{\text{д}} + Q_{FM}^-| \cdot e \right\} = \frac{1.0395 \cdot \max \{ 1.9878 \cdot 10^5 \cdot 28.5 + (46785 + 0) \cdot 16.591; |46785 + 0| \cdot 16.591 \}}{16.591} = 6695.8 \text{ Н·м}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_1$ :

$$\sigma_1^P = \frac{M^P}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D} = 6695.8 / (1.3078 \cdot (20 - 3)^2 \cdot 166) = 106.72 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в рабочих условиях :

$$\sigma_R^P = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + 1_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot 1_0 \cdot D} \cdot M^P = (1.33 \cdot 0.71228 \cdot 25 + 33.091) / (1.3078 \cdot 25^2 \cdot 33.091 \cdot 146) \cdot 6695.8 = 96.267 \text{ МПа}$$

Окружное напряжение в тарелке в рабочих условиях :

$$\sigma_T^P = \frac{\beta_Y \cdot M^P}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^P = 2.8766 \cdot 6695.8 / (25^2 \cdot 146) - 1.6207 \cdot 96.267 = 55.063 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_1$  (+):

$$\sigma_{\text{лмм}}^{P+} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_1}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = (0.785 \cdot 146^2 \cdot 1.6 + 0 + 4 \cdot 0 / (146 + 20)) / (3.1416 \cdot (146 + 20) \cdot (20 - 3)) = 3.0199 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_1$  (п. 8.5.1):

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^{P+} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^{P+} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{\text{лмм}}^{P+} \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_M$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^{P+} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^{P+} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{\text{лмм}}^{P+} \right| \right\} = \max \{ |106.72 - 3.0199 + 96.267|; |106.72 - 3.0199 + 55.063|; |106.72 + 3.0199| \} = 199.97 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_M = 1.5 \cdot [\sigma]_F = 1.5 \cdot 144 = 216 \text{ МПа}$$

$$K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_M = 1.2 \cdot 1.3 \cdot 216 = 336.96 \text{ МПа}$$

199.97 МПа  $\leq$  336.96 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_1$  (-):

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	$\sigma_{\text{лмм}}^{\text{P+}} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_1}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = (0.785 \cdot 146^2 \cdot 1.6 + 0 + 4 \cdot 0 / (146 + 20)) / (3.1416 \cdot (146 + 20) \cdot (20 - 3)) = 3.0199 \text{ МПа}$ <p>Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении <math>s_1</math> (п. 8.5.1):</p> $\max \left\{ \left  \sigma_1^{\text{P}} - \sigma_{\text{лмм}}^{\text{P+}} + \sigma_{\text{R}}^{\text{P}} \right , \left  \sigma_1^{\text{P}} - \sigma_{\text{лмм}}^{\text{P+}} + \sigma_{\text{T}}^{\text{P}} \right , \left  \sigma_1^{\text{P}} + \sigma_{\text{лмм}}^{\text{P+}} \right  \right\} \leq K_{\text{S}} \cdot K_{\text{T}} \cdot [\sigma]_{\text{ж}}$ $\max \left\{ \left  \sigma_1^{\text{P}} - \sigma_{\text{лмм}}^{\text{P+}} + \sigma_{\text{R}}^{\text{P}} \right , \left  \sigma_1^{\text{P}} - \sigma_{\text{лмм}}^{\text{P+}} + \sigma_{\text{T}}^{\text{P}} \right , \left  \sigma_1^{\text{P}} + \sigma_{\text{лмм}}^{\text{P+}} \right  \right\} = \frac{\max\{ 106.72 - 3.0199 + 96.267 ;  106.72 - 3.0199 + 55.063 ;  106.72 + 3.0199 \}}{1} = 199.97 \text{ МПа}$ <p>Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):</p> $[\sigma]_{\text{м}} = 1.5 \cdot [\sigma]_{\text{ф}} = 1.5 \cdot 144 = 216 \text{ МПа}$ $K_{\text{S}} \cdot K_{\text{T}} \cdot [\sigma]_{\text{ж}} = 1.2 \cdot 1.3 \cdot 216 = 336.96 \text{ МПа}$ <p>199.97 МПа ≤ 336.96 МПа, <b>Условие прочности выполнено.</b></p> <p>Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении <math>S_1</math> (–):</p>				
			<div>90651-20600-AM-02-220 PP</div>				
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	Лист		
					274		

$$\sigma_{\text{Iмм}}^{\text{P-}} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F - \frac{4 \cdot M}{D + s_1}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = (0.785 \cdot 146^2 \cdot 1.6 + 0 - 4 \cdot 0 / (146 + 20)) / (3.1416 \cdot (146 + 20) \cdot (20 - 3)) = 3.0199 \text{ МПа}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^{\text{P}} - \sigma_{\text{Iмм}}^{\text{P-}} + \sigma_{\text{R}}^{\text{P}} \right|, \left| \sigma_1^{\text{P}} - \sigma_{\text{Iмм}}^{\text{P-}} + \sigma_{\text{T}}^{\text{P}} \right|, \left| \sigma_1^{\text{P}} + \sigma_{\text{Iмм}}^{\text{P-}} \right| \right\} \leq K_{\text{S}} \cdot K_{\text{T}} \cdot [\sigma]_{\text{м}}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^{\text{P}} - \sigma_{\text{Iмм}}^{\text{P-}} + \sigma_{\text{R}}^{\text{P}} \right|, \left| \sigma_1^{\text{P}} - \sigma_{\text{Iмм}}^{\text{P-}} + \sigma_{\text{T}}^{\text{P}} \right|, \left| \sigma_1^{\text{P}} + \sigma_{\text{Iмм}}^{\text{P-}} \right| \right\} = \frac{\max\{106.72 - 3.0199 + 96.267; |106.72 - 3.0199 + 55.063|; 106.72 + 3.0199\}}{106.72 + 3.0199} = 199.97 \text{ МПа}$$

199.97 МПа ≤ 336.96 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_0^{\text{M}} = f \cdot \sigma_1^{\text{M}} = 1 \cdot 112.6 = 112.6 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении  $s_0$  (п. 8.5.2):

$$\sigma_0^{\text{M}} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_{\text{R}}^{20}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_{\text{R}}^{20} = 3 \cdot [\sigma]_{\text{ф}}^{20} = 3 \cdot 164.5 = 493.5 \text{ МПа}$$

$$1.3 \cdot [\sigma]_{\text{R}}^{20} = 1.3 \cdot 493.5 = 641.55 \text{ МПа}$$

112.6 МПа ≤ 641.55 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_0^{\text{P}} = f \cdot \sigma_1^{\text{P}} = 1 \cdot 106.72 = 106.72 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_0$  (+):

$$\sigma_{0\text{мм}}^{\text{P+}} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_0}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = (0.785 \cdot 146^2 \cdot 1.6 + 0 + 4 \cdot 0 / (146 + 7.5)) / (3.1416 \cdot (146 + 7.5) \cdot (7.5 - 3)) = 12.337 \text{ МПа}$$

Окружное мембранное напряжение от действия давления во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_{0\text{мо}}^{\text{P}} = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s_0 - c)} = 1.6 \cdot 146 / (2 \cdot (7.5 - 3)) = 25.956 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^{\text{P}} \pm \sigma_{0\text{мм}}^{\text{P+}} \right|, \left| 0.3 \cdot \sigma_0^{\text{P}} \pm \sigma_{0\text{мо}}^{\text{P}} \right|, \left| 0.7 \cdot \sigma_0^{\text{P}} \pm (\sigma_{0\text{мм}}^{\text{P+}} - \sigma_{0\text{мо}}^{\text{P}}) \right| \right\} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_{\text{R}}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^{\text{P}} \pm \sigma_{0\text{мм}}^{\text{P+}} \right|, \left| 0.3 \cdot \sigma_0^{\text{P}} \pm \sigma_{0\text{мо}}^{\text{P}} \right|, \left| 0.7 \cdot \sigma_0^{\text{P}} \pm (\sigma_{0\text{мм}}^{\text{P+}} - \sigma_{0\text{мо}}^{\text{P}}) \right| \right\} = \frac{\max\{106.72 \pm 12.337; |0.3 \cdot 106.72 \pm 25.956|; |0.7 \cdot 106.72 \pm (12.337 - 25.956)|\}}{106.72 \pm (12.337 - 25.956)} = 119.06 \text{ МПа}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_{\text{R}} = 3 \cdot [\sigma]_{\text{ф}} = 3 \cdot 144 = 432 \text{ МПа}$$

$$1.3 \cdot [\sigma]_{\text{R}} = 1.3 \cdot 432 = 561.6 \text{ МПа}$$

119.06 МПа ≤ 561.6 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_0$  (-):

$$\sigma_{0\text{мм}}^{\text{P-}} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F - \frac{4 \cdot M}{D + s_0}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = (0.785 \cdot 146^2 \cdot 1.6 + 0 - 4 \cdot 0 / (146 + 7.5)) / (3.1416 \cdot (146 + 7.5) \cdot (7.5 - 3)) = 12.337 \text{ МПа}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^{\text{P}} \pm \sigma_{0\text{мм}}^{\text{P-}} \right|, \left| 0.3 \cdot \sigma_0^{\text{P}} \pm \sigma_{0\text{мо}}^{\text{P}} \right|, \left| 0.7 \cdot \sigma_0^{\text{P}} \pm (\sigma_{0\text{мм}}^{\text{P-}} - \sigma_{0\text{мо}}^{\text{P}}) \right| \right\} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_{\text{R}}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^{\text{P}} \pm \sigma_{0\text{мм}}^{\text{P-}} \right|, \left| 0.3 \cdot \sigma_0^{\text{P}} \pm \sigma_{0\text{мо}}^{\text{P}} \right|, \left| 0.7 \cdot \sigma_0^{\text{P}} \pm (\sigma_{0\text{мм}}^{\text{P-}} - \sigma_{0\text{мо}}^{\text{P}}) \right| \right\} = \frac{\max\{106.72 \pm 12.337; |0.3 \cdot 106.72 \pm 25.956|; |0.7 \cdot 106.72 \pm (12.337 - 25.956)|\}}{106.72 \pm (12.337 - 25.956)} = 119.06 \text{ МПа}$$

119.06 МПа ≤ 561.6 МПа, **Условие прочности выполнено.**

**Расчет в сечении  $s_0$  в рабочих условиях (п. 8.5.5 ГОСТ 34233.4-2017):**

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0\text{мо}}^{\text{P}} \right|, \left| \sigma_{0\text{мм}}^{\text{P}} \right| \right\} \leq [\sigma]_{\text{ф}}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0\text{мо}}^{\text{P}} \right|, \left| \sigma_{0\text{мм}}^{\text{P}} \right| \right\} = \max\{25.956; |12.337|\} = 25.956 \text{ МПа}$$

Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	90651-20600-AM-02-220 PP	Лист
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	90651-20600-AM-02-220 PP	275

25.956 МПа ≤ 144 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Условие статической прочности при затяжке для тарелок:

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_T^M \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_{\Phi}^{20}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_T^M \right| \right\} = \max \{101.57; 58.097\} = 101.57 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_{\Phi}^{20} = 1.3 \cdot 164.5 = 213.85 \text{ МПа}$$

101.57 МПа ≤ 213.85 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Условие статической прочности в рабочих условиях для тарелок:

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_T^P \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_{\Phi}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_T^P \right| \right\} = \max \{96.267; 55.063\} = 96.267 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_{\Phi} = 1.3 \cdot 144 = 187.2 \text{ МПа}$$

96.267 МПа ≤ 187.2 МПа, **Условие прочности выполнено.**

### Жёсткость фланца:

Угол поворота фланца в рабочих условиях:

$$\Theta = M^P \cdot y_{\Phi} \cdot \frac{E^{20}}{E} = 6695.8 \cdot 0.10965 \cdot 10^{-4} \cdot 1.99 \cdot 10^5 / 1.91 \cdot 10^5 = 0.076495^\circ$$

Условие выполнения жесткости фланцев :

$$\Theta \leq K_{\Theta} \cdot [\Theta] = 1 \cdot 0.34377 = 0.34377^\circ$$

**Условие жёсткости выполнено.**

### Расчёт второго фланца:

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при затяжке :

$$M^M = C_F \cdot P_6^M \cdot b = 1.0113 \cdot 2.3846 \cdot 10^5 \cdot 28.5 = 6872.8 \text{ Н·м}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении  $s_1$ :

$$\sigma_1^M = \frac{M^M}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D} = 6872.8 / (1.4615 \cdot (20 - 3)^2 \cdot 166) = 98.02 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в условиях затяжки :

$$\sigma_R^M = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + 1.0}{\lambda \cdot h^2 \cdot l_0 \cdot D} \cdot M^M = (1.33 \cdot 0.71228 \cdot 28 + 33.091) / (1.4615 \cdot 28^2 \cdot 33.091 \cdot 146) \cdot 6872.8 = 74.013 \text{ МПа}$$

Окружное напряжение в тарелке в условиях затяжки :

$$\sigma_T^M = \frac{\beta_Y \cdot M^M}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^M = 2.8766 \cdot 6872.8 / (28^2 \cdot 146) - 1.6207 \cdot 74.013 = 52.769 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении  $s_1$  (п. 8.5.1):

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^M + \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_1^M + \sigma_T^M \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\Phi}^{20}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^M + \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_1^M + \sigma_T^M \right| \right\} = \max \{98.02 + 74.013; 98.02 + 52.769\} = 172.03 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_{\Phi}^{20} = 1.5 \cdot [\sigma]_{\Phi}^{20} = 1.5 \cdot 164.5 = 246.75 \text{ МПа}$$

Коэффициент учета размеров тарелки фланца:  $K_S = 1.2$

$$K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\Phi}^{20} = 1.2 \cdot 1.3 \cdot 246.75 = 384.93 \text{ МПа}$$

172.03 МПа ≤ 384.93 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Приведенная нагрузка от внешней силы и момента :

$$Q_{FM}^+ = F + \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{ст}}} = 0 + 4 \cdot |0| / 193 = 0 \text{ Н}$$

$$Q_{FM}^- = F - \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{ст}}} = 0 - 4 \cdot |0| / 193 = 0 \text{ Н}$$

Взам. инв. №					
Подп. и дата					
Инв. № подл.					
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	90651-20600-AM-02-220 РР



Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при рабочих условиях:

$$M^P = C_F \cdot \max \{ P_F^P \cdot b + (Q_{\text{д}} + Q_{\text{FM}}) \cdot e; |Q_{\text{д}} + Q_{\text{FM}}| \cdot e \} = \frac{1.0113 \cdot \max \{ 1.9878 \cdot 10^5 \cdot 28.5 + (46785 + 0) \cdot 16.591; |46785 + 0| \cdot 16.591 \}}{16.591} = 6514 \text{ Н·м}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_1$ :

$$\sigma_1^P = \frac{M^P}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D} = \frac{6514}{1.4615 \cdot (20 - 3)^2 \cdot 166} = 92.903 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в рабочих условиях:

$$\sigma_R^P = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + 1_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot 1_0 \cdot D} \cdot M^P = \frac{(1.33 \cdot 0.71228 \cdot 28 + 33.091) / (1.4615 \cdot 28^2 \cdot 33.091 \cdot 146) \cdot 6514}{1} = 70.149 \text{ МПа}$$

Окружное напряжение в тарелке в рабочих условиях:

$$\sigma_T^P = \frac{\beta_V \cdot M^P}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^P = \frac{2.8766 \cdot 6514}{(28^2 \cdot 146)} - 1.6207 \cdot 70.149 = 50.014 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_1$  (+):

$$\sigma_{\text{mm}}^{P+} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_1}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = \frac{(0.785 \cdot 146^2 \cdot 1.6 + 0 + 4 \cdot 0) / (146 + 20)}{(3.1416 \cdot (146 + 20) \cdot (20 - 3))} = 3.0199 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_1$  (п. 8.5.1):

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{mm}}^{P+} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{mm}}^{P+} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{\text{mm}}^{P+} \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{м}}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{mm}}^{P+} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{mm}}^{P+} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{\text{mm}}^{P+} \right| \right\} = \frac{\max \{ |92.903 - 3.0199 + 70.149|; |92.903 - 3.0199 + 50.014|; |92.903 + 3.0199| \}}{|92.903 + 3.0199|} = 160.03 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_{\text{м}} = 1.5 \cdot [\sigma]_{\text{ф}} = 1.5 \cdot 144 = 216 \text{ МПа}$$

$$K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{м}} = 1.2 \cdot 1.3 \cdot 216 = 336.96 \text{ МПа}$$

160.03 МПа ≤ 336.96 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_1$  (-):

$$\sigma_{\text{mm}}^{P-} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F - \frac{4 \cdot M}{D + s_1}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = \frac{(0.785 \cdot 146^2 \cdot 1.6 + 0 - 4 \cdot 0) / (146 + 20)}{(3.1416 \cdot (146 + 20) \cdot (20 - 3))} = 3.0199 \text{ МПа}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{mm}}^{P-} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{mm}}^{P-} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{\text{mm}}^{P-} \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{м}}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{mm}}^{P-} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{mm}}^{P-} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{\text{mm}}^{P-} \right| \right\} = \frac{\max \{ |92.903 - 3.0199 + 70.149|; |92.903 - 3.0199 + 50.014|; |92.903 + 3.0199| \}}{|92.903 + 3.0199|} = 160.03 \text{ МПа}$$

160.03 МПа ≤ 336.96 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_0^M = f \cdot \sigma_1^M = 1 \cdot 98.02 = 98.02 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении  $s_0$  (п. 8.5.2):

$$\sigma_0^M \leq 1.3 \cdot [\sigma]_{\text{R}}^{20}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_{\text{R}}^{20} = 3 \cdot [\sigma]_{\text{ф}}^{20} = 3 \cdot 164.5 = 493.5 \text{ МПа}$$

$$1.3 \cdot [\sigma]_{\text{R}}^{20} = 1.3 \cdot 493.5 = 641.55 \text{ МПа}$$

98.02 МПа ≤ 641.55 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_0^P = f \cdot \sigma_1^P = 1 \cdot 92.903 = 92.903 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_0$  (+):

$$\sigma_{\text{mm}}^{P+} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_0}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = \frac{(0.785 \cdot 146^2 \cdot 1.6 + 0 + 4 \cdot 0) / (146 + 7.5)}{(3.1416 \cdot (146 + 7.5) \cdot (7.5 - 3))} = 12.337 \text{ МПа}$$

Взам. инв. №		$\sigma_0 \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R$ Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1): $[\sigma]_R^{20} = 3 \cdot [\sigma]_{\Phi}^{20} = 3 \cdot 164.5 = 493.5 \text{ МПа}$ $1.3 \cdot [\sigma]_R^{20} = 1.3 \cdot 493.5 = 641.55 \text{ МПа}$ $98.02 \text{ МПа} \leq 641.55 \text{ МПа}$ , <b>Условие прочности выполнено.</b> Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении $s_0$ : $\sigma_0^P = f \cdot \sigma_1^P = 1 \cdot 92.903 = 92.903 \text{ МПа}$ Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении $S_0 (+)$ : $\sigma_{0mm}^{P+} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_0}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = (0.785 \cdot 146^2 \cdot 1.6 + 0 + 4 \cdot 0 / (146 + 7.5)) / (3.1416 \cdot (146 + 7.5) \cdot (7.5 - 3)) = 12.337 \text{ МПа}$				
Подп. и дата						
Инв. № подл.						
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	90651-20600-AM-02-220 РР	
					Лист	
					277	

Окружное мембранное напряжение от действия давления во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_{0mo}^P = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s_0 - c)} = \frac{1.6 \cdot 146}{2 \cdot (7.5 - 3)} = 25.956 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P+} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P+} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P+} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P+} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} = \frac{\max\{92.903 \pm 12.337; |0.3 \cdot 92.903 \pm 25.956|; |0.7 \cdot 92.903 \pm (12.337 - 25.956)|\}}{92.903 \pm (12.337 - 25.956)} = 105.24 \text{ МПа}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_R = 3 \cdot [\sigma]_\Phi = 3 \cdot 144 = 432 \text{ МПа}$$

$$1.3 \cdot [\sigma]_R = 1.3 \cdot 432 = 561.6 \text{ МПа}$$

105.24 МПа ≤ 561.6 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_0$  (—):

$$\sigma_{0mm}^{P-} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F - \frac{4 \cdot M}{D + s_0}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = \frac{(0.785 \cdot 146^2 \cdot 1.6 + 0 - 4 \cdot 0) / (146 + 7.5)}{(3.1416 \cdot (146 + 7.5) \cdot (7.5 - 3))} = 12.337 \text{ МПа}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P-} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P-} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P-} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P-} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} = \frac{\max\{92.903 \pm 12.337; |0.3 \cdot 92.903 \pm 25.956|; |0.7 \cdot 92.903 \pm (12.337 - 25.956)|\}}{92.903 \pm (12.337 - 25.956)} = 105.24 \text{ МПа}$$

105.24 МПа ≤ 561.6 МПа, **Условие прочности выполнено.**

**Расчет в сечении  $s_0$  в рабочих условиях (п. 8.5.5 ГОСТ 34233.4-2017):**

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0mo}^P \right|; \left| \sigma_{0mm}^P \right| \right\} \leq [\sigma]_\Phi$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0mo}^P \right|; \left| \sigma_{0mm}^P \right| \right\} = \max\{25.956; |12.337|\} = 25.956 \text{ МПа}$$

25.956 МПа ≤ 144 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Условие статической прочности при затяжке для тарелок:

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_T^M \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_\Phi^{20}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_T^M \right| \right\} = \max\{74.013; |52.769|\} = 74.013 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_\Phi^{20} = 1.3 \cdot 164.5 = 213.85 \text{ МПа}$$

74.013 МПа ≤ 213.85 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Условие статической прочности в рабочих условиях для тарелок:

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_T^P \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_\Phi$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_T^P \right| \right\} = \max\{70.149; |50.014|\} = 70.149 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_\Phi = 1.3 \cdot 144 = 187.2 \text{ МПа}$$

70.149 МПа ≤ 187.2 МПа, **Условие прочности выполнено.**

**Жёсткость фланца:**

Угол поворота фланца в рабочих условиях:

$$\Theta = M^P \cdot y_\Phi \cdot \frac{E^{20}}{E} = 6514 \cdot 0.98115 \cdot 10^{-5} \cdot 1.99 \cdot 10^5 / 1.91 \cdot 10^5 = 0.066589^\circ$$

Условие выполнения жесткости фланцев:

$$\Theta \leq K_\Theta \cdot [\Theta] = 1 \cdot 0.34377 = 0.34377^\circ$$

**Условие жёсткости выполнено.**

**Расчет давления испытаний**

Пробное давление при гидравлическом испытании, при работе элемента под внутренним давлением:

Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	90651-20600-AM-02-220 PP	Лист 278
Взам. инв. №	Подп. и дата	Изм. № подл.				

$$\max \{ \sigma_R; \sigma_T \} = \max \{ 70.149; 50.014 \} = 70.149 \text{ МПа}$$
$$K_T \cdot [\sigma]_{\Phi} = 1.3 \cdot 144 = 187.2 \text{ МПа}$$

70.149 МПа ≤ 187.2 МПа, **Условие прочности выполнено.**

**Жёсткость фланца:**

Угол поворота фланца в рабочих условиях:

$$\Theta = M^P \cdot y_{\Phi} \cdot \frac{E^{20}}{E} = 6514 \cdot 0.98115 \cdot 10^{-5} \cdot 1.99 \cdot 10^5 / 1.91 \cdot 10^5 = 0.066589^{\circ}$$

Условие выполнения жесткости фланцев :

$$\Theta \leq K_{\Theta} \cdot [\Theta] = 1 \cdot 0.34377 = 0.34377^{\circ}$$

**Условие жёсткости выполнено.**

**Расчет давления испытаний**

Пробное давление при гидравлическом испытании, при работе элемента под внутренним давлением:



Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата

Взам. инв. №	
--------------	--

Подп. и дата	
--------------	--

Изм. № подл.	
--------------	--

Этот документ является собственностью "НЕФТЕХИМПРОЕКТ" и не подлежит копированию и распространению без его согласия

НЕФТЕХИМПРОЕКТ NEFTECHIMPROEKT			МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ			РР	
$P_{гп} = 1.25 \cdot p \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]_t} = 1.25 \cdot 1.6 \cdot 164.5 / 144 = 2.2847 \text{ МПа}$ <p>Пробное давление при гидравлическом испытании, при работе элемента под внутренним давлением:</p> $P_{гп} = 1.25 \cdot p \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]_t} = 1.25 \cdot 1.6 \cdot 164.5 / 144 = 2.2847 \text{ МПа}$ <p><b>Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)</b></p> <p><b>Условия нагружения:</b></p> <p>Расчётное осевое сжимающее усилие, F: 0 Н</p> <p>Расчётный изгибающий момент, M: 0 Н·м</p> <p>Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 2.2216 МПа</p> <p><b>Расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ 34233.4-2017</b></p> <p>Расчётная температура элементов соединения:</p> <p>Температура фланца (кольца), t<sub>ф</sub>: 20 °С</p> <p>Температура фланца (кольца), t<sub>ф</sub>: 20 °С</p> <p>Температура болтов (шпилек), t<sub>б</sub>: 20 °С</p> <p><b>Свойства материала болтов (шпилек)</b></p> <p>Допускаемые напряжения для материала 35Х Крепеж при температуре 20 °С (условия гидроиспытаний):</p> <p><math>[\sigma]^{20_б} = 230 \text{ МПа}</math></p> <p>Модуль продольной упругости для материала 35Х Крепеж при температуре T = 20 °С:</p> <p><math>E^{20_б} = 2.18 \cdot 10^5 \text{ МПа}</math></p> <p>Коэффициент линейного расширения для материала 35Х Крепеж при температуре T = 20 °С:</p> <p><math>\alpha^{20_б} = 0.134 \cdot 10^{-4} / ^\circ\text{C}</math></p> <p><b>Свойства материала фланца (кольца) 1</b></p> <p>Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре 20 °С (условия гидроиспытаний):</p> <p><math>[\sigma]^{20_{ф1}} = \frac{R_e / 20}{n_T} = 245 / 1.1 = 222.73 \text{ МПа}</math></p> <p>Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре T = 20 °С:</p> <p><math>E^{20_1} = 1.99 \cdot 10^5 \text{ МПа}</math></p> <p>Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре T = 20 °С:</p> <p><math>\alpha^{20_1} = 0.116 \cdot 10^{-4} / ^\circ\text{C}</math></p> <p><b>Свойства материала фланца (кольца) 2</b></p> <p>Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре 20 °С (условия гидроиспытаний):</p> <p><math>[\sigma]^{20_{ф2}} = \frac{R_e / 20}{n_T} = 245 / 1.1 = 222.73 \text{ МПа}</math></p> <p>Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре T = 20 °С:</p> <p><math>E^{20_2} = 1.99 \cdot 10^5 \text{ МПа}</math></p> <p>Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре T = 20 °С:</p> <p><math>\alpha^{20_2} = 0.116 \cdot 10^{-4} / ^\circ\text{C}</math></p> <p>Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре T = 20 °С:</p> <p><math>\alpha^{20_p} = 0.116 \cdot 10^{-4} / ^\circ\text{C}</math></p> <p><b>Расчётные параметры первого фланца:</b></p>							
90651-20600-AM-02-220 РР						Лист	
						279	
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата			

$$\beta = \frac{s_1}{s_0} = 20/7.5 = 2.6667$$

$$x = \frac{1}{\sqrt{D \cdot s_0}} = 31/(146 \cdot 7.5)^{1/2} = 0.93682$$

$$\kappa = 1 + (\beta - 1) \cdot \frac{x}{x + \frac{1 + \beta}{4}} = 1 + (2.6667 - 1) \cdot 0.93682 / (0.93682 + (1 + 2.6667) / 4) = 1.8424$$

Эквивалентная толщина втулки для фланца, приварного встык:

$$s_3 = \kappa \cdot s_0 = 1.8424 \cdot 7.5 = 13.818 \text{ мм}$$

$$l_0 = \sqrt{D \cdot s_0} = (146 \cdot 7.5)^{1/2} = 33.091 \text{ мм}$$

$$\beta_F = 0.71228$$

$$\beta_T = \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg K) - 1}{(1.05 + 1.945 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} = (2.0548^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg 2.0548) - 1) / ((1.05 + 1.945 \cdot 2.0548^2) \cdot (2.0548 - 1)) = 1.4855$$

$$\beta_V = 0.10187$$

$$\beta_U = \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg K) - 1}{1.36 \cdot (K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = (2.0548^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg 2.0548) - 1) / (1.36 \cdot (2.0548^2 - 1) \cdot (2.0548 - 1)) = 3.1398$$

$$\lambda = \frac{\beta_F \cdot h + l_0}{\beta_T \cdot l_0} + \frac{\beta_V \cdot h^3}{\beta_U \cdot l_0 \cdot s_0^2} = (0.71228 \cdot 25 + 33.091) / (1.4855 \cdot 33.091) + 0.10187 \cdot 25^3 / (3.1398 \cdot 33.091 \cdot 7.5^2) = 1.3078$$

Угловая податливость фланца при затяжке:

$$y_{\Phi} = \frac{0.91 \cdot \beta_V}{E^{20} \cdot \lambda \cdot s_0^2 \cdot l_0} = 0.91 \cdot 0.10187 / (1.99 \cdot 10^6 \cdot 1.3078 \cdot 7.5^2 \cdot 33.091) = 0.10965 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ/\text{Н} \cdot \text{м}$$

Угловая податливость фланца, нагруженного внешним изгибающим моментом:

$$y_{\Phi M} = \left( \frac{\pi}{4} \right)^3 \cdot \frac{D_6}{E^{20} \cdot D_K \cdot h^3} = (3.1416 / 4)^3 \cdot 250 / (1.99 \cdot 10^6 \cdot 300 \cdot 25^3) = 0.74394 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ/\text{Н} \cdot \text{м}$$

Плечи моментов:

$$a = 0$$

$$b = 0.5 \cdot (D_6 - D_{\text{сп}}) = 0.5 \cdot (250 - 193) = 28.5 \text{ мм}$$

$$e = 0.5 \cdot (D_{\text{сп}} - D - s_3) = 0.5 \cdot (193 - 146 - 13.818) = 16.591 \text{ мм}$$

**Расчётные параметры второго фланца:**

$$\beta = \frac{s_1}{s_0} = 20/7.5 = 2.6667$$

$$x = \frac{1}{\sqrt{D \cdot s_0}} = 31/(146 \cdot 7.5)^{1/2} = 0.93682$$

$$\kappa = 1 + (\beta - 1) \cdot \frac{x}{x + \frac{1 + \beta}{4}} = 1 + (2.6667 - 1) \cdot 0.93682 / (0.93682 + (1 + 2.6667) / 4) = 1.8424$$

Эквивалентная толщина втулки для фланца, приварного встык:

$$s_3 = \kappa \cdot s_0 = 1.8424 \cdot 7.5 = 13.818 \text{ мм}$$

$$l_0 = \sqrt{D \cdot s_0} = (146 \cdot 7.5)^{1/2} = 33.091 \text{ мм}$$

$$\beta_F = 0.71228$$

$$\beta_T = \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg K) - 1}{(1.05 + 1.945 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} = (2.0548^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg 2.0548) - 1) / ((1.05 + 1.945 \cdot 2.0548^2) \cdot (2.0548 - 1)) = 1.4855$$

$$\beta_V = 0.10187$$

Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	90651-20600-AM-02-220 РР	Лист 280
Взам. инв. №	Подп. и дата	Инв. № подл.				

$\kappa = 1 + (\beta - 1) \cdot \frac{x}{x + \frac{1 + \beta}{4}} = 1 + (2.6667 - 1) \cdot 0.93682 / (0.93682 + (1 + 2.6667) / 4) = 1.8424$
Эквивалентная толщина втулки для фланца, приварного встык:
$s_3 = \kappa \cdot s_0 = 1.8424 \cdot 7.5 = 13.818 \text{ мм}$
$l_0 = \sqrt{D \cdot s_0} = (146 \cdot 7.5)^{1/2} = 33.091 \text{ мм}$
$\beta_F = 0.71228$
$\beta_T = \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg K) - 1}{(1.05 + 1.945 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} = (2.0548^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg 2.0548) - 1) / ((1.05 + 1.945 \cdot 2.0548^2) \cdot (2.0548 - 1)) = 1.4855$
$\beta_V = 0.10187$

$$\beta_U = \frac{K^2(1+8.55 \cdot \lg K) - 1}{1.36 \cdot (K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = (2.0548^2 \cdot (1+8.55 \cdot \lg 2.0548) - 1) / (1.36 \cdot (2.0548^2 - 1) \cdot (2.0548 - 1)) = 3.1398$$

$$\lambda = \frac{\beta_F \cdot h + 1_0}{\beta_T \cdot 1_0} + \frac{\beta_V \cdot h^3}{\beta_U \cdot 1_0 \cdot s_0^2} = (0.71228 \cdot 28 + 33.091) / (1.4855 \cdot 33.091) + 0.10187 \cdot 28^3 / (3.1398 \cdot 33.091 \cdot 7.5^2) = 1.4615$$

Угловая податливость фланца при затяжке:

$$y_\Phi = \frac{0.91 \cdot \beta_V}{E^{20} \cdot \lambda \cdot s_0^2 \cdot 1_0} = 0.91 \cdot 0.10187 / (1.99 \cdot 10^5 \cdot 1.4615 \cdot 7.5^2 \cdot 33.091) = 0.98115 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ/\text{Н}\cdot\text{м}$$

Угловая податливость фланца, нагруженного внешним изгибающим моментом:

$$y_{\Phi M} = \left(\frac{\pi}{4}\right)^3 \cdot \frac{D_6}{E^{20} \cdot D_H \cdot h^3} = (3.1416 / 4)^3 \cdot 250 / (1.99 \cdot 10^5 \cdot 300 \cdot 28^3) = 0.52952 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ/\text{Н}\cdot\text{м}$$

Плечи моментов:

$$a = 0$$

$$b = 0.5 \cdot (D_6 - D_{\text{сп}}) = 0.5 \cdot (250 - 193) = 28.5 \text{ мм}$$

$$e = 0.5 \cdot (D_{\text{сп}} - D - s_3) = 0.5 \cdot (193 - 146 - 13.818) = 16.591 \text{ мм}$$

### Характеристики прокладки:

Тип и материал прокладки	Коэффициент m	Удельное давление обжатия $q_{\text{обж}}$ , 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 :

$$b_0 = 10 \text{ мм}$$

$$\text{Примечание: } \begin{cases} b_0 = b_{\text{тп}} & \text{при } b_{\text{тп}} \leq 15.0 \text{ мм} \\ b_0 = 3.8 \cdot \sqrt{b_{\text{тп}}} & \text{при } b_{\text{тп}} > 15.0 \text{ мм} \end{cases}$$

Рабочий наружный диаметр прокладки :

$$D_{\text{тпф}} = \min\{D_4; D_{\text{нп}}\} = \min\{203; 203\} = 203 \text{ мм}$$

Средний эффективный диаметр прокладки:

$$D_{\text{ст}} = D_{\text{тпф}} - b_0 = 203 - 10 = 193 \text{ мм}$$

Для металлических и асбометаллических прокладок  $y_n = 0$ .

### Расчёт нагрузок:

Равнодействующая давления :

$$Q_d = 0.785 \cdot D_{\text{ст}}^2 \cdot p = 0.785 \cdot 193^2 \cdot 2.2216 = 64961 \text{ Н}$$

Усилие на прокладке в рабочих условиях, необходимое для обеспечения герметичности:

$$R_n = \pi \cdot D_{\text{ст}} \cdot b_0 \cdot m \cdot [p] = 3.1416 \cdot 193 \cdot 10 \cdot 3 \cdot [2.2216] = 40411 \text{ Н}$$

Усилие, необходимое для смятия прокладки при затяжке :

$$P_{\text{обж}} = 0.5 \cdot \pi \cdot D_{\text{ст}} \cdot b_0 \cdot q_{\text{обж}} = 0.5 \cdot 3.1416 \cdot 193 \cdot 10 \cdot 69 = 2.0918 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

**Расчетная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для герметизации в условиях испытаний (нагрузки + давление)**

Рабочая длина болта (шпильки):

$$L_{60} = h' + h'' + 2 \cdot h_{\text{ш}} + s_{\text{гн}} + h'_{\text{ш}} + h''_{\text{ш}} = 25 + 28 + 2 \cdot 3.2 + 20 + 0 + 0 = 79.4 \text{ мм}$$

Эффективная длина шпильки :

$$L_6 = L_{60} + 0.56 \cdot d = 79.4 + 0.56 \cdot 24 = 92.84 \text{ мм}$$

Взам. инв. №		Подп. и дата		Инв. № подл.		90651-20600-AM-02-220 РР	Лист
							281
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата			

Взам. инв. №	
Подп. и дата	
Инв. № подл.	

Площадь сечения шпильки (по внутреннему диаметру резьбы):

$$f_6 = 324 \text{ мм}^2$$

Податливость шпилек :

$$y_6 = \frac{L_6}{E_6 \cdot f_6 \cdot n} = 92.84 / (2.18 \cdot 10^5 \cdot 324 \cdot 8) = 0.1643 \cdot 10^{-6} \text{ мм/Н}$$

$$\eta = y_{\pi} + y_6 + y'_{\Phi} \cdot b'^2 + y''_{\Phi} \cdot b''^2 = 0 + 0.1643 \cdot 10^{-6} + 0.10965 \cdot 10^{-4} \cdot 28.5^2 + 0.98115 \cdot 10^{-5} \cdot 28.5^2 = 0.45884 \cdot 10^{-6} \text{ мм/Н}$$

Коэффициенты жёсткости для фланцевого соединения, нагруженного внутренним давлением и внешней осевой силой:

$$\alpha = 1 - \frac{y_{\pi} - (y'_{\Phi} \cdot e' \cdot b' + y''_{\Phi} \cdot e'' \cdot b'')}{\eta}$$

$$= 1 - (0 - (0.10965 \cdot 10^{-4} \cdot 16.591 \cdot 28.5 + 0.98115 \cdot 10^{-5} \cdot 16.591 \cdot 28.5)) / 0.45884 \cdot 10^{-6}$$

$$= 1.3737$$

Коэффициенты жёсткости для фланцевого соединения, нагруженного внешним изгибающим моментом:

$$\alpha_M = \frac{y_6 + y'_{\Phi M} \cdot b' \cdot \left( b' + e' - \frac{e'^2}{D_{\text{ф}}} \right) + y''_{\Phi M} \cdot b'' \cdot \left( b'' + e'' - \frac{e''^2}{D_{\text{ф}}} \right)}{y_6 + y_{\pi} \cdot \left( \frac{D_6}{D_{\text{ф}}} \right)^2 + y'_{\Phi M} \cdot b'^2 + y''_{\Phi M} \cdot b''^2}$$

$$= [0.1643 \cdot 10^{-6} + 0.74394 \cdot 10^{-5} \cdot 28.5 \cdot (28.5 + 16.591 - 16.591^2 / 193) + 0.52952 \cdot 10^{-5} \cdot 28.5 \cdot (28.5 + 16.591 - 16.591^2 / 193)] / [0.1643 \cdot 10^{-6} + 0 \cdot (250 / 193)^2 + 0.74394 \cdot 10^{-5} \cdot 28.5^2 + 0.74394 \cdot 10^{-5} \cdot 28.5^2]$$

$$= 1.2786$$

$$P_{61} = \alpha \cdot (Q_{\text{д}} + F) + R_{\pi} + \frac{4 \cdot \alpha_M \cdot |M|}{D_{\text{ф}}} = 1.3737 \cdot (64961 + 0) + 40411 + 4 \cdot 1.2786 \cdot |0| / 193 = 1.2965 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

**Расчетная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для герметизации в условиях испытаний (только давление)**

$$P_{61} = \alpha \cdot (Q_{\text{д}} + F) + R_{\pi} + \frac{4 \cdot \alpha_M \cdot |M|}{D_{\text{ф}}} = 1.3737 \cdot (64961 + 0) + 40411 + 4 \cdot 1.2786 \cdot |0| / 193 = 1.2965 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Суммарная площадь сечения болтов (шпилек) по внутреннему диаметру резьбы или сечению наименьшего диаметра:

$$A_6 = n \cdot f_6 = 8 \cdot 324 = 2592 \text{ мм}^2$$

Расчётная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для обжатия прокладки и минимального начального натяжения болтов:

$$P_{62} = \max \{ P_{\text{обж}}, 0.4 \cdot A_6 \cdot [\sigma]_6^{20} \} = \max \{ 2.0918 \cdot 10^5; 0.4 \cdot 2592 \cdot 230 = 2.3846 \cdot 10^5 \} = 2.3846 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

**Расчёт без учета стесненности температурных деформаций**

**Расчёт болтов(шпилек):**

Коэффициент увеличения допускаемых напряжений при затяжке:  $\xi = 1.2$

Коэффициент условий работы:  $K_{\text{уп}} = 1.35$

Коэффициент условий затяжки:  $K_{\text{уз}} = 1$

Коэффициент учета нагрузки от температурных деформаций:  $K_{\text{ут}} = 1$

Допускаемые напряжения для болтов (шпилек) при затяжке :

$$[\sigma]_6^{\text{м}} = \xi \cdot K_{\text{уп}} \cdot K_{\text{уз}} \cdot K_{\text{ут}} \cdot [\sigma]_6^{20} = 1.2 \cdot 1.35 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 230 = 372.6 \text{ МПа}$$

Болтовая нагрузка в условиях затяжки :

$$P_6^{\text{м}} = \max \{ P_{61}, P_{62} \} = \max \{ 1.2965 \cdot 10^5; 2.3846 \cdot 10^5 \} = 2.3846 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Условие прочности при затяжке:

$$\sigma_{61} = \frac{P_6^{\text{м}}}{A_6} \leq [\sigma]_6^{\text{м}}$$

$$\sigma_{61} = \frac{P_6^{\text{м}}}{A_6} = 2.3846 \cdot 10^5 / 2592 = 92 \text{ МПа}$$

90651-20600-AM-02-220 РР

Лист

282

НЕФТЕХИМПРОЕКТ NEFTECHIMPROEKT		МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ		РР	
Крутящий момент при затяжке болтов (шпилек) без смазки при $\sigma_{61} < 120$ МПа: $M_{кр} = 0.3 \cdot \frac{P_6^M \cdot d}{n} = 0.3 \cdot 2.3846 \cdot 10^5 \cdot 24 / 8 = 214.62 \text{ Н} \cdot \text{м}$ <p>При наличии смазки величина <math>M_{кр}</math> снижается на 25% и составляет <math>0.75 \cdot M_{кр} = 160.96 \text{ Н} \cdot \text{м}</math></p> <p><math>92 \text{ МПа} \leq 372.6 \text{ МПа}</math>, <b>Условие прочности выполнено.</b></p> <p>Допускаемые напряжения для болтов (шпилек) при рабочих условиях: <math display="block">[\sigma]_6^P = K_{ур} \cdot K_{уз} \cdot K_{ут} \cdot [\sigma]_6 = 1.35 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 230 = 310.5 \text{ МПа}</math></p> <p>Болтовая нагрузка в рабочих условиях : <math display="block">P_6^P = P_6^M + (1 - \alpha) \cdot (Q_d + F) + \frac{4 \cdot (1 - \alpha_m) \cdot  M }{D_{от}} = 2.3846 \cdot 10^5 + (1 - 1.3737) \cdot (64961 + 0) + 4 \cdot (1 - 1.2786) \cdot  0  / 193 = 2.1419 \cdot 10^5 \text{ Н}</math></p> <p>Условие прочности в рабочих условиях: <math display="block">\sigma_{62} = \frac{P_6^P}{A_6} \leq [\sigma]_6^P</math> <math display="block">\sigma_{62} = \frac{P_6^P}{A_6} = 2.1419 \cdot 10^5 / 2592 = 82.635 \text{ МПа}</math></p> <p><math>82.635 \text{ МПа} \leq 310.5 \text{ МПа}</math>, <b>Условие прочности выполнено.</b></p> <p><b>Расчёт первого фланца:</b></p> <p>Коэффициент, учитывающий изгиб тарелки фланца между шпильками: <math display="block">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; (3.1416 \cdot 250 / 8 / (2 \cdot 24 + 6 \cdot 25 / (3 + 0.5)))^{1/2}\} = 1.0395</math></p> <p>Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при затяжке : <math display="block">M^M = C_F \cdot P_6^M \cdot b = 1.0395 \cdot 2.3846 \cdot 10^5 \cdot 28.5 = 7064.6 \text{ Н} \cdot \text{м}</math> <math display="block">f = \max \left\{ \frac{C_{36}}{1 + A}; 1.0 \right\} = \max \{1.6922 / (1 + 1.6667); 1.0\} = 1</math> <math display="block">D^* = D + c + s_1 \text{ при } (D + 2 \cdot c) &lt; 20 \cdot (s_1 - c) \text{ и } f = 1 = 146 + 0 + 20 \text{ при } 146 &lt; 20 \cdot (20 - 0) \text{ и } f = 1 = 166 \text{ мм}</math></p> <p>Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении <math>s_1</math>: <math display="block">\sigma_1^M = \frac{M^M}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D^*} = 7064.6 / (1.3078 \cdot (20 - 3)^2 \cdot 166) = 112.6 \text{ МПа}</math></p> <p>Радиальное напряжение в тарелке в условиях затяжки : <math display="block">\sigma_R^M = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + 1.0}{\lambda \cdot h^2 \cdot 1.0 \cdot D} \cdot M^M = (1.33 \cdot 0.71228 \cdot 25 + 33.091) / (1.3078 \cdot 25^2 \cdot 33.091 \cdot 146) \cdot 7064.6 = 101.57 \text{ МПа}</math> <math display="block">\beta_Y = \frac{1}{K - 1} \cdot \left( 0.69 + 5.72 \cdot \frac{K^2 \cdot \lg K}{K^2 - 1} \right) = 1 / (2.0548 - 1) \cdot (0.69 + 5.72 \cdot 2.0548^2 \cdot \lg 2.0548 / (2.0548^2 - 1)) = 2.8766</math> <math display="block">\beta_Z = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = (2.0548^2 + 1) / (2.0548^2 - 1) = 1.6207</math></p> <p>Окружное напряжение в тарелке в условиях затяжки : <math display="block">\sigma_T^M = \frac{\beta_Y \cdot M^M}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^M = 2.8766 \cdot 7064.6 / (25^2 \cdot 146) - 1.6207 \cdot 101.57 = 58.097 \text{ МПа}</math></p> <p>Условие статической прочности при затяжке в сечении <math>s_1</math> (п. 8.5.1): <math display="block">\max \{  \sigma_1^M + \sigma_R^M ;  \sigma_1^M + \sigma_T^M  \} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_M^{20}</math> <math display="block">\max \{  \sigma_1^M + \sigma_R^M ;  \sigma_1^M + \sigma_T^M  \} = \max \{  112.6 + 101.57 ;  112.6 + 58.097  \} = 214.17 \text{ МПа}</math></p>					
Взам. инв. №	Подп. и дата	Инв. № подл.	90651-20600-AM-02-220 РР		Лист
					283
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	

90651-20600-AM-02-220 РР.izm.0.docx

Формат А4

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_{\text{м}}^{20} = 1.5 \cdot [\sigma]_{\text{ф}}^{20} = 1.5 \cdot 222.73 = 334.09 \text{ МПа}$$

$$K = \frac{D_{\text{ж}}}{D} = 300 / 146 = 2.0548$$

Коэффициент учета размеров тарелки фланца:  $K_S = 1.2$

$$K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{м}}^{20} = 1.2 \cdot 1 \cdot 334.09 = 400.91 \text{ МПа}$$

214.17 МПа ≤ 400.91 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Болтовая нагрузка в рабочих условиях:

$$P_6^P = P_6^M + (1 - \alpha) \cdot (Q_{\text{д}} + F) + \frac{4 \cdot (1 - \alpha_{\text{м}}) \cdot |M|}{D_{\text{ст}}} = 2.3846 \cdot 10^5 + (1 - 1.3737) \cdot (64961 + 0) + 4 \cdot (1 - 1.2786) \cdot |0| / 193 = 2.1419 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Приведенная нагрузка от внешней силы и момента:

$$Q_{\text{FM}}^+ = F + \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{ст}}} = 0 + 4 \cdot |0| / 193 = 0 \text{ Н}$$

$$Q_{\text{FM}}^- = F - \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{ст}}} = 0 - 4 \cdot |0| / 193 = 0 \text{ Н}$$

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при рабочих условиях:

$$M^P = C_F \cdot \max \{ P_6^P \cdot b + (Q_{\text{д}} + Q_{\text{FM}}^-) \cdot e; |Q_{\text{д}} + Q_{\text{FM}}^+| \cdot e \} = \frac{1.0395 \cdot \max \{ 2.1419 \cdot 10^5 \cdot 28.5 + (64961 + 0) \cdot 16.591; |64961 + 0| \cdot 16.591 \}}{16.591} = 7465.8 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_1$ :

$$\sigma_1^P = \frac{M^P}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D} = 7465.8 / (1.3078 \cdot (20 - 3)^2 \cdot 166) = 119 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в рабочих условиях:

$$\sigma_R^P = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + 1.0}{\lambda \cdot h^2 \cdot 1.0 \cdot D} \cdot M^P = (1.33 \cdot 0.71228 \cdot 25 + 33.091) / (1.3078 \cdot 25^2 \cdot 33.091 \cdot 146) \cdot 7465.8 = 107.34 \text{ МПа}$$

Окружное напряжение в тарелке в рабочих условиях:

$$\sigma_T^P = \frac{\beta_Y \cdot M^P}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^P = 2.8766 \cdot 7465.8 / (25^2 \cdot 146) - 1.6207 \cdot 107.34 = 61.396 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_1$  (+):

$$\sigma_{\text{лмм}}^{P+} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_1}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = (0.785 \cdot 146^2 \cdot 2.2216 + 0 + 4 \cdot 0 / (146 + 20)) / (3.1416 \cdot (146 + 20) \cdot (20 - 3)) = 4.1931 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_1$  (п. 8.5.1):

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^{P+} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^{P+} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{\text{лмм}}^{P+} \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{м}}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^{P+} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^{P+} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{\text{лмм}}^{P+} \right| \right\} = \max \{ |119 - 4.1931 + 107.34|; |119 - 4.1931 + 61.396|; |119 + 4.1931| \} = 222.14 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_{\text{м}} = 1.5 \cdot [\sigma]_{\text{ф}} = 1.5 \cdot 222.73 = 334.09 \text{ МПа}$$

$$K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{м}} = 1.2 \cdot 1 \cdot 334.09 = 400.91 \text{ МПа}$$

222.14 МПа ≤ 400.91 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_1$  (-):

$$\sigma_{\text{лмм}}^{P-} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F - \frac{4 \cdot M}{D + s_1}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = (0.785 \cdot 146^2 \cdot 2.2216 + 0 - 4 \cdot 0 / (146 + 20)) / (3.1416 \cdot (146 + 20) \cdot (20 - 3)) = 4.1931 \text{ МПа}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^{P-} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^{P-} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{\text{лмм}}^{P-} \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{м}}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^{P-} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^{P-} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{\text{лмм}}^{P-} \right| \right\} = \max \{ |119 - 4.1931 + 107.34|; |119 - 4.1931 + 61.396|; |119 + 4.1931| \} = 222.14 \text{ МПа}$$

222.14 МПа ≤ 400.91 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении  $s_0$ :

Взам. инв. №					
Подп. и дата					
Инв. № подл.					
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	90651-20600-AM-02-220 РР
					Лист
					284

$$\sigma_0^M = f \cdot \sigma_1^M = 1 \cdot 112.6 = 112.6 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении  $s_0$  (п. 8.5.2):

$$\sigma_0^M \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R^{20}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_R^{20} = 3 \cdot [\sigma]_\Phi^{20} = 3 \cdot 222.73 = 668.18 \text{ МПа}$$

$$1.3 \cdot [\sigma]_R^{20} = 1.3 \cdot 668.18 = 868.64 \text{ МПа}$$

112.6 МПа ≤ 868.64 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_0^P = f \cdot \sigma_1^P = 1 \cdot 119 = 119 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_0$  (+):

$$\sigma_{0mm}^{P+} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_0}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = (0.785 \cdot 146^2 \cdot 2.2216 + 0 + 4 \cdot 0 / (146 + 7.5)) / (3.1416 \cdot (146 + 7.5) \cdot (7.5 - 3)) = 17.131 \text{ МПа}$$

Окружное мембранное напряжение от действия давления во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_{0mo}^P = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s_0 - c)} = 2.2216 \cdot 146 / (2 \cdot (7.5 - 3)) = 36.04 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P+} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P+} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P+} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P+} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} = \max \{ |119 \pm 17.131|; |0.3 \cdot 119 \pm 36.04|; |0.7 \cdot 119 \pm (17.131 - 36.04)| \} = 136.13 \text{ МПа}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_R = 3 \cdot [\sigma]_\Phi = 3 \cdot 222.73 = 668.18 \text{ МПа}$$

$$1.3 \cdot [\sigma]_R = 1.3 \cdot 668.18 = 868.64 \text{ МПа}$$

136.13 МПа ≤ 868.64 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_0$  (-):

$$\sigma_{0mm}^{P-} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F - \frac{4 \cdot M}{D + s_0}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = (0.785 \cdot 146^2 \cdot 2.2216 + 0 - 4 \cdot 0 / (146 + 7.5)) / (3.1416 \cdot (146 + 7.5) \cdot (7.5 - 3)) = 17.131 \text{ МПа}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P-} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P-} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P-} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P-} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} = \max \{ |119 \pm 17.131|; |0.3 \cdot 119 \pm 36.04|; |0.7 \cdot 119 \pm (17.131 - 36.04)| \} = 136.13 \text{ МПа}$$

136.13 МПа ≤ 868.64 МПа, **Условие прочности выполнено.**

**Расчет в сечении  $s_0$  в рабочих условиях (п. 8.5.5 ГОСТ 34233.4-2017):**

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0mo}^P \right|; \left| \sigma_{0mm}^P \right| \right\} \leq [\sigma]_\Phi$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0mo}^P \right|; \left| \sigma_{0mm}^P \right| \right\} = \max \{ |36.04|; |17.131| \} = 36.04 \text{ МПа}$$

36.04 МПа ≤ 222.73 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Условие статической прочности при затяжке для тарелок:

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_T^M \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_\Phi^{20}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_T^M \right| \right\} = \max \{ |101.57|; |58.097| \} = 101.57 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_\Phi^{20} = 1 \cdot 222.73 = 222.73 \text{ МПа}$$

101.57 МПа ≤ 222.73 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Условие статической прочности в рабочих условиях для тарелок:

Взам. инв. №					
Подп. и дата					
Инв. № подл.					
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	

90651-20600-AM-02-220 РР

Лист

285

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_T^P \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_{\Phi}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_T^P \right| \right\} = \max\{107.34; 61.396\} = 107.34 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_{\Phi} = 1 \cdot 222.73 = 222.73 \text{ МПа}$$

107.34 МПа ≤ 222.73 МПа, **Условие прочности выполнено.**

### Жёсткость фланца:

Угол поворота фланца в рабочих условиях:

$$\Theta = M^P \cdot y_{\Phi} \cdot \frac{E^{20}}{E} = 7465.8 \cdot 0.10965 \cdot 10^{-4} \cdot 1.99 \cdot 10^5 / 1.99 \cdot 10^5 = 0.081863^\circ$$

Допускаемый угол поворота фланца:

$$[\Theta] = 0.34377^\circ$$

Коэффициент увеличения допускаемого угла поворота фланцев:  $K_{\Theta} = 1.3$

Условие выполнения жесткости фланцев :

$$\Theta \leq K_{\Theta} \cdot [\Theta] = 1.3 \cdot 0.34377 = 0.44691^\circ$$

**Условие жёсткости выполнено.**

### Расчёт второго фланца:

Коэффициент, учитывающий изгиб тарелки фланца между шпильками:

$$C_F = \max \left\{ 1; \sqrt{\frac{\frac{\pi \cdot D_6}{n}}{2 \cdot d + \frac{6 \cdot h}{m + 0.5}}} \right\} = \max\{1; (3.1416 \cdot 250 / 8 / (2 \cdot 24 + 6 \cdot 28 / (3 + 0.5)))^{1/2}\} = 1.0113$$

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при затяжке :

$$M^M = C_F \cdot P_6^M \cdot b = 1.0113 \cdot 2.3846 \cdot 10^5 \cdot 28.5 = 6872.8 \text{ Н·м}$$

$$f = \max \left\{ \frac{C_{36}}{1 + A}; 1.0 \right\} = \max\{1.6922 / (1 + 1.6667); 1.0\} = 1$$

$$D^* = D + c + s_{1 \text{ при } (D + 2 \cdot c) < 20 \cdot (s_1 - c) \text{ и } f = 1} = 146 + 0 + 20 \text{ при } 146 < 20 \cdot (20 - 0) \text{ и } f = 1 = 166 \text{ мм}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении  $s_1$ :

$$\sigma_1^M = \frac{M^M}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D^*} = 6872.8 / (1.4615 \cdot (20 - 3)^2 \cdot 166) = 98.02 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в условиях затяжки :

$$\sigma_R^M = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + 1_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot 1_0 \cdot D} \cdot M^M = (1.33 \cdot 0.71228 \cdot 28 + 33.091) / (1.4615 \cdot 28^2 \cdot 33.091 \cdot 146) \cdot 6872.8 = 74.013 \text{ МПа}$$

$$\beta_Y = \frac{1}{K - 1} \cdot \left( 0.69 + 5.72 \cdot \frac{K^2 \cdot \lg K}{K^2 - 1} \right) = 1 / (2.0548 - 1) \cdot (0.69 + 5.72 \cdot 2.0548^2 \cdot \lg 2.0548 / (2.0548^2 - 1)) = 2.8766$$

$$\beta_Z = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = (2.0548^2 + 1) / (2.0548^2 - 1) = 1.6207$$

Окружное напряжение в тарелке в условиях затяжки :

$$\sigma_T^M = \frac{\beta_Y \cdot M^M}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^M = 2.8766 \cdot 6872.8 / (28^2 \cdot 146) - 1.6207 \cdot 74.013 = 52.769 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении  $s_1$  (п. 8.5.1):

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^M + \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_1^M + \sigma_T^M \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{мк}}^{20}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^M + \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_1^M + \sigma_T^M \right| \right\} = \max\{98.02 + 74.013; 98.02 + 52.769\} = 172.03 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_{\text{мк}}^{20} = 1.5 \cdot [\sigma]_{\Phi}^{20} = 1.5 \cdot 222.73 = 334.09 \text{ МПа}$$

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	90651-20600-AM-02-220 PP					Лист
								286
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата				



$$K = \frac{D_H}{D} = 300 / 146 = 2.0548$$

Коэффициент учета размеров тарелки фланца:  $K_S = 1.2$

$$K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_M^{20} = 1.2 \cdot 1 \cdot 334.09 = 400.91 \text{ МПа}$$

172.03 МПа ≤ 400.91 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Приведенная нагрузка от внешней силы и момента :

$$Q_{FM}^+ = F + \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{фл}}} = 0 + 4 \cdot |0| / 193 = 0 \text{ Н}$$

$$Q_{FM}^- = F - \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{фл}}} = 0 - 4 \cdot |0| / 193 = 0 \text{ Н}$$

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при рабочих условиях:

$$M^P = C_F \cdot \max \{ p_E^P \cdot b + (Q_{\text{д}} + Q_{FM}) \cdot e; |Q_{\text{д}} + Q_{FM}| \cdot e \} = \frac{1.0113 \cdot \max \{ 2.1419 \cdot 10^5 \cdot 28.5 + (64961 + 0) \cdot 16.591; |64961 + 0| \cdot 16.591 \}}{16.591} = 7263.1 \text{ Н·м}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_1$ :

$$\sigma_1^P = \frac{M^P}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D} = 7263.1 / (1.4615 \cdot (20 - 3)^2 \cdot 166) = 103.59 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в рабочих условиях :

$$\sigma_R^P = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + l_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot l_0 \cdot D} \cdot M^P = (1.33 \cdot 0.71228 \cdot 28 + 33.091) / (1.4615 \cdot 28^2 \cdot 33.091 \cdot 146) \cdot 7263.1 = 78.216 \text{ МПа}$$

Окружное напряжение в тарелке в рабочих условиях :

$$\sigma_T^P = \frac{\beta_Y \cdot M^P}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^P = 2.8766 \cdot 7263.1 / (28^2 \cdot 146) - 1.6207 \cdot 78.216 = 55.766 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_1$  (+):

$$\sigma_{\text{лмм}}^{P+} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_1}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = (0.785 \cdot 146^2 \cdot 2.2216 + 0 + 4 \cdot 0 / (146 + 20)) / (3.1416 \cdot (146 + 20) \cdot (20 - 3)) = 4.1931 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_1$  (п. 8.5.1):

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^{P+} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^{P+} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{\text{лмм}}^{P+} \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_M$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^{P+} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^{P+} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{\text{лмм}}^{P+} \right| \right\} = \frac{\max \{ |103.59 - 4.1931 + 78.216|; |103.59 - 4.1931 + 55.766|; |103.59 + 4.1931| \}}{|103.59 + 4.1931|} = 177.61 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_M = 1.5 \cdot [\sigma]_{\text{ф}} = 1.5 \cdot 222.73 = 334.09 \text{ МПа}$$

$$K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_M = 1.2 \cdot 1 \cdot 334.09 = 400.91 \text{ МПа}$$

177.61 МПа ≤ 400.91 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_1$  (-):

$$\sigma_{\text{лмм}}^{P-} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F - \frac{4 \cdot M}{D + s_1}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = (0.785 \cdot 146^2 \cdot 2.2216 + 0 - 4 \cdot 0 / (146 + 20)) / (3.1416 \cdot (146 + 20) \cdot (20 - 3)) = 4.1931 \text{ МПа}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^{P-} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^{P-} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{\text{лмм}}^{P-} \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_M$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^{P-} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^{P-} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{\text{лмм}}^{P-} \right| \right\} = \frac{\max \{ |103.59 - 4.1931 + 78.216|; |103.59 - 4.1931 + 55.766|; |103.59 + 4.1931| \}}{|103.59 + 4.1931|} = 177.61 \text{ МПа}$$

177.61 МПа ≤ 400.91 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_0^M = f \cdot \sigma_1^M = 1 \cdot 98.02 = 98.02 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении  $s_0$  (п. 8.5.2):

$$\sigma_0^M \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R^{20}$$

Взам. инв. №		$\sigma_{\text{lim}}^{P-} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F - \frac{4 \cdot M}{D + s_1}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = (0.785 \cdot 146^2 \cdot 2.2216 + 0 - 4 \cdot 0 / (146 + 20)) / (3.1416 \cdot (146 + 20) \cdot (20 - 3)) = 4.1931 \text{ МПа}$				
		$\max \left\{ \left  \sigma_1^P - \sigma_{\text{lim}}^{P-} + \sigma_R^P \right ; \left  \sigma_1^P - \sigma_{\text{lim}}^{P-} + \sigma_T^P \right ; \left  \sigma_1^P + \sigma_{\text{lim}}^{P-} \right  \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{н}}$				
Подп. и дата		$\max \left\{ \left  \sigma_1^P - \sigma_{\text{lim}}^{P-} + \sigma_R^P \right ; \left  \sigma_1^P - \sigma_{\text{lim}}^{P-} + \sigma_T^P \right ; \left  \sigma_1^P + \sigma_{\text{lim}}^{P-} \right  \right\} = \frac{\max\{ 103.59 - 4.1931 + 78.216 ;  103.59 - 4.1931 + 55.766 ;  103.59 + 4.1931 \}}{ 103.59 + 4.1931 } = 177.61 \text{ МПа}$				
		177.61 МПа ≤ 400.91 МПа, <b>Условие прочности выполнено.</b>				
Инв. № подл.		Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении s <sub>0</sub> :				
		$\sigma_0^M = f \cdot \sigma_1^M = 1 \cdot 98.02 = 98.02 \text{ МПа}$				
Условие статической прочности при затяжке в сечении s <sub>0</sub> (п. 8.5.2):						
$\sigma_0^M \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R^{20}$						
Изм. Лист № док. Подп. Дата						Лист
90651-20600-AM-02-220 РР						287

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_R^{20} = 3 \cdot [\sigma]_{\Phi}^{20} = 3 \cdot 222.73 = 668.18 \text{ МПа}$$

$$1.3 \cdot [\sigma]_R^{20} = 1.3 \cdot 668.18 = 868.64 \text{ МПа}$$

98.02 МПа ≤ 868.64 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_0^P = f \cdot \sigma_1^P = 1 \cdot 103.59 = 103.59 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_0$  (+):

$$\sigma_{0mm}^{P+} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_0}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = \frac{(0.785 \cdot 146^2 \cdot 2.2216 + 0 + 4 \cdot 0 / (146 + 7.5)) / (3.1416 \cdot (146 + 7.5) \cdot (7.5 - 3))}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = 17.131 \text{ МПа}$$

Окружное мембранное напряжение от действия давления во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_{0mo}^P = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s_0 - c)} = \frac{2.2216 \cdot 146 / (2 \cdot (7.5 - 3))}{2 \cdot (s_0 - c)} = 36.04 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P+} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P+} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P+} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P+} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} = \max \{103.59 \pm 17.131; |0.3 \cdot 103.59 \pm 36.04|; |0.7 \cdot 103.59 \pm (17.131 - 36.04)|\} = 120.72 \text{ МПа}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_R = 3 \cdot [\sigma]_{\Phi} = 3 \cdot 222.73 = 668.18 \text{ МПа}$$

$$1.3 \cdot [\sigma]_R = 1.3 \cdot 668.18 = 868.64 \text{ МПа}$$

120.72 МПа ≤ 868.64 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_0$  (-):

$$\sigma_{0mm}^{P-} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F - \frac{4 \cdot M}{D + s_0}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = \frac{(0.785 \cdot 146^2 \cdot 2.2216 + 0 - 4 \cdot 0 / (146 + 7.5)) / (3.1416 \cdot (146 + 7.5) \cdot (7.5 - 3))}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = 17.131 \text{ МПа}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P-} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P-} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P-} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P-} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} = \max \{103.59 \pm 17.131; |0.3 \cdot 103.59 \pm 36.04|; |0.7 \cdot 103.59 \pm (17.131 - 36.04)|\} = 120.72 \text{ МПа}$$

120.72 МПа ≤ 868.64 МПа, **Условие прочности выполнено.**

**Расчет в сечении  $s_0$  в рабочих условиях (п. 8.5.5 ГОСТ 34233.4-2017):**

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0mo}^P \right|; \left| \sigma_{0mm}^P \right| \right\} \leq [\sigma]_{\Phi}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0mo}^P \right|; \left| \sigma_{0mm}^P \right| \right\} = \max \{36.04; |17.131|\} = 36.04 \text{ МПа}$$

36.04 МПа ≤ 222.73 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Условие статической прочности при затяжке для тарелок:

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_T^M \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_{\Phi}^{20}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_T^M \right| \right\} = \max \{74.013; |52.769|\} = 74.013 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_{\Phi}^{20} = 1 \cdot 222.73 = 222.73 \text{ МПа}$$

74.013 МПа ≤ 222.73 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Условие статической прочности в рабочих условиях для тарелок:

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_T^P \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_{\Phi}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_T^P \right| \right\} = \max \{78.216; |55.766|\} = 78.216 \text{ МПа}$$

Взам. инв. №	Подп. и дата	Инв. № подл.	$\max \left\{ \left  \sigma_{0\text{мо}}^P \right ; \left  \sigma_{0\text{мм}}^P \right  \right\} = \max \{ 36.04;   17.131   \} = 36.04 \text{ МПа}$ 36.04 МПа ≤ 222.73 МПа, <b>Условие прочности выполнено.</b> Условие статической прочности при затяжке для тарелок: $\max \left\{ \left  \sigma_R^M \right ; \left  \sigma_T^M \right  \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_{\Phi}^{20}$ $\max \left\{ \left  \sigma_R^M \right ; \left  \sigma_T^M \right  \right\} = \max \{ 74.013;   52.769   \} = 74.013 \text{ МПа}$ $K_T \cdot [\sigma]_{\Phi}^{20} = 1 \cdot 222.73 = 222.73 \text{ МПа}$ 74.013 МПа ≤ 222.73 МПа, <b>Условие прочности выполнено.</b> Условие статической прочности в рабочих условиях для тарелок: $\max \left\{ \left  \sigma_R^P \right ; \left  \sigma_T^P \right  \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_{\Phi}$ $\max \left\{ \left  \sigma_R^P \right ; \left  \sigma_T^P \right  \right\} = \max \{ 78.216;   55.766   \} = 78.216 \text{ МПа}$											
			<table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>Изм.</td><td>Лист</td><td>№ док.</td><td>Подп.</td><td>Дата</td></tr></table>										Изм.	Лист
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата										

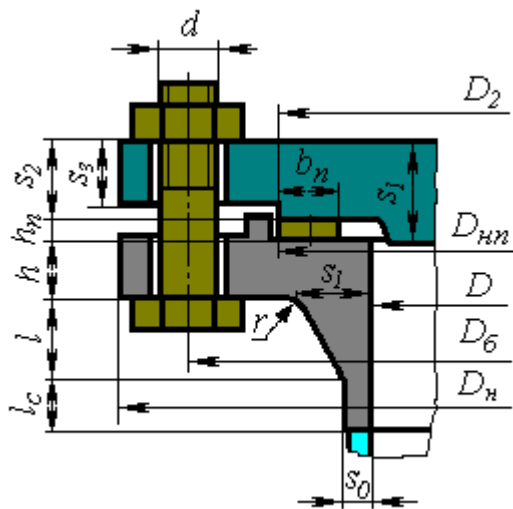
90651-20600-AM-02-220 РР					Лист
					288

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №

Этот документ является собственностью "НЕФТЕХИМПРОЕКТ" и не подлежит копированию и распространению без его согласия

НЕФТЕХИМПРОЕКТ NEFTECHIMPROEKT		МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ		РР	
<div><div><div><div><div><div></div><div><math>K_T \cdot [\sigma]_ф = 1 \cdot 222.73 = 222.73 \text{ МПа}</math></div></div></div><div><div></div><div><math>78.216 \text{ МПа} \leq 222.73 \text{ МПа}, \text{Условие прочности выполнено.}</math></div></div></div></div><div><div><div><div><div><div></div><div><b>Жёсткость фланца:</b></div></div></div><div><div></div><div>Угол поворота фланца в рабочих условиях:</div></div></div><div><div><div><math display="block">\varphi = M^P \cdot y_\Phi \cdot \frac{E^{20}}{E} = 7263.1 \cdot 0.98115 \cdot 10^{-5} \cdot 1.99 \cdot 10^5 / 1.99 \cdot 10^5 = 0.071261^\circ</math></div></div></div><div><div></div><div>Допускаемый угол поворота фланца:</div></div><div><div><math display="block">[\varphi] = 0.34377^\circ</math></div></div><div><div></div><div>Условие выполнения жесткости фланцев :</div></div><div><div><math display="block">\varphi \leq K_\varphi \cdot [\varphi] = 1.3 \cdot 0.34377 = 0.44691^\circ</math></div></div><div><div></div><div>Условие жёсткости выполнено.</div></div></div></div></div>					
				</	

Крышка плоская М1



Исходные данные

Параметры крышки:

Материал:	09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ
	8479 Поковка
Толщина стенки, $s_1$ :	45 мм
Прибавка для компенсации коррозии и эрозии, $s_1$ :	3 мм
Прибавка для компенсации минусового допуска, $s_2$ :	0 мм
Прибавка технологическая, $s_3$ :	0 мм
Сумма прибавок к расчётной толщине стенки, $c$ :	3 мм
Толщина в месте прокладки, $s_2$ :	41 мм
Толщина вне уплотнения, $s_3$ :	35 мм
Наименьший диаметр наружной утоненной части, $D_2$ :	663 мм
Наружный диаметр крышки, $D_n$ :	740 мм
Коэффициент прочности сварного шва :	
$\varphi_p = 1$	

Параметры фланца:

Тип фланца:	Приварные встык
Исполнение фланца:	Выступ-впадина
Диаметр болтовой окружности, $D_6$ :	700мм
Материал фланца:	09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ
	8479 Поковка
Смежный элемент:	Люк-лаз (М1)
Материал смежного элемента:	09Г2С Лист
Толщина стенки смежного элемента:	10 мм
Внутренний диаметр фланца, $D$ :	600 мм
Наружный диаметр фланца, $D_n$ :	740 мм
Толщина фланца, $h$ :	45 мм
Сумма прибавок, $c$ :	3 мм
Длина конической части втулки, $l$ :	36 мм
Длина цилиндрической части втулки, $l_c$ :	0 мм
Толщина цилиндрической части втулки, $s_0$ :	12 мм
Толщина конической части втулки, $s_1$ :	24 мм

Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата

Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата

90651-20600-AM-02-220 РР

Лист

290

Этот документ является собственностью "НЕФТЕХИМПРОЕКТ" и не подлежит копированию и распространению без его согласия

НЕФТЕХИМПРОЕКТ NEFTECHIMPROEKT		МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ			РР
Радиус перехода, r: 7 мм					
Шпильки:					
Материал: 35Х Крепеж					
Наружный диаметр, d: 20 мм					
Количество, n: 32					
Контроль затяжки: Нет					
Прокладка:					
Материал прокладки: Спирально-навитая с лентой из нержавеющей стали					
Толщина, hп: 3.2 мм					
Наружный диаметр, Dн.п: 663 мм					
Ширина, bп: 12 мм					
Расчёт в рабочих условиях					
Условия нагружения:					
Расчётное осевое сжимающее усилие, F: 0 Н					
Расчётный изгибающий момент, M: 0 Н·м					
Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 1.6313 МПа					
Расчёт фланца по ГОСТ 34233.4-2017:					
Свойства материала болтов (шпилек)					
Температура болтов (шпилек), tб: 97 °С					
Допускаемые напряжения для материала 35Х Крепеж при температуре 97 °С (рабочие условия): [σ]б= 230 МПа					
Модуль продольной упругости для материала 35Х Крепеж при температуре T = 97 °С: Eб= 2.1511·10 <sup>5</sup> МПа					
Коэффициент линейного расширения для материала 35Х Крепеж при температуре T = 97 °С: αб= 0.134·10 <sup>-4</sup> /°С					
Допускаемые напряжения для материала 35Х Крепеж при температуре 20 °С (рабочие условия): [σ] <sup>20</sup> б= 230 МПа					
Модуль продольной упругости для материала 35Х Крепеж при температуре T = 20 °С: E <sup>20</sup> б= 2.18·10 <sup>5</sup> МПа					
Свойства материала смежного элемента фланца 2 Люк-лаз (М1)					
Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Лист при температуре 100 °С (рабочие условия): [σ]ш= 177 МПа					
Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Лист при температуре 20 °С (рабочие условия): [σ] <sup>20</sup> ш= 196 МПа					
Свойства материала фланца					
Температура фланца (кольца), tф: 100 °С					
Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре 100 °С (рабочие условия): [σ]ф= 144 МПа					
Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре T = 100 °С: Eф= 1.91·10 <sup>5</sup> МПа					
Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре T = 100 °С: αф= 0.116·10 <sup>-4</sup> /°С					
Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре 20 °С (рабочие условия): [σ] <sup>20</sup> ф= 164.5 МПа					
Взам. инв. №					Лист
Подп. и дата					90651-20600-AM-02-220 РР
Инв. № подл.					291
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	

90651-20600-AM-02-220 РР\_изм.0.docx

Формат А4

НЕФТЕХИМПРОЕКТ NEFTECHIMPROEKT		МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ			РР
Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре Т = 20 °С: $E^{20}_{\phi} = 1.99 \cdot 10^5$ МПа					
Характеристики прокладки:					
Тип и материал прокладки	Коэффициент m	Удельное давление обжатия $q_{обж}$ , МПа	Допускаемое удельное давление $[q]$ , МПа	Коэффициент обжатия К	Условный модуль сжатия $E_n$ , МПа
Спирально-навитая с лентой из нержавеющей стали	3	69	-	-	-
Эффективная ширина прокладки : $b_0 = 12$ мм					
Примечание: $\begin{cases} b_0 = b_{\text{тп}} & \text{при } b_{\text{тп}} \leq 15.0 \text{ мм} \\ b_0 = 3.8 \cdot \sqrt{b_{\text{тп}}} & \text{при } b_{\text{тп}} > 15.0 \text{ мм} \end{cases}$					
Рабочий наружный диаметр прокладки : $D_{\text{тпф}} = 663$ мм					
Средний эффективный диаметр прокладки: $D_{\text{ст}} = D_{\text{тпф}} - b_0 = 663 - 12 = 651$ мм					
Для металлических и асбометаллических прокладок $y_n = 0$ .					
Расчётные параметры болтов (шпилек):					
Рабочая длина болта (шпильки): $L_{\phi 0} = h + s_2 + h_{\text{ш}} = 41 + 45 + 3.2 = 89.2$ мм					
Площадь сечения шпильки (по внутреннему диаметру резьбы): $f_{\phi} = 225$ мм <sup>2</sup>					
Эффективная длина шпильки : $L_{\phi} = L_{\phi 0} + 0.56 \cdot d = 89.2 + 0.56 \cdot 20 = 100.4$ мм					
Податливость шпилек : $y_{\phi} = \frac{L_{\phi}}{E_{\phi}^{20} \cdot f_{\phi} \cdot n} = \frac{100.4}{(2.18 \cdot 10^5 \cdot 225 \cdot 32)} = 0.63965 \cdot 10^{-7} \text{ мм/Н}$					
Расчётные параметры крышки:					
$K_{\text{кр}} = \frac{D_{\text{н}}}{D_{\text{ст}}} = 740 / 651 = 1.1367$					
$x_{\text{кр}} = \frac{0.67 \cdot [K_{\text{кр}}^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg K_{\text{кр}}) - 1]}{(K_{\text{кр}} - 1) \cdot [K_{\text{кр}}^2 - 1 + (1.857 \cdot K_{\text{кр}}^2 + 1) \cdot \left(\frac{s_1}{s_2}\right)^3]} = \frac{(0.67 \cdot (1.1367^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg(1.1367)) - 1)) / ((1.1367 - 1) \cdot [1.1367^2 - 1 + (1.857 \cdot 1.1367^2 + 1) \cdot (45 / 41)^3])}{0.92853}$					
Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре Т = 20 °С: $E^{20}_{\text{кр}} = 1.99 \cdot 10^5$ МПа					
Угловая податливость крышки : $y_{\text{кр}} = \frac{x_{\text{кр}}}{E_{\text{кр}}^{20} \cdot s_2^3} = 0.92853 / (1.99 \cdot 10^5 \cdot 41^3) = 0.38789 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{Н}\cdot\text{м}$					
Расчётные параметры фланца:					
$l_0 = \sqrt{D \cdot s_0} = (600 \cdot 12)^{1/2} = 84.853$ мм					
$\beta_F = 0.84262$					
90651-20600-AM-02-220 РР					Лист
					292
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	

$$K = \frac{D_K}{D} = 740 / 600 = 1.2333$$

$$\beta_T = \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg K) - 1}{(1.05 + 1.945 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} = (1.2333^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg 1.2333) - 1) / ((1.05 + 1.945 \cdot 1.2333^2) \cdot (1.2333 - 1)) = 1.8236$$

$$\beta_V = 0.25062$$

$$\beta_U = \frac{K^2 (1 + 8.55 \cdot \lg K) - 1}{1.36 \cdot (K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = (1.2333^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg 1.2333) - 1) / (1.36 \cdot (1.2333^2 - 1) \cdot (1.2333 - 1)) = 10.314$$

$$\lambda = \frac{\beta_T \cdot h + 1_0}{\beta_T \cdot 1_0} + \frac{\beta_V \cdot h^3}{\beta_U \cdot 1_0 \cdot s_0^2} = (0.84262 \cdot 45 + 84.853) / (1.8236 \cdot 84.853) + 0.25062 \cdot 45^3 / (10.314 \cdot 84.853 \cdot 12^2) = 0.97462$$

Угловая податливость фланца при затяжке:

$$y_\Phi = \frac{0.91 \cdot \beta_V}{E^{20} \cdot \lambda \cdot s_0^2 \cdot 1_0} = 0.91 \cdot 0.25062 / (1.99 \cdot 10^5 \cdot 0.97462 \cdot 12^2 \cdot 84.853) = 0.55138 \cdot 10^{-5} \text{ °/Н·м}$$

Плечи моментов:

$$a = 0$$

$$b = 0.5 \cdot (D_B - D_{\text{сп}}) = 0.5 \cdot (700 - 651) = 24.5 \text{ мм}$$

$$\beta = \frac{s_1}{s_0} = 24 / 12 = 2$$

$$x = \frac{1}{\sqrt{D \cdot s_0}} = 36 / (600 \cdot 12)^{1/2} = 0.42426$$

$$\kappa = 1 + (\beta - 1) \cdot \frac{x}{x + \frac{1 + \beta}{4}} = 1 + (2 - 1) \cdot 0.42426 / (0.42426 + (1 + 2) / 4) = 1.3613$$

Эквивалентная толщина втулки для фланца, приварного встык:

$$s_3 = \kappa \cdot s_0 = 1.3613 \cdot 12 = 16.336 \text{ мм}$$

$$e = 0.5 \cdot (D_{\text{сп}} - D - s_3) = 0.5 \cdot (651 - 600 - 16.336) = 17.332 \text{ мм}$$

### Расчёт нагрузок:

Равнодействующая давления :

$$Q_d = 0.785 \cdot D_{\text{сп}}^2 \cdot p = 0.785 \cdot 651^2 \cdot 1.6313 = 5.4272 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Усилие на прокладке в рабочих условиях, необходимое для обеспечения герметичности:

$$R_{\text{п}} = \pi \cdot D_{\text{сп}} \cdot b_0 \cdot m \cdot |p| = 3.1416 \cdot 651 \cdot 12 \cdot 3 \cdot |1.6313| = 1.2011 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Усилие, необходимое для смятия прокладки при затяжке :

$$P_{\text{обж}} = 0.5 \cdot \pi \cdot D_{\text{сп}} \cdot b_0 \cdot q_{\text{обж}} = 0.5 \cdot 3.1416 \cdot 651 \cdot 12 \cdot 69 = 8.467 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

**Расчетная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для герметизации в рабочих условиях (нагрузки + давление, без учета температурной нагрузки)**

$$\eta = y_{\text{п}} + y_6 + y_{\Phi}^I \cdot b^{1/2} + y_{\Phi}^{II} \cdot b^{1/2} = 0 + 0.63965 \cdot 10^{-7} + 0.38789 \cdot 10^{-5} \cdot 24.5^2 + 0.55138 \cdot 10^{-5} \cdot 24.5^2 = 0.16237 \cdot 10^{-6} \text{ мм/Н}$$

Коэффициенты жёсткости для фланцевого соединения с крышкой, нагруженного внутренним давлением:

$$\alpha = 1 - \frac{y_{\text{п}} - (y_{\Phi}^I \cdot e + y_{\text{кр}} \cdot b) \cdot b}{\eta} = 1 - (0 - (0.55138 \cdot 10^{-5} \cdot 17.332 + 0.38789 \cdot 10^{-5} \cdot 24.5) \cdot 24.5) / 0.16237 \cdot 10^{-6} = 1.502$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре T = 20 °C:

$$E_{20_{\text{кр}}} = 1.99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Угловая податливость фланца, нагруженного внешним изгибающим моментом:

$$y_{\Phi M} = \left( \frac{\pi}{4} \right)^3 \cdot \frac{D_B}{E^{20} \cdot D_K \cdot h^3} = (3.1416 / 4)^3 \cdot 700 / (1.99 \cdot 10^5 \cdot 740 \cdot 41^3) = 0.19145 \cdot 10^{-5} \text{ °/Н·м}$$

Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	90651-20600-AM-02-220 РР	Лист
Взам. инв. №						
Подп. и дата						
Инв. № подл.						293

Угловая податливость фланца, нагруженного внешним изгибающим моментом:

$$y_{\Phi M} = \left( \frac{\pi}{4} \right)^3 \cdot \frac{D_6}{E^{20} \cdot D_{\Phi} \cdot h^3} = (3.1416 / 4)^3 \cdot 700 / (1.99 \cdot 10^5 \cdot 740 \cdot 45^3) = 0.1448 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ/\text{Н}\cdot\text{м}$$

Коэффициенты жёсткости для фланцевого соединения, нагруженного внешним изгибающим моментом:

$$\alpha_M = \frac{y_6 + y'_{\Phi M} \cdot b' \cdot \left( b' + e' - \frac{e'^2}{D_{\Phi}} \right) + y''_{\Phi M} \cdot b'' \cdot \left( b'' + e'' - \frac{e''^2}{D_{\Phi}} \right)}{y_6 + y_{\pi} \cdot \left( \frac{D_6}{D_{\Phi}} \right)^2 + y'_{\Phi M} \cdot b'^2 + y''_{\Phi M} \cdot b''^2}$$

$$= [0.63965 \cdot 10^{-7} + 0.19145 \cdot 10^{-5} \cdot 24.5 \cdot (24.5 + 24.5 - 24.5^2 / 651) + 0.1448 \cdot 10^{-5} \cdot 24.5 \cdot (24.5 + 17.332 - 17.332^2 / 651)] / [0.63965 \cdot 10^{-7} + 0 \cdot (700 / 651)^2 + 0.19145 \cdot 10^{-5} \cdot 24.5^2 + 0.19145 \cdot 10^{-5} \cdot 24.5^2]$$

$$= 1.2999$$

$$P_{61} = \alpha \cdot (Q_{\Phi} + F) + R_{\pi} + \frac{4 \cdot \alpha_M \cdot |M|}{D_{\Phi}} = 1.502 \cdot (5.4272 \cdot 10^5 + 0) + 1.2011 \cdot 10^5 + 4 \cdot 1.2999 \cdot |0| / 651 = 9.3525 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

**Расчетная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для герметизации в рабочих условиях (только давление, без учета температурной нагрузки)**

$$P_{61} = \alpha \cdot (Q_{\Phi} + F) + R_{\pi} + \frac{4 \cdot \alpha_M \cdot |M|}{D_{\Phi}} = 1.502 \cdot (5.4272 \cdot 10^5 + 0) + 1.2011 \cdot 10^5 + 4 \cdot 1.2999 \cdot |0| / 651 = 9.3525 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Суммарная площадь сечения болтов (шпилек) по внутреннему диаметру резьбы или сечению наименьшего диаметра:

$$A_6 = n \cdot f_6 = 32 \cdot 225 = 7200 \text{ мм}^2$$

Расчётная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для обжатия прокладки и минимального начального натяжения болтов:

$$P_{62} = \max \{ P_{обж}; 0.4 \cdot A_6 \cdot [\sigma]_6^{20} \} = \max \{ 8.467 \cdot 10^5; 0.4 \cdot 7200 \cdot 230 = 6.624 \cdot 10^5 \} = 8.467 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

**Расчёт без учета стесненности температурных деформаций**

**Расчёт болтов(шпилек):**

Коэффициент увеличения допускаемых напряжений при затяжке:  $\xi = 1.2$

Коэффициент условий работы:  $K_{yp} = 1$

Коэффициент условий затяжки:  $K_{yz} = 1$

Допускаемые напряжения для болтов (шпилек) при затяжке :

$$[\sigma]_6^M = \xi \cdot K_{yp} \cdot K_{yz} \cdot K_{yt} \cdot [\sigma]_6^{20} = 1.2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 230 = 276 \text{ МПа}$$

**Расчетная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для герметизации в рабочих условиях (только давление, без учета температурной нагрузки)**

$$P_{61} = \alpha \cdot (Q_{\Phi} + F) + R_{\pi} + \frac{4 \cdot \alpha_M \cdot |M|}{D_{\Phi}} = 1.502 \cdot (5.4272 \cdot 10^5 + 0) + 1.2011 \cdot 10^5 + 4 \cdot 1.2999 \cdot |0| / 651 = 9.3525 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Болтовая нагрузка в условиях затяжки :

$$P_6^M = \max \{ P_{61}; P_{62} \} = \max \{ 9.3525 \cdot 10^5; 8.467 \cdot 10^5 \} = 9.3525 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Условие прочности при затяжке:

$$\sigma_{61} = \frac{P_6^M}{A_6} \leq [\sigma]_6^M$$

$$\sigma_{61} = \frac{P_6^M}{A_6} = 9.3525 \cdot 10^5 / 7200 = 129.9 \text{ МПа}$$

Крутящий момент при затяжке болтов (шпилек) без смазки при  $\sigma_{61} \geq 120 \text{ МПа}$  выбирается по рис. Л.1 ГОСТ 34233.4-2017:

$$M_{кр} = 144.96 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

При наличии смазки величина  $M_{кр}$  снижается на 25% и составляет  $0.75 \cdot M_{кр} = 108.72 \text{ Н}\cdot\text{м}$

$129.9 \text{ МПа} \leq 276 \text{ МПа}$ , **Условие прочности выполнено.**

Взам. инв. №					
Подп. и дата					
Инв. № подл.					
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	

90651-20600-AM-02-220 PP

Лист

294



Допускаемые напряжения для болтов (шпилек) при рабочих условиях:

$$[\sigma]_6^P = K_{ур} \cdot K_{уз} \cdot K_{ут} \cdot [\sigma]_6 = 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 230 = 230 \text{ МПа}$$

Болтовая нагрузка в рабочих условиях :

$$P_6^P = P_6^M + (1 - \alpha) \cdot (Q_d + F) + \frac{4 \cdot (1 - \alpha_m) \cdot |M|}{D_{от}} = 9.3525 \cdot 10^5 + (1 - 1.502) \cdot (5.4272 \cdot 10^5 + 0) + 4 \cdot (1 - 1.2999) \cdot |0| / 651 = 6.6283 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Условие прочности в рабочих условиях:

$$\sigma_{62} = \frac{P_6^P}{A_6} \leq [\sigma]_6^P$$

$$\sigma_{62} = \frac{P_6^P}{A_6} = 6.6283 \cdot 10^5 / 7200 = 92.06 \text{ МПа}$$

92.06 МПа ≤ 230 МПа, **Условие прочности выполнено.**

### Расчёт второго фланца:

Коэффициент, учитывающий изгиб тарелки фланца между шпильками:

$$C_F = \max \left\{ 1; \sqrt{\frac{\frac{\pi \cdot D_6}{n}}{2 \cdot d + \frac{6 \cdot h}{m + 0.5}}} \right\} = \max \{1; (3.1416 \cdot 700 / 32 / (2 \cdot 20 + 6 \cdot 45 / (3 + 0.5)))^{1/2}\} = 1$$

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при затяжке :

$$M^M = C_F \cdot P_6^M \cdot b = 1 \cdot 9.3525 \cdot 10^5 \cdot 24.5 = 22914 \text{ Н·м}$$

$$D^* = (D + 2 \cdot c)_{\text{при } (D + 2 \cdot c) \geq 20 \cdot (s_1 - c)} = 600 + 2 \cdot 0 \text{ при } (600 + 2 \cdot 0) \geq 20 \cdot (24 - 0) = 600 \text{ мм}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении s<sub>1</sub>:

$$\sigma_1^M = \frac{M^M}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D^*} = 22914 / (0.97462 \cdot (24 - 3)^2 \cdot 600) = 88.852 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в условиях затяжки :

$$\sigma_R^M = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + 1_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot 1_0 \cdot D} \cdot M^M = (1.33 \cdot 0.84262 \cdot 45 + 84.853) / (0.97462 \cdot 45^2 \cdot 84.853 \cdot 600) \cdot 22914 = 30.85 \text{ МПа}$$

$$\beta_Y = \frac{1}{K - 1} \cdot \left( 0.69 + 5.72 \cdot \frac{K^2 \cdot \lg K}{K^2 - 1} \right) = 1 / (1.2333 - 1) \cdot (0.69 + 5.72 \cdot 1.2333^2 \cdot \lg 1.2333 / (1.2333^2 - 1)) = 9.4746$$

$$\beta_Z = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = (1.2333^2 + 1) / (1.2333^2 - 1) = 4.838$$

Окружное напряжение в тарелке в условиях затяжки :

$$\sigma_T^M = \frac{\beta_Y \cdot M^M}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^M = 9.4746 \cdot 22914 / (45^2 \cdot 600) - 4.838 \cdot 30.85 = 29.428 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении s<sub>1</sub> (п. 8.5.1):

$$\max \{ |\sigma_1^M + \sigma_R^M|; |\sigma_1^M + \sigma_T^M| \} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{мк}}^{20}$$

$$\max \{ |\sigma_1^M + \sigma_R^M|; |\sigma_1^M + \sigma_T^M| \} = \max \{ |88.852 + 30.85|; |88.852 + 29.428| \} = 119.7 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_{\text{мк}}^{20} = 1.5 \cdot [\sigma]_{\text{ф}}^{20} = 1.5 \cdot 164.5 = 246.75 \text{ МПа}$$

$$K = \frac{D_{\text{н}}}{D} = 740 / 600 = 1.2333$$

Коэффициент учета размеров тарелки фланца: K<sub>S</sub> = 1

$$K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{мк}}^{20} = 1 \cdot 1 \cdot 246.75 = 246.75 \text{ МПа}$$

119.7 МПа ≤ 246.75 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Взам. инв. №					
Подп. и дата					
Инв. № подл.					
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	90651-20600-AM-02-220 РР



$$1.3 \cdot [\sigma]_R^{20} = 1.3 \cdot 493.5 = 641.55 \text{ МПа}$$

134.09 МПа ≤ 641.55 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_0^P = f \cdot \sigma_1^P = 1.5091 \cdot 99.447 = 150.07 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_0$  (+):

$$\sigma_{0mm}^{P+} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_0}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = (0.785 \cdot 600^2 \cdot 1.6313 + 0 + 4 \cdot 0 / (600 + 12)) / (3.1416 \cdot (600 + 12) \cdot (12 - 3)) = 26.642 \text{ МПа}$$

Окружное мембранное напряжение от действия давления во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_{0mo}^P = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s_0 - c)} = 1.6313 \cdot 600 / (2 \cdot (12 - 3)) = 54.378 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P+} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm \left( \sigma_{0mm}^{P+} - \sigma_{0mo}^P \right) \right| \right\} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P+} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm \left( \sigma_{0mm}^{P+} - \sigma_{0mo}^P \right) \right| \right\} = \max \{ 150.07 \pm 26.642; |0.3 \cdot 150.07 \pm 54.378|; |0.7 \cdot 150.07 \pm (26.642 - 54.378)| \} = 176.72 \text{ МПа}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_R = 3 \cdot [\sigma]_\Phi = 3 \cdot 144 = 432 \text{ МПа}$$

$$1.3 \cdot [\sigma]_R = 1.3 \cdot 432 = 561.6 \text{ МПа}$$

176.72 МПа ≤ 561.6 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_0$  (-):

$$\sigma_{0mm}^{P-} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F - \frac{4 \cdot M}{D + s_0}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = (0.785 \cdot 600^2 \cdot 1.6313 + 0 - 4 \cdot 0 / (600 + 12)) / (3.1416 \cdot (600 + 12) \cdot (12 - 3)) = 26.642 \text{ МПа}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P-} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm \left( \sigma_{0mm}^{P-} - \sigma_{0mo}^P \right) \right| \right\} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P-} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm \left( \sigma_{0mm}^{P-} - \sigma_{0mo}^P \right) \right| \right\} = \max \{ 150.07 \pm 26.642; |0.3 \cdot 150.07 \pm 54.378|; |0.7 \cdot 150.07 \pm (26.642 - 54.378)| \} = 176.72 \text{ МПа}$$

176.72 МПа ≤ 561.6 МПа, **Условие прочности выполнено.**

**Расчет в сечении  $s_0$  в рабочих условиях (п. 8.5.5 ГОСТ 34233.4-2017):**

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0mo}^P \right|; \left| \sigma_{0mm}^P \right| \right\} \leq [\sigma]_\Phi$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0mo}^P \right|; \left| \sigma_{0mm}^P \right| \right\} = \max \{ 54.378; |26.642| \} = 54.378 \text{ МПа}$$

54.378 МПа ≤ 144 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Условие статической прочности при затяжке для тарелок:

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_T^M \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_\Phi^{20}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_T^M \right| \right\} = \max \{ 30.85; |29.428| \} = 30.85 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_\Phi^{20} = 1 \cdot 164.5 = 164.5 \text{ МПа}$$

30.85 МПа ≤ 164.5 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Условие статической прочности в рабочих условиях для тарелок:

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_T^P \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_\Phi$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_T^P \right| \right\} = \max \{ 34.529; |32.937| \} = 34.529 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_\Phi = 1 \cdot 144 = 144 \text{ МПа}$$

34.529 МПа ≤ 144 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	90651-20600-AM-02-220 РР	Лист 297
Взам. инв. №						
Подп. и дата						
Инв. № подл.						

### Жёсткость фланца:

Угол поворота фланца в рабочих условиях:

$$\varpi = M^P \cdot y_{\Phi} \cdot \frac{E^{20}}{E} = 25646 \cdot 0.55138 \cdot 10^{-5} \cdot 1.99 \cdot 10^5 / 1.91 \cdot 10^5 = 0.14733^{\circ}$$

Допускаемый угол поворота фланца:

$$[\varpi] = 0.39391^{\circ}$$

Коэффициент увеличения допускаемого угла поворота фланцев:  $K_{\Theta} = 1$

Условие выполнения жесткости фланцев:

$$\varpi \leq K_{\Theta} \cdot [\varpi] = 1 \cdot 0.39391 = 0.39391^{\circ}$$

**Условие жёсткости выполнено.**

### Расчёт с учетом стесненности температурных деформаций

#### Расчёт болтов(шпилек):

Допускаемые напряжения для болтов (шпилек) при затяжке:

$$[\sigma]_{\epsilon}^M = \xi \cdot K_{yp} \cdot K_{yz} \cdot K_{yt} \cdot [\sigma]_{\epsilon}^{20} = 1.2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1.3 \cdot 230 = 358.8 \text{ МПа}$$

**Расчетная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для герметизации в рабочих условиях (только давление, с учетом температурной нагрузки)**

$$\gamma = \frac{1}{y_{\Pi} + y_{\epsilon} \cdot \frac{E_{\epsilon}^{20}}{E_{\epsilon}} + \left( y_{\Phi} \cdot \frac{E_{\Phi}^{20}}{E_{\Phi}} + y_{xp} \cdot \frac{E_{xp}^{20}}{E_{xp}} \right) \cdot b^2} = \frac{1 / (0 + 0.63965 \cdot 10^{-7} \cdot 2.18 \cdot 10^5 / 2.1511 \cdot 10^5 + (0.55138 \cdot 10^{-5} \cdot 1.99 \cdot 10^5 / 1.91 \cdot 10^5 + 0.38789 \cdot 10^{-5} \cdot 1.99 \cdot 10^5 / 1.91 \cdot 10^5) \cdot 24.5^2)}{1.91 \cdot 10^5} = 5.9756 \cdot 10^6 \text{ Н/мм}$$

Нагрузка от температурных деформаций:

$$Q_t = \gamma \cdot \left( \begin{aligned} & (\alpha'_{\Phi} \cdot h' + \alpha'_{ш} \cdot h'_{ш}) \cdot (t_{\Phi 1} - 20^{\circ} \text{C}) + \\ & + (\alpha''_{\Phi} \cdot h'' + \alpha''_{ш} \cdot h''_{ш}) \cdot (t_{\Phi 2} - 20^{\circ} \text{C}) - \\ & - \alpha_{\epsilon} \cdot (h' + h'' + h'_{ш} + h''_{ш}) \cdot (t_{\epsilon} - 20^{\circ} \text{C}) \end{aligned} \right)$$
$$= 5.9756 \cdot 10^6 \cdot ((0.116 \cdot 10^{-4} \cdot 41 + 0 \cdot 0) \cdot (100 - 20^{\circ} \text{C}) + ((0.116 \cdot 10^{-4} \cdot 45 + 0 \cdot 0) \cdot (100 - 20^{\circ} \text{C}) - 0.134 \cdot 10^{-4} \cdot (41 + 45 + 0 + 0) \cdot (97 - 20^{\circ} \text{C}))$$
$$= (-53343) \text{ Н}$$

$$P_{\epsilon 1} = \max \left\{ \begin{aligned} & \alpha \cdot (Q_d + F) + R_{\Pi} + \frac{4 \cdot \alpha_M \cdot |M|}{D_{\text{ст}}} \\ & \alpha \cdot (Q_d + F) + R_{\Pi} + \frac{4 \cdot \alpha_M \cdot |M|}{D_{\text{ст}}} - Q_t \end{aligned} \right\} = \max \left\{ \begin{aligned} & 1.502 \cdot (5.4272 \cdot 10^5 + 0) + 1.2011 \cdot 10^5 + 4 \cdot 1.2999 \cdot |0| / 651 = \\ & 9.3525 \cdot 10^5 \cdot 1.502 \cdot (5.4272 \cdot 10^5 + 0) + 1.2011 \cdot 10^5 + 4 \cdot 1.2999 \cdot |0| / 651 - (-53343) = 9.886 \cdot 10^5 \end{aligned} \right\} = 9.886 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Условие прочности при затяжке:

$$\sigma_{\epsilon 1} = \frac{P_{\epsilon}^M}{A_{\epsilon}} \leq [\sigma]_{\epsilon}^M$$

$$\sigma_{\epsilon 1} = \frac{P_{\epsilon}^M}{A_{\epsilon}} = 9.886 \cdot 10^5 / 7200 = 137.3 \text{ МПа}$$

Крутящий момент при затяжке болтов (шпилек) без смазки при  $\sigma_{\epsilon 1} \geq 120$  МПа выбирается по рис. Л.1 ГОСТ 34233.4-2017:

$$M_{кр} = 153.83 \text{ Н·м}$$

При наличии смазки величина  $M_{кр}$  снижается на 25% и составляет  $0.75 \cdot M_{кр} = 115.37 \text{ Н·м}$

$137.3 \text{ МПа} \leq 358.8 \text{ МПа}$ , **Условие прочности выполнено.**

Допускаемые напряжения для болтов (шпилек) при рабочих условиях:

$$[\sigma]_{\epsilon}^P = K_{yp} \cdot K_{yz} \cdot K_{yt} \cdot [\sigma]_{\epsilon} = 1 \cdot 1 \cdot 1.3 \cdot 230 = 299 \text{ МПа}$$

Болтовая нагрузка в рабочих условиях:

$$P_{\epsilon}^P = P_{\epsilon}^M + (1 - \alpha) \cdot (Q_d + F) + Q_t + \frac{4 \cdot (1 - \alpha_M) \cdot |M|}{D_{\text{ст}}} = \frac{9.886 \cdot 10^5}{1.2999} + (1 - 1.502) \cdot (5.4272 \cdot 10^5 + 0) + (-53343) + 4 \cdot (1 - 1.2999) \cdot |0| / 651 = 6.6283 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Условие прочности в рабочих условиях:

Взам. инв. №					
Подп. и дата					
Инв. № подл.					
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	

90651-20600-AM-02-220 РР

Лист

298

$$\sigma_{62} = \frac{P_6^P}{A_6} \leq [\sigma]_6^P$$

$$\sigma_{62} = \frac{P_6^P}{A_6} = 6.6283 \cdot 10^5 / 7200 = 92.06 \text{ МПа}$$

92.06 МПа ≤ 299 МПа, **Условие прочности выполнено.**

**Расчетная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для герметизации в рабочих условиях (нагрузки + давление, с учетом температурной нагрузки)**

$$P_{61} = \max \left\{ \alpha \cdot (Q_d + F) + R_{\pi} + \frac{4 \cdot \alpha_M \cdot |M|}{D_{\text{ст}}}, \alpha \cdot (Q_d + F) + R_{\pi} + \frac{4 \cdot \alpha_M \cdot |M|}{D_{\text{ст}}} - Q_t \right\} = \max \left\{ \begin{aligned} &1.502 \cdot (5.4272 \cdot 10^5 + 0) + 1.2011 \cdot 10^5 + 4 \cdot 1.2999 \cdot |0| / 651 = \\ &9.3525 \cdot 10^5, 1.502 \cdot (5.4272 \cdot 10^5 + 0) + 1.2011 \cdot 10^5 + 4 \cdot 1.2999 \cdot |0| / \\ &651 - (-53343) = 9.886 \cdot 10^5 \end{aligned} \right\} = 9.886 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Условие прочности при затяжке:

$$\sigma_{61} = \frac{P_6^M}{A_6} \leq [\sigma]_6^M$$

$$\sigma_{61} = \frac{P_6^M}{A_6} = 9.886 \cdot 10^5 / 7200 = 137.3 \text{ МПа}$$

Крутящий момент при затяжке болтов (шпилек) без смазки при  $\sigma_{61} \geq 120$  МПа выбирается по рис. Л.1 ГОСТ 34233.4-2017:

$$M_{\text{кр}} = 153.83 \text{ Н·м}$$

При наличии смазки величина  $M_{\text{кр}}$  снижается на 25% и составляет  $0.75 \cdot M_{\text{кр}} = 115.37 \text{ Н·м}$

### Расчёт второго фланца:

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при затяжке :

$$M^M = C_F \cdot P_6^M \cdot b = 1 \cdot 9.886 \cdot 10^5 \cdot 24.5 = 24221 \text{ Н·м}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении  $s_1$ :

$$\sigma_1^M = \frac{M^M}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D} = 24221 / (0.97462 \cdot (24 - 3)^2 \cdot 600) = 93.92 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в условиях затяжки :

$$\sigma_R^M = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + 1_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot 1_0 \cdot D} \cdot M^M = (1.33 \cdot 0.84262 \cdot 45 + 84.853) / (0.97462 \cdot 45^2 \cdot 84.853 \cdot 600) \cdot 24221 = 32.61 \text{ МПа}$$

Окружное напряжение в тарелке в условиях затяжки :

$$\sigma_T^M = \frac{\beta_Y \cdot M^M}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^M = 9.4746 \cdot 24221 / (45^2 \cdot 600) - 4.838 \cdot 32.61 = 31.106 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении  $s_1$  (п. 8.5.1):

$$\max \left\{ |\sigma_1^M + \sigma_R^M|, |\sigma_1^M + \sigma_T^M| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{лм}}^{20}$$

$$\max \left\{ |\sigma_1^M + \sigma_R^M|, |\sigma_1^M + \sigma_T^M| \right\} = \max \{ |93.92 + 32.61|, |93.92 + 31.106| \} = 126.53 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_{\text{лм}}^{20} = 1.5 \cdot [\sigma]_{\text{ф}}^{20} = 1.5 \cdot 164.5 = 246.75 \text{ МПа}$$

Коэффициент учета размеров тарелки фланца:  $K_S = 1$

$$K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{лм}}^{20} = 1 \cdot 1.3 \cdot 246.75 = 320.78 \text{ МПа}$$

126.53 МПа ≤ 320.78 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Приведенная нагрузка от внешней силы и момента :

$$Q_{\text{FM}}^+ = F + \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{ст}}} = 0 + 4 \cdot |0| / 651 = 0 \text{ Н}$$

$$Q_{\text{FM}}^- = F - \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{ст}}} = 0 - 4 \cdot |0| / 651 = 0 \text{ Н}$$

Взам. инв. №		$\max \left\{ \left  \sigma_1^m + \sigma_R^m \right ; \left  \sigma_1^m + \sigma_T^m \right  \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{жк}}^{20}$ $\max \left\{ \left  \sigma_1^m + \sigma_R^m \right ; \left  \sigma_1^m + \sigma_T^m \right  \right\} = \max \{  93.92 + 32.61 ;  93.92 + 31.106  \} = 126.53 \text{ МПа}$ Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1): $[\sigma]_{\text{жк}}^{20} = 1.5 \cdot [\sigma]_{\text{ф}}^{20} = 1.5 \cdot 164.5 = 246.75 \text{ МПа}$ Коэффициент учета размеров тарелки фланца: $K_S = 1$ $K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{жк}}^{20} = 1 \cdot 1.3 \cdot 246.75 = 320.78 \text{ МПа}$ $126.53 \text{ МПа} \leq 320.78 \text{ МПа}$ , <b>Условие прочности выполнено.</b> Приведенная нагрузка от внешней силы и момента : $Q_{\text{FM}}^+ = F + \frac{4 \cdot  M }{D_{\text{фл}}} = 0 + 4 \cdot  0  / 651 = 0 \text{ Н}$ $Q_{\text{FM}}^- = F - \frac{4 \cdot  M }{D_{\text{фл}}} = 0 - 4 \cdot  0  / 651 = 0 \text{ Н}$				
		Подп. и дата				
Инв. № подл.						
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	90651-20600-AM-02-220 PP	Лист 299

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при рабочих условиях:

$$M^P = C_F \cdot \max \left\{ P_F^P \cdot b + (Q_{\text{д}} + Q_{\text{FM}}) \cdot e; |Q_{\text{д}} + Q_{\text{FM}}| \cdot e \right\} = \frac{1 \cdot \max \{ 6.6283 \cdot 10^5 \cdot 24.5 + (5.4272 \cdot 10^5 + 0) \cdot 17.332; |5.4272 \cdot 10^5 + 0| \cdot 17.332 \}}{0} = 25646 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_1$ :

$$\sigma_1^P = \frac{M^P}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D} = 25646 / (0.97462 \cdot (24 - 3)^2 \cdot 600) = 99.447 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в рабочих условиях:

$$\sigma_R^P = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + 1_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot 1_0 \cdot D} \cdot M^P = (1.33 \cdot 0.84262 \cdot 45 + 84.853) / (0.97462 \cdot 45^2 \cdot 84.853 \cdot 600) \cdot 25646 = 34.529 \text{ МПа}$$

Окружное напряжение в тарелке в рабочих условиях:

$$\sigma_T^P = \frac{\beta_V \cdot M^P}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^P = 9.4746 \cdot 25646 / (45^2 \cdot 600) - 4.838 \cdot 34.529 = 32.937 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_1 (+)$ :

$$\sigma_{\text{mm}}^{P+} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_1}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = (0.785 \cdot 600^2 \cdot 1.6313 + 0 + 4 \cdot 0 / (600 + 24)) / (3.1416 \cdot (600 + 24) \cdot (24 - 3)) = 11.199 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_1$  (п. 8.5.1):

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{mm}}^{P+} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{mm}}^{P+} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{\text{mm}}^{P+} \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{м}}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{mm}}^{P+} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{mm}}^{P+} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{\text{mm}}^{P+} \right| \right\} = \frac{\max \{ |99.447 - 11.199 + 34.529|; |99.447 - 11.199 + 32.937|; |99.447 + 11.199| \}}{|99.447 + 11.199|} = 122.78 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_{\text{м}} = 1.5 \cdot [\sigma]_{\text{ф}} = 1.5 \cdot 144 = 216 \text{ МПа}$$

$$K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{м}} = 1 \cdot 1.3 \cdot 216 = 280.8 \text{ МПа}$$

122.78 МПа ≤ 280.8 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_1 (-)$ :

$$\sigma_{\text{mm}}^{P-} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F - \frac{4 \cdot M}{D + s_1}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = (0.785 \cdot 600^2 \cdot 1.6313 + 0 - 4 \cdot 0 / (600 + 24)) / (3.1416 \cdot (600 + 24) \cdot (24 - 3)) = 11.199 \text{ МПа}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{mm}}^{P-} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{mm}}^{P-} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{\text{mm}}^{P-} \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{м}}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{mm}}^{P-} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{mm}}^{P-} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{\text{mm}}^{P-} \right| \right\} = \frac{\max \{ |99.447 - 11.199 + 34.529|; |99.447 - 11.199 + 32.937|; |99.447 + 11.199| \}}{|99.447 + 11.199|} = 122.78 \text{ МПа}$$

122.78 МПа ≤ 280.8 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_0^M = f \cdot \sigma_1^M = 1.5091 \cdot 93.92 = 141.73 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении  $s_0$  (п. 8.5.2):

$$\sigma_0^M \leq 1.3 \cdot [\sigma]_{\text{R}}^{20}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_{\text{R}}^{20} = 3 \cdot [\sigma]_{\text{ф}}^{20} = 3 \cdot 164.5 = 493.5 \text{ МПа}$$

$$1.3 \cdot [\sigma]_{\text{R}}^{20} = 1.3 \cdot 493.5 = 641.55 \text{ МПа}$$

141.73 МПа ≤ 641.55 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_0^P = f \cdot \sigma_1^P = 1.5091 \cdot 99.447 = 150.07 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_0 (+)$ :

$$\sigma_{\text{mm}}^{P+} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_0}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = (0.785 \cdot 600^2 \cdot 1.6313 + 0 + 4 \cdot 0 / (600 + 12)) / (3.1416 \cdot (600 + 12) \cdot (12 - 3)) = 26.642 \text{ МПа}$$

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	90651-20600-AM-02-220 РР					Лист
								300
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата				



Окружное мембранное напряжение от действия давления во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_{\text{omo}}^p = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s_0 - c)} = 1.6313 \cdot 600 / (2 \cdot (12 - 3)) = 54.378 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^p \pm \sigma_{0mm}^{p+} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^p \pm \sigma_{0mo}^p \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^p \pm \left( \sigma_{0mm}^{p+} - \sigma_{0mo}^p \right) \right| \right\} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^p \pm \sigma_{0mm}^{p+} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^p \pm \sigma_{0mo}^p \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^p \pm \left( \sigma_{0mm}^{p+} - \sigma_{0mo}^p \right) \right| \right\} = \max \{ |150.07 \pm 26.642|; |0.3 * 150.07 \pm 54.378|; |0.7 * 150.07 \pm (26.642 - 54.378)| \} = 176.72 \text{ МПа}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_R = 3 \cdot [\sigma]_{\phi} = 3 \cdot 144 = 432 \text{ МПа}$$

$$1.3 \cdot [\sigma]_R = 1.3 \cdot 432 = 561.6 \text{ МПа}$$

$$176.72 \text{ МПа} \leq 561.6 \text{ МПа, Условие прочности выполнено.}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_0$  (–):

$$\sigma_{0mm}^p = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F - \frac{4 \cdot M}{D + s_0}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = (0.785 \cdot 600^2 \cdot 1.6313 + 0 - 4 \cdot 0 / (600 + 12)) / (3.1416 \cdot (600 + 12) \cdot (12 - 3)) = 26.642 \text{ МПа}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P-} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P-} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P-} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P-} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} = \max \{ |150.07 \pm 26.642|; |0.3 * 150.07 \pm 54.378|; |0.7 * 150.07 \pm (26.642 - 54.378)| \} = 176.72 \text{ МПа}$$

$$176.72 \text{ МПа} \leq 561.6 \text{ МПа, Условие прочности выполнено.}$$

Расчет в сечении  $s_0$  в рабочих условиях (п. 8.5.5 ГОСТ 34233.4-2017):

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0mo}^p \right|, \left| \sigma_{0mm}^p \right| \right\} \leq [\sigma]_{\Phi}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0mo}^p \right|, \left| \sigma_{0mm}^p \right| \right\} = \max \{ 54.378; 26.642 \} = 54.378 \text{ МПа}$$

$54.378 \text{ МПа} \leq 144 \text{ МПа}$ . **Условие прочности выполнено.**

Условие статической прочности при затяжке для тарелок:

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^M \right|, \left| \sigma_T^M \right| \right\} = \max \{ 32.61; 31.106 \} = 32.61 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_{\Phi}^{20} = 1.3 \cdot 164.5 = 213.85 \text{ МПа}$$

$$32.61 \text{ МПа} \leq 213.85 \text{ МПа, Условие прочности выполнено.}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях для тарелок:

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^p \right|, \left| \sigma_T^p \right| \right\} = \max \{ 34.529; 32.937 \} = 34.529 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_{\text{н}} = 1.3 \cdot 144 = 187.2 \text{ МПа}$$

$$34.529 \text{ МПа} \leq 187.2 \text{ МПа. Условие прочности выполнено.}$$

### Жёсткость фланца:

Угол поворота фланца в рабочих условиях:

$$\Theta = M^P \cdot y_{\Phi} \cdot \frac{E^{20}}{E} = 25646 \cdot 0.55138 \cdot 10^{-5} \cdot 1.99 \cdot 10^5 / 1.91 \cdot 10^5 = 0.14733^{\circ}$$

Условие выполнения жесткости фланцев :

$$[\text{H}] \leq K_m \cdot [\text{H}] = 1 \cdot 0.39391 = 0.39391 \text{ °}$$

**Условие жёсткости выполнено.**

Взам. инв. №		$\max \{ [\sigma_R], [\sigma_T] \} = \max \{ 34.529, 152.937 \} = 34.529 \text{ МПа}$ $K_T \cdot [\sigma]_{\text{ф}} = 1.3 \cdot 144 = 187.2 \text{ МПа}$ $34.529 \text{ МПа} \leq 187.2 \text{ МПа}$ , <b>Условие прочности выполнено.</b> <b>Жёсткость фланца:</b> Угол поворота фланца в рабочих условиях: $\Theta = M^P \cdot y_{\Phi} \cdot \frac{E^{20}}{E} = 25646 \cdot 0.55138 \cdot 10^{-6} \cdot 1.99 \cdot 10^5 / 1.91 \cdot 10^5 = 0.14733^\circ$ Условие выполнения жесткости фланцев : $\Theta \leq K_{\Theta} \cdot [\Theta] = 1 \cdot 0.39391 = 0.39391^\circ$ <b>Условие жёсткости выполнено.</b>					
Подп. и дата							
Инв. № подл.							
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	90651-20600-AM-02-220 PP		Лист
							301

Расчёт крышки на прочность и устойчивость по ГОСТ 34233.2-2017

Коэффициент ослабления для днищ, не имеющих отверстий  $K_0 = 1.0$

Днища и крышки с дополнительным краевым моментом, нагруженные избыточным давлением

$$\psi = \frac{P_6^p}{Q_d} = 6.6283 \cdot 10^5 / 5.4272 \cdot 10^5 = 1.2213$$

$$K_6 = 0.41 \cdot \sqrt{\frac{1 + 3 \cdot \psi \cdot \left( \frac{D_3}{D_{с.п.}} - 1 \right)}{\frac{D_3}{D_{с.п.}}}} = 0.41 \cdot \left[ (1 + 3 \cdot 1.2213 \cdot (700 / 651 - 1)) / (700 / 651) \right]^{1/2} = 0.44659$$

Поправочный коэффициент для допускаемого давления  $K_p = 1.0$

Допускаемое давление :

$$[P] = \left( \frac{s_1 - c}{K_0 \cdot K_6 \cdot D_p} \right)^3 \cdot [\sigma] \cdot \varphi \cdot K_p = ([45 - 3] / [1 \cdot 0.44659 \cdot 651])^3 \cdot 144 \cdot 1 \cdot 1 = 3.0052 \text{ МПа}$$

3.0052 МПа  $\geq$  1.6313 МПа

Заключение: **Условие прочности выполнено.**

Днища и крышки, нагруженные избыточным давлением

Расчётная толщина стенки с учётом прибавок :

$$s_p + c = K_6 \cdot K_0 \cdot D_p \cdot \sqrt{\frac{P}{\varphi \cdot [\sigma] \cdot K_p}} + c = 0.44659 \cdot 1 \cdot 651 \cdot (1.6313 / [1 \cdot 144 \cdot 1])^{1/2} + 3 = 33.945 \text{ мм}$$

33.945 мм  $\leq$  45 мм

Заключение: **Условие прочности выполнено.**

$$K_7 = 0.8 \cdot \sqrt{\frac{D_3}{D_{с.п.}} - 1} = 0.8 \cdot [700 / 651 - 1]^{1/2} = 0.21948$$

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре 100 °С (рабочие условия):

$[\sigma]_{кр} = 144 \text{ МПа}$

$$\Phi = \max \left\{ \frac{P_6^p}{[\sigma]}, \frac{P_6^m}{[\sigma]^{20}} \right\} = \max \{ 6.6283 \cdot 10^5 / 144; 9.886 \cdot 10^5 / 222.73 \} = 4603 \text{ мм}^2$$

Расчётная толщина крышки в месте уплотнения с учётом прибавок :

$$s_p + c = \max \left\{ K_7 \cdot \sqrt{\Phi}; \frac{0.6}{D_{с.п.}} \cdot \Phi \right\} + c = \max \{ 0.21948 \cdot 4603^{1/2}; 0.6 \cdot 4603 / 651 \} + 0 = 14.891 \text{ мм}$$

14.891 мм  $\leq$  41 мм

Заключение: **Условие прочности выполнено.**

$$K_7' = 0.8 \cdot \sqrt{\frac{D_3}{D_2} - 1} = 0.8 \cdot [700 / 663 - 1]^{1/2} = 0.18899$$

Расчётная толщина вне зоны уплотнения с учётом прибавок :

$$s_p + c = \max \left\{ K_7' \cdot \sqrt{\Phi}; \frac{0.6}{D_2} \cdot \Phi \right\} + c = \max \{ 0.18899 \cdot 4603^{1/2}; 0.6 \cdot 4603 / 663 \} + 0 = 12.822 \text{ мм}$$

12.822 мм  $\leq$  35 мм

Заключение: **Условие прочности выполнено.**

Расчет давления испытаний

Фланец:

Пробное давление при гидравлическом испытании, при работе элемента под внутренним давлением:

Взам. инв. №		14.891 мм ≤ 41 мм				
		Заключение: <b>Условие прочности выполнено.</b>				
Подп. и дата		$K_7' = 0.8 \cdot \sqrt{\frac{D_3}{D_2} - 1} = 0.8 \cdot [700 / 663 - 1]^{1/2} = 0.18899$				
		Расчётная толщина вне зоны уплотнения с учётом прибавок :				
Инв. № подл.		$s_{3p} + c = \max \left\{ K_7' \cdot \sqrt{\Phi}; \frac{0.6}{D_2} \cdot \Phi \right\} + c = \max \{ 0.18899 \cdot 4603^{1/2}; 0.6 \cdot 4603 / 663 \} + 0 = 12.822 \text{ мм}$				
		12.822 мм ≤ 35 мм				
		Заключение: <b>Условие прочности выполнено.</b>				
		<b>Расчет давления испытаний</b>				
		<b>Фланец:</b>				
		Пробное давление при гидравлическом испытании, при работе элемента под внутренним давлением:				
					90651-20600-AM-02-220 PP	Лист
						302
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата		



Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №					

Этот документ является собственностью "НЕФТЕХИМПРОЕКТ" и не подлежит копированию и распространению без его согласия

НЕФТЕХИМПРОЕКТ NEFTECHIMPROEKT		МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ			РР																															
$P_{гр} = 1.25 \cdot p \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]_t} = 1.25 \cdot 1.6313 \cdot 164.5 / 144 = 2.3295 \text{ МПа}$ <p>Пробное давление при гидравлическом испытании, при работе элемента под внутренним давлением:</p> $P_{гр} = 1.25 \cdot p \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]_t} = 1.25 \cdot 1.6313 \cdot 164.5 / 144 = 2.3295 \text{ МПа}$ <p><b>Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)</b></p> <p><b>Условия нагружения при испытаниях:</b></p> <p>Расчётное осевое сжимающее усилие, F: 0 Н</p> <p>Расчётный изгибающий момент, M: 0 Н·м</p> <p>Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 2.2696 МПа</p> <p>По ГОСТ 34233.1-2017 расчёт на прочность при испытаниях допускается не проводить, если выполнено условие:</p> $P_{исп} < 1.35 \cdot P_{расч} \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]}$ $1.35 \cdot P_{расч} \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]} = 1.35 \cdot 1.6313 \cdot 164.5 / 144 = 2.5158 \text{ МПа} \geq 2.2696 \text{ МПа}$ <p><b>Расчёт фланца по ГОСТ 34233.4-2017:</b></p> <p><b>Свойства материала болтов (шпилек)</b></p> <p>Температура болтов (шпилек), t<sub>б</sub>: 20 °С</p> <p>Допускаемые напряжения для материала 35Х Крепеж при температуре 20 °С (условия гидроиспытаний):</p> <p>[σ]<sup>20<sub>б</sub></sup> = 230 МПа</p> <p>Модуль продольной упругости для материала 35Х Крепеж при температуре T = 20 °С:</p> <p>E<sup>20<sub>б</sub></sup> = 2.18·10<sup>5</sup> МПа</p> <p>Коэффициент линейного расширения для материала 35Х Крепеж при температуре T = 20 °С:</p> <p>α<sup>20<sub>б</sub></sup> = 0.134·10<sup>-4</sup>/°С</p> <p><b>Свойства материала смежного элемента фланца 2 Люк-лаз (М1)</b></p> <p>Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Лист при температуре 20 °С (условия гидроиспытаний):</p> $[\sigma]_{20ш} = \frac{R_{eL20}}{n_T} = 300 / 1.1 = 272.73 \text{ МПа}$ <p><b>Свойства материала фланца</b></p> <p>Температура фланца (кольца), t<sub>ф</sub>: 20 °С</p> <p>Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре 20 °С (условия гидроиспытаний):</p> $[\sigma]_{20ф} = \frac{R_{eL20}}{n_T} = 245 / 1.1 = 222.73 \text{ МПа}$ <p>Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре T = 20 °С:</p> <p>E<sup>20<sub>ф</sub></sup> = 1.99·10<sup>5</sup> МПа</p> <p>Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре T = 20 °С:</p> <p>α<sup>20<sub>ф</sub></sup> = 0.116·10<sup>-4</sup>/°С</p> <p><b>Характеристики прокладки:</b></p> <table><tr><td>Тип и материал прокладки</td><td>Коэффициент m</td><td>Удельное давление обжатия q<sub>обж</sub>, МПа</td><td>Допускаемое удельное давление [q], МПа</td><td>Коэффициент обжатия K</td><td>Условный модуль сжатия E<sub>n</sub>, МПа</td></tr><tr><td colspan="6"></td></tr></table> <table><tr><td>Изм.</td><td>Лист</td><td>№ док.</td><td>Подп.</td><td>Дата</td><td rowspan="3">90651-20600-AM-02-220 РР</td><td>Лист</td></tr><tr><td colspan="5"></td><td>303</td></tr><tr><td colspan="5"></td><td></td></tr></table>						Тип и материал прокладки	Коэффициент m	Удельное давление обжатия q <sub>обж</sub> , МПа	Допускаемое удельное давление [q], МПа	Коэффициент обжатия K	Условный модуль сжатия E <sub>n</sub> , МПа							Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	90651-20600-AM-02-220 РР	Лист						303						
Тип и материал прокладки	Коэффициент m	Удельное давление обжатия q <sub>обж</sub> , МПа	Допускаемое удельное давление [q], МПа	Коэффициент обжатия K	Условный модуль сжатия E <sub>n</sub> , МПа																															
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	90651-20600-AM-02-220 РР	Лист																														
						303																														



$$s_3 = \kappa \cdot s_0 = 1.3613 \cdot 12 = 16.336 \text{ мм}$$

$$e = 0.5 \cdot (D_{\text{ст}} - D - s_3) = 0.5 \cdot (651 - 600 - 16.336) = 17.332 \text{ мм}$$

### Расчёт нагрузок:

Равнодействующая давления :

$$Q_d = 0.785 \cdot D_{\text{ст}}^2 \cdot p = 0.785 \cdot 651^2 \cdot 2.2696 = 7.5506 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Усилие на прокладке в рабочих условиях, необходимое для обеспечения герметичности:

$$R_{\pi} = \pi \cdot D_{\text{ст}} \cdot b_0 \cdot m \cdot |p| = 3.1416 \cdot 651 \cdot 12 \cdot 3 \cdot |2.2696| = 1.671 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Усилие, необходимое для смятия прокладки при затяжке :

$$P_{\text{обж}} = 0.5 \cdot \pi \cdot D_{\text{ст}} \cdot b_0 \cdot q_{\text{обж}} = 0.5 \cdot 3.1416 \cdot 651 \cdot 12 \cdot 69 = 8.467 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

### Расчетная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для герметизации в условиях испытаний (нагрузки + давление)

Рабочая длина болта (шпильки):

$$L_{\text{б0}} = h + s_2 + h_{\pi} = 41 + 45 + 3.2 = 89.2 \text{ мм}$$

Эффективная длина шпильки :

$$L_{\text{б}} = L_{\text{б0}} + 0.56 \cdot d = 89.2 + 0.56 \cdot 20 = 100.4 \text{ мм}$$

Площадь сечения шпильки (по внутреннему диаметру резьбы):

$$f_{\text{б}} = 225 \text{ мм}^2$$

Податливость шпилек :

$$y_{\text{б}} = \frac{L_{\text{б}}}{E_{\text{б}}^{20} \cdot f_{\text{б}} \cdot n} = \frac{100.4}{(2.18 \cdot 10^5 \cdot 225 \cdot 32)} = 0.63965 \cdot 10^{-7} \text{ мм/Н}$$

$$\eta = y_{\pi} + y_{\text{б}} + y'_{\text{ф}} \cdot b'^{1/2} + y''_{\text{ф}} \cdot b''^{1/2} = 0 + 0.63965 \cdot 10^{-7} + 0.38789 \cdot 10^{-5} \cdot 24.5^2 + 0.55138 \cdot 10^{-5} \cdot 24.5^2 = 0.16237 \cdot 10^{-6} \text{ мм/Н}$$

Коэффициенты жёсткости для фланцевого соединения с крышкой, нагруженного внутренним давлением:

$$\alpha = 1 - \frac{y_{\pi} - (y'_{\text{ф}} \cdot e + y'_{\text{кр}} \cdot b) \cdot b}{\eta} = 1 - (0 - (0.55138 \cdot 10^{-5} \cdot 17.332 + 0.38789 \cdot 10^{-5} \cdot 24.5) \cdot 24.5) / 0.16237 \cdot 10^{-6} = 1.502$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре T = 20 °С:

$$E_{\text{кр}}^{20} = 1.99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Угловая податливость фланца, нагруженного внешним изгибающим моментом:

$$y_{\text{фМ}} = \left( \frac{\pi}{4} \right)^3 \cdot \frac{D_{\text{б}}}{E^{20} \cdot D_{\text{н}} \cdot h^3} = (3.1416 / 4)^3 \cdot 700 / (1.99 \cdot 10^5 \cdot 740 \cdot 41^3) = 0.19145 \cdot 10^{-5} \text{ °/Н·м}$$

Угловая податливость фланца, нагруженного внешним изгибающим моментом:

$$y_{\text{фМ}} = \left( \frac{\pi}{4} \right)^3 \cdot \frac{D_{\text{б}}}{E^{20} \cdot D_{\text{н}} \cdot h^3} = (3.1416 / 4)^3 \cdot 700 / (1.99 \cdot 10^5 \cdot 740 \cdot 45^3) = 0.1448 \cdot 10^{-5} \text{ °/Н·м}$$

Коэффициенты жёсткости для фланцевого соединения, нагруженного внешним изгибающим моментом:

$$\alpha_{\text{М}} = \frac{y_{\text{б}} + y'_{\text{фМ}} \cdot b' \cdot \left( b' + e' - \frac{e'^2}{D_{\text{ст}}} \right) + y''_{\text{фМ}} \cdot b'' \cdot \left( b'' + e'' - \frac{e''^2}{D_{\text{ст}}} \right)}{y_{\text{б}} + y_{\pi} \cdot \left( \frac{D_{\text{б}}}{D_{\text{ст}}} \right)^2 + y'_{\text{фМ}} \cdot b'^{1/2} + y''_{\text{фМ}} \cdot b''^{1/2}}$$

$$= [0.63965 \cdot 10^{-7} + 0.19145 \cdot 10^{-5} \cdot 24.5 \cdot (24.5 + 24.5 - 24.5^2 / 651) + 0.1448 \cdot 10^{-5} \cdot 24.5 \cdot (24.5 + 17.332 - 17.332^2 / 651)] / [0.63965 \cdot 10^{-7} + 0 \cdot (700 / 651)^2 + 0.19145 \cdot 10^{-5} \cdot 24.5^2 + 0.19145 \cdot 10^{-5} \cdot 24.5^2] = 1.2999$$

$$P_{\text{б1}} = \alpha \cdot (Q_d + F) + R_{\pi} + \frac{4 \cdot \alpha_{\text{М}} \cdot |M|}{D_{\text{ст}}} = 1.502 \cdot (7.5506 \cdot 10^5 + 0) + 1.671 \cdot 10^5 + 4 \cdot 1.2999 \cdot |0| / 651 = 1.3012 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

### Расчетная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для герметизации в условиях испытаний (только давление)

$$P_{\text{б1}} = \alpha \cdot (Q_d + F) + R_{\pi} + \frac{4 \cdot \alpha_{\text{М}} \cdot |M|}{D_{\text{ст}}} = 1.502 \cdot (7.5506 \cdot 10^5 + 0) + 1.671 \cdot 10^5 + 4 \cdot 1.2999 \cdot |0| / 651 = 1.3012 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Взам. инв. №	
Подп. и дата	
Инв. № подл.	
Изм.	Лист
Лист	№ док.
Подп.	Дата
90651-20600-AM-02-220 РР	
305	

Суммарная площадь сечения болтов (шпилек) по внутреннему диаметру резьбы или сечению наименьшего диаметра:

$$A_E = n \cdot f_E = 32 \cdot 225 = 7200 \text{ mm}^2$$

Расчётная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для обжатия прокладки и минимального начального натяжения болтов:

$$P_{\Sigma} = \max \{ P_{\text{огж}}, 0,4 \cdot A_6 \cdot [\sigma]_6^{20} \} = \max \{ 8,467 \cdot 10^5; 0,4 \cdot 7200 \cdot 230 = 6,624 \cdot 10^5 \} = 8,467 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

### Расчёт без учета стесненности температурных деформаций

### Расчёт болтов(шпилек):

Коэффициент увеличения допускаемых напряжений при затяжке:  $\xi = 1.2$

Коэффициент условий работы:  $K_{\text{вр}} = 1.35$

Коэффициент условий затяжки:  $K_{y3} = 1$

Допускаемые напряжения для болтов (шпилек) при затяжке :

$$[\sigma]_6^{\text{пр}} = \xi \cdot K_{\text{вн}} \cdot K_{\text{вз}} \cdot K_{\text{вп}} \cdot [\sigma]_6^{20} = 1.2 \cdot 1.35 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 230 = 372.6 \text{ МПа}$$

**Расчетная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для герметизации в условиях испытаний (только давление)**

$$P_{61} = \alpha \cdot (Q_{\pi} + F) + R_{\pi} + \frac{4 \cdot \alpha_M \cdot |M|}{D_{\pi}} \quad 1.502 \cdot (7.5506 \cdot 10^5 + 0) + 1.671 \cdot 10^5 + 4 \cdot 1.2999 \cdot |0| / 651 = 1.3012 \cdot 10^6 \text{ H}$$

Болтовая нагрузка в условиях затяжки :

$$P_{\varepsilon}^{\pi} = \max\{P_{\varepsilon_1}; P_{\varepsilon_2}\} = \max\{1.3012 \cdot 10^6; 8.467 \cdot 10^5\} = 1.3012 \cdot 10^6 \text{ H}$$

Условие прочности при затяжке:

$$\sigma_{61} = \frac{P_6^m}{A_6} \leq [\sigma]_6^m$$

$$\sigma_{61} = \frac{P_6^M}{A_6} = 1.3012 \cdot 10^6 / 7200 = 180.72 \text{ МПа}$$

Крутящий момент при затяжке болтов (шпилек) без смазки при  $\sigma_{b1} \geq 120$  МПа выбирается по рис. Л.1 ГОСТ 34233.4-2017:

$$M_{kp} = 176.85 \text{ H}\cdot\text{M}$$

При наличии смазки величина  $M_{кр}$  снижается на 25% и составляет  $0.75 \cdot M_{кр} = 132.64 \text{ Н} \cdot \text{м}$

$$180.72 \text{ МПа} \leq 372.6 \text{ МПа, Условие прочности выполнено.}$$

Допускаемые напряжения для болтов (шпилек) при рабочих условиях:

$$[\sigma]_6^p = K_{yp} \cdot K_{y3} \cdot K_{yT} \cdot [\sigma]_6 = 1.35 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 230 = 310.5 \text{ МПа}$$

Болтовая нагрузка в рабочих условиях :

$$P_6^P = P_6^M + (1 - \alpha) \cdot (Q_{\pi} + F) + \frac{4 \cdot (1 - \alpha_{\pi}) \cdot |M|}{D_{\pi}} = 1.3012 \cdot 10^6 + (1 - 1.502) \cdot (7.5506 \cdot 10^5 + 0) + 4 \cdot (1 - 1.2999) \cdot |0| / 651 = 9.2217 \cdot 10^5 \text{ H}$$

Условие прочности в рабочих условиях:

$$\sigma_{62} = \frac{P_6^P}{A_6} \leq [\sigma]_6^P$$

$$\sigma_{62} = \frac{P_6^p}{A_6} = 9.2217 \cdot 10^5 / 7200 = 128.08 \text{ МПа}$$

$128.08 \text{ МПа} \leq 310.5 \text{ МПа}$ , Условие прочности выполнено.

### Расчёт второго фланца:

Коэффициент, учитывающий изгиб тарелки фланца между шпильками:

$$C_F = \max \left\{ 1, \sqrt{\frac{\frac{\pi \cdot D_6}{n}}{2 \cdot d + \frac{6 \cdot h}{m + 0.5}}} \right\} = \max \{1; (3.1416 \cdot 700 / 32 / (2 \cdot 20 + 6 \cdot 45 / (3 + 0.5)))^{1/2}\} = 1$$

Взам. инв. №	Условие прочности в рабочих условиях:			
	$\sigma_{62} = \frac{P_6^P}{A_6} \leq [\sigma]_6^P$ $\sigma_{62} = \frac{P_6^P}{A_6} = 9.2217 \cdot 10^5 / 7200 = 128.08 \text{ МПа}$			
Подп. и дата	128.08 МПа ≤ 310.5 МПа, <b>Условие прочности выполнено.</b>			
	<b>Расчёт второго фланца:</b> Коэффициент, учитывающий изгиб тарелки фланца между шпильками:			
Инв. № подл.	$C_F = \max \left\{ 1; \sqrt{\frac{\frac{\pi \cdot D_6}{n}}{2 \cdot d + \frac{6 \cdot h}{m + 0.5}}} \right\} = \max \{ 1; (3.1416 \cdot 700 / 32 / (2 \cdot 20 + 6 \cdot 45 / (3 + 0.5)))^{1/2} \} = 1$			
	90651-20600-AM-02-220 PP			
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при затяжке :

$$M^M = C_F \cdot P_g^M \cdot b = 1 \cdot 1.3012 \cdot 10^6 \cdot 24.5 = 31879 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$D^* = (D + 2 \cdot c)_{\text{при}} (D + 2 \cdot c) \geq 20 \cdot (s_1 - c) = 600 + 2 \cdot 0 \text{ при } (600 + 2 \cdot 0) \geq 20 \cdot (24 - 0) = 600 \text{ мм}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении  $s_1$ :

$$\sigma_1^M = \frac{M^M}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D^*} = 31879 / (0.97462 \cdot (24 - 3)^2 \cdot 600) = 123.62 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в условиях затяжки :

$$\sigma_R^M = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + 1_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot 1_0 \cdot D} \cdot M^M = (1.33 \cdot 0.84262 \cdot 45 + 84.853) / (0.97462 \cdot 45^2 \cdot 84.853 \cdot 600) \cdot 31879 = 42.921 \text{ МПа}$$

$$\beta_Y = \frac{1}{K - 1} \cdot \left( 0.69 + 5.72 \cdot \frac{K^2 \cdot \lg K}{K^2 - 1} \right) = 1 / (1.2333 - 1) \cdot (0.69 + 5.72 \cdot 1.2333^2 \cdot \lg 1.2333 / (1.2333^2 - 1)) = 9.4746$$

$$\beta_Z = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = (1.2333^2 + 1) / (1.2333^2 - 1) = 4.838$$

Окружное напряжение в тарелке в условиях затяжки :

$$\sigma_T^M = \frac{\beta_Y \cdot M^M}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^M = 9.4746 \cdot 31879 / (45^2 \cdot 600) - 4.838 \cdot 42.921 = 40.942 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении  $s_1$  (п. 8.5.1):

$$\max \{ |\sigma_1^M + \sigma_R^M|; |\sigma_1^M + \sigma_T^M| \} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{м}}^{20}$$

$$\max \{ |\sigma_1^M + \sigma_R^M|; |\sigma_1^M + \sigma_T^M| \} = \max \{ |123.62 + 42.921|; |123.62 + 40.942| \} = 166.54 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_{\text{м}}^{20} = 1.5 \cdot [\sigma]_{\text{ф}}^{20} = 1.5 \cdot 222.73 = 334.09 \text{ МПа}$$

$$K = \frac{D_{\text{н}}}{D} = 740 / 600 = 1.2333$$

Коэффициент учета размеров тарелки фланца:  $K_S = 1$

$$K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{м}}^{20} = 1 \cdot 1 \cdot 334.09 = 334.09 \text{ МПа}$$

166.54 МПа ≤ 334.09 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Приведенная нагрузка от внешней силы и момента :

$$Q_{\text{FM}}^+ = F + \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{ст}}} = 0 + 4 \cdot |0| / 651 = 0 \text{ Н}$$

$$Q_{\text{FM}}^- = F - \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{ст}}} = 0 - 4 \cdot |0| / 651 = 0 \text{ Н}$$

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при рабочих условиях:

$$M^P = C_F \cdot \max \{ P_g^P \cdot b + (Q_{\text{д}} + Q_{\text{FM}}) \cdot e; |Q_{\text{д}} + Q_{\text{FM}}| \cdot e \} = \frac{1 \cdot \max \{ 9.2217 \cdot 10^5 \cdot 24.5 + (7.5506 \cdot 10^5 + 0) \cdot 17.332; |7.5506 \cdot 10^5 + 0| \cdot 17.332 \}}{0} = 35680 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_1$ :

$$\sigma_1^P = \frac{M^P}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D^*} = 35680 / (0.97462 \cdot (24 - 3)^2 \cdot 600) = 138.36 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в рабочих условиях :

$$\sigma_R^P = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + 1_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot 1_0 \cdot D} \cdot M^P = (1.33 \cdot 0.84262 \cdot 45 + 84.853) / (0.97462 \cdot 45^2 \cdot 84.853 \cdot 600) \cdot 35680 = 48.039 \text{ МПа}$$

Окружное напряжение в тарелке в рабочих условиях :

$$\sigma_T^P = \frac{\beta_Y \cdot M^P}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^P = 9.4746 \cdot 35680 / (45^2 \cdot 600) - 4.838 \cdot 48.039 = 45.823 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_1$  (+):

Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	90651-20600-AM-02-220 PP	Лист 307
<div>Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении S<sub>1</sub>:</div> <div><math display="block">\sigma_1^P = \frac{M^P}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D} = 35680 / (0.97462 \cdot (24 - 3)^2 \cdot 600) = 138.36 \text{ МПа}</math></div> <div>Радиальное напряжение в тарелке в рабочих условиях :</div> <div><math display="block">\sigma_R^P = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + 1_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot 1_0 \cdot D} \cdot M^P = (1.33 \cdot 0.84262 \cdot 45 + 84.853) / (0.97462 \cdot 45^2 \cdot 84.853 \cdot 600) \cdot 35680 = 48.039 \text{ МПа}</math></div> <div>Окружное напряжение в тарелке в рабочих условиях :</div> <div><math display="block">\sigma_T^P = \frac{\beta_Y \cdot M^P}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^P = 9.4746 \cdot 35680 / (45^2 \cdot 600) - 4.838 \cdot 48.039 = 45.823 \text{ МПа}</math></div> <div>Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении S<sub>1</sub> (+):</div>						
Взам. инв. №	Подп. и дата					

$$\sigma_{\text{Iмм}}^{P+} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_1}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = (0.785 \cdot 600^2 \cdot 2.2696 + 0 + 4 \cdot 0 / (600 + 24)) / (3.1416 \cdot (600 + 24) \cdot (24 - 3)) = 15.58 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_1$  (п. 8.5.1):

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{Iмм}}^{P+} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{Iмм}}^{P+} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{\text{Iмм}}^{P+} \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{м}}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{Iмм}}^{P+} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{Iмм}}^{P+} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{\text{Iмм}}^{P+} \right| \right\} = \max \{ |138.36 - 15.58 + 48.039|; |138.36 - 15.58 + 45.823|; |138.36 + 15.58| \} = 170.81 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_{\text{м}} = 1.5 \cdot [\sigma]_{\text{ф}} = 1.5 \cdot 222.73 = 334.09 \text{ МПа}$$

$$K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{м}} = 1 \cdot 1 \cdot 334.09 = 334.09 \text{ МПа}$$

170.81 МПа ≤ 334.09 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_1$  (-):

$$\sigma_{\text{Iмм}}^{P-} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F - \frac{4 \cdot M}{D + s_1}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = (0.785 \cdot 600^2 \cdot 2.2696 + 0 - 4 \cdot 0 / (600 + 24)) / (3.1416 \cdot (600 + 24) \cdot (24 - 3)) = 15.58 \text{ МПа}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{Iмм}}^{P-} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{Iмм}}^{P-} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{\text{Iмм}}^{P-} \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{м}}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{Iмм}}^{P-} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{Iмм}}^{P-} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{\text{Iмм}}^{P-} \right| \right\} = \max \{ |138.36 - 15.58 + 48.039|; |138.36 - 15.58 + 45.823|; |138.36 + 15.58| \} = 170.81 \text{ МПа}$$

170.81 МПа ≤ 334.09 МПа, **Условие прочности выполнено.**

$$f = \max \left\{ \frac{C_{36}}{1 + A}; 1.0 \right\} = \max \{ 3.0182 / (1 + 1); 1.0 \} = 1.5091$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_0^M = f \cdot \sigma_1^M = 1.5091 \cdot 123.62 = 186.55 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении  $s_0$  (п. 8.5.2):

$$\sigma_0^M \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R^{20}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_R^{20} = 3 \cdot [\sigma]_{\text{ф}}^{20} = 3 \cdot 222.73 = 668.18 \text{ МПа}$$

$$1.3 \cdot [\sigma]_R^{20} = 1.3 \cdot 668.18 = 868.64 \text{ МПа}$$

186.55 МПа ≤ 868.64 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_0^P = f \cdot \sigma_1^P = 1.5091 \cdot 138.36 = 208.79 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_0$  (+):

$$\sigma_{0\text{мм}}^{P+} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_0}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = (0.785 \cdot 600^2 \cdot 2.2696 + 0 + 4 \cdot 0 / (600 + 12)) / (3.1416 \cdot (600 + 12) \cdot (12 - 3)) = 37.066 \text{ МПа}$$

Окружное мембранное напряжение от действия давления во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_{0\text{мо}}^P = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s_0 - c)} = 2.2696 \cdot 600 / (2 \cdot (12 - 3)) = 75.654 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0\text{мм}}^{P+} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0\text{мо}}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0\text{мм}}^{P+} - \sigma_{0\text{мо}}^P) \right| \right\} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0\text{мм}}^{P+} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0\text{мо}}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0\text{мм}}^{P+} - \sigma_{0\text{мо}}^P) \right| \right\} = \max \{ |208.79 \pm 37.066|; |0.3 \cdot 208.79 \pm 75.654|; |0.7 \cdot 208.79 \pm (37.066 - 75.654)| \} = 245.86 \text{ МПа}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_R = 3 \cdot [\sigma]_{\text{ф}} = 3 \cdot 222.73 = 668.18 \text{ МПа}$$

Взам. инв. №					
Подп. и дата					
Инв. № подл.					
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	

90651-20600-AM-02-220 РР

Лист

308

$$1.3 \cdot [\sigma]_R = 1.3 \cdot 668.18 = 868.64 \text{ МПа}$$

245.86 МПа ≤ 868.64 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_0$  (–):

$$\sigma_{0mm}^{P-} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F - \frac{4 \cdot M}{D + s_0}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = (0.785 \cdot 600^2 \cdot 2.2696 + 0 - 4 \cdot 0 / (600 + 12)) / (3.1416 \cdot (600 + 12) \cdot (12 - 3)) = 37.066 \text{ МПа}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P-} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P-} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P-} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P-} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} = \max \{ 208.79 \pm 37.066; |0.3 \cdot 208.79 \pm 75.654|; |0.7 \cdot 208.79 \pm (37.066 - 75.654)| \} = 245.86 \text{ МПа}$$

245.86 МПа ≤ 868.64 МПа, **Условие прочности выполнено.**

**Расчет в сечении  $s_0$  в рабочих условиях (п. 8.5.5 ГОСТ 34233.4-2017):**

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $S_0$ :

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0mo}^P \right|; \left| \sigma_{0mm}^P \right| \right\} \leq [\sigma]_\Phi$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0mo}^P \right|; \left| \sigma_{0mm}^P \right| \right\} = \max \{ 75.654; |37.066| \} = 75.654 \text{ МПа}$$

75.654 МПа ≤ 222.73 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Условие статической прочности при затяжке для тарелок:

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_T^M \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_\Phi^{20}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_T^M \right| \right\} = \max \{ 42.921; |40.942| \} = 42.921 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_\Phi^{20} = 1 \cdot 222.73 = 222.73 \text{ МПа}$$

42.921 МПа ≤ 222.73 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Условие статической прочности в рабочих условиях для тарелок:

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_T^P \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_\Phi$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_T^P \right| \right\} = \max \{ 48.039; |45.823| \} = 48.039 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_\Phi = 1 \cdot 222.73 = 222.73 \text{ МПа}$$

48.039 МПа ≤ 222.73 МПа, **Условие прочности выполнено.**

### Жёсткость фланца:

Угол поворота фланца в рабочих условиях:

$$\Theta = M^P \cdot y_\Phi \cdot \frac{E^{20}}{E} = 35680 \cdot 0.55138 \cdot 10^{-5} \cdot 1.99 \cdot 10^5 / 1.99 \cdot 10^5 = 0.19673^\circ$$

Допускаемый угол поворота фланца:

$$[\Theta] = 0.39391^\circ$$

Коэффициент увеличения допускаемого угла поворота фланцев:  $K_\Theta = 1.3$

Условие выполнения жесткости фланцев:

$$\Theta \leq K_\Theta \cdot [\Theta] = 1.3 \cdot 0.39391 = 0.51208^\circ$$

**Условие жёсткости выполнено.**

### Расчёт крышки на прочность и устойчивость по ГОСТ 34233.2-2017

**Днища и крышки с дополнительным краевым моментом, нагруженные избыточным давлением**

$$\psi = \frac{P^P}{Q_\Delta} = 9.2217 \cdot 10^5 / 7.5506 \cdot 10^5 = 1.2213$$

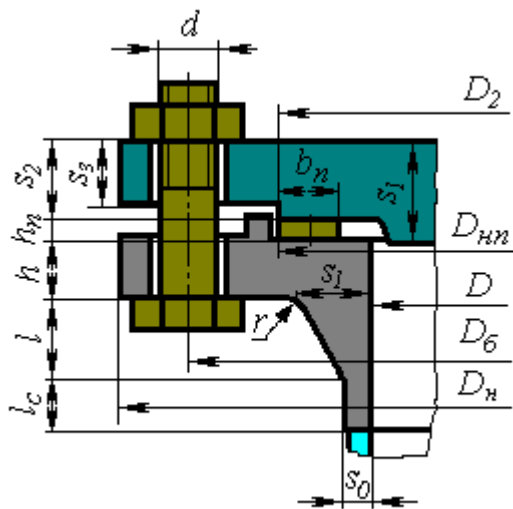
$$K_6 = 0.41 \cdot \sqrt{\frac{1 + 3 \cdot \psi \cdot \left( \frac{D_3}{D_{сП}} - 1 \right)}{\frac{D_3}{D_{сП}}}} = 0.41 \cdot \sqrt{\frac{1 + 3 \cdot 1.2213 \cdot (700 / 651 - 1)}{(700 / 651)}} = 0.44659$$

Взам. инв. №	Подп. и дата	Инв. № подл.	Коэффициент увеличения допускаемого угла поворота фланцев: $K_{\Theta} = 1.3$				
			Условие выполнения жесткости фланцев : $\Theta \leq K_{\Theta} \cdot [\Theta] = 1.3 \cdot 0.39391 = 0.51208^{\circ}$				
Условие жёсткости выполнено.							
Расчёт крышки на прочность и устойчивость по ГОСТ 34233.2-2017							
Днища и крышки с дополнительным краевым моментом, нагруженные избыточным давлением							
$\psi = \frac{P_6^P}{Q_d} = 9.2217 \cdot 10^5 / 7.5506 \cdot 10^5 = 1.2213$							
$K_6 = 0.41 \cdot \sqrt{\frac{1 + 3 \cdot \psi \cdot \left( \frac{D_3}{D_{сП}} - 1 \right)}{\frac{D_3}{D_{сП}}}} = 0.41 \cdot [(1 + 3 \cdot 1.2213 \cdot (700 / 651 - 1)) / (700 / 651)]^{1/2} = 0.44659$							
					90651-20600-AM-02-220 РР		Лист
							309
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата			





Крышка плоская Р1



Исходные данные

Параметры крышки:

Материал:	09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ
	8479 Поковка
Толщина стенки, $s_1$ :	18 мм
Прибавка для компенсации коррозии и эрозии, $s_1$ :	3 мм
Прибавка для компенсации минусового допуска, $s_2$ :	0 мм
Прибавка технологическая, $s_3$ :	0 мм
Сумма прибавок к расчётной толщине стенки, $s$ :	3 мм
Толщина в месте прокладки, $s_2$ :	17 мм
Толщина вне уплотнения, $s_3$ :	13 мм
Наименьший диаметр наружной утоненной части, $D_2$ :	87 мм
Наружный диаметр крышки, $D_n$ :	160 мм
Коэффициент прочности сварного шва :	
$\varphi_p = 1$	

Параметры фланца:

Тип фланца:	Приварные встык
Исполнение фланца:	Выступ-впадина
Диаметр болтовой окружности, $D_6$ :	125мм
Материал фланца:	09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ
	8479 Поковка
Смежный элемент:	Измерение давления
	(Р1)
Материал смежного элемента:	09Г2С Труба
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, $s$ :	3 мм
Длина конической части втулки, $l$ :	20 мм
Длина цилиндрической части втулки, $l_c$ :	8 мм
Толщина цилиндрической части втулки, $s_0$ :	5 мм

Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата
Изм. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №		

90651-20600-AM-02-220 РР

Лист

311

Этот документ является собственностью "НЕФТЕХИМПРОЕКТ" и не подлежит копированию и распространению без его согласия

НЕФТЕХИМПРОЕКТ NEFTECHIMPROEKT		МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ			РР	
<div>Толщина конической части втулки, s<sub>1</sub>:14 мм</div> <div>Радиус перехода, r:5 мм</div> <div>Шпильки:<div>Материал:35Х Крепеж</div><div>Наружный диаметр, d:16 мм</div><div>Количество, n:4</div><div>Контроль затяжки:Нет</div></div> <div>Прокладка:<div>Материал прокладки:Спирально-навитая с лентой из нержавеющей стали</div><div>Толщина, h<sub>п</sub>:3.2 мм</div><div>Наружный диаметр, D<sub>н.п</sub>:87 мм</div><div>Ширина, b<sub>п</sub>:6.5 мм</div></div> <div>Расчёт в рабочих условиях</div> <div>Условия нагружения:<div>Расчётное осевое сжимающее усилие, F:0 Н</div><div>Расчётный изгибающий момент, M:0 Н·м</div><div>Расчётное внутреннее избыточное давление, p:1.6 МПа</div></div> <div>Расчёт фланца по ГОСТ 34233.4-2017:</div> <div>Свойства материала болтов (шпилек)<div>Температура болтов (шпилек), t<sub>б</sub>:97 °C</div><div>Допускаемые напряжения для материала 35Х Крепеж при температуре 97 °C (рабочие условия): [σ]<sub>6</sub>= 230 МПа</div><div>Модуль продольной упругости для материала 35Х Крепеж при температуре T = 97 °C: E<sub>6</sub>= 2.1511·10<sup>5</sup> МПа</div><div>Коэффициент линейного расширения для материала 35Х Крепеж при температуре T = 97 °C: α<sub>6</sub>= 0.134·10<sup>-4</sup>/°C</div><div>Допускаемые напряжения для материала 35Х Крепеж при температуре 20 °C (рабочие условия): [σ]<sup>20</sup><sub>6</sub>= 230 МПа</div><div>Модуль продольной упругости для материала 35Х Крепеж при температуре T = 20 °C: E<sup>20</sup><sub>6</sub>= 2.18·10<sup>5</sup> МПа</div></div> <div>Свойства материала смежного элемента фланца 2 Измерение давления (Р1)<div>Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Труба при температуре 100 °C (рабочие условия): [σ]<sub>ш</sub>= 160 МПа</div><div>Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Труба при температуре 20 °C (рабочие условия): [σ]<sup>20</sup><sub>ш</sub>= 183 МПа</div></div> <div>Свойства материала фланца<div>Температура фланца (кольца), t<sub>ф</sub>:100 °C</div><div>Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре 100 °C (рабочие условия): [σ]<sub>ф</sub>= 144 МПа</div><div>Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре T = 100 °C: E<sub>ф</sub>= 1.91·10<sup>5</sup> МПа</div><div>Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре T = 100 °C: α<sub>ф</sub>= 0.116·10<sup>-4</sup>/°C</div><div>Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре 20 °C (рабочие условия):</div></div>						
Взам. инв. №	Подп. и дата	Инв. № подл.				Лист
			90651-20600-AM-02-220 РР			
			312			
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата		

90651-20600-AM-02-220 РР\_изм.0.docx

Формат А4

$[\sigma]^{20}_{\phi} = 164.5 \text{ МПа}$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре T = 20 °C:

$E^{20}_{\phi} = 1.99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

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: 
$$\begin{cases} b_0 = b_{\text{пр}} & \text{при } b_{\text{пр}} \leq 15.0 \text{ мм} \\ b_0 = 3.8 \cdot \sqrt{b_{\text{пр}}} & \text{при } b_{\text{пр}} > 15.0 \text{ мм} \end{cases}$$

Рабочий наружный диаметр прокладки :

$D_{\text{прф}} = 87 \text{ мм}$

Средний эффективный диаметр прокладки:

$D_{\text{ст}} = D_{\text{прф}} - b_0 = 87 - 6.5 = 80.5 \text{ мм}$

Для металлических и асбометаллических прокладок  $y_n = 0$ .

Расчётные параметры болтов (шпилек):

Рабочая длина болта (шпильки):

$L_{\text{б0}} = h + s_2 + h_{\text{ш}} = 17 + 17 + 3.2 = 37.2 \text{ мм}$

Площадь сечения шпильки (по внутреннему диаметру резьбы):

$f_6 = 144 \text{ мм}^2$

Эффективная длина шпильки :

$L_6 = L_{\text{б0}} + 0.56 \cdot d = 37.2 + 0.56 \cdot 16 = 46.16 \text{ мм}$

Податливость шпилек :

$y_6 = \frac{L_6}{E_6^{20} \cdot f_6 \cdot n} = \frac{46.16}{(2.18 \cdot 10^5 \cdot 144 \cdot 4)} = 0.36761 \cdot 10^{-6} \text{ мм/Н}$

Расчётные параметры крышки:

$K_{\text{кр}} = \frac{D_{\text{н}}}{D_{\text{ст}}} = 160 / 80.5 = 1.9876$

$$x_{\text{кр}} = \frac{0.67 \cdot [K_{\text{кр}}^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg K_{\text{кр}}) - 1]}{(K_{\text{кр}} - 1) \cdot [K_{\text{кр}}^2 - 1 + (1.857 \cdot K_{\text{кр}}^2 + 1) \cdot \left(\frac{s_1}{s_2}\right)^3]} = \frac{(0.67 \cdot (1.9876^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg(1.9876)) - 1)) / ((1.9876 - 1) \cdot [1.9876^2 - 1 + (1.857 \cdot 1.9876^2 + 1) \cdot (18 / 17)^3])}{1} = 0.68799$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре T = 20 °C:

$E^{20}_{\text{кр}} = 1.99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Угловая податливость крышки :

$y_{\text{кр}} = \frac{x_{\text{кр}}}{E_{\text{кр}}^{20} \cdot s_2^3} = 0.68799 / (1.99 \cdot 10^5 \cdot 17^3) = 0.40318 \cdot 10^{-4} \text{ °/Н·м}$

Расчётные параметры фланца:

$l_0 = \sqrt{D \cdot s_0} = (48 \cdot 5)^{1/2} = 15.492 \text{ мм}$

$\beta_F = 0.65336$

Взам. инв. №	
Подп. и дата	
Инв. № подл.	
Изм.	Лист
Лист	313
№ док.	
Подп.	
Дата	
90651-20600-AM-02-220 РР	

$$K = \frac{D_K}{D} = 160 / 48 = 3.3333$$

$$\beta_T = \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg K) - 1}{(1.05 + 1.945 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} = (3.3333^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg 3.3333) - 1) / ((1.05 + 1.945 \cdot 3.3333^2) \cdot (3.3333 - 1)) = 1.1307$$

$$\beta_V = 0.074265$$

$$\beta_U = \frac{K^2 (1 + 8.55 \cdot \lg K) - 1}{1.36 \cdot (K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = (3.3333^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg 3.3333) - 1) / (1.36 \cdot (3.3333^2 - 1) \cdot (3.3333 - 1)) = 1.8633$$

$$\lambda = \frac{\beta_F \cdot h + 1_0}{\beta_T \cdot 1_0} + \frac{\beta_V \cdot h^3}{\beta_U \cdot 1_0 \cdot s_0^2} = (0.65336 \cdot 17 + 15.492) / (1.1307 \cdot 15.492) + 0.074265 \cdot 17^3 / (1.8633 \cdot 15.492 \cdot 5^2) = 2.0242$$

Угловая податливость фланца при затяжке:

$$y_\Phi = \frac{0.91 \cdot \beta_V}{E^{20} \cdot \lambda \cdot s_0^2 \cdot 1_0} = 0.91 \cdot 0.074265 / (1.99 \cdot 10^5 \cdot 2.0242 \cdot 5^2 \cdot 15.492) = 0.2482 \cdot 10^{-4} \text{ °/Н·м}$$

Плечи моментов:

$$a = 0$$

$$b = 0.5 \cdot (D_B - D_{сп}) = 0.5 \cdot (125 - 80.5) = 22.25 \text{ мм}$$

$$\beta = \frac{s_1}{s_0} = 14/5 = 2.8$$

$$x = \frac{1}{\sqrt{D \cdot s_0}} = 20 / (48 \cdot 5)^{1/2} = 1.291$$

$$\kappa = 1 + (\beta - 1) \cdot \frac{x}{x + \frac{1 + \beta}{4}} = 1 + (2.8 - 1) \cdot 1.291 / (1.291 + (1 + 2.8) / 4) = 2.0369$$

Эквивалентная толщина втулки для фланца, приварного встык:

$$s_3 = \kappa \cdot s_0 = 2.0369 \cdot 5 = 10.185 \text{ мм}$$

$$e = 0.5 \cdot (D_{сп} - D - s_3) = 0.5 \cdot (80.5 - 48 - 10.185) = 11.158 \text{ мм}$$

### Расчёт нагрузок:

Равнодействующая давления :

$$Q_d = 0.785 \cdot D_{сп}^2 \cdot p = 0.785 \cdot 80.5^2 \cdot 1.6 = 8139.2 \text{ Н}$$

Усилие на прокладке в рабочих условиях, необходимое для обеспечения герметичности:

$$R_{п} = \pi \cdot D_{сп} \cdot b_0 \cdot m \cdot |p| = 3.1416 \cdot 80.5 \cdot 6.5 \cdot 3 \cdot |1.6| = 7890.4 \text{ Н}$$

Усилие, необходимое для смятия прокладки при затяжке :

$$P_{обж} = 0.5 \cdot \pi \cdot D_{сп} \cdot b_0 \cdot q_{обж} = 0.5 \cdot 3.1416 \cdot 80.5 \cdot 6.5 \cdot 69 = 56712 \text{ Н}$$

**Расчетная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для герметизации в рабочих условиях (нагрузки + давление, без учета температурной нагрузки)**

$$\eta = y_{п} + y_6 + y_{\Phi}^{I} \cdot b^{I/2} + y_{\Phi}^{II} \cdot b^{II/2} = 0 + 0.36761 \cdot 10^{-6} + 0.40318 \cdot 10^{-4} \cdot 22.25 + 0.2482 \cdot 10^{-4} \cdot 22.25^2 = 0.93044 \cdot 10^{-6} \text{ мм/Н}$$

Коэффициенты жёсткости для фланцевого соединения с крышкой, нагруженного внутренним давлением:

$$\alpha = 1 - \frac{y_{п} - (y_{\Phi} \cdot e + y_{кр} \cdot b) \cdot b}{\eta} = 1 - (0 - (0.2482 \cdot 10^{-4} \cdot 11.158 + 0.40318 \cdot 10^{-4} \cdot 22.25) \cdot 22.25) / 0.93044 \cdot 10^{-6} = 1.49$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре T = 20 °C:

$$E^{20_{кр}} = 1.99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Угловая податливость фланца, нагруженного внешним изгибающим моментом:

$$y_{\Phi M} = \left( \frac{\pi}{4} \right)^3 \cdot \frac{D_B}{E^{20} \cdot D_K \cdot h^3} = (3.1416 / 4)^3 \cdot 125 / (1.99 \cdot 10^5 \cdot 160 \cdot 17^3) = 0.22181 \cdot 10^{-4} \text{ °/Н·м}$$

Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	90651-20600-AM-02-220 РР	Лист			
							314		
Ив. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	усл. нагрузках (нагрузки + давление, без учета температурной нагрузки)						
			$\eta = y_{\pi} + y_{\epsilon} + y'_{\Phi} \cdot b'^{1/2} + y''_{\Phi} \cdot b''^{1/2} = 0 + 0.36761 \cdot 10^{-6} + 0.40318 \cdot 10^{-4} \cdot 22.25^2 + 0.2482 \cdot 10^{-4} \cdot 22.25^2 = 0.93044 \cdot 10^{-6} \text{ мм/Н}$						
			Коэффициенты жёсткости для фланцевого соединения с крышкой, нагруженного внутренним давлением:						
			$\alpha = 1 - \frac{y_{\pi} - (y'_{\Phi} \cdot e + y''_{\Phi} \cdot b) \cdot b}{\eta} = 1 - (0 - (0.2482 \cdot 10^{-4} \cdot 11.158 + 0.40318 \cdot 10^{-4} \cdot 22.25) \cdot 22.25) / 0.93044 \cdot 10^{-6} = 1.49$						
			Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре T = 20 °С:						
E <sup>20</sup> <sub>кр</sub> = 1.99·10 <sup>5</sup> МПа									
Угловая податливость фланца, нагруженного внешним изгибающим моментом:									
$y_{\Phi M} = \left(\frac{\pi}{4}\right)^3 \cdot \frac{D_{\Phi}^3}{E^{20} \cdot D_{\Phi} \cdot h^3} = (3.1416 / 4)^3 \cdot 125 / (1.99 \cdot 10^5 \cdot 160 \cdot 17^3) = 0.22181 \cdot 10^{-4} \text{ °/Н·м}$									

Угловая податливость фланца, нагруженного внешним изгибающим моментом:

$$y_{\Phi M} = \left( \frac{\pi}{4} \right)^3 \cdot \frac{D_{\Phi}}{E^{20} \cdot D_{\Phi} \cdot h^3} = (3.1416/4)^3 \cdot 125 / (1.99 \cdot 10^5 \cdot 160 \cdot 17^3) = 0.22181 \cdot 10^{-4} \text{ °/Н·м}$$

Коэффициенты жёсткости для фланцевого соединения, нагруженного внешним изгибающим моментом:

$$\alpha_M = \frac{y_{\Phi} + y'_{\Phi M} \cdot b' \cdot \left( b' + e' - \frac{e'^2}{D_{\Phi}} \right) + y''_{\Phi M} \cdot b'' \cdot \left( b'' + e'' - \frac{e''^2}{D_{\Phi}} \right)}{y_{\Phi} + y_{\pi} \cdot \left( \frac{D_{\Phi}}{D_{\pi}} \right)^2 + y'_{\Phi M} \cdot b'^2 + y''_{\Phi M} \cdot b''^2}$$
$$= [0.36761 \cdot 10^{-6} + 0.22181 \cdot 10^{-4} \cdot 22.25 \cdot (22.25 + 22.25 - 22.25^2 / 80.5) + 0.22181 \cdot 10^{-4} \cdot 22.25 \cdot (22.25 + 11.158 - 11.158^2 / 80.5)] / [0.36761 \cdot 10^{-6} + 0 \cdot (125 / 80.5)^2 + 0.22181 \cdot 10^{-4} \cdot 22.25^2 + 0.22181 \cdot 10^{-4} \cdot 22.25^2]$$
$$= 1.2949$$

$$P_{\Phi 1} = \alpha \cdot (Q_{\Phi} + F) + R_{\pi} + \frac{4 \cdot \alpha_M \cdot |M|}{D_{\Phi}} = 1.49 \cdot (8139.2 + 0) + 7890.4 + 4 \cdot 1.2949 \cdot |0| / 80.5 = 20018 \text{ Н}$$

**Расчетная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для герметизации в рабочих условиях (только давление, без учета температурной нагрузки)**

$$P_{\Phi 1} = \alpha \cdot (Q_{\Phi} + F) + R_{\pi} + \frac{4 \cdot \alpha_M \cdot |M|}{D_{\Phi}} = 1.49 \cdot (8139.2 + 0) + 7890.4 + 4 \cdot 1.2949 \cdot |0| / 80.5 = 20018 \text{ Н}$$

Суммарная площадь сечения болтов (шпилек) по внутреннему диаметру резьбы или сечению наименьшего диаметра:

$$A_{\Phi} = n \cdot f_{\Phi} = 4 \cdot 144 = 576 \text{ мм}^2$$

Расчётная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для обжатия прокладки и минимального начального натяжения болтов:

$$P_{\Phi 2} = \max \{ P_{\text{обж}}, 0.4 \cdot A_{\Phi} \cdot [\sigma]_{\Phi}^{20} \} = \max \{ 56712; 0.4 \cdot 576 \cdot 230 = 52992 \} = 56712 \text{ Н}$$

**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 :

$$[\sigma]_{\Phi}^M = \xi \cdot K_{\text{уп}} \cdot K_{\text{уз}} \cdot K_{\text{ут}} \cdot [\sigma]_{\Phi}^{20} = 1.2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 230 = 276 \text{ МПа}$$

**Расчетная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для герметизации в рабочих условиях (только давление, без учета температурной нагрузки)**

$$P_{\Phi 1} = \alpha \cdot (Q_{\Phi} + F) + R_{\pi} + \frac{4 \cdot \alpha_M \cdot |M|}{D_{\Phi}} = 1.49 \cdot (8139.2 + 0) + 7890.4 + 4 \cdot 1.2949 \cdot |0| / 80.5 = 20018 \text{ Н}$$

Болтовая нагрузка в условиях затяжки :

$$P_{\Phi}^M = \max \{ P_{\Phi 1}; P_{\Phi 2} \} = \max \{ 20018; 56712 \} = 56712 \text{ Н}$$

Условие прочности при затяжке:

$$\sigma_{\Phi 1} = \frac{P_{\Phi}^M}{A_{\Phi}} \leq [\sigma]_{\Phi}^M$$

$$\sigma_{\Phi 1} = \frac{P_{\Phi}^M}{A_{\Phi}} = 56712 / 576 = 98.459 \text{ МПа}$$

Крутящий момент при затяжке болтов (шпилек) без смазки при  $\sigma_{\Phi 1} < 120 \text{ МПа}$ :

$$M_{\text{кр}} = 0.3 \cdot \frac{P_{\Phi}^M \cdot d}{n} = 0.3 \cdot 56712 \cdot 16 / 4 = 68.055 \text{ Н·м}$$

При наличии смазки величина  $M_{\text{кр}}$  снижается на 25% и составляет  $0.75 \cdot M_{\text{кр}} = 51.041 \text{ Н·м}$

$98.459 \text{ МПа} \leq 276 \text{ МПа}$ , **Условие прочности выполнено.**

Взам. инв. №	Болтовая нагрузка в условиях затяжки : $P_6^M = \max\{P_{61}; P_{62}\} = \max\{20018; 56712\} = 56712 \text{ Н}$					
	Условие прочности при затяжке: $\sigma_{61} = \frac{P_6^M}{A_6} \leq [\sigma]_6^M$ $\sigma_{61} = \frac{P_6^M}{A_6} = 56712 / 576 = 98.459 \text{ МПа}$					
Подп. и дата	Крутящий момент при затяжке болтов (шпилек) без смазки при $\sigma_{61} < 120 \text{ МПа}$ : $M_{кр} = 0.3 \cdot \frac{P_6^M \cdot d}{n} = 0.3 \cdot 56712 \cdot 16 / 4 = 68.055 \text{ Н}\cdot\text{м}$					
	При наличии смазки величина $M_{кр}$ снижается на 25% и составляет $0.75 \cdot M_{кр} = 51.041 \text{ Н}\cdot\text{м}$ $98.459 \text{ МПа} \leq 276 \text{ МПа}$ , <b>Условие прочности выполнено.</b>					
Инв. № подл.					90651-20600-AM-02-220 РР	Лист
	Изм.	Лист	№ док.	Подп.		Дата

Допускаемые напряжения для болтов (шпилек) при рабочих условиях:

$$[\sigma]_6^P = K_{ур} \cdot K_{уз} \cdot K_{ут} \cdot [\sigma]_6 = 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 230 = 230 \text{ МПа}$$

Болтовая нагрузка в рабочих условиях:

$$P_6^P = P_6^M + (1 - \alpha) \cdot (Q_d + F) + \frac{4 \cdot (1 - \alpha_m) \cdot |M|}{D_{от}} = 56712 + (1 - 1.49) \cdot (8139.2 + 0) + 4 \cdot (1 - 1.2949) \cdot |0| / 80.5 = 52724 \text{ Н}$$

Условие прочности в рабочих условиях:

$$\sigma_{62} = \frac{P_6^P}{A_6} \leq [\sigma]_6^P$$

$$\sigma_{62} = \frac{P_6^P}{A_6} = 52724 / 576 = 91.535 \text{ МПа}$$

91.535 МПа ≤ 230 МПа, **Условие прочности выполнено.**

### Расчёт второго фланца:

Коэффициент, учитывающий изгиб тарелки фланца между шпильками:

$$C_F = \max \left\{ 1; \sqrt{\frac{\frac{\pi \cdot D_6}{n} \cdot \frac{1}{2 \cdot d + \frac{6 \cdot h}{m + 0.5}}}} \right\} = \max \{1; (3.1416 \cdot 125 / 4 / (2 \cdot 16 + 6 \cdot 17 / (3 + 0.5)))^{1/2}\} = 1.2671$$

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при затяжке:

$$M^M = C_F \cdot P_6^M \cdot b = 1.2671 \cdot 56712 \cdot 22.25 = 1599 \text{ Н·м}$$

$$f = \max \left\{ \frac{C_{36}}{1 + A}; 1.0 \right\} = \max \{0.44314 / (1 + 1.8); 1.0\} = 1$$

$$D^* = D + c + s_1 \text{ при } (D + 2 \cdot c) < 20 \cdot (s_1 - c) \text{ и } f = 1 = 48 + 0 + 14 \text{ при } 48 < 20 \cdot (14 - 0) \text{ и } f = 1 = 62 \text{ мм}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении  $s_1$ :

$$\sigma_1^M = \frac{M^M}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D^*} = 1599 / (2.0242 \cdot (14 - 3)^2 \cdot 62) = 105.3 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в условиях затяжки:

$$\sigma_R^M = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + 1.0}{\lambda \cdot h^2 \cdot 1.0 \cdot D} \cdot M^M = (1.33 \cdot 0.65336 \cdot 17 + 15.492) / (2.0242 \cdot 17^2 \cdot 15.492 \cdot 48) \cdot 1599 = 111.24 \text{ МПа}$$

$$\beta_Y = \frac{1}{K - 1} \cdot \left( 0.69 + 5.72 \cdot \frac{K^2 \cdot \lg K}{K^2 - 1} \right) = 1 / (3.3333 - 1) \cdot (0.69 + 5.72 \cdot 3.3333^2 \cdot \lg 3.3333 / (3.3333^2 - 1)) = 1.7043$$

$$\beta_Z = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = (3.3333^2 + 1) / (3.3333^2 - 1) = 1.1978$$

Окружное напряжение в тарелке в условиях затяжки:

$$\sigma_T^M = \frac{\beta_Y \cdot M^M}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^M = 1.7043 \cdot 1599 / (17^2 \cdot 48) - 1.1978 \cdot 111.24 = 63.195 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении  $s_1$  (п. 8.5.1):

$$\max \{ |\sigma_1^M + \sigma_R^M|; |\sigma_1^M + \sigma_T^M| \} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{м}}^{20}$$

$$\max \{ |\sigma_1^M + \sigma_R^M|; |\sigma_1^M + \sigma_T^M| \} = \max \{ |105.3 + 111.24|; |105.3 + 63.195| \} = 216.54 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_{\text{м}}^{20} = 1.5 \cdot [\sigma]_{\text{ф}}^{20} = 1.5 \cdot 164.5 = 246.75 \text{ МПа}$$

$$K = \frac{D_H}{D} = 160 / 48 = 3.3333$$

Коэффициент учета размеров тарелки фланца:  $K_S = 1.2$

$$K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{м}}^{20} = 1.2 \cdot 1 \cdot 246.75 = 296.1 \text{ МПа}$$

90651-20600-AM-02-220 РР

Лист

316

216.54 МПа ≤ 296.1 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Приведенная нагрузка от внешней силы и момента :

$$Q_{FM}^+ = F + \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{сп}}} = 0 + 4 \cdot |0| / 80.5 = 0 \text{ Н}$$

$$Q_{FM}^- = F - \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{сп}}} = 0 - 4 \cdot |0| / 80.5 = 0 \text{ Н}$$

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при рабочих условиях:

$$M^P = C_F \cdot \max \{ p_E^P \cdot b + (Q_{\text{д}} + Q_{FM}) \cdot e; |Q_{\text{д}} + Q_{FM}| \cdot e \} = \frac{1.2671 \cdot \max \{ 52724 \cdot 22.25 + (8139.2 + 0) \cdot 11.158; |8139.2 + 0| \cdot 11.158 \}}{11.158} = 1601.6 \text{ Н·м}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении s<sub>1</sub>:

$$\sigma_1^P = \frac{M^P}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D} = 1601.6 / (2.0242 \cdot (14 - 3)^2 \cdot 62) = 105.47 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в рабочих условиях :

$$\sigma_R^P = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + 1_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot 1_0 \cdot D} \cdot M^P = (1.33 \cdot 0.65336 \cdot 17 + 15.492) / (2.0242 \cdot 17^2 \cdot 15.492 \cdot 48) \cdot 1601.6 = 111.43 \text{ МПа}$$

Окружное напряжение в тарелке в рабочих условиях :

$$\sigma_T^P = \frac{\beta_Y \cdot M^P}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^P = 1.7043 \cdot 1601.6 / (17^2 \cdot 48) - 1.1978 \cdot 111.43 = 63.299 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении S<sub>1</sub> (+):

$$\sigma_{\text{лмм}}^{P+} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_1}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = (0.785 \cdot 48^2 \cdot 1.6 + 0 + 4 \cdot 0 / (48 + 14)) / (3.1416 \cdot (48 + 14) \cdot (14 - 3)) = 1.3506 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении s<sub>1</sub> (п. 8.5.1):

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^{P+} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^{P+} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{\text{лмм}}^{P+} \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{ж}}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^{P+} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^{P+} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{\text{лмм}}^{P+} \right| \right\} = \frac{\max \{ |105.47 - 1.3506 + 111.43|; |105.47 - 1.3506 + 63.299|; |105.47 + 1.3506| \}}{|105.47 + 1.3506|} = 215.55 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_{\text{ж}} = 1.5 \cdot [\sigma]_{\text{ф}} = 1.5 \cdot 144 = 216 \text{ МПа}$$

$$K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{ж}} = 1.2 \cdot 1 \cdot 216 = 259.2 \text{ МПа}$$

215.55 МПа ≤ 259.2 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении S<sub>1</sub> (-):

$$\sigma_{\text{лмм}}^{P-} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F - \frac{4 \cdot M}{D + s_1}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = (0.785 \cdot 48^2 \cdot 1.6 + 0 - 4 \cdot 0 / (48 + 14)) / (3.1416 \cdot (48 + 14) \cdot (14 - 3)) = 1.3506 \text{ МПа}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^{P-} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^{P-} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{\text{лмм}}^{P-} \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{ж}}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^{P-} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{лмм}}^{P-} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{\text{лмм}}^{P-} \right| \right\} = \frac{\max \{ |105.47 - 1.3506 + 111.43|; |105.47 - 1.3506 + 63.299|; |105.47 + 1.3506| \}}{|105.47 + 1.3506|} = 215.55 \text{ МПа}$$

215.55 МПа ≤ 259.2 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении s<sub>0</sub>:

$$\sigma_0^M = f \cdot \sigma_1^M = 1 \cdot 105.3 = 105.3 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении s<sub>0</sub> (п. 8.5.2):

$$\sigma_0^M \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R^{20}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_R^{20} = 3 \cdot [\sigma]_{\text{ф}}^{20} = 3 \cdot 164.5 = 493.5 \text{ МПа}$$

$$1.3 \cdot [\sigma]_R^{20} = 1.3 \cdot 493.5 = 641.55 \text{ МПа}$$

105.3 МПа ≤ 641.55 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении s<sub>0</sub>:

Взам. инв. №	$\max \left\{ \left  \sigma_1^P - \sigma_{\text{lim}}^{P-} + \sigma_R^P \right ; \left  \sigma_1^P - \sigma_{\text{lim}}^{P-} + \sigma_T^P \right ; \left  \sigma_1^P + \sigma_{\text{lim}}^{P-} \right  \right\} = \frac{\max \{  105.47 - 1.3506 + 111.43 ;  105.47 - 1.3506 + 63.299 ;  105.47 + 1.3506  \}}{1} = 215.55 \text{ МПа}$				
	215.55 МПа ≤ 259.2 МПа, <b>Условие прочности выполнено.</b>				
Подп. и дата	Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении s <sub>0</sub> : $\sigma_0^{\pi} = f \cdot \sigma_1^{\pi} = 1 * 105.3 = 105.3 \text{ МПа}$				
	Условие статической прочности при затяжке в сечении s <sub>0</sub> (п. 8.5.2): $\sigma_0^{\pi} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R^{20}$ <p>Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):</p> $[\sigma]_R^{20} = 3 \cdot [\sigma]_{\Phi}^{20} = 3 * 164.5 = 493.5 \text{ МПа}$ $1.3 \cdot [\sigma]_R^{20} = 1.3 * 493.5 = 641.55 \text{ МПа}$ <p>105.3 МПа ≤ 641.55 МПа, <b>Условие прочности выполнено.</b></p>				
Инв. № подл.	Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении s <sub>0</sub> :				
					90651-20600-AM-02-220 РР
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	Лист
					317

$$\sigma_0^P = f \cdot \sigma_1^P = 1 \cdot 105.47 = 105.47 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_0$  (+):

$$\sigma_{0mm}^{P+} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_0}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = \frac{(0.785 \cdot 48^2 \cdot 1.6 + 0 + 4 \cdot 0 / (48 + 5)) / (3.1416 \cdot (48 + 5) \cdot (5 - 3))}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = 8.6899 \text{ МПа}$$

Окружное мембранное напряжение от действия давления во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_0$ :

$$\sigma_{0mo}^P = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s_0 - c)} = \frac{1.6 \cdot 48 / (2 \cdot (5 - 3))}{2 \cdot (s_0 - c)} = 19.2 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $S_0$ :

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P+} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P+} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P+} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P+} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} = \max \{105.47 \pm 8.6899; |0.3 \cdot 105.47 \pm 19.2|; |0.7 \cdot 105.47 \pm (8.6899 - 19.2)|\} = 114.16 \text{ МПа}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_R = 3 \cdot [\sigma]_\Phi = 3 \cdot 144 = 432 \text{ МПа}$$

$$1.3 \cdot [\sigma]_R = 1.3 \cdot 432 = 561.6 \text{ МПа}$$

114.16 МПа ≤ 561.6 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_0$  (-):

$$\sigma_{0mm}^{P-} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F - \frac{4 \cdot M}{D + s_0}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = \frac{(0.785 \cdot 48^2 \cdot 1.6 + 0 - 4 \cdot 0 / (48 + 5)) / (3.1416 \cdot (48 + 5) \cdot (5 - 3))}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = 8.6899 \text{ МПа}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P-} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P-} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P-} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm (\sigma_{0mm}^{P-} - \sigma_{0mo}^P) \right| \right\} = \max \{105.47 \pm 8.6899; |0.3 \cdot 105.47 \pm 19.2|; |0.7 \cdot 105.47 \pm (8.6899 - 19.2)|\} = 114.16 \text{ МПа}$$

114.16 МПа ≤ 561.6 МПа, **Условие прочности выполнено.**

**Расчет в сечении  $s_0$  в рабочих условиях (п. 8.5.5 ГОСТ 34233.4-2017):**

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $S_0$ :

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0mo}^P \right|; \left| \sigma_{0mm}^P \right| \right\} \leq [\sigma]_\Phi$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0mo}^P \right|; \left| \sigma_{0mm}^P \right| \right\} = \max \{19.2; |8.6899|\} = 19.2 \text{ МПа}$$

19.2 МПа ≤ 144 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Условие статической прочности при затяжке для тарелок:

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_T^M \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_\Phi^{20}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_T^M \right| \right\} = \max \{111.24; |63.195|\} = 111.24 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_\Phi^{20} = 1 \cdot 164.5 = 164.5 \text{ МПа}$$

111.24 МПа ≤ 164.5 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Условие статической прочности в рабочих условиях для тарелок:

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_T^P \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_\Phi$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_T^P \right| \right\} = \max \{111.43; |63.299|\} = 111.43 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_\Phi = 1 \cdot 144 = 144 \text{ МПа}$$

111.43 МПа ≤ 144 МПа, **Условие прочности выполнено.**

**Жёсткость фланца:**

Угол поворота фланца в рабочих условиях:

$$\varpi = M^P \cdot y_\Phi \cdot \frac{E^{20}}{E} = 1601.6 \cdot 0.2482 \cdot 10^{-4} \cdot 1.99 \cdot 10^5 / 1.91 \cdot 10^5 = 0.041417^\circ$$

Взам. инв. №	Подп. и дата	$K_T \cdot [\sigma]_{\Phi}^{20} = 1 \cdot 164.5 = 164.5 \text{ МПа}$ 111.24 МПа ≤ 164.5 МПа, <b>Условие прочности выполнено.</b> Условие статической прочности в рабочих условиях для тарелок: $\max \left\{ \left  \sigma_R^P \right ; \left  \sigma_T^P \right  \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_{\Phi}$ $\max \left\{ \left  \sigma_R^P \right ; \left  \sigma_T^P \right  \right\} = \max \{ 111.43;   63.299   \} = 111.43 \text{ МПа}$ $K_T \cdot [\sigma]_{\Phi} = 1 \cdot 144 = 144 \text{ МПа}$ 111.43 МПа ≤ 144 МПа, <b>Условие прочности выполнено.</b> <b>Жёсткость фланца:</b> Угол поворота фланца в рабочих условиях: $\Theta = M^P \cdot y_{\Phi} \cdot \frac{E^{20}}{E} = 1601.6 \cdot 0.2482 \cdot 10^{-4} \cdot 1.99 \cdot 10^5 / 1.91 \cdot 10^5 = 0.041417^\circ$				
		Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата

90651-20600-AM-02-220 РР					Лист
					318



Допускаемый угол поворота фланца:

$$[\text{H}] = 0.34377^\circ$$

Коэффициент увеличения допускаемого угла поворота фланцев:  $K_{\Theta} = 1$

Условие выполнения жесткости фланцев:

$$\Theta \leq K_m \cdot [\Theta] = 1 * 0.34377 = 0.34377^\circ$$

**Условие жёсткости выполнено.**

### Расчёт с учетом стесненности температурных деформаций

### Расчёт болтов(шпилек):

Допускаемые напряжения для болтов (шпилек) при затяжке :

$$[\sigma]_6^{\text{II}} = \xi \cdot K_{\text{вн}} \cdot K_{\text{вз}} \cdot K_{\text{вп}} \cdot [\sigma]_6^{20} = 1.2 * 1 * 1 * 1.3 * 230 = 358.8 \text{ МПа}$$

Расчетная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для герметизации в рабочих условиях (только давление, с учетом температурной нагрузки)

$$\gamma = \frac{1}{y_{\pi} + y_{\phi} \cdot \frac{E_{\phi}^{20}}{E_{\phi}} + \left( y_{\psi} \cdot \frac{E_{\psi}^{20}}{E_{\psi}} + y_{xp} \cdot \frac{E_{xp}^{20}}{E_{xp}} \right) \cdot b^2} = \frac{1 / (0 + 0.36761 \cdot 10^{-6} \cdot 2.18 \cdot 10^5 / 2.1511 \cdot 10^5 + (0.2482 \cdot 10^{-4} \cdot 1.99 \cdot 10^5 / 1.91 \cdot 10^5 + 0.40318 \cdot 10^{-4} \cdot 1.99 \cdot 10^5 / 1.91 \cdot 10^5) \cdot 22.25^2)}{=} = 1.0428 \cdot 10^6 \text{ H/MM}$$

Нагрузка от температурных деформаций :

$$Q_t = \gamma \cdot \left( \begin{aligned} &(\alpha'_{\Phi} \cdot h' + \alpha'_{III} \cdot h'_{III}) \cdot (t_{\Phi 1} - 20^{\circ}C) + \\ &+ (\alpha''_{\Phi} \cdot h'' + \alpha''_{III} \cdot h''_{III}) \cdot (t_{\Phi 2} - 20^{\circ}C) - \\ &- \alpha_{\varepsilon} \cdot (h' + h'' + h'_{III} + h''_{III}) \cdot (t_{\varepsilon} - 20^{\circ}C) \end{aligned} \right)$$

$$= 1.0428 \cdot 10^6 \cdot ((0.116 \cdot 10^{-4} \cdot 17 + 0 \cdot 0) \cdot (100 - 20^{\circ}C) + ((0.116 \cdot 10^{-4} \cdot 17 + 0 \cdot 0) \cdot (100 - 20^{\circ}C) - 0.134 \cdot 10^{-4} \cdot (17 + 17 + 0 + 0) \cdot (97 - 20^{\circ}C))$$

$$= (-3680.3) \text{ H}$$

$$P_{\epsilon 1} = \max \left\{ \begin{array}{l} \alpha \cdot (Q_{\pi} + F) + R_{\pi} + \frac{4 \cdot \alpha_M \cdot |M|}{D_{\pi}} \\ \alpha \cdot (Q_{\pi} + F) + R_{\pi} + \frac{4 \cdot \alpha_M \cdot |M|}{D_{\pi}} - Q_t \end{array} \right\} = \max \left\{ \begin{array}{l} 1.49 \cdot (8139.2 + 0) + 7890.4 + 4 \cdot 1.2949 \cdot |0| / 80.5 = 200181.49 \\ (8139.2 + 0) + 7890.4 + 4 \cdot 1.2949 \cdot |0| / 80.5 - (-3680.3) = 23698 \end{array} \right\} = 23698 \text{ H}$$

Условие прочности при затяжке:

$$\sigma_{61} = \frac{P_6^M}{A_6} \leq [\sigma]_6^M$$

$$\sigma_{\delta 1} = \frac{P_{\delta}^M}{A_{\delta}} = 56712 / 576 = 98.459 \text{ МПа}$$

Крутящий момент при затяжке болтов (шпилек) без смазки при  $\sigma_{61} < 120$  МПа:

$$M_{xp} = 0.3 \cdot \frac{P_6^m \cdot d}{n} = 0.3 \cdot 56712 \cdot 16 / 4 = 68.055 \text{ H} \cdot \text{M}$$

При наличии смазки величина  $M_{кр}$  снижается на 25% и составляет  $0.75 \cdot M_{кр} = 51.041 \text{ Н} \cdot \text{м}$

$98.459 \text{ МПа} \leq 358.8 \text{ МПа}$ , **Условие прочности выполнено.**

Допускаемые напряжения для болтов (шпилек) при рабочих условиях:

$$[\sigma]_6^p = K_{\text{вп}} \cdot K_{\text{вз}} \cdot K_{\text{вт}} \cdot [\sigma]_6 = 1 \cdot 1 \cdot 1.3 \cdot 230 = 299 \text{ МПа}$$

Болтовая нагрузка в рабочих условиях :

$$P_6^P = P_6^M + (1 - \alpha) \cdot (Q_{\pi} + F) + Q_t + \frac{4 \cdot (1 - \alpha_M) \cdot |M|}{D_{\pi}} = 56712 + (1 - 1.49) \cdot (8139.2 + 0) + (-3680.3) + 4 \cdot (1 - 1.2949) \cdot |0| / 80.5 = 49044 \text{ H}$$

Условие прочности в рабочих условиях:

$$\sigma_{62} = \frac{P_6^P}{A_6} \leq [\sigma]_6^P$$

$$\sigma_{62} = \frac{P_6^P}{A_6} = 49044 / 576 = 85.146 \text{ МПа}$$

Взам. инв. №		При наличии смазки величина $M_{кр}$ снижается на 25% и составляет $0.75 \cdot M_{кр} = 51.041 \text{ Н} \cdot \text{м}$ $98.459 \text{ МПа} \leq 358.8 \text{ МПа}$ , <b>Условие прочности выполнено.</b> Допускаемые напряжения для болтов (шпилек) при рабочих условиях: $[\sigma]_6^P = K_{yp} \cdot K_{yz} \cdot K_{yt} \cdot [\sigma]_6 = 1 \cdot 1 \cdot 1.3 \cdot 230 = 299 \text{ МПа}$				
		Болтовая нагрузка в рабочих условиях : $P_6^P = P_6^M + (1 - \alpha) \cdot (Q_d + F) + Q_t + \frac{4 \cdot (1 - \alpha_m) \cdot  M }{D_{от}} = 56712 + (1 - 1.49) \cdot (8139.2 + 0) + (-3680.3) + 4 \cdot (1 - 1.2949) \cdot  0  / 80.5 = 49044 \text{ Н}$ Условие прочности в рабочих условиях: $\sigma_{62} = \frac{P_6^P}{A_6} \leq [\sigma]_6^P$ $\sigma_{62} = \frac{P_6^P}{A_6} = 49044 / 576 = 85.146 \text{ МПа}$				
Подп. и дата		<div>90651-20600-AM-02-220 PP</div>				
Инв. № подл.		Изм.			Лист	319
		№ док.	Подп.	Дата		

85.146 МПа ≤ 299 МПа, **Условие прочности выполнено.**

**Расчетная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для герметизации в рабочих условиях (нагрузки + давление, с учетом температурной нагрузки)**

$$P_{\epsilon 1} = \max \left\{ \begin{array}{l} \alpha \cdot (Q_{\text{д}} + F) + R_{\text{п}} + \frac{4 \cdot \alpha_{\text{м}} \cdot |M|}{D_{\text{ст}}} \\ \alpha \cdot (Q_{\text{д}} + F) + R_{\text{п}} + \frac{4 \cdot \alpha_{\text{м}} \cdot |M|}{D_{\text{ст}}} - Q_{\text{т}} \end{array} \right\} = \max \left\{ \begin{array}{l} 1.49 \cdot (8139.2 + 0) + 7890.4 + 4 \cdot 1.2949 \cdot |0| / 80.5 = 200181.49 \\ (8139.2 + 0) + 7890.4 + 4 \cdot 1.2949 \cdot |0| / 80.5 - (-3680.3) = 23698 \end{array} \right\} = 23698 \text{ Н}$$

Условие прочности при затяжке:

$$\sigma_{\epsilon 1} = \frac{P_{\epsilon}^{\text{м}}}{A_{\epsilon}} \leq [\sigma]_{\epsilon}^{\text{м}}$$

$$\sigma_{\epsilon 1} = \frac{P_{\epsilon}^{\text{м}}}{A_{\epsilon}} = 56712 / 576 = 98.459 \text{ МПа}$$

Крутящий момент при затяжке болтов (шпилек) без смазки при  $\sigma_{\epsilon 1} < 120 \text{ МПа}$ :

$$M_{\text{кр}} = 0.3 \cdot \frac{P_{\epsilon}^{\text{м}} \cdot d}{n} = 0.3 \cdot 56712 \cdot 16 / 4 = 68.055 \text{ Н·м}$$

При наличии смазки величина  $M_{\text{кр}}$  снижается на 25% и составляет  $0.75 \cdot M_{\text{кр}} = 51.041 \text{ Н·м}$

### Расчёт второго фланца:

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при затяжке :

$$M^{\text{м}} = C_{\text{F}} \cdot P_{\epsilon}^{\text{м}} \cdot b = 1.2671 \cdot 56712 \cdot 22.25 = 1599 \text{ Н·м}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении  $s_1$ :

$$\sigma_1^{\text{м}} = \frac{M^{\text{м}}}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D} = 1599 / (2.0242 \cdot (14 - 3)^2 \cdot 62) = 105.3 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в условиях затяжки :

$$\sigma_R^{\text{м}} = \frac{1.33 \cdot \beta_{\text{F}} \cdot h + 1.0 \cdot M^{\text{м}}}{\lambda \cdot h^2 \cdot 1.0 \cdot D} = (1.33 \cdot 0.65336 \cdot 17 + 15.492) / (2.0242 \cdot 17^2 \cdot 15.492 \cdot 48) \cdot 1599 = 111.24 \text{ МПа}$$

Окружное напряжение в тарелке в условиях затяжки :

$$\sigma_T^{\text{м}} = \frac{\beta_{\text{Y}} \cdot M^{\text{м}}}{h^2 \cdot D} - \beta_{\text{Z}} \cdot \sigma_R^{\text{м}} = 1.7043 \cdot 1599 / (17^2 \cdot 48) - 1.1978 \cdot 111.24 = 63.195 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении  $s_1$  (п. 8.5.1):

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^{\text{м}} + \sigma_R^{\text{м}} \right|; \left| \sigma_1^{\text{м}} + \sigma_T^{\text{м}} \right| \right\} \leq K_{\text{S}} \cdot K_{\text{T}} \cdot [\sigma]_{\text{м}}^{20}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^{\text{м}} + \sigma_R^{\text{м}} \right|; \left| \sigma_1^{\text{м}} + \sigma_T^{\text{м}} \right| \right\} = \max \{ 105.3 + 111.24; | 105.3 + 63.195 | \} = 216.54 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_{\text{м}}^{20} = 1.5 \cdot [\sigma]_{\text{Ф}}^{20} = 1.5 \cdot 164.5 = 246.75 \text{ МПа}$$

Коэффициент учета размеров тарелки фланца:  $K_{\text{S}} = 1.2$

$$K_{\text{S}} \cdot K_{\text{T}} \cdot [\sigma]_{\text{м}}^{20} = 1.2 \cdot 1.3 \cdot 246.75 = 384.93 \text{ МПа}$$

216.54 МПа ≤ 384.93 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Приведенная нагрузка от внешней силы и момента :

$$Q_{\text{FM}}^+ = F + \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{ст}}} = 0 + 4 \cdot |0| / 80.5 = 0 \text{ Н}$$

$$Q_{\text{FM}}^- = F - \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{ст}}} = 0 - 4 \cdot |0| / 80.5 = 0 \text{ Н}$$

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при рабочих условиях:

$$M^{\text{P}} = C_{\text{F}} \cdot \max \left\{ P_{\epsilon}^{\text{P}} \cdot b + (Q_{\text{д}} + Q_{\text{FM}}) \cdot e; |Q_{\text{д}} + Q_{\text{FM}}| \cdot e \right\} = 1.2671 \cdot \max \{ 49044 \cdot 22.25 + (8139.2 + 0) \cdot 11.158; |8139.2 + 0| \cdot 11.158 \} = 1497.8 \text{ Н·м}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_1$ :

Взам. инв. №					
Подп. и дата					
Инв. № подл.					
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	90651-20600-AM-02-220 РР
					Лист
					320

$$\sigma_1^P = \frac{M^P}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D} = 1497.8 / (2.0242 \cdot (14 - 3)^2 \cdot 62) = 98.637 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в рабочих условиях :

$$\sigma_R^P = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + l_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot l_0 \cdot D} \cdot M^P = (1.33 \cdot 0.65336 \cdot 17 + 15.492) / (2.0242 \cdot 17^2 \cdot 15.492 \cdot 48) \cdot 1497.8 = 104.21 \text{ МПа}$$

Окружное напряжение в тарелке в рабочих условиях :

$$\sigma_T^P = \frac{\beta_Y \cdot M^P}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^P = 1.7043 \cdot 1497.8 / (17^2 \cdot 48) - 1.1978 \cdot 104.21 = 59.198 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_1$  (+):

$$\sigma_{1mm}^{P+} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_1}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = (0.785 \cdot 48^2 \cdot 1.6 + 0 + 4 \cdot 0 / (48 + 14)) / (3.1416 \cdot (48 + 14) \cdot (14 - 3)) = 1.3506 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_1$  (п. 8.5.1):

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P+} + \sigma_R^P \right|, \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P+} + \sigma_T^P \right|, \left| \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^{P+} \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{м}}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P+} + \sigma_R^P \right|, \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P+} + \sigma_T^P \right|, \left| \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^{P+} \right| \right\} = \frac{\max\{|98.637 - 1.3506 + 104.21|; |98.637 - 1.3506 + 59.198|; |98.637 + 1.3506|\}}{1.3506} = 201.49 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_{\text{м}} = 1.5 \cdot [\sigma]_{\text{ф}} = 1.5 \cdot 144 = 216 \text{ МПа}$$

$$K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{м}} = 1.2 \cdot 1.3 \cdot 216 = 336.96 \text{ МПа}$$

201.49 МПа ≤ 336.96 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_1$  (-):

$$\sigma_{1mm}^{P-} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F - \frac{4 \cdot M}{D + s_1}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = (0.785 \cdot 48^2 \cdot 1.6 + 0 - 4 \cdot 0 / (48 + 14)) / (3.1416 \cdot (48 + 14) \cdot (14 - 3)) = 1.3506 \text{ МПа}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P-} + \sigma_R^P \right|, \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P-} + \sigma_T^P \right|, \left| \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^{P-} \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{м}}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P-} + \sigma_R^P \right|, \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P-} + \sigma_T^P \right|, \left| \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^{P-} \right| \right\} = \frac{\max\{|98.637 - 1.3506 + 104.21|; |98.637 - 1.3506 + 59.198|; |98.637 + 1.3506|\}}{1.3506} = 201.49 \text{ МПа}$$

201.49 МПа ≤ 336.96 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_0^M = f \cdot \sigma_1^M = 1 \cdot 105.3 = 105.3 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении  $s_0$  (п. 8.5.2):

$$\sigma_0^M \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R^{20}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_R^{20} = 3 \cdot [\sigma]_{\text{ф}}^{20} = 3 \cdot 164.5 = 493.5 \text{ МПа}$$

$$1.3 \cdot [\sigma]_R^{20} = 1.3 \cdot 493.5 = 641.55 \text{ МПа}$$

105.3 МПа ≤ 641.55 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_0^P = f \cdot \sigma_1^P = 1 \cdot 98.637 = 98.637 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_0$  (+):

$$\sigma_{0mm}^{P+} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_0}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = (0.785 \cdot 48^2 \cdot 1.6 + 0 + 4 \cdot 0 / (48 + 5)) / (3.1416 \cdot (48 + 5) \cdot (5 - 3)) = 8.6899 \text{ МПа}$$

Окружное мембранное напряжение от действия давления во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_{0mo}^P = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s_0 - c)} = 1.6 \cdot 48 / (2 \cdot (5 - 3)) = 19.2 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

Взам. инв. №					
Подп. и дата					
Инв. № подл.					
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	90651-20600-AM-02-220 РР
					Лист
					321

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P+} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm \left( \sigma_{0mm}^{P+} - \sigma_{0mo}^P \right) \right| \right\} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P+} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm \left( \sigma_{0mm}^{P+} - \sigma_{0mo}^P \right) \right| \right\} = \max \{ 98.637 \pm 8.6899; |0.3 * 98.637 \pm 19.2|; |0.7 * 98.637 \pm (8.6899 - 19.2)| \} = 107.33 \text{ МПа}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_R = 3 \cdot [\sigma]_{\Phi} = 3 * 144 = 432 \text{ МПа}$$

$$1.3 \cdot [\sigma]_R = 1.3 * 432 = 561.6 \text{ МПа}$$

107.33 МПа ≤ 561.6 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_0$  (–):

$$\sigma_{0mm}^{P-} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F - \frac{4 \cdot M}{D + s_0}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = (0.785 * 48^2 * 1.6 + 0 - 4 * 0 / (48 + 5)) / (3.1416 * (48 + 5) * (5 - 3)) = 8.6899 \text{ МПа}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P-} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm \left( \sigma_{0mm}^{P-} - \sigma_{0mo}^P \right) \right| \right\} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P-} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm \left( \sigma_{0mm}^{P-} - \sigma_{0mo}^P \right) \right| \right\} = \max \{ 98.637 \pm 8.6899; |0.3 * 98.637 \pm 19.2|; |0.7 * 98.637 \pm (8.6899 - 19.2)| \} = 107.33 \text{ МПа}$$

107.33 МПа ≤ 561.6 МПа, **Условие прочности выполнено.**

**Расчет в сечении  $s_0$  в рабочих условиях (п. 8.5.5 ГОСТ 34233.4-2017):**

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0mo}^P \right|; \left| \sigma_{0mm}^P \right| \right\} \leq [\sigma]_{\Phi}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0mo}^P \right|; \left| \sigma_{0mm}^P \right| \right\} = \max \{ 19.2; |8.6899| \} = 19.2 \text{ МПа}$$

19.2 МПа ≤ 144 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Условие статической прочности при затяжке для тарелок:

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_T^M \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_{\Phi}^{20}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_T^M \right| \right\} = \max \{ 111.24; |63.195| \} = 111.24 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_{\Phi}^{20} = 1.3 * 164.5 = 213.85 \text{ МПа}$$

111.24 МПа ≤ 213.85 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Условие статической прочности в рабочих условиях для тарелок:

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_T^P \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_{\Phi}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_T^P \right| \right\} = \max \{ 104.21; |59.198| \} = 104.21 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_{\Phi} = 1.3 * 144 = 187.2 \text{ МПа}$$

104.21 МПа ≤ 187.2 МПа, **Условие прочности выполнено.**

### Жёсткость фланца:

Угол поворота фланца в рабочих условиях:

$$\Theta = M^P \cdot y_{\Phi} \cdot \frac{E^{20}}{E} = 1497.8 * 0.2482 \cdot 10^{-4} * 1.99 \cdot 10^5 / 1.91 \cdot 10^5 = 0.038733^{\circ}$$

Условие выполнения жесткости фланцев :

$$\Theta \leq K_{\Theta} \cdot [\Theta] = 1 * 0.34377 = 0.34377^{\circ}$$

**Условие жёсткости выполнено.**

### Расчёт крышки на прочность и устойчивость по ГОСТ 34233.2-2017

Коэффициент ослабления для днищ, не имеющих отверстий  $K_0 = 1.0$

Взам. инв. №	<b>Жесткость фланца:</b> Угол поворота фланца в рабочих условиях: $\varpi = M^P \cdot y_{\Phi} \cdot \frac{E^{20}}{E} = 1497.8 * 0.2482 \cdot 10^{-4} * 1.99 \cdot 10^5 / 1.91 \cdot 10^5 = 0.038733^{\circ}$ Условие выполнения жесткости фланцев : $\varpi \leq K_{\varpi} \cdot [\varpi] = 1 * 0.34377 = 0.34377^{\circ}$ <b>Условие жёсткости выполнено.</b>  <b>Расчёт крышки на прочность и устойчивость по ГОСТ 34233.2-2017</b> Коэффициент ослабления для днищ, не имеющих отверстий $K_0 = 1.0$					
	Подп. и дата					
Инв. № подл.						
						90651-20600-AM-02-220 РР
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	322	

**Днища и крышки с дополнительным краевым моментом, нагруженные избыточным давлением**

$$\psi = \frac{P_6^P}{Q_д} = 49044 / 8139.2 = 6.0257$$

$$K_6 = 0.41 \cdot \sqrt{\frac{1 + 3 \cdot \psi \cdot \left( \frac{D_3}{D_{с.п.}} - 1 \right)}{\frac{D_3}{D_{с.п.}}}} = 0.41 \cdot \left[ (1 + 3 \cdot 6.0257 \cdot (125 / 80.5 - 1)) / (125 / 80.5) \right]^{1/2} = 1.0909$$

Нарушено условие применимости расчётных формул:

$$\frac{s_1 - c}{D_p} \leq 0.11$$

В этом случае поправочный коэффициент для допускаемого давления:

$$K_p = \frac{2.2}{1 + \sqrt{1 + \left( 6 \cdot \frac{s_1 - c}{D_p} \right)^2}} = 2.2 / [1 + (6 \cdot [18 - 3] / 80.5)^2]^{1/2} = 0.88001$$

Допускаемое давление :

$$[p] = \left( \frac{s_1 - c}{K_0 \cdot K_6 \cdot D_p} \right)^3 \cdot [\sigma] \cdot \varphi \cdot K_p = ([18 - 3] / [1 \cdot 1.0909 \cdot 80.5])^2 \cdot 144 \cdot 1 \cdot 0.88001 = 3.6972 \text{ МПа}$$

$$3.6972 \text{ МПа} \geq 1.6 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности выполнено.**

**Днища и крышки, нагруженные избыточным давлением**

Расчётная толщина стенки с учётом прибавок :

$$s_{\text{дп}} + c = K_6 \cdot K_0 \cdot D_p \cdot \sqrt{\frac{p}{\varphi \cdot [\sigma] \cdot K_p}} + c = 1.0909 \cdot 1 \cdot 80.5 \cdot (1.6 / [1 \cdot 144 \cdot 0.88001])^{1/2} + 3 = 12.868 \text{ мм}$$

$$12.868 \text{ мм} \leq 18 \text{ мм}$$

Заключение: **Условие прочности выполнено.**

$$K_7 = 0.8 \cdot \sqrt{\frac{D_3}{D_{с.п.}} - 1} = 0.8 \cdot [125 / 80.5 - 1]^{1/2} = 0.5948$$

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре 100 °С (рабочие условия):

$$[\sigma]_{\text{кр}} = 144 \text{ МПа}$$

$$\Phi = \max \left\{ \frac{P_6^P}{[\sigma]}; \frac{P_6^M}{[\sigma]^{20}} \right\} = \max \{ 49044 / 144; 56712 / 222.73 \} = 340.58 \text{ мм}^2$$

Расчётная толщина крышки в месте уплотнения с учётом прибавок :

$$s_{2p} + c = \max \left\{ K_7 \cdot \sqrt{\Phi}; \frac{0.6}{D_{с.п.}} \cdot \Phi \right\} + c = \max \{ 0.5948 \cdot 340.58^{1/2}; 0.6 \cdot 340.58 / 80.5 \} + 0 = 10.977 \text{ мм}$$

$$10.977 \text{ мм} \leq 17 \text{ мм}$$

Заключение: **Условие прочности выполнено.**

$$K_7' = 0.8 \cdot \sqrt{\frac{D_3}{D_2} - 1} = 0.8 \cdot [125 / 87 - 1]^{1/2} = 0.52872$$

Расчётная толщина вне зоны уплотнения с учётом прибавок :

$$s_{3p} + c = \max \left\{ K_7' \cdot \sqrt{\Phi}; \frac{0.6}{D_2} \cdot \Phi \right\} + c = \max \{ 0.52872 \cdot 340.58^{1/2}; 0.6 \cdot 340.58 / 87 \} + 0 = 9.7574 \text{ мм}$$

$$9.7574 \text{ мм} \leq 13 \text{ мм}$$

Заключение: **Условие прочности выполнено.**

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	90651-20600-AM-02-220 РР					Лист
								323
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата				

## Расчет давления испытаний

**Фланец:**

Пробное давление при гидравлическом испытании, при работе элемента под внутренним давлением:

$$P_{\text{тп}} = 1.25 \cdot p \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]_+} = 1.25 \cdot 1.6 \cdot 164.5 / 144 = 2.2847 \text{ МПа}$$

Пробное давление при гидравлическом испытании, при работе элемента под внутренним давлением:

$$P_{\text{тп}} = 1.25 \cdot p \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]_t} = 1.25 \cdot 1.6 \cdot 164.5 / 144 = 2.2847 \text{ МПа}$$

### Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)

**Условия нагружения при испытаниях:**

Расчётное осевое сжимающее усилие, F: 0 Н

Расчётный изгибающий момент, М: 0 Н·м

Расчётное внутреннее избыточное давление, р: 2.222 МПа

По ГОСТ 34233.1-2017 расчёт на прочность при испытаниях допускается не проводить, если выполнено условие:

$$P_{\text{нп}} < 1.35 \cdot P_{\text{расч}} \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]}$$

$$1.35 \cdot P_{\text{расч}} \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]} = 1.35 \cdot 1.6 \cdot 164.5 / 144 = 2.4675 \text{ МПа} \geq 2.222 \text{ МПа}$$

### Расчёт фланца по ГОСТ 34233.4-2017:

### Свойства материала болтов (шпилек)

Температура болтов (шпилек),  $t_6$ : 20 °C

Допускаемые напряжения для материала 35Х Крепеж при температуре 20 °С (условия гидроиспытаний):

$$[\sigma]^{20}_6 = 230 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 35Х Крепеж при температуре  $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$E_{6}^{20} = 2.18 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Коэффициент линейного расширения для материала 35Х Крепеж при температуре  $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$\alpha_{20}^{20} = 0.134 \cdot 10^{-4} 1/^{\circ}\text{C}$$

### Свойства материала смежного элемента фланца 2 Измерение давления (P1)

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

$$[\sigma]^{20_{\text{ш}}} = \frac{R_e / 20}{n_T} = 280 / 1.1 = 254.55 \text{ МПа}$$

## Свойства материала фланца

Температура фланца (кольца),  $t_{\text{ф}}$ : 20 °C

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре 20 °С (условия гидроиспытаний):

$$[\sigma]_{\phi}^{20} = \frac{R_e / 20}{n_T} = 245 / 1.1 = 222.73 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре  $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$E_{\phi}^{20} = 1.99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре  $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$\alpha_{\text{ph}}^{20} = 0.116 \cdot 10^{-41} / ^\circ\text{C}$$

Взам. инв. №	Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре 20 °С (условия гидроиспытаний):				
	$[\sigma]_{\phi}^{20} = \frac{R_{\sigma} / 20}{n_T} = 245 / 1.1 = 222.73 \text{ МПа}$				
Подп. и дата	Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре T = 20 °С: $E_{\phi}^{20} = 1.99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре T = 20 °С: $\alpha_{\phi}^{20} = 0.116 \cdot 10^{-4} / ^\circ\text{C}$				
Инв. № подл.					

НЕФТЕХИМПРОЕКТ NEFTECHIMPROEKT		МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ			РР
Характеристики прокладки:					
Тип и материал прокладки	Коэффициент m	Удельное давление обжатия q <sub>обж</sub> , МПа	Допускаемое удельное давление [q], МПа	Коэффициент обжатия K	Условный модуль сжатия E <sub>n</sub> , МПа
Спирально-навитая с лентой из нержавеющей стали	3	69	-	-	-
Эффективная ширина прокладки : b <sub>0</sub> = 6.5 мм <div> Примечание: <div> <div>b<sub>0</sub> = b<sub>тп</sub></div> <div>при b<sub>тп</sub> ≤ 15.0 мм</div> </div> <div> <div>b<sub>0</sub> = 3.8 · √b<sub>тп</sub></div> <div>при b<sub>тп</sub> &gt; 15.0 мм</div> </div> </div> Средний эффективный диаметр прокладки: D <sub>ст</sub> = D <sub>тпф</sub> - b <sub>0</sub> = 87 - 6.5 = 80.5 мм Расчётные параметры крышки: <div> <div>K<sub>кр</sub> = <math>\frac{D_H}{D_{ст}}</math></div> <div>= 160 / 80.5</div> <div>= 1.9876</div> </div> <div> <div>x<sub>кр</sub> = <math>\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 (\frac{s_1}{s_2})^3]}</math></div> <div>= (0.67 * (1.9876² * (1 + 8.55 * lg(1.9876)) - 1)) / (((1.9876 - 1) * [1.9876² - 1 + (1.857 * 1.9876² + 1) * (18 / 17)³])</div> <div>= 0.68799</div> </div> Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре T = 20 °С: E <sub>кр</sub> <sup>20</sup> = 1.99·10 <sup>5</sup> МПа Угловая податливость крышки : <div> <div>y<sub>кр</sub> = <math>\frac{x_{кр}}{E_{кр}^{20} \cdot s_2^3}</math></div> <div>= 0.68799 / (1.99·10<sup>5</sup> * 17³)</div> <div>= 0.40318·10<sup>-4</sup> °/Н·м</div> </div> Расчётные параметры фланца: <div> <div>l<sub>0</sub> = √(D · s<sub>0</sub>)</div> <div>=(48 * 5)<sup>1/2</sup></div> <div>= 15.492 мм</div> </div> <div> <div>β<sub>ф</sub> = 0.65336</div> </div> <div> <div>β<sub>т</sub> = <math>\frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg K) - 1}{(1.05 + 1.945 \cdot K^2) \cdot (K - 1)}</math></div> <div>= (3.3333² * (1+8.55*lg 3.3333)-1) / ( (1.05+1.945* 3.3333²) * (3.3333-1))</div> <div>= 1.1307</div> </div> <div> <div>β<sub>в</sub> = 0.074265</div> </div> <div> <div>β<sub>у</sub> = <math>\frac{K^2(1 + 8.55 \cdot \lg K) - 1}{1.36 \cdot (K^2 - 1) \cdot (K - 1)}</math></div> <div>= (3.3333² * (1+8.55*lg 3.3333) - 1) / (1.36 * (3.3333²-1) * (3.3333-1))</div> <div>= 1.8633</div> </div> <div> <div>λ = <math>\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}</math></div> <div>=(0.65336 * 17 + 15.492) / (1.1307 * 15.492) + 0.074265 * 17³ / (1.8633 * 15.492 * 5²)</div> <div>= 2.0242</div> </div> Угловая податливость фланца при затяжке: <div> <div>y<sub>ф</sub> = <math>\frac{0.91 \cdot \beta_v}{E^{20} \cdot \lambda \cdot s_0^2 \cdot l_0}</math></div> <div>= 0.91 * 0.074265 / (1.99·10<sup>5</sup> * 2.0242 * 5² * 15.492)</div> <div>= 0.2482·10<sup>-4</sup> °/Н·м</div> </div> Плечи моментов: <div> <div>a = 0</div> </div> <div> <div>b = 0.5 · (D<sub>б</sub> - D<sub>стп</sub>)</div> <div>= 0.5 * (125 - 80.5)</div> <div>= 22.25 мм</div> </div> <div> <div>β = <math>\frac{s_1}{s_0}</math></div> <div>= 14/5</div> <div>= 2.8</div> </div>					
90651-20600-AM-02-220 РР					Лист
					325

$$x = \frac{1}{\sqrt{D \cdot s_0}} = 20 / (48 \cdot 5)^{1/2} = 1.291$$

$$\kappa = 1 + (\beta - 1) \cdot \frac{x}{x + \frac{1 + \beta}{4}} = 1 + (2.8 - 1) \cdot 1.291 / (1.291 + (1 + 2.8) / 4) = 2.0369$$

Эквивалентная толщина втулки для фланца, приварного встык:

$$s_3 = \kappa \cdot s_0 = 2.0369 \cdot 5 = 10.185 \text{ мм}$$

$$e = 0.5 \cdot (D_{\text{фл}} - D - s_3) = 0.5 \cdot (80.5 - 48 - 10.185) = 11.158 \text{ мм}$$

### Расчёт нагрузок:

Равнодействующая давления :

$$Q_{\text{д}} = 0.785 \cdot D_{\text{фл}}^2 \cdot p = 0.785 \cdot 80.5^2 \cdot 2.222 = 11303 \text{ Н}$$

Усилие на прокладке в рабочих условиях, необходимое для обеспечения герметичности:

$$R_{\text{п}} = \pi \cdot D_{\text{фл}} \cdot b_0 \cdot m \cdot |p| = 3.1416 \cdot 80.5 \cdot 6.5 \cdot 3 \cdot |2.222| = 10958 \text{ Н}$$

Усилие, необходимое для смятия прокладки при затяжке :

$$P_{\text{обж}} = 0.5 \cdot \pi \cdot D_{\text{фл}} \cdot b_0 \cdot q_{\text{обж}} = 0.5 \cdot 3.1416 \cdot 80.5 \cdot 6.5 \cdot 69 = 56712 \text{ Н}$$

**Расчетная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для герметизации в условиях испытаний (нагрузки + давление)**

Рабочая длина болта (шпильки):

$$L_{\text{б0}} = h + s_2 + h_{\text{п}} = 17 + 17 + 3.2 = 37.2 \text{ мм}$$

Эффективная длина шпильки :

$$L_{\text{б}} = L_{\text{б0}} + 0.56 \cdot d = 37.2 + 0.56 \cdot 16 = 46.16 \text{ мм}$$

Площадь сечения шпильки (по внутреннему диаметру резьбы):

$$f_6 = 144 \text{ мм}^2$$

Податливость шпилек :

$$y_6 = \frac{L_{\text{б}}}{E_6^{20} \cdot f_6 \cdot n} = 46.16 / (2.18 \cdot 10^5 \cdot 144 \cdot 4) = 0.36761 \cdot 10^{-6} \text{ мм/Н}$$

$$\eta = y_{\text{п}} + y_6 + y_{\text{ф}}' \cdot b'^2 + y_{\text{ф}}'' \cdot b''2 = 0 + 0.36761 \cdot 10^{-6} + 0.40318 \cdot 10^{-4} \cdot 22.25^2 + 0.2482 \cdot 10^{-4} \cdot 22.25^2 = 0.93044 \cdot 10^{-6} \text{ мм/Н}$$

Коэффициенты жёсткости для фланцевого соединения с крышкой, нагруженного внутренним давлением:

$$\alpha = 1 - \frac{y_{\text{п}} - (y_{\text{ф}}' \cdot e + y_{\text{ф}}'' \cdot b) \cdot b}{\eta} = 1 - (0 - (0.2482 \cdot 10^{-4} \cdot 11.158 + 0.40318 \cdot 10^{-4} \cdot 22.25) \cdot 22.25) / 0.93044 \cdot 10^{-6} = 1.49$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре T = 20 °C:

$$E_{\text{кр}}^{20} = 1.99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Угловая податливость фланца, нагруженного внешним изгибающим моментом:

$$y_{\text{фМ}} = \left( \frac{\pi}{4} \right)^3 \cdot \frac{D_{\text{б}}}{E^{20} \cdot D_{\text{фл}} \cdot h^3} = (3.1416 / 4)^3 \cdot 125 / (1.99 \cdot 10^5 \cdot 160 \cdot 17^3) = 0.22181 \cdot 10^{-4} \text{ °/Н·м}$$

Угловая податливость фланца, нагруженного внешним изгибающим моментом:

$$y_{\text{фМ}} = \left( \frac{\pi}{4} \right)^3 \cdot \frac{D_{\text{б}}}{E^{20} \cdot D_{\text{фл}} \cdot h^3} = (3.1416 / 4)^3 \cdot 125 / (1.99 \cdot 10^5 \cdot 160 \cdot 17^3) = 0.22181 \cdot 10^{-4} \text{ °/Н·м}$$

Коэффициенты жёсткости для фланцевого соединения, нагруженного внешним изгибающим моментом:

$$\alpha_{\text{М}} = \frac{y_6 + y_{\text{фМ}}' \cdot b' \cdot \left( b' + e' - \frac{e'^2}{D_{\text{фл}}} \right) + y_{\text{фМ}}'' \cdot b'' \cdot \left( b'' + e'' - \frac{e''2}{D_{\text{фл}}} \right)}{y_6 + y_{\text{п}} \cdot \left( \frac{D_{\text{б}}}{D_{\text{фл}}} \right)^2 + y_{\text{фМ}}' \cdot b'^2 + y_{\text{фМ}}'' \cdot b''2}$$

$$= [0.36761 \cdot 10^{-6} + 0.22181 \cdot 10^{-4} \cdot 22.25 \cdot (22.25 + 22.25 - 22.25^2 / 80.5) + 0.22181 \cdot 10^{-4} \cdot 22.25 \cdot (22.25 + 11.158 - 11.158^2 / 80.5)] / [0.36761 \cdot 10^{-6} + 0 \cdot (125 / 80.5)^2 + 0.22181 \cdot 10^{-4} \cdot 22.25^2 + 0.22181 \cdot 10^{-4} \cdot 22.25^2]$$

$$= 1.2949$$

Взам. инв. №	$y_{\Phi M} = \left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot \frac{D_6}{E^{20} \cdot D_{\Phi} \cdot h^3} = (3.1416/4)^3 \cdot 125 / (1.99 \cdot 10^6 \cdot 160 \cdot 17^3) = 0.22181 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ/\text{Н} \cdot \text{м}$ <p>Угловая податливость фланца, нагруженного внешним изгибающим моментом:</p> $y_{\Phi M} = \left(\frac{\pi}{4}\right)^3 \cdot \frac{D_6}{E^{20} \cdot D_{\Phi} \cdot h^3} = (3.1416/4)^3 \cdot 125 / (1.99 \cdot 10^6 \cdot 160 \cdot 17^3) = 0.22181 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ/\text{Н} \cdot \text{м}$				
	Подп. и дата	<p>Коэффициенты жёсткости для фланцевого соединения, нагруженного внешним изгибающим моментом:</p> $\alpha_M = \frac{y_6 + y'_{\Phi M} \cdot b' \cdot \left(b' + e' - \frac{e'^2}{D_{\Phi}}\right) + y''_{\Phi M} \cdot b'' \cdot \left(b'' + e'' - \frac{e''^2}{D_{\Phi}}\right)}{y_6 + y_{\pi} \cdot \left(\frac{D_6}{D_{\Phi}}\right)^2 + y'_{\Phi M} \cdot b'^2 + y''_{\Phi M} \cdot b''^2}$ $= [0.36761 \cdot 10^{-6} + 0.22181 \cdot 10^{-4} \cdot 22.25 \cdot (22.25 + 22.25 - 22.25^2 / 80.5) + 0.22181 \cdot 10^{-4} \cdot 22.25 \cdot (22.25 + 11.158 - 11.158^2 / 80.5)] / [0.36761 \cdot 10^{-6} + 0 \cdot (125 / 80.5)^2 + 0.22181 \cdot 10^{-4} \cdot 22.25^2 + 0.22181 \cdot 10^{-4} \cdot 22.25^2]$ $= 1.2949$			
Инв. № подл.		<div>90651-20600-AM-02-220 РР</div>			
	Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата

Лист
326



НЕФТЕХИМПРОЕКТ NEFTECHIMPROEKT			МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ			РР
<div><div>Этот документ является собственностью "НЕФТЕХИМПРОЕКТ" и не подлежит копированию и распространению без его согласия</div><div><math display="block">P_{б1} = \alpha \cdot (Q_{д} + F) + R_{п} + \frac{4 \cdot \alpha_{м} \cdot  M }{D_{ст}} \quad 1.49 \cdot (11303 + 0) + 10958 + 4 \cdot 1.2949 \cdot  0  / 80.5 = 27800 \text{ Н}</math><p><b>Расчетная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для герметизации в условиях испытаний (только давление)</b></p><math display="block">P_{б1} = \alpha \cdot (Q_{д} + F) + R_{п} + \frac{4 \cdot \alpha_{м} \cdot  M }{D_{ст}} \quad 1.49 \cdot (11303 + 0) + 10958 + 4 \cdot 1.2949 \cdot  0  / 80.5 = 27800 \text{ Н}</math><p>Суммарная площадь сечения болтов (шпилек) по внутреннему диаметру резьбы или сечению наименьшего диаметра:</p><math display="block">A_{б} = n \cdot f_{б} = 4 \cdot 144 = 576 \text{ мм}^2</math><p>Расчётная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для обжатия прокладки и минимального начального натяжения болтов:</p><math display="block">P_{б2} = \max \{ P_{обж}; 0.4 \cdot A_{б} \cdot [\sigma]_{б}^{20} \} = \max \{ 56712; 0.4 \cdot 576 \cdot 230 = 52992 \} = 56712 \text{ Н}</math><p><b>Расчёт без учета стесненности температурных деформаций</b></p><p><b>Расчёт болтов(шпилек):</b></p><p>Коэффициент увеличения допускаемых напряжений при затяжке: <math>\xi = 1.2</math></p><p>Коэффициент условий работы: <math>K_{ур} = 1.35</math></p><p>Коэффициент условий затяжки: <math>K_{уз} = 1</math></p><p>Допускаемые напряжения для болтов (шпилек) при затяжке :</p><math display="block">[\sigma]_{б}^м = \xi \cdot K_{ур} \cdot K_{уз} \cdot K_{ут} \cdot [\sigma]_{б}^{20} = 1.2 \cdot 1.35 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 230 = 372.6 \text{ МПа}</math><p><b>Расчетная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для герметизации в условиях испытаний (только давление)</b></p><math display="block">P_{б1} = \alpha \cdot (Q_{д} + F) + R_{п} + \frac{4 \cdot \alpha_{м} \cdot  M }{D_{ст}} \quad 1.49 \cdot (11303 + 0) + 10958 + 4 \cdot 1.2949 \cdot  0  / 80.5 = 27800 \text{ Н}</math><p>Болтовая нагрузка в условиях затяжки :</p><math display="block">P_{б}^м = \max \{ P_{б1}; P_{б2} \} = \max \{ 27800; 56712 \} = 56712 \text{ Н}</math><p>Условие прочности при затяжке:</p><math display="block">\sigma_{б1} = \frac{P_{б}^м}{A_{б}} \leq [\sigma]_{б}^м</math><math display="block">\sigma_{б1} = \frac{P_{б}^м}{A_{б}} = 56712 / 576 = 98.459 \text{ МПа}</math><p>Крутящий момент при затяжке болтов (шпилек) без смазки при <math>\sigma_{б1} &lt; 120 \text{ МПа}</math>:</p><math display="block">M_{кр} = 0.3 \cdot \frac{P_{б}^м \cdot d}{n} = 0.3 \cdot 56712 \cdot 16 / 4 = 68.055 \text{ Н·м}</math><p>При наличии смазки величина <math>M_{кр}</math> снижается на 25% и составляет <math>0.75 \cdot M_{кр} = 51.041 \text{ Н·м}</math></p><p><math>98.459 \text{ МПа} \leq 372.6 \text{ МПа}</math>, <b>Условие прочности выполнено.</b></p><p>Допускаемые напряжения для болтов (шпилек) при рабочих условиях:</p><math display="block">[\sigma]_{б}^р = K_{ур} \cdot K_{уз} \cdot K_{ут} \cdot [\sigma]_{б} = 1.35 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 230 = 310.5 \text{ МПа}</math><p>Болтовая нагрузка в рабочих условиях :</p><math display="block">P_{б}^р = P_{б}^м + (1 - \alpha) \cdot (Q_{д} + F) + \frac{4 \cdot (1 - \alpha_{м}) \cdot  M }{D_{ст}} = 56712 + (1 - 1.49) \cdot (11303 + 0) + 4 \cdot (1 - 1.2949) \cdot  0  / 80.5 = 51174 \text{ Н}</math><p>Условие прочности в рабочих условиях:</p><math display="block">\sigma_{б2} = \frac{P_{б}^р}{A_{б}} \leq [\sigma]_{б}^р</math><math display="block">\sigma_{б2} = \frac{P_{б}^р}{A_{б}} = 51174 / 576 = 88.843 \text{ МПа}</math></div></div>						
Взам. инв. №	Подп. и дата	Инв. № подл.				Лист
			90651-20600-AM-02-220 РР			327
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата		

90651-20600-AM-02-220 РР изм.0.docx

Формат А4

88.843 МПа ≤ 310.5 МПа, **Условие прочности выполнено.**

### Расчёт второго фланца:

Коэффициент, учитывающий изгиб тарелки фланца между шпильками:

$$C_F = \max \left\{ 1; \sqrt{\frac{\frac{\pi \cdot D_6}{n}}{2 \cdot d + \frac{6 \cdot h}{m + 0.5}}} \right\} = \max \{1; (3.1416 \cdot 125 / 4 / (2 \cdot 16 + 6 \cdot 17 / (3 + 0.5)))^{1/2}\} = 1.2671$$

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при затяжке:

$$M^M = C_F \cdot P_6^M \cdot b = 1.2671 \cdot 56712 \cdot 22.25 = 1599 \text{ Н·м}$$

$$f = \max \left\{ \frac{C_{36}}{1 + A}; 1.0 \right\} = \max \{0.44314 / (1 + 1.8); 1.0\} = 1$$

$$D^* = D + c + s_1 \text{ при } (D + 2 \cdot c) < 20 \cdot (s_1 - c) \text{ и } f = 1 = 48 + 0 + 14 \text{ при } 48 < 20 \cdot (14 - 0) \text{ и } f = 1 = 62 \text{ мм}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении s<sub>1</sub>:

$$\sigma_1^M = \frac{M^M}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D^*} = 1599 / (2.0242 \cdot (14 - 3)^2 \cdot 62) = 105.3 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в условиях затяжки:

$$\sigma_R^M = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + 1_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot 1_0 \cdot D} \cdot M^M = (1.33 \cdot 0.65336 \cdot 17 + 15.492) / (2.0242 \cdot 17^2 \cdot 15.492 \cdot 48) \cdot 1599 = 111.24 \text{ МПа}$$

$$\beta_Y = \frac{1}{K - 1} \cdot \left( 0.69 + 5.72 \cdot \frac{K^2 \cdot \lg K}{K^2 - 1} \right) = 1 / (3.3333 - 1) \cdot (0.69 + 5.72 \cdot 3.3333^2 \cdot \lg 3.3333 / (3.3333^2 - 1)) = 1.7043$$

$$\beta_Z = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = (3.3333^2 + 1) / (3.3333^2 - 1) = 1.1978$$

Окружное напряжение в тарелке в условиях затяжки:

$$\sigma_T^M = \frac{\beta_Y \cdot M^M}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^M = 1.7043 \cdot 1599 / (17^2 \cdot 48) - 1.1978 \cdot 111.24 = 63.195 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении s<sub>1</sub> (п. 8.5.1):

$$\max \{ |\sigma_1^M + \sigma_R^M|; |\sigma_1^M + \sigma_T^M| \} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{ст}}^{20}$$

$$\max \{ |\sigma_1^M + \sigma_R^M|; |\sigma_1^M + \sigma_T^M| \} = \max \{ |105.3 + 111.24|; |105.3 + 63.195| \} = 216.54 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_{\text{ст}}^{20} = 1.5 \cdot [\sigma]_{\text{ф}}^{20} = 1.5 \cdot 222.73 = 334.09 \text{ МПа}$$

$$K = \frac{D_H}{D} = 160 / 48 = 3.3333$$

Коэффициент учета размеров тарелки фланца: K<sub>S</sub> = 1.2

$$K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{ст}}^{20} = 1.2 \cdot 1 \cdot 334.09 = 400.91 \text{ МПа}$$

216.54 МПа ≤ 400.91 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Приведенная нагрузка от внешней силы и момента:

$$Q_{FM}^+ = F + \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{ст}}} = 0 + 4 \cdot |0| / 80.5 = 0 \text{ Н}$$

$$Q_{FM}^- = F - \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{ст}}} = 0 - 4 \cdot |0| / 80.5 = 0 \text{ Н}$$

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при рабочих условиях:

$$M^P = C_F \cdot \max \{ P_6^P \cdot b + (Q_d + Q_{FM}) \cdot e; |Q_d + Q_{FM}| \cdot e \} = \frac{1.2671 \cdot \max \{ 51174 \cdot 22.25 + (11303 + 0) \cdot 11.158; |11303 + 0| \cdot 11.158 \}}{11.158} = 1602.6 \text{ Н·м}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении s<sub>1</sub>:

Взам. инв. №					
Подп. и дата					
Инв. № подл.					
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	

90651-20600-AM-02-220 РР

Лист

328

$$\sigma_1^P = \frac{M^P}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D} = 1602.6 / (2.0242 \cdot (14 - 3)^2 \cdot 62) = 105.54 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в рабочих условиях :

$$\sigma_R^P = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + l_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot l_0 \cdot D} \cdot M^P = (1.33 \cdot 0.65336 \cdot 17 + 15.492) / (2.0242 \cdot 17^2 \cdot 15.492 \cdot 48) \cdot 1602.6 = 111.5 \text{ МПа}$$

Окружное напряжение в тарелке в рабочих условиях :

$$\sigma_T^P = \frac{\beta_Y \cdot M^P}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^P = 1.7043 \cdot 1602.6 / (17^2 \cdot 48) - 1.1978 \cdot 111.5 = 63.339 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_1$  (+):

$$\sigma_{1mm}^{P+} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_1}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = (0.785 \cdot 48^2 \cdot 2.222 + 0 + 4 \cdot 0 / (48 + 14)) / (3.1416 \cdot (48 + 14) \cdot (14 - 3)) = 1.8757 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_1$  (п. 8.5.1):

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P+} + \sigma_R^P \right|, \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P+} + \sigma_T^P \right|, \left| \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^{P+} \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{м}}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P+} + \sigma_R^P \right|, \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P+} + \sigma_T^P \right|, \left| \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^{P+} \right| \right\} = \frac{\max\{|105.54 - 1.8757 + 111.5|; |105.54 - 1.8757 + 63.339|; |105.54 + 1.8757|\}}{1.8757} = 215.16 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_{\text{м}} = 1.5 \cdot [\sigma]_{\text{ф}} = 1.5 \cdot 222.73 = 334.09 \text{ МПа}$$

$$K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{м}} = 1.2 \cdot 1 \cdot 334.09 = 400.91 \text{ МПа}$$

215.16 МПа ≤ 400.91 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_1$  (-):

$$\sigma_{1mm}^{P-} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F - \frac{4 \cdot M}{D + s_1}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = (0.785 \cdot 48^2 \cdot 2.222 + 0 - 4 \cdot 0 / (48 + 14)) / (3.1416 \cdot (48 + 14) \cdot (14 - 3)) = 1.8757 \text{ МПа}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P-} + \sigma_R^P \right|, \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P-} + \sigma_T^P \right|, \left| \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^{P-} \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{м}}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P-} + \sigma_R^P \right|, \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P-} + \sigma_T^P \right|, \left| \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^{P-} \right| \right\} = \frac{\max\{|105.54 - 1.8757 + 111.5|; |105.54 - 1.8757 + 63.339|; |105.54 + 1.8757|\}}{1.8757} = 215.16 \text{ МПа}$$

215.16 МПа ≤ 400.91 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_0^M = f \cdot \sigma_1^M = 1 \cdot 105.3 = 105.3 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении  $s_0$  (п. 8.5.2):

$$\sigma_0^M \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R^{20}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_R^{20} = 3 \cdot [\sigma]_{\text{ф}}^{20} = 3 \cdot 222.73 = 668.18 \text{ МПа}$$

$$1.3 \cdot [\sigma]_R^{20} = 1.3 \cdot 668.18 = 868.64 \text{ МПа}$$

105.3 МПа ≤ 868.64 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_0^P = f \cdot \sigma_1^P = 1 \cdot 105.54 = 105.54 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_0$  (+):

$$\sigma_{0mm}^{P+} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_0}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = (0.785 \cdot 48^2 \cdot 2.222 + 0 + 4 \cdot 0 / (48 + 5)) / (3.1416 \cdot (48 + 5) \cdot (5 - 3)) = 12.068 \text{ МПа}$$

Окружное мембранное напряжение от действия давления во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_{0mo}^P = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s_0 - c)} = 2.222 \cdot 48 / (2 \cdot (5 - 3)) = 26.664 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

Взам. инв. №		$1.3 \cdot [\sigma]_R^{20} = 1.3 \cdot 668.18 = 868.64 \text{ МПа}$ $105.3 \text{ МПа} \leq 868.64 \text{ МПа}$ , <b>Условие прочности выполнено.</b> Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении $s_0$ : $\sigma_0^P = f \cdot \sigma_1^P = 1 \cdot 105.54 = 105.54 \text{ МПа}$ Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении $S_0$ (+): $\sigma_{0mm}^{P+} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_0}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = (0.785 \cdot 48^2 \cdot 2.222 + 0 + 4 \cdot 0 / (48 + 5)) / (3.1416 \cdot (48 + 5) \cdot (5 - 3)) = 12.068 \text{ МПа}$ Окружное мембранное напряжение от действия давления во втулке в рабочих условиях в сечении $s_0$ : $\sigma_{0mo}^P = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s_0 - c)} = 2.222 \cdot 48 / (2 \cdot (5 - 3)) = 26.664 \text{ МПа}$ Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении $s_0$ :				
		Подп. и дата		Инд. № подл.		
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	329	

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P+} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm \left( \sigma_{0mm}^{P+} - \sigma_{0mo}^P \right) \right| \right\} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P+} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm \left( \sigma_{0mm}^{P+} - \sigma_{0mo}^P \right) \right| \right\} = \max \{ 105.54 \pm 12.068; |0.3 * 105.54 \pm 26.664|; |0.7 * 105.54 \pm (12.068 - 26.664)| \} = 117.61 \text{ МПа}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_R = 3 \cdot [\sigma]_{\Phi} = 3 * 222.73 = 668.18 \text{ МПа}$$

$$1.3 \cdot [\sigma]_R = 1.3 * 668.18 = 868.64 \text{ МПа}$$

117.61 МПа ≤ 868.64 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_0$  (–):

$$\sigma_{0mm}^{P-} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F - \frac{4 \cdot M}{D + s_0}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = (0.785 * 48^2 * 2.222 + 0 - 4 * 0 / (48 + 5)) / (3.1416 * (48 + 5) * (5 - 3)) = 12.068 \text{ МПа}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P-} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm \left( \sigma_{0mm}^{P-} - \sigma_{0mo}^P \right) \right| \right\} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P-} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm \left( \sigma_{0mm}^{P-} - \sigma_{0mo}^P \right) \right| \right\} = \max \{ 105.54 \pm 12.068; |0.3 * 105.54 \pm 26.664|; |0.7 * 105.54 \pm (12.068 - 26.664)| \} = 117.61 \text{ МПа}$$

117.61 МПа ≤ 868.64 МПа, **Условие прочности выполнено.**

**Расчет в сечении  $s_0$  в рабочих условиях (п. 8.5.5 ГОСТ 34233.4-2017):**

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0mo}^P \right|; \left| \sigma_{0mm}^P \right| \right\} \leq [\sigma]_{\Phi}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0mo}^P \right|; \left| \sigma_{0mm}^P \right| \right\} = \max \{ 26.664; |12.068| \} = 26.664 \text{ МПа}$$

26.664 МПа ≤ 222.73 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Условие статической прочности при затяжке для тарелок:

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_T^M \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_{\Phi}^{20}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^M \right|; \left| \sigma_T^M \right| \right\} = \max \{ 111.24; |63.195| \} = 111.24 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_{\Phi}^{20} = 1 * 222.73 = 222.73 \text{ МПа}$$

111.24 МПа ≤ 222.73 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Условие статической прочности в рабочих условиях для тарелок:

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_T^P \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_{\Phi}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_T^P \right| \right\} = \max \{ 111.5; |63.339| \} = 111.5 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_{\Phi} = 1 * 222.73 = 222.73 \text{ МПа}$$

111.5 МПа ≤ 222.73 МПа, **Условие прочности выполнено.**

### Жёсткость фланца:

Угол поворота фланца в рабочих условиях:

$$\Theta = M^P \cdot y_{\Phi} \cdot \frac{E^{20}}{E} = 1602.6 * 0.2482 \cdot 10^{-4} * 1.99 \cdot 10^5 / 1.99 \cdot 10^5 = 0.039777^\circ$$

Допускаемый угол поворота фланца:

$$[\Theta] = 0.34377^\circ$$

Коэффициент увеличения допускаемого угла поворота фланцев:  $K_{\Theta} = 1.3$

Условие выполнения жесткости фланцев:

$$\Theta \leq K_{\Theta} \cdot [\Theta] = 1.3 * 0.34377 = 0.44691^\circ$$

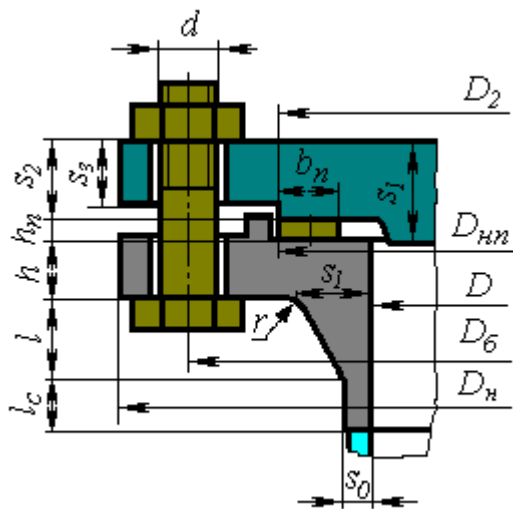
**Условие жёсткости выполнено.**

Взам. инв. №		<b>Жесткость фланца:</b> Угол поворота фланца в рабочих условиях: $[\Theta] = M^P \cdot y_{\Phi} \cdot \frac{E^{20}}{E} = 1602.6 * 0.2482 \cdot 10^{-4} * 1.99 \cdot 10^5 / 1.99 \cdot 10^5 = 0.039777^{\circ}$ Допускаемый угол поворота фланца: $[\Theta] = 0.34377^{\circ}$ Коэффициент увеличения допускаемого угла поворота фланцев: $K_{\Theta} = 1.3$ Условие выполнения жесткости фланцев : $\Theta \leq K_{\Theta} \cdot [\Theta] = 1.3 * 0.34377 = 0.44691^{\circ}$ <b>Условие жёсткости выполнено.</b>					
		Подп. и дата		Инв. № подл.			
Изм.	Лист						№ док.
90651-20600-AM-02-220 РР							Лист
							330





Крышка плоская Т1



Исходные данные

Параметры крышки:

Материал:	09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ
	8479 Поковка
Толщина стенки, $s_1$ :	18 мм
Прибавка для компенсации коррозии и эрозии, $s_1$ :	3 мм
Прибавка для компенсации минусового допуска, $s_2$ :	0 мм
Прибавка технологическая, $s_3$ :	0 мм
Сумма прибавок к расчётной толщине стенки, $s$ :	3 мм
Толщина в месте прокладки, $s_2$ :	17 мм
Толщина вне уплотнения, $s_3$ :	13 мм
Наименьший диаметр наружной утоненной части, $D_2$ :	87 мм
Наружный диаметр крышки, $D_n$ :	160 мм
Коэффициент прочности сварного шва :	
$\varphi_p = 1$	

Параметры фланца:

Тип фланца:	Приварные встык
Исполнение фланца:	Выступ-впадина
Диаметр болтовой окружности, $D_6$ :	125мм
Материал фланца:	09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ
	8479 Поковка
Смежный элемент:	Измерение темпера- туры (Т1)
Материал смежного элемента:	09Г2С Труба
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, $s$ :	3 мм
Длина конической части втулки, $l$ :	20 мм
Длина цилиндрической части втулки, $l_c$ :	8 мм
Толщина цилиндрической части втулки, $s_0$ :	5 мм

Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата

Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата

90651-20600-AM-02-220 РР

Лист

333

Этот документ является собственностью "НЕФТЕХИМПРОЕКТ" и не подлежит копированию и распространению без его согласия

НЕФТЕХИМПРОЕКТ NEFTECHIMPROEKT		МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ			РР		
<div>Толщина конической части втулки, s1:14 мм</div> <div>Радиус перехода, r:5 мм</div> <div>Шпильки:<div>Материал:35Х Крепеж</div><div>Наружный диаметр, d:16 мм</div><div>Количество, n:4</div><div>Контроль затяжки:Нет</div></div> <div>Прокладка:<div>Материал прокладки:Спирально-навитая с лентой из нержавеющей стали</div><div>Толщина, hп:3.2 мм</div><div>Наружный диаметр, Dн.п:87 мм</div><div>Ширина, bп:6.5 мм</div></div> <div>Расчёт в рабочих условиях</div> <div>Условия нагружения:<div>Расчётное осевое сжимающее усилие, F:0 Н</div><div>Расчётный изгибающий момент, M:0 Н·м</div><div>Расчётное внутреннее избыточное давление, p:1.6311 МПа</div></div> <div>Расчёт фланца по ГОСТ 34233.4-2017:</div> <div>Свойства материала болтов (шпилек)<div>Температура болтов (шпилек), tб:97 °C</div><div>Допускаемые напряжения для материала 35Х Крепеж при температуре 97 °C (рабочие условия): [σ]б= 230 МПа</div><div>Модуль продольной упругости для материала 35Х Крепеж при температуре T = 97 °C: Eб= 2.1511·10<sup>5</sup> МПа</div><div>Коэффициент линейного расширения для материала 35Х Крепеж при температуре T = 97 °C: αб= 0.134·10<sup>-4</sup>/°C</div><div>Допускаемые напряжения для материала 35Х Крепеж при температуре 20 °C (рабочие условия): [σ]<sup>20б</sup>= 230 МПа</div><div>Модуль продольной упругости для материала 35Х Крепеж при температуре T = 20 °C: E<sup>20б</sup>= 2.18·10<sup>5</sup> МПа</div></div> <div>Свойства материала смежного элемента фланца 2 Измерение температуры (T1)<div>Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Труба при температуре 100 °C (рабочие условия): [σ]ш= 160 МПа</div><div>Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Труба при температуре 20 °C (рабочие условия): [σ]<sup>20ш</sup>= 183 МПа</div></div> <div>Свойства материала фланца<div>Температура фланца (кольца), tф:100 °C</div><div>Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре 100 °C (рабочие условия): [σ]ф= 144 МПа</div><div>Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре T = 100 °C: Eф= 1.91·10<sup>5</sup> МПа</div><div>Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре T = 100 °C: αф= 0.116·10<sup>-4</sup>/°C</div><div>Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре 20 °C (рабочие условия):</div></div>							
Взам. инв. №	Подп. и дата	Инв. № подл.				Лист	
			90651-20600-AM-02-220 РР				334
			Изм.	Лист	№ док.		

90651-20600-AM-02-220 РР\_изм.0.docx

Формат А4



$$[\sigma]_{\phi}^{20} = 164.5 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка 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 :

$$b_0 = 6.5 \text{ mm}$$

Примечание: 
$$\begin{cases} b_0 = b_{\text{пр}} & \text{при } b_{\text{пр}} \leq 15,0 \text{ мм} \\ b_0 = 3,8 \cdot \sqrt{b_{\text{пр}}} & \text{при } b_{\text{пр}} > 15,0 \text{ мм} \end{cases}$$

Рабочий наружный диаметр прокладки :

$$D_{\text{ITD}} = 87 \text{ mm}$$

Средний эффективный диаметр прокладки:

$$D_{\text{ст}} = D_{\text{нпр}} - b_0 = 87 - 6.5 = 80.5 \text{ мм}$$

Для металлических и асбометаллических прокладок  $\gamma_n = 0$ .

**Расчётные параметры болтов (шпилек):**

Рабочая длина болта (шпильки):

$$L_{60} = h + s_2 + h_{\pi} = 17 + 17 + 3.2 = 37.2 \text{ mm}$$

Площадь сечения шпильки (по внутреннему диаметру резьбы):

$$f_6 = 144 \text{ mm}^2$$

Эффективная длина шпильки :

$$L_6 = L_{60} + 0.56 \cdot d = 37.2 + 0.56 \cdot 16 = 46.16 \text{ mm}$$

Податливость шпилек:

$$y_6 = \frac{L_6}{E_6^{20} \cdot f_6 \cdot n} = 46.16 / (2.18 \cdot 10^5 \cdot 144 \cdot 4) = 0.36761 \cdot 10^{-6} \text{ mm/H}$$

### Расчётные параметры крышки:

$$K_{\text{xp}} = \frac{D_{\text{H}}}{D_{\text{TH}}} = 160 / 80.5 = 1.9876$$

$$x_{xp} = \frac{0.67 \cdot [K_{xp}^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg K_{xp}) - 1]}{(K_{xp} - 1) \cdot [K_{xp}^2 - 1 + (1.857 \cdot K_{xp}^2 + 1) \cdot \left(\frac{s_1}{s_2}\right)^3]} = \frac{0.67 \cdot (1.9876^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg(1.9876)) - 1)}{(1.9876 - 1) \cdot [1.9876^2 - 1 + (1.857 \cdot 1.9876^2 + 1) \cdot (18/17)^3]} = 0.68799$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре  $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$E_{kp}^{20} = 1.99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Угловая податливость крышки :

$$Y_{xp} = \frac{x_{xp}}{E_{xp}^{20} \cdot s_2^3} = 0.68799 / (1.99 \cdot 10^5 \cdot 17^3) = 0.40318 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ/\text{H} \cdot \text{M}$$

### Расчётные параметры фланца:

$$l_0 = \sqrt{D \cdot s_0} = (48 \cdot 5)^{1/2} = 15.492 \text{ mm}$$
$$\beta_F = 0.65336$$

Взам. инв. №	Подп. и дата	Инв. № подл.	$x_{кр} = \frac{0.67 \cdot [K_{кр}^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg K_{кр}) - 1]}{(K_{кр} - 1) \cdot [K_{кр}^2 - 1 + (1.857 \cdot K_{кр}^2 + 1) \cdot \left(\frac{s_1}{s_2}\right)^3]} = \frac{(0.67 \cdot (1.9876^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg(1.9876)) - 1)) / ((1.9876 - 1) \cdot [1.9876^2 - 1 + (1.857 \cdot 1.9876^2 + 1) \cdot (18 / 17)^3])}{0.68799}$				
			<p>Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре Т = 20 °С:</p> <p><math>E_{кр}^{20} = 1.99 \cdot 10^5</math> МПа</p> <p>Угловая податливость крышки :</p> <p><math>y_{кр} = \frac{x_{кр}}{E_{кр}^{20} \cdot s_2^3} = 0.68799 / (1.99 \cdot 10^5 \cdot 17^3) = 0.40318 \cdot 10^{-4}</math> °/Н·м</p> <p><b>Расчётные параметры фланца:</b></p> <p><math>l_0 = \sqrt{D \cdot s_0} = (48 \cdot 5)^{1/2} = 15.492</math> мм</p> <p><math>\beta_F = 0.65336</math></p>				
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	90651-20600-AM-02-220 PP		Лист
							335

$$K = \frac{D_K}{D} = 160 / 48 = 3.3333$$

$$\beta_T = \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg K) - 1}{(1.05 + 1.945 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} = (3.3333^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg 3.3333) - 1) / ((1.05 + 1.945 \cdot 3.3333^2) \cdot (3.3333 - 1)) = 1.1307$$

$$\beta_V = 0.074265$$

$$\beta_U = \frac{K^2 (1 + 8.55 \cdot \lg K) - 1}{1.36 \cdot (K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = (3.3333^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg 3.3333) - 1) / (1.36 \cdot (3.3333^2 - 1) \cdot (3.3333 - 1)) = 1.8633$$

$$\lambda = \frac{\beta_F \cdot h + 1_0}{\beta_T \cdot 1_0} + \frac{\beta_V \cdot h^3}{\beta_U \cdot 1_0 \cdot s_0^2} = (0.65336 \cdot 17 + 15.492) / (1.1307 \cdot 15.492) + 0.074265 \cdot 17^3 / (1.8633 \cdot 15.492 \cdot 5^2) = 2.0242$$

Угловая податливость фланца при затяжке:

$$y_\Phi = \frac{0.91 \cdot \beta_V}{E^{20} \cdot \lambda \cdot s_0^2 \cdot 1_0} = 0.91 \cdot 0.074265 / (1.99 \cdot 10^5 \cdot 2.0242 \cdot 5^2 \cdot 15.492) = 0.2482 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ/\text{Н}\cdot\text{м}$$

Плечи моментов:

$$a = 0$$

$$b = 0.5 \cdot (D_B - D_{\text{сп}}) = 0.5 \cdot (125 - 80.5) = 22.25 \text{ мм}$$

$$\beta = \frac{s_1}{s_0} = 14/5 = 2.8$$

$$x = \frac{1}{\sqrt{D \cdot s_0}} = 20 / (48 \cdot 5)^{1/2} = 1.291$$

$$\kappa = 1 + (\beta - 1) \cdot \frac{x}{x + \frac{1 + \beta}{4}} = 1 + (2.8 - 1) \cdot 1.291 / (1.291 + (1 + 2.8) / 4) = 2.0369$$

Эквивалентная толщина втулки для фланца, приварного встык:

$$s_3 = \kappa \cdot s_0 = 2.0369 \cdot 5 = 10.185 \text{ мм}$$

$$e = 0.5 \cdot (D_{\text{сп}} - D - s_3) = 0.5 \cdot (80.5 - 48 - 10.185) = 11.158 \text{ мм}$$

### Расчёт нагрузок:

Равнодействующая давления :

$$Q_d = 0.785 \cdot D_{\text{сп}}^2 \cdot p = 0.785 \cdot 80.5^2 \cdot 1.6311 = 8297.3 \text{ Н}$$

Усилие на прокладке в рабочих условиях, необходимое для обеспечения герметичности:

$$R_{\text{п}} = \pi \cdot D_{\text{сп}} \cdot b_0 \cdot m \cdot |p| = 3.1416 \cdot 80.5 \cdot 6.5 \cdot 3 \cdot |1.6311| = 8043.7 \text{ Н}$$

Усилие, необходимое для смятия прокладки при затяжке :

$$P_{\text{обж}} = 0.5 \cdot \pi \cdot D_{\text{сп}} \cdot b_0 \cdot q_{\text{обж}} = 0.5 \cdot 3.1416 \cdot 80.5 \cdot 6.5 \cdot 69 = 56712 \text{ Н}$$

**Расчетная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для герметизации в рабочих условиях (нагрузки + давление, без учета температурной нагрузки)**

$$\eta = y_{\text{п}} + y_{\text{б}} + y_{\text{ф}}' \cdot b'^2 + y_{\text{ф}}'' \cdot b''^2 = 0 + 0.36761 \cdot 10^{-6} + 0.40318 \cdot 10^{-4} \cdot 22.25^2 + 0.2482 \cdot 10^{-4} \cdot 22.25^2 = 0.93044 \cdot 10^{-6} \text{ мм/Н}$$

Коэффициенты жёсткости для фланцевого соединения с крышкой, нагруженного внутренним давлением:

$$\alpha = 1 - \frac{y_{\text{п}} - (y_{\text{ф}}' \cdot e + y_{\text{ф}}'' \cdot b) \cdot b}{\eta} = 1 - (0 - (0.2482 \cdot 10^{-4} \cdot 11.158 + 0.40318 \cdot 10^{-4} \cdot 22.25) \cdot 22.25) / 0.93044 \cdot 10^{-6} = 1.49$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре T = 20 °С:

$$E^{20}_{\text{кр}} = 1.99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Угловая податливость фланца, нагруженного внешним изгибающим моментом:

$$y_{\Phi M} = \left( \frac{\pi}{4} \right)^3 \cdot \frac{D_B}{E^{20} \cdot D_K \cdot h^3} = (3.1416 / 4)^3 \cdot 125 / (1.99 \cdot 10^5 \cdot 160 \cdot 17^3) = 0.22181 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ/\text{Н}\cdot\text{м}$$

Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	90651-20600-AM-02-220 РР	Лист		
Взам. инв. №	Подп. и дата	Инв. № подл.						
						336		

Угловая податливость фланца, нагруженного внешним изгибающим моментом:

$$y_{\Phi M} = \left( \frac{\pi}{4} \right)^3 \cdot \frac{D_6}{E^{20} \cdot D_{\pi} \cdot h^3} = (3.1416/4)^3 \cdot 125 / (1.99 \cdot 10^5 \cdot 160 \cdot 17^3) = 0.22181 \cdot 10^{-4} \text{ °/Н·м}$$

Коэффициенты жёсткости для фланцевого соединения, нагруженного внешним изгибающим моментом:

$$\alpha_M = \frac{y_6 + y'_{\Phi M} \cdot b' \cdot \left( b' + e' - \frac{e'^2}{D_{\pi}} \right) + y''_{\Phi M} \cdot b'' \cdot \left( b'' + e'' - \frac{e''^2}{D_{\pi}} \right)}{y_6 + y_{\pi} \cdot \left( \frac{D_6}{D_{\pi}} \right)^2 + y'_{\Phi M} \cdot b'^2 + y''_{\Phi M} \cdot b''^2}$$

$$= [0.36761 \cdot 10^{-6} + 0.22181 \cdot 10^{-4} \cdot 22.25 \cdot (22.25 + 22.25 - 22.25^2 / 80.5) + 0.22181 \cdot 10^{-4} \cdot 22.25 \cdot (22.25 + 11.158 - 11.158^2 / 80.5)] / [0.36761 \cdot 10^{-6} + 0 \cdot (125 / 80.5)^2 + 0.22181 \cdot 10^{-4} \cdot 22.25^2 + 0.22181 \cdot 10^{-4} \cdot 22.25^2] = 1.2949$$

$$P_{61} = \alpha \cdot (Q_{\pi} + F) + R_{\pi} + \frac{4 \cdot \alpha_M \cdot |M|}{D_{\pi}} = 1.49 \cdot (8297.3 + 0) + 8043.7 + 4 \cdot 1.2949 \cdot |0| / 80.5 = 20407 \text{ Н}$$

**Расчетная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для герметизации в рабочих условиях (только давление, без учета температурной нагрузки)**

$$P_{61} = \alpha \cdot (Q_{\pi} + F) + R_{\pi} + \frac{4 \cdot \alpha_M \cdot |M|}{D_{\pi}} = 1.49 \cdot (8297.3 + 0) + 8043.7 + 4 \cdot 1.2949 \cdot |0| / 80.5 = 20407 \text{ Н}$$

Суммарная площадь сечения болтов (шпилек) по внутреннему диаметру резьбы или сечению наименьшего диаметра:

$$A_6 = n \cdot f_6 = 4 \cdot 144 = 576 \text{ мм}^2$$

Расчётная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для обжатия прокладки и минимального начального натяжения болтов:

$$P_{62} = \max \{ P_{обж}; 0.4 \cdot A_6 \cdot [\sigma]_6^{20} \} = \max \{ 56712; 0.4 \cdot 576 \cdot 230 = 52992 \} = 56712 \text{ Н}$$

**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:  $K_{yz} = 1$

Допускаемые напряжения для болтов (шпилек) при затяжке :

$$[\sigma]_6^M = \xi \cdot K_{yp} \cdot K_{yz} \cdot K_{yt} \cdot [\sigma]_6^{20} = 1.2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 230 = 276 \text{ МПа}$$

**Расчетная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для герметизации в рабочих условиях (только давление, без учета температурной нагрузки)**

$$P_{61} = \alpha \cdot (Q_{\pi} + F) + R_{\pi} + \frac{4 \cdot \alpha_M \cdot |M|}{D_{\pi}} = 1.49 \cdot (8297.3 + 0) + 8043.7 + 4 \cdot 1.2949 \cdot |0| / 80.5 = 20407 \text{ Н}$$

Болтовая нагрузка в условиях затяжки :

$$P_6^M = \max \{ P_{61}; P_{62} \} = \max \{ 20407; 56712 \} = 56712 \text{ Н}$$

Условие прочности при затяжке:

$$\sigma_{61} = \frac{P_6^M}{A_6} \leq [\sigma]_6^M$$

$$\sigma_{61} = \frac{P_6^M}{A_6} = 56712 / 576 = 98.459 \text{ МПа}$$

Крутящий момент при затяжке болтов (шпилек) без смазки при  $\sigma_{61} < 120 \text{ МПа}$ :

$$M_{кр} = 0.3 \cdot \frac{P_6^M \cdot d}{n} = 0.3 \cdot 56712 \cdot 16 / 4 = 68.055 \text{ Н·м}$$

При наличии смазки величина  $M_{кр}$  снижается на 25% и составляет  $0.75 \cdot M_{кр} = 51.041 \text{ Н·м}$

$98.459 \text{ МПа} \leq 276 \text{ МПа}$ , **Условие прочности выполнено.**

Взам. инв. №				
Подп. и дата				
Инв. № подл.				
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата

90651-20600-AM-02-220 PP

Лист

337

Допускаемые напряжения для болтов (шпилек) при рабочих условиях:

$$[\sigma]_6^P = K_{ур} \cdot K_{уз} \cdot K_{ут} \cdot [\sigma]_6 = 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 230 = 230 \text{ МПа}$$

Болтовая нагрузка в рабочих условиях:

$$P_6^P = P_6^M + (1 - \alpha) \cdot (Q_d + F) + \frac{4 \cdot (1 - \alpha_m) \cdot |M|}{D_{от}} = 56712 + (1 - 1.49) \cdot (8297.3 + 0) + 4 \cdot (1 - 1.2949) \cdot |0| / 80.5 = 52647 \text{ Н}$$

Условие прочности в рабочих условиях:

$$\sigma_{62} = \frac{P_6^P}{A_6} \leq [\sigma]_6^P$$

$$\sigma_{62} = \frac{P_6^P}{A_6} = 52647 / 576 = 91.401 \text{ МПа}$$

91.401 МПа ≤ 230 МПа, **Условие прочности выполнено.**

### Расчёт второго фланца:

Коэффициент, учитывающий изгиб тарелки фланца между шпильками:

$$C_F = \max \left\{ 1; \sqrt{\frac{\frac{\pi \cdot D_6}{n} \cdot \frac{6 \cdot h}{m + 0.5}}{2 \cdot d + \frac{6 \cdot h}{m + 0.5}}} \right\} = \max \{1; (3.1416 \cdot 125 / 4 / (2 \cdot 16 + 6 \cdot 17 / (3 + 0.5)))^{1/2}\} = 1.2671$$

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при затяжке:

$$M^M = C_F \cdot P_6^M \cdot b = 1.2671 \cdot 56712 \cdot 22.25 = 1599 \text{ Н·м}$$

$$f = \max \left\{ \frac{C_{36}}{1 + A}; 1.0 \right\} = \max \{0.44314 / (1 + 1.8); 1.0\} = 1$$

$$D^* = D + c + s_1 \text{ при } (D + 2 \cdot c) < 20 \cdot (s_1 - c) \text{ и } f = 1 = 48 + 0 + 14 \text{ при } 48 < 20 \cdot (14 - 0) \text{ и } f = 1 = 62 \text{ мм}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении s<sub>1</sub>:

$$\sigma_1^M = \frac{M^M}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D^*} = 1599 / (2.0242 \cdot (14 - 3)^2 \cdot 62) = 105.3 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в условиях затяжки:

$$\sigma_R^M = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + 1.0}{\lambda \cdot h^2 \cdot 1.0 \cdot D} \cdot M^M = (1.33 \cdot 0.65336 \cdot 17 + 15.492) / (2.0242 \cdot 17^2 \cdot 15.492 \cdot 48) \cdot 1599 = 111.24 \text{ МПа}$$

$$\beta_Y = \frac{1}{K - 1} \cdot \left( 0.69 + 5.72 \cdot \frac{K^2 \cdot \lg K}{K^2 - 1} \right) = 1 / (3.3333 - 1) \cdot (0.69 + 5.72 \cdot 3.3333^2 \cdot \lg 3.3333 / (3.3333^2 - 1)) = 1.7043$$

$$\beta_Z = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = (3.3333^2 + 1) / (3.3333^2 - 1) = 1.1978$$

Окружное напряжение в тарелке в условиях затяжки:

$$\sigma_T^M = \frac{\beta_Y \cdot M^M}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^M = 1.7043 \cdot 1599 / (17^2 \cdot 48) - 1.1978 \cdot 111.24 = 63.195 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении s<sub>1</sub> (п. 8.5.1):

$$\max \{ |\sigma_1^M + \sigma_R^M|; |\sigma_1^M + \sigma_T^M| \} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{м}}^{20}$$

$$\max \{ |\sigma_1^M + \sigma_R^M|; |\sigma_1^M + \sigma_T^M| \} = \max \{ |105.3 + 111.24|; |105.3 + 63.195| \} = 216.54 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_{\text{м}}^{20} = 1.5 \cdot [\sigma]_F^{20} = 1.5 \cdot 164.5 = 246.75 \text{ МПа}$$

$$K = \frac{D_H}{D} = 160 / 48 = 3.3333$$

Коэффициент учета размеров тарелки фланца: K<sub>S</sub> = 1.2

$$K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{м}}^{20} = 1.2 \cdot 1 \cdot 246.75 = 296.1 \text{ МПа}$$

Взам. инв. №	Окружное напряжение в тарелке в условиях затяжки :				
	$\sigma_T^M = \frac{\beta_y \cdot M^M}{h^2 \cdot D} - \beta_z \cdot \sigma_R^M = 1.7043 \cdot 1599 / (17^2 \cdot 48) - 1.1978 \cdot 111.24 = 63.195 \text{ МПа}$				
Подп. и дата	Условие статической прочности при затяжке в сечении $s_1$ (п. 8.5.1):				
	$\max \left\{ \left  \sigma_1^M + \sigma_R^M \right ; \left  \sigma_1^M + \sigma_T^M \right  \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{М}}^{20}$ $\max \left\{ \left  \sigma_1^M + \sigma_R^M \right ; \left  \sigma_1^M + \sigma_T^M \right  \right\} = \max \{ 105.3 + 111.24;   105.3 + 63.195 \} = 216.54 \text{ МПа}$				
Инв. № подл.	Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):				
	$[\sigma]_{\text{М}}^{20} = 1.5 \cdot [\sigma]_{\text{Ф}}^{20} = 1.5 \cdot 164.5 = 246.75 \text{ МПа}$				
	$K = \frac{D_{\text{н}}}{D} = 160 / 48 = 3.3333$				
Изм.	Коэффициент учета размеров тарелки фланца: $K_S = 1.2$				
	$K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{М}}^{20} = 1.2 \cdot 1 \cdot 246.75 = 296.1 \text{ МПа}$				
Лист	90651-20600-AM-02-220 РР				
338					

216.54 МПа ≤ 296.1 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Приведенная нагрузка от внешней силы и момента :

$$Q_{FM}^+ = F + \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{ст}}} = 0 + 4 \cdot |0| / 80.5 = 0 \text{ Н}$$

$$Q_{FM}^- = F - \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{ст}}} = 0 - 4 \cdot |0| / 80.5 = 0 \text{ Н}$$

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при рабочих условиях:

$$M^P = C_F \cdot \max \{ p_E^P \cdot b + (Q_{\text{д}} + Q_{FM}) \cdot e; |Q_{\text{д}} + Q_{FM}| \cdot e \} = \frac{1.2671 \cdot \max \{ 52647 \cdot 22.25 + (8297.3 + 0) \cdot 11.158; |8297.3 + 0| \cdot 11.158 \}}{11.158} = 1601.6 \text{ Н·м}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении s<sub>1</sub>:

$$\sigma_1^P = \frac{M^P}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D} = 1601.6 / (2.0242 \cdot (14 - 3)^2 \cdot 62) = 105.47 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в рабочих условиях :

$$\sigma_R^P = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + 1_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot 1_0 \cdot D} \cdot M^P = (1.33 \cdot 0.65336 \cdot 17 + 15.492) / (2.0242 \cdot 17^2 \cdot 15.492 \cdot 48) \cdot 1601.6 = 111.43 \text{ МПа}$$

Окружное напряжение в тарелке в рабочих условиях :

$$\sigma_T^P = \frac{\beta_Y \cdot M^P}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^P = 1.7043 \cdot 1601.6 / (17^2 \cdot 48) - 1.1978 \cdot 111.43 = 63.301 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении S<sub>1</sub> (+):

$$\sigma_{\text{мм}}^{P+} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_1}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = (0.785 \cdot 48^2 \cdot 1.6311 + 0 + 4 \cdot 0 / (48 + 14)) / (3.1416 \cdot (48 + 14) \cdot (14 - 3)) = 1.3769 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении s<sub>1</sub> (п. 8.5.1):

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{мм}}^{P+} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{мм}}^{P+} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{\text{мм}}^{P+} \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{ж}}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{мм}}^{P+} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{мм}}^{P+} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{\text{мм}}^{P+} \right| \right\} = \frac{\max \{ |105.47 - 1.3769 + 111.43|; |105.47 - 1.3769 + 63.301|; |105.47 + 1.3769| \}}{|105.47 + 1.3769|} = 215.53 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_{\text{ж}} = 1.5 \cdot [\sigma]_{\text{ф}} = 1.5 \cdot 144 = 216 \text{ МПа}$$

$$K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{ж}} = 1.2 \cdot 1 \cdot 216 = 259.2 \text{ МПа}$$

215.53 МПа ≤ 259.2 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении S<sub>1</sub> (-):

$$\sigma_{\text{мм}}^{P-} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F - \frac{4 \cdot M}{D + s_1}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = (0.785 \cdot 48^2 \cdot 1.6311 + 0 - 4 \cdot 0 / (48 + 14)) / (3.1416 \cdot (48 + 14) \cdot (14 - 3)) = 1.3769 \text{ МПа}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{мм}}^{P-} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{мм}}^{P-} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{\text{мм}}^{P-} \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{ж}}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{мм}}^{P-} + \sigma_R^P \right|; \left| \sigma_1^P - \sigma_{\text{мм}}^{P-} + \sigma_T^P \right|; \left| \sigma_1^P + \sigma_{\text{мм}}^{P-} \right| \right\} = \frac{\max \{ |105.47 - 1.3769 + 111.43|; |105.47 - 1.3769 + 63.301|; |105.47 + 1.3769| \}}{|105.47 + 1.3769|} = 215.53 \text{ МПа}$$

215.53 МПа ≤ 259.2 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении s<sub>0</sub>:

$$\sigma_0^M = f \cdot \sigma_1^M = 1 \cdot 105.3 = 105.3 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении s<sub>0</sub> (п. 8.5.2):

$$\sigma_0^M \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R^{20}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_R^{20} = 3 \cdot [\sigma]_{\text{ф}}^{20} = 3 \cdot 164.5 = 493.5 \text{ МПа}$$

$$1.3 \cdot [\sigma]_R^{20} = 1.3 \cdot 493.5 = 641.55 \text{ МПа}$$

105.3 МПа ≤ 641.55 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении s<sub>0</sub>:

Взам. инв. №		$\max \left\{ \left  \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P-} + \sigma_R^P \right ; \left  \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P-} + \sigma_T^P \right ; \left  \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^{P-} \right  \right\} = \frac{\max\{ 105.47 - 1.3769 + 111.43 ;  105.47 - 1.3769 + 63.301 ;  105.47 + 1.3769 \}}{1} = 215.53 \text{ МПа}$				
		215.53 МПа ≤ 259.2 МПа, <b>Условие прочности выполнено.</b>				
Подп. и дата		Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении s <sub>0</sub> : $\sigma_0^{\pi} = f \cdot \sigma_1^{\pi} = 1 * 105.3 = 105.3 \text{ МПа}$				
		Условие статической прочности при затяжке в сечении s <sub>0</sub> (п. 8.5.2): $\sigma_0^{\pi} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R^{20}$ Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1): $[\sigma]_R^{20} = 3 \cdot [\sigma]_{\Phi}^{20} = 3 * 164.5 = 493.5 \text{ МПа}$ $1.3 \cdot [\sigma]_R^{20} = 1.3 * 493.5 = 641.55 \text{ МПа}$				
Инв. № подл.		105.3 МПа ≤ 641.55 МПа, <b>Условие прочности выполнено.</b>				
		Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении s <sub>0</sub> :				
					90651-20600-AM-02-220 РР	Лист
						339
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата		



Допускаемый угол поворота фланца:

$$[\varpi] = 0.34377^\circ$$

Коэффициент увеличения допускаемого угла поворота фланцев:  $K_\varpi = 1$

Условие выполнения жесткости фланцев:

$$\varpi \leq K_\varpi \cdot [\varpi] = 1 \cdot 0.34377 = 0.34377^\circ$$

**Условие жёсткости выполнено.**

**Расчёт с учетом стесненности температурных деформаций**

**Расчёт болтов(шпилек):**

Допускаемые напряжения для болтов (шпилек) при затяжке:

$$[\sigma]_6^M = \xi \cdot K_{yp} \cdot K_{yz} \cdot K_{yt} \cdot [\sigma]_6^{20} = 1.2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1.3 \cdot 230 = 358.8 \text{ МПа}$$

**Расчетная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для герметизации в рабочих условиях (только давление, с учетом температурной нагрузки)**

$$\gamma = \frac{1}{y_\pi + y_\epsilon \cdot \frac{E_\epsilon^{20}}{E_\epsilon} + \left( y_\Phi \cdot \frac{E_\Phi^{20}}{E_\Phi} + y_{xp} \cdot \frac{E_{xp}^{20}}{E_{xp}} \right) \cdot b^2} = \frac{1 / (0 + 0.36761 \cdot 10^{-6} \cdot 2.18 \cdot 10^5 / 2.1511 \cdot 10^5 + (0.2482 \cdot 10^{-4} \cdot 1.99 \cdot 10^5 / 1.91 \cdot 10^5 + 0.40318 \cdot 10^{-4} \cdot 1.99 \cdot 10^5 / 1.91 \cdot 10^5) \cdot 22.25^2)}{1.91 \cdot 10^5 + 0.40318 \cdot 10^{-4} \cdot 1.99 \cdot 10^5 / 1.91 \cdot 10^5} = 1.0428 \cdot 10^6 \text{ Н/мм}$$

Нагрузка от температурных деформаций:

$$Q_t = \gamma \cdot \left( \begin{aligned} &(\alpha'_\Phi \cdot h' + \alpha'_{ш} \cdot h'_{ш}) \cdot (t_{\Phi 1} - 20^\circ \text{C}) + \\ &+ (\alpha''_\Phi \cdot h'' + \alpha''_{ш} \cdot h''_{ш}) \cdot (t_{\Phi 2} - 20^\circ \text{C}) - \\ &- \alpha_\epsilon \cdot (h' + h'' + h'_{ш} + h''_{ш}) \cdot (t_\epsilon - 20^\circ \text{C}) \end{aligned} \right)$$

$$= 1.0428 \cdot 10^6 \cdot ((0.116 \cdot 10^{-4} \cdot 17 + 0 \cdot 0) \cdot (100 - 20^\circ \text{C}) + ((0.116 \cdot 10^{-4} \cdot 17 + 0 \cdot 0) \cdot (100 - 20^\circ \text{C}) - 0.134 \cdot 10^{-4} \cdot (17 + 17 + 0 + 0) \cdot (97 - 20^\circ \text{C}))$$

$$= (-3680.3) \text{ Н}$$

$$P_{61} = \max \left\{ \begin{aligned} &\alpha \cdot (Q_\pi + F) + R_\pi + \frac{4 \cdot \alpha_M \cdot |M|}{D_{\text{ст}}} \\ &\alpha \cdot (Q_\pi + F) + R_\pi + \frac{4 \cdot \alpha_M \cdot |M|}{D_{\text{ст}}} - Q_t \end{aligned} \right\} = \max \left\{ \begin{aligned} &1.49 \cdot (8297.3 + 0) + 8043.7 + 4 \cdot 1.2949 \cdot |0| / 80.5 = 204071.49 \\ &(8297.3 + 0) + 8043.7 + 4 \cdot 1.2949 \cdot |0| / 80.5 - (-3680.3) = 24087 \end{aligned} \right\} = 24087 \text{ Н}$$

Условие прочности при затяжке:

$$\sigma_{61} = \frac{P_6^M}{A_6} \leq [\sigma]_6^M$$

$$\sigma_{61} = \frac{P_6^M}{A_6} = 56712 / 576 = 98.459 \text{ МПа}$$

Крутящий момент при затяжке болтов (шпилек) без смазки при  $\sigma_{61} < 120 \text{ МПа}$ :

$$M_{xp} = 0.3 \cdot \frac{P_6^M \cdot d}{n} = 0.3 \cdot 56712 \cdot 16 / 4 = 68.055 \text{ Н·м}$$

При наличии смазки величина  $M_{кр}$  снижается на 25% и составляет  $0.75 \cdot M_{кр} = 51.041 \text{ Н·м}$

$98.459 \text{ МПа} \leq 358.8 \text{ МПа}$ , **Условие прочности выполнено.**

Допускаемые напряжения для болтов (шпилек) при рабочих условиях:

$$[\sigma]_6^P = K_{yp} \cdot K_{yz} \cdot K_{yt} \cdot [\sigma]_6 = 1 \cdot 1 \cdot 1.3 \cdot 230 = 299 \text{ МПа}$$

Болтовая нагрузка в рабочих условиях:

$$P_6^P = P_6^M + (1 - \alpha) \cdot (Q_\pi + F) + Q_t + \frac{4 \cdot (1 - \alpha_M) \cdot |M|}{D_{\text{ст}}} = 56712 + (1 - 1.49) \cdot (8297.3 + 0) + (-3680.3) + 4 \cdot (1 - 1.2949) \cdot |0| / 80.5 = 48966 \text{ Н}$$

Условие прочности в рабочих условиях:

$$\sigma_{62} = \frac{P_6^P}{A_6} \leq [\sigma]_6^P$$

$$\sigma_{62} = \frac{P_6^P}{A_6} = 48966 / 576 = 85.011 \text{ МПа}$$

Взам. инв. №					
Подп. и дата					
Инв. № подл.					
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	

90651-20600-AM-02-220 РР

Лист

341

85.011 МПа ≤ 299 МПа, **Условие прочности выполнено.**

**Расчетная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для герметизации в рабочих условиях (нагрузки + давление, с учетом температурной нагрузки)**

$$P_{\epsilon 1} = \max \left\{ \begin{array}{l} \alpha \cdot (Q_{\text{д}} + F) + R_{\text{п}} + \frac{4 \cdot \alpha_{\text{м}} \cdot |M|}{D_{\text{ст}}} \\ \alpha \cdot (Q_{\text{д}} + F) + R_{\text{п}} + \frac{4 \cdot \alpha_{\text{м}} \cdot |M|}{D_{\text{ст}}} - Q_{\text{т}} \end{array} \right\} = \max \left\{ \begin{array}{l} 1.49 \cdot (8297.3 + 0) + 8043.7 + 4 \cdot 1.2949 \cdot |0| / 80.5 = 204071.49 \\ (8297.3 + 0) + 8043.7 + 4 \cdot 1.2949 \cdot |0| / 80.5 - (-3680.3) = 24087 \end{array} \right\} = 24087 \text{ Н}$$

Условие прочности при затяжке:

$$\sigma_{\epsilon 1} = \frac{P_{\epsilon}^{\text{м}}}{A_{\epsilon}} \leq [\sigma]_{\epsilon}^{\text{м}}$$

$$\sigma_{\epsilon 1} = \frac{P_{\epsilon}^{\text{м}}}{A_{\epsilon}} = 56712 / 576 = 98.459 \text{ МПа}$$

Крутящий момент при затяжке болтов (шпилек) без смазки при  $\sigma_{\epsilon 1} < 120 \text{ МПа}$ :

$$M_{\text{кр}} = 0.3 \cdot \frac{P_{\epsilon}^{\text{м}} \cdot d}{n} = 0.3 \cdot 56712 \cdot 16 / 4 = 68.055 \text{ Н·м}$$

При наличии смазки величина  $M_{\text{кр}}$  снижается на 25% и составляет  $0.75 \cdot M_{\text{кр}} = 51.041 \text{ Н·м}$

### Расчёт второго фланца:

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при затяжке :

$$M^{\text{м}} = C_{\text{F}} \cdot P_{\epsilon}^{\text{м}} \cdot b = 1.2671 \cdot 56712 \cdot 22.25 = 1599 \text{ Н·м}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении  $s_1$ :

$$\sigma_1^{\text{м}} = \frac{M^{\text{м}}}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D} = 1599 / (2.0242 \cdot (14 - 3)^2 \cdot 62) = 105.3 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в условиях затяжки :

$$\sigma_R^{\text{м}} = \frac{1.33 \cdot \beta_{\text{F}} \cdot h + 1.0 \cdot M^{\text{м}}}{\lambda \cdot h^2 \cdot 1.0 \cdot D} = (1.33 \cdot 0.65336 \cdot 17 + 15.492) / (2.0242 \cdot 17^2 \cdot 15.492 \cdot 48) \cdot 1599 = 111.24 \text{ МПа}$$

Окружное напряжение в тарелке в условиях затяжки :

$$\sigma_T^{\text{м}} = \frac{\beta_{\text{Y}} \cdot M^{\text{м}}}{h^2 \cdot D} - \beta_{\text{Z}} \cdot \sigma_R^{\text{м}} = 1.7043 \cdot 1599 / (17^2 \cdot 48) - 1.1978 \cdot 111.24 = 63.195 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении  $s_1$  (п. 8.5.1):

$$\max \{ |\sigma_1^{\text{м}} + \sigma_R^{\text{м}}|; |\sigma_1^{\text{м}} + \sigma_T^{\text{м}}| \} \leq K_{\text{S}} \cdot K_{\text{T}} \cdot [\sigma]_{\text{м}}^{20}$$

$$\max \{ |\sigma_1^{\text{м}} + \sigma_R^{\text{м}}|; |\sigma_1^{\text{м}} + \sigma_T^{\text{м}}| \} = \max \{ |105.3 + 111.24|; |105.3 + 63.195| \} = 216.54 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_{\text{м}}^{20} = 1.5 \cdot [\sigma]_{\text{Ф}}^{20} = 1.5 \cdot 164.5 = 246.75 \text{ МПа}$$

Коэффициент учета размеров тарелки фланца:  $K_{\text{S}} = 1.2$

$$K_{\text{S}} \cdot K_{\text{T}} \cdot [\sigma]_{\text{м}}^{20} = 1.2 \cdot 1.3 \cdot 246.75 = 384.93 \text{ МПа}$$

216.54 МПа ≤ 384.93 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Приведенная нагрузка от внешней силы и момента :

$$Q_{\text{FM}}^+ = F + \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{ст}}} = 0 + 4 \cdot |0| / 80.5 = 0 \text{ Н}$$

$$Q_{\text{FM}}^- = F - \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{ст}}} = 0 - 4 \cdot |0| / 80.5 = 0 \text{ Н}$$

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при рабочих условиях:

$$M^{\text{P}} = C_{\text{F}} \cdot \max \{ P_{\epsilon}^{\text{P}} \cdot b + (Q_{\text{д}} + Q_{\text{FM}}) \cdot e; |Q_{\text{д}} + Q_{\text{FM}}| \cdot e \} = \frac{1.2671 \cdot \max \{ 48966 \cdot 22.25 + (8297.3 + 0) \cdot 11.158; |8297.3 + 0| \cdot 11.158 \}}{11.158} = 1497.9 \text{ Н·м}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_1$ :

Взам. инв. №		$K_S = 1.2$				
		Коэффициент учета размеров тарелки фланца: $K_S = 1.2$				
Подп. и дата		$K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{фл}}^{20} = 1.2 \cdot 1.3 \cdot 246.75 = 384.93 \text{ МПа}$				
		216.54 МПа ≤ 384.93 МПа, <b>Условие прочности выполнено.</b>				
Инв. № подл.		Приведенная нагрузка от внешней силы и момента :				
		$Q_{\text{FM}}^+ = F + \frac{4 \cdot  M }{D_{\text{фл}}} = 0 + 4 \cdot  0  / 80.5 = 0 \text{ Н}$				
		$Q_{\text{FM}}^- = F - \frac{4 \cdot  M }{D_{\text{фл}}} = 0 - 4 \cdot  0  / 80.5 = 0 \text{ Н}$				
		Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при рабочих условиях:				
		$M^P = C_F \cdot \max \left\{ P_g^P \cdot b + (Q_{\text{д}} + Q_{\text{FM}}) \cdot e;  Q_{\text{д}} + Q_{\text{FM}}  \cdot e \right\} = \frac{1.2671 \cdot \max\{48966 \cdot 22.25 + (8297.3 + 0) \cdot 11.158;  8297.3 + 0  \cdot 11.158\}}{11.158} = 1497.9 \text{ Н·м}$				
		Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении s <sub>1</sub> :				
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	90651-20600-AM-02-220 РР	Лист
						342



$$\sigma_1^P = \frac{M^P}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D} = 1497.9 / (2.0242 \cdot (14 - 3)^2 \cdot 62) = 98.64 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в рабочих условиях :

$$\sigma_R^P = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + l_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot l_0 \cdot D} \cdot M^P = (1.33 \cdot 0.65336 \cdot 17 + 15.492) / (2.0242 \cdot 17^2 \cdot 15.492 \cdot 48) \cdot 1497.9 = 104.21 \text{ МПа}$$

Окружное напряжение в тарелке в рабочих условиях :

$$\sigma_T^P = \frac{\beta_Y \cdot M^P}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^P = 1.7043 \cdot 1497.9 / (17^2 \cdot 48) - 1.1978 \cdot 104.21 = 59.2 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_1$  (+):

$$\sigma_{1mm}^{P+} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_1}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = (0.785 \cdot 48^2 \cdot 1.6311 + 0 + 4 \cdot 0 / (48 + 14)) / (3.1416 \cdot (48 + 14) \cdot (14 - 3)) = 1.3769 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_1$  (п. 8.5.1):

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P+} + \sigma_R^P \right|, \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P+} + \sigma_T^P \right|, \left| \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^{P+} \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{м}}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P+} + \sigma_R^P \right|, \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P+} + \sigma_T^P \right|, \left| \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^{P+} \right| \right\} = \frac{\max\{|98.64 - 1.3769 + 104.21|; |98.64 - 1.3769 + 59.2|; |98.64 + 1.3769|\}}{1.3769} = 201.48 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_{\text{м}} = 1.5 \cdot [\sigma]_{\text{ф}} = 1.5 \cdot 144 = 216 \text{ МПа}$$

$$K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{м}} = 1.2 \cdot 1.3 \cdot 216 = 336.96 \text{ МПа}$$

201.48 МПа ≤ 336.96 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_1$  (-):

$$\sigma_{1mm}^{P-} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F - \frac{4 \cdot M}{D + s_1}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = (0.785 \cdot 48^2 \cdot 1.6311 + 0 - 4 \cdot 0 / (48 + 14)) / (3.1416 \cdot (48 + 14) \cdot (14 - 3)) = 1.3769 \text{ МПа}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P-} + \sigma_R^P \right|, \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P-} + \sigma_T^P \right|, \left| \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^{P-} \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{м}}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P-} + \sigma_R^P \right|, \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P-} + \sigma_T^P \right|, \left| \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^{P-} \right| \right\} = \frac{\max\{|98.64 - 1.3769 + 104.21|; |98.64 - 1.3769 + 59.2|; |98.64 + 1.3769|\}}{1.3769} = 201.48 \text{ МПа}$$

201.48 МПа ≤ 336.96 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_0^M = f \cdot \sigma_1^M = 1 \cdot 105.3 = 105.3 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении  $s_0$  (п. 8.5.2):

$$\sigma_0^M \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R^{20}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_R^{20} = 3 \cdot [\sigma]_{\text{ф}}^{20} = 3 \cdot 164.5 = 493.5 \text{ МПа}$$

$$1.3 \cdot [\sigma]_R^{20} = 1.3 \cdot 493.5 = 641.55 \text{ МПа}$$

105.3 МПа ≤ 641.55 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_0^P = f \cdot \sigma_1^P = 1 \cdot 98.64 = 98.64 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_0$  (+):

$$\sigma_{0mm}^{P+} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_0}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = (0.785 \cdot 48^2 \cdot 1.6311 + 0 + 4 \cdot 0 / (48 + 5)) / (3.1416 \cdot (48 + 5) \cdot (5 - 3)) = 8.8588 \text{ МПа}$$

Окружное мембранное напряжение от действия давления во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_{0mo}^P = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s_0 - c)} = 1.6311 \cdot 48 / (2 \cdot (5 - 3)) = 19.573 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

Взам. инв. №		$1.3 \cdot [\sigma]_R^{20} = 1.3 \cdot 493.5 = 641.55 \text{ МПа}$ $105.3 \text{ МПа} \leq 641.55 \text{ МПа}$ , <b>Условие прочности выполнено.</b> Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении $s_0$ : $\sigma_0^P = f \cdot \sigma_1^P = 1 \cdot 98.64 = 98.64 \text{ МПа}$ Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении $S_0$ (+): $\sigma_{0mm}^{P+} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_0}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = (0.785 \cdot 48^2 \cdot 1.6311 + 0 + 4 \cdot 0 / (48 + 5)) / (3.1416 \cdot (48 + 5) \cdot (5 - 3)) = 8.8588 \text{ МПа}$ Окружное мембранное напряжение от действия давления во втулке в рабочих условиях в сечении $s_0$ : $\sigma_{0mo}^P = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s_0 - c)} = 1.6311 \cdot 48 / (2 \cdot (5 - 3)) = 19.573 \text{ МПа}$ Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении $s_0$ :	
		Подп. и дата	

Инв. № подл.					90651-20600-AM-02-220 РР	Лист
						343
	Изм.	Лист	№ док.	Подп.		Дата

НЕФТЕХИМПРОЕКТ NEFTECHIMPROEKT		МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ		РР			
<div><div><div><div>max {  σ<sub>0</sub><sup>P</sup> ± σ<sub>0mm</sub><sup>P+</sup>   ;  0.3 · σ<sub>0</sub><sup>P</sup> ± σ<sub>0mo</sub><sup>P</sup>   ;  0.7 · σ<sub>0</sub><sup>P</sup> ± (σ<sub>0mm</sub><sup>P+</sup> - σ<sub>0mo</sub><sup>P</sup>)   } ≤ 1.3 · [σ]<sub>R</sub></div><div>max {  σ<sub>0</sub><sup>P</sup> ± σ<sub>0mm</sub><sup>P+</sup>   ;  0.3 · σ<sub>0</sub><sup>P</sup> ± σ<sub>0mo</sub><sup>P</sup>   ;  0.7 · σ<sub>0</sub><sup>P</sup> ± (σ<sub>0mm</sub><sup>P+</sup> - σ<sub>0mo</sub><sup>P</sup>)   } = max {  98.64 ± 8.8588  ;  0.3 * 98.64 ± 19.573  ;  0.7 * 98.64 ± (8.8588 - 19.573)  } = 107.5 МПа</div></div><div>Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):</div><div>[σ]<sub>R</sub> = 3 · [σ]<sub>ф</sub> = 3 * 144 = 432 МПа</div><div>1.3 · [σ]<sub>R</sub> = 1.3 * 432 = 561.6 МПа</div><div>107.5 МПа ≤ 561.6 МПа, <b>Условие прочности выполнено.</b></div><div>Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении S<sub>0</sub> (–):</div><div><div><div><div><div>0.785 · D<sup>2</sup> · p + F - <math>\frac{4 \cdot M}{D + s_0}</math></div><div>σ<sub>0mm</sub><sup>P-</sup> = <math>\frac{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)}</math></div></div><div>= (0.785 * 48<sup>2</sup> * 1.6311 + 0 - 4 * 0 / (48 + 5)) / (3.1416 * (48 + 5) * (5 - 3)) = 8.8588 МПа</div></div></div><div><div><div><div>max {  σ<sub>0</sub><sup>P</sup> ± σ<sub>0mm</sub><sup>P-</sup>   ;  0.3 · σ<sub>0</sub><sup>P</sup> ± σ<sub>0mo</sub><sup>P</sup>   ;  0.7 · σ<sub>0</sub><sup>P</sup> ± (σ<sub>0mm</sub><sup>P-</sup> - σ<sub>0mo</sub><sup>P</sup>)   } ≤ 1.3 · [σ]<sub>R</sub></div><div>max {  σ<sub>0</sub><sup>P</sup> ± σ<sub>0mm</sub><sup>P-</sup>   ;  0.3 · σ<sub>0</sub><sup>P</sup> ± σ<sub>0mo</sub><sup>P</sup>   ;  0.7 · σ<sub>0</sub><sup>P</sup> ± (σ<sub>0mm</sub><sup>P-</sup> - σ<sub>0mo</sub><sup>P</sup>)   } = max {  98.64 ± 8.8588  ;  0.3 * 98.64 ± 19.573  ;  0.7 * 98.64 ± (8.8588 - 19.573)  } = 107.5 МПа</div></div></div><div>107.5 МПа ≤ 561.6 МПа, <b>Условие прочности выполнено.</b></div><div><b>Расчет в сечении s<sub>0</sub> в рабочих условиях (п. 8.5.5 ГОСТ 34233.4-2017):</b></div><div>Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении S<sub>0</sub>:</div><div><div><div><div>max {  σ<sub>0mo</sub><sup>P</sup>   ;  σ<sub>0mm</sub><sup>P</sup>   } ≤ [σ]<sub>ф</sub></div><div>max {  σ<sub>0mo</sub><sup>P</sup>   ;  σ<sub>0mm</sub><sup>P</sup>   } = max {  19.573  ;  8.8588  } = 19.573 МПа</div></div></div><div>19.573 МПа ≤ 144 МПа, <b>Условие прочности выполнено.</b></div><div>Условие статической прочности при затяжке для тарелок:</div><div><div><div><div>max {  σ<sub>R</sub><sup>M</sup>   ;  σ<sub>T</sub><sup>M</sup>   } ≤ K<sub>T</sub> · [σ]<sub>ф</sub><sup>20</sup></div><div>max {  σ<sub>R</sub><sup>M</sup>   ;  σ<sub>T</sub><sup>M</sup>   } = max {  111.24  ;  63.195  } = 111.24 МПа</div></div></div><div>K<sub>T</sub> · [σ]<sub>ф</sub><sup>20</sup> = 1.3 * 164.5 = 213.85 МПа</div><div>111.24 МПа ≤ 213.85 МПа, <b>Условие прочности выполнено.</b></div><div>Условие статической прочности в рабочих условиях для тарелок:</div><div><div><div><div>max {  σ<sub>R</sub><sup>P</sup>   ;  σ<sub>T</sub><sup>P</sup>   } ≤ K<sub>T</sub> · [σ]<sub>ф</sub></div><div>max {  σ<sub>R</sub><sup>P</sup>   ;  σ<sub>T</sub><sup>P</sup>   } = max {  104.21  ;  59.2  } = 104.21 МПа</div></div></div><div>K<sub>T</sub> · [σ]<sub>ф</sub> = 1.3 * 144 = 187.2 МПа</div><div>104.21 МПа ≤ 187.2 МПа, <b>Условие прочности выполнено.</b></div><div><b>Жёсткость фланца:</b></div><div>Угол поворота фланца в рабочих условиях:</div><div><div><div><div>⊙ = M<sup>P</sup> · y<sub>ф</sub> · <math>\frac{E^{20}}{E}</math></div><div>= 1497.9 * 0.2482 · 10<sup>-4</sup> * 1.99 · 10<sup>5</sup> / 1.91 · 10<sup>5</sup> = 0.038735 °</div></div></div><div>Условие выполнения жесткости фланцев :</div><div><div><div><div>⊙ ≤ K<sub>⊙</sub> · [⊙]</div><div>= 1 * 0.34377 = 0.34377 °</div></div></div><div><b>Условие жёсткости выполнено.</b></div><div><b>Расчёт крышки на прочность и устойчивость по ГОСТ 34233.2-2017</b></div><div>Коэффициент ослабления для днищ, не имеющих отверстий K<sub>0</sub> = 1.0</div></div></div></div></div></div></div></div></div></div>					Взам. инв. №	Подп. и дата	Инов. № подл.
Изм.				Лист			
Лист				344			

**Днища и крышки с дополнительным краевым моментом, нагруженные избыточным давлением**

$$\psi = \frac{P_6^P}{Q_д} = 48966 / 8297.3 = 5.9015$$

$$K_6 = 0.41 \cdot \sqrt{\frac{1 + 3 \cdot \psi \cdot \left( \frac{D_3}{D_{с.п.}} - 1 \right)}{\frac{D_3}{D_{с.п.}}}} = 0.41 \cdot \left[ (1 + 3 \cdot 5.9015 \cdot (125 / 80.5 - 1)) / (125 / 80.5) \right]^{1/2} = 1.0806$$

Нарушено условие применимости расчётных формул:

$$\frac{s_1 - c}{D_p} \leq 0.11$$

В этом случае поправочный коэффициент для допускаемого давления:

$$K_p = \frac{2.2}{1 + \sqrt{1 + \left( 6 \cdot \frac{s_1 - c}{D_p} \right)^2}} = 2.2 / [1 + (1 + (6 \cdot [18 - 3] / 80.5)^2)^{1/2}] = 0.88001$$

Допускаемое давление :

$$[p] = \left( \frac{s_1 - c}{K_0 \cdot K_6 \cdot D_p} \right)^3 \cdot [\sigma] \cdot \varphi \cdot K_p = ([18 - 3] / [1 \cdot 1.0806 \cdot 80.5])^2 \cdot 144 \cdot 1 \cdot 0.88001 = 3.7678 \text{ МПа}$$

$$3.7678 \text{ МПа} \geq 1.6311 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности выполнено.**

**Днища и крышки, нагруженные избыточным давлением**

Расчётная толщина стенки с учётом прибавок :

$$s_{\text{ш}} + c = K_6 \cdot K_0 \cdot D_p \cdot \sqrt{\frac{p}{\varphi \cdot [\sigma] \cdot K_p}} + c = 1.0806 \cdot 1 \cdot 80.5 \cdot (1.6311 / [1 \cdot 144 \cdot 0.88001])^{1/2} + 3 = 12.869 \text{ мм}$$

$$12.869 \text{ мм} \leq 18 \text{ мм}$$

Заключение: **Условие прочности выполнено.**

$$K_7 = 0.8 \cdot \sqrt{\frac{D_3}{D_{с.п.}} - 1} = 0.8 \cdot [125 / 80.5 - 1]^{1/2} = 0.5948$$

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре 100 °С (рабочие условия):

$$[\sigma]_{\text{кр}} = 144 \text{ МПа}$$

$$\Phi = \max \left\{ \frac{P_6^P}{[\sigma]}; \frac{P_6^M}{[\sigma]^{20}} \right\} = \max \{ 48966 / 144; 56712 / 222.73 \} = 340.04 \text{ мм}^2$$

Расчётная толщина крышки в месте уплотнения с учётом прибавок :

$$s_{2p} + c = \max \left\{ K_7 \cdot \sqrt{\Phi}; \frac{0.6}{D_{с.п.}} \cdot \Phi \right\} + c = \max \{ 0.5948 \cdot 340.04^{1/2}; 0.6 \cdot 340.04 / 80.5 \} + 0 = 10.968 \text{ мм}$$

$$10.968 \text{ мм} \leq 17 \text{ мм}$$

Заключение: **Условие прочности выполнено.**

$$K_7' = 0.8 \cdot \sqrt{\frac{D_3}{D_2} - 1} = 0.8 \cdot [125 / 87 - 1]^{1/2} = 0.52872$$

Расчётная толщина вне зоны уплотнения с учётом прибавок :

$$s_{3p} + c = \max \left\{ K_7' \cdot \sqrt{\Phi}; \frac{0.6}{D_2} \cdot \Phi \right\} + c = \max \{ 0.52872 \cdot 340.04^{1/2}; 0.6 \cdot 340.04 / 87 \} + 0 = 9.7497 \text{ мм}$$

$$9.7497 \text{ мм} \leq 13 \text{ мм}$$

Заключение: **Условие прочности выполнено.**

Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	90651-20600-AM-02-220 РР	Лист 345
Взам. инв. №						
Подп. и дата						
Инв. № подл.						

Этот документ является собственностью "НЕФТЕХИМПРОЕКТ" и не подлежит копированию и распространению без его согласия

Расчет давления испытаний

Фланец:

Пробное давление при гидравлическом испытании, при работе элемента под внутренним давлением:

$$P_{гр} = 1.25 \cdot p \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]_t} = 1.25 \cdot 1.6311 \cdot 164.5 / 144 = 2.3291 \text{ МПа}$$

Пробное давление при гидравлическом испытании, при работе элемента под внутренним давлением:

$$P_{гр} = 1.25 \cdot p \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]_t} = 1.25 \cdot 1.6311 \cdot 164.5 / 144 = 2.3291 \text{ МПа}$$

Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)

Условия нагружения при испытаниях:

Расчётное осевое сжимающее усилие, F: 0 Н  
Расчётный изгибающий момент, M: 0 Н·м  
Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 2.2694 МПа  
По ГОСТ 34233.1-2017 расчёт на прочность при испытаниях допускается не проводить, если выполнено условие:

$$P_{исп} < 1.35 \cdot P_{расч} \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]}$$
  
$$1.35 \cdot P_{расч} \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]} = 1.35 \cdot 1.6311 \cdot 164.5 / 144 = 2.5154 \text{ МПа} \geq 2.2694 \text{ МПа}$$

Расчёт фланца по ГОСТ 34233.4-2017:

Свойства материала болтов (шпилек)

Температура болтов (шпилек), t<sub>б</sub>: 20 °С  
Допускаемые напряжения для материала 35Х Крепеж при температуре 20 °С (условия гидроиспытаний):  
[σ]<sup>20<sub>б</sub></sup>= 230 МПа  
Модуль продольной упругости для материала 35Х Крепеж при температуре T = 20 °С:  
E<sup>20<sub>б</sub></sup>= 2.18·10<sup>5</sup> МПа  
Коэффициент линейного расширения для материала 35Х Крепеж при температуре T = 20 °С:  
α<sup>20<sub>б</sub></sup>= 0.134·10<sup>-4</sup>/°С

Свойства материала смежного элемента фланца 2 Измерение температуры (T1)

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Труба при температуре 20 °С (условия гидроиспытаний):  
$$[\sigma]_{20ш} = \frac{R_{e/20}}{n_T} = 280 / 1.1 = 254.55 \text{ МПа}$$

Свойства материала фланца

Температура фланца (кольца), t<sub>ф</sub>: 20 °С  
Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре 20 °С (условия гидроиспытаний):  
$$[\sigma]_{20ф} = \frac{R_{e/20}}{n_T} = 245 / 1.1 = 222.73 \text{ МПа}$$
  
Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре T = 20 °С:  
E<sup>20<sub>ф</sub></sup>= 1.99·10<sup>5</sup> МПа  
Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре T = 20 °С:  
α<sup>20<sub>ф</sub></sup>= 0.116·10<sup>-4</sup>/°С

Взам. инв. №		Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре 20 °С (условия гидроиспытаний):					
		$[\sigma]^{20}_{\Phi} = \frac{R_{eL20}}{n_T} = 245 / 1.1 = 222.73 \text{ МПа}$					
Подп. и дата		Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре T = 20 °С: $E^{20}_{\Phi} = 1.99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре T = 20 °С: $\alpha^{20}_{\Phi} = 0.116 \cdot 10^{-4} / ^\circ\text{C}$					
Инв. № подл.						90651-20600-AM-02-220 РР	Лист
							346
	Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата		

НЕФТЕХИМПРОЕКТ NEFTECHIMPROEKT		МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ			РР
Характеристики прокладки:					
Тип и материал прокладки	Коэффициент m	Удельное давление обжатия q <sub>обж</sub> , МПа	Допускаемое удельное давление [q], МПа	Коэффициент обжатия K	Условный модуль сжатия E <sub>n</sub> , МПа
Спирально-навитая с лентой из нержавеющей стали	3	69	-	-	-
Эффективная ширина прокладки : b <sub>0</sub> = 6.5 мм <div> Примечание: <div> <div>b<sub>0</sub> = b<sub>тп</sub></div> <div>при b<sub>тп</sub> ≤ 15.0 мм</div> </div> <div> <div>b<sub>0</sub> = 3.8 · √b<sub>тп</sub></div> <div>при b<sub>тп</sub> &gt; 15.0 мм</div> </div> </div> Средний эффективный диаметр прокладки: D <sub>ст</sub> = D <sub>тпф</sub> - b <sub>0</sub> = 87 - 6.5 = 80.5 мм Расчётные параметры крышки: <div> <div>K<sub>кр</sub> = <math>\frac{D_H}{D_{ст}}</math></div> <div>= 160 / 80.5</div> <div>= 1.9876</div> </div> <div> <div>x<sub>кр</sub> = <math>\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 (\frac{s_1}{s_2})^3]}</math></div> <div>= (0.67 * (1.9876² * (1 + 8.55 * lg(1.9876)) - 1)) / (((1.9876 - 1) * [1.9876² - 1 + (1.857 * 1.9876² + 1) * (18 / 17)³])</div> <div>= 0.68799</div> </div> Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре T = 20 °С: E <sup>20</sup> <sub>кр</sub> = 1.99·10 <sup>5</sup> МПа Угловая податливость крышки : <div> <div>y<sub>кр</sub> = <math>\frac{x_{кр}}{E_{кр}^{20} \cdot s_2^3}</math></div> <div>= 0.68799 / (1.99·10<sup>5</sup> * 17³)</div> <div>= 0.40318·10<sup>-4</sup> °/Н·м</div> </div> Расчётные параметры фланца: <div> <div>l<sub>0</sub> = <math>\sqrt{D \cdot s_0}</math></div> <div>= (48 * 5)<sup>1/2</sup></div> <div>= 15.492 мм</div> </div> <div> <div>β<sub>F</sub> = 0.65336</div> </div> <div> <div>β<sub>T</sub> = <math>\frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \lg K) - 1}{(1.05 + 1.945 \cdot K^2) \cdot (K - 1)}</math></div> <div>= (3.3333² * (1 + 8.55 * lg 3.3333) - 1) / ((1.05 + 1.945 * 3.3333²) * (3.3333 - 1))</div> <div>= 1.1307</div> </div> <div> <div>β<sub>V</sub> = 0.074265</div> </div> <div> <div>β<sub>U</sub> = <math>\frac{K^2 (1 + 8.55 \cdot \lg K) - 1}{1.36 \cdot (K^2 - 1) \cdot (K - 1)}</math></div> <div>= (3.3333² * (1 + 8.55 * lg 3.3333) - 1) / (1.36 * (3.3333² - 1) * (3.3333 - 1))</div> <div>= 1.8633</div> </div> <div> <div>λ = <math>\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}</math></div> <div>= (0.65336 * 17 + 15.492) / (1.1307 * 15.492) + 0.074265 * 17³ / (1.8633 * 15.492 * 5²)</div> <div>= 2.0242</div> </div> Угловая податливость фланца при затяжке: <div> <div>y<sub>ф</sub> = <math>\frac{0.91 \cdot \beta_V}{E^{20} \cdot \lambda \cdot s_0^2 \cdot l_0}</math></div> <div>= 0.91 * 0.074265 / (1.99·10<sup>5</sup> * 2.0242 * 5² * 15.492)</div> <div>= 0.2482·10<sup>-4</sup> °/Н·м</div> </div> Плечи моментов: <div> <div>a = 0</div> </div> <div> <div>b = 0.5 · (D<sub>Б</sub> - D<sub>стп</sub>)</div> <div>= 0.5 * (125 - 80.5)</div> <div>= 22.25 мм</div> </div> <div> <div>β = <math>\frac{s_1}{s_0}</math></div> <div>= 14/5</div> <div>= 2.8</div> </div>					
90651-20600-AM-02-220 РР					Лист
					347

$$x = \frac{1}{\sqrt{D \cdot s_0}} = 20 / (48 \cdot 5)^{1/2} = 1.291$$

$$\kappa = 1 + (\beta - 1) \cdot \frac{x}{x + \frac{1 + \beta}{4}} = 1 + (2.8 - 1) \cdot 1.291 / (1.291 + (1 + 2.8) / 4) = 2.0369$$

Эквивалентная толщина втулки для фланца, приварного встык:

$$s_3 = \kappa \cdot s_0 = 2.0369 \cdot 5 = 10.185 \text{ мм}$$

$$e = 0.5 \cdot (D_{\text{фл}} - D - s_3) = 0.5 \cdot (80.5 - 48 - 10.185) = 11.158 \text{ мм}$$

### Расчёт нагрузок:

Равнодействующая давления :

$$Q_{\text{д}} = 0.785 \cdot D_{\text{фл}}^2 \cdot p = 0.785 \cdot 80.5^2 \cdot 2.2694 = 11544 \text{ Н}$$

Усилие на прокладке в рабочих условиях, необходимое для обеспечения герметичности:

$$R_{\text{п}} = \pi \cdot D_{\text{фл}} \cdot b_0 \cdot m \cdot |p| = 3.1416 \cdot 80.5 \cdot 6.5 \cdot 3 \cdot |2.2694| = 11191 \text{ Н}$$

Усилие, необходимое для смятия прокладки при затяжке :

$$P_{\text{обж}} = 0.5 \cdot \pi \cdot D_{\text{фл}} \cdot b_0 \cdot q_{\text{обж}} = 0.5 \cdot 3.1416 \cdot 80.5 \cdot 6.5 \cdot 69 = 56712 \text{ Н}$$

**Расчетная болтовая нагрузка при затяжке, необходимая для герметизации в условиях испытаний (нагрузки + давление)**

Рабочая длина болта (шпильки):

$$L_{\text{б0}} = h + s_2 + h_{\text{п}} = 17 + 17 + 3.2 = 37.2 \text{ мм}$$

Эффективная длина шпильки :

$$L_{\text{б}} = L_{\text{б0}} + 0.56 \cdot d = 37.2 + 0.56 \cdot 16 = 46.16 \text{ мм}$$

Площадь сечения шпильки (по внутреннему диаметру резьбы):

$$f_6 = 144 \text{ мм}^2$$

Податливость шпилек :

$$y_6 = \frac{L_{\text{б}}}{E_6^{20} \cdot f_6 \cdot n} = 46.16 / (2.18 \cdot 10^5 \cdot 144 \cdot 4) = 0.36761 \cdot 10^{-6} \text{ мм/Н}$$

$$\eta = y_{\text{п}} + y_6 + y_{\text{ф}}' \cdot b'^2 + y_{\text{ф}}'' \cdot b''^2 = 0 + 0.36761 \cdot 10^{-6} + 0.40318 \cdot 10^{-4} \cdot 22.25^2 + 0.2482 \cdot 10^{-4} \cdot 22.25^2 = 0.93044 \cdot 10^{-6} \text{ мм/Н}$$

Коэффициенты жёсткости для фланцевого соединения с крышкой, нагруженного внутренним давлением:

$$\alpha = 1 - \frac{y_{\text{п}} - (y_{\text{ф}}' \cdot e + y_{\text{ф}}'' \cdot b) \cdot b}{\eta} = 1 - (0 - (0.2482 \cdot 10^{-4} \cdot 11.158 + 0.40318 \cdot 10^{-4} \cdot 22.25) \cdot 22.25) / 0.93044 \cdot 10^{-6} = 1.49$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.КП 245 ГОСТ 8479 Поковка при температуре T = 20 °C:

$$E_{\text{кр}}^{20} = 1.99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Угловая податливость фланца, нагруженного внешним изгибающим моментом:

$$y_{\text{фМ}} = \left( \frac{\pi}{4} \right)^3 \cdot \frac{D_{\text{б}}}{E^{20} \cdot D_{\text{фл}} \cdot h^3} = (3.1416 / 4)^3 \cdot 125 / (1.99 \cdot 10^5 \cdot 160 \cdot 17^3) = 0.22181 \cdot 10^{-4} \text{ °/Н·м}$$

Угловая податливость фланца, нагруженного внешним изгибающим моментом:

$$y_{\text{фМ}} = \left( \frac{\pi}{4} \right)^3 \cdot \frac{D_{\text{б}}}{E^{20} \cdot D_{\text{фл}} \cdot h^3} = (3.1416 / 4)^3 \cdot 125 / (1.99 \cdot 10^5 \cdot 160 \cdot 17^3) = 0.22181 \cdot 10^{-4} \text{ °/Н·м}$$

Коэффициенты жёсткости для фланцевого соединения, нагруженного внешним изгибающим моментом:

$$\alpha_{\text{М}} = \frac{y_6 + y_{\text{фМ}}' \cdot b' \cdot \left( b' + e' - \frac{e'^2}{D_{\text{фл}}} \right) + y_{\text{фМ}}'' \cdot b'' \cdot \left( b'' + e'' - \frac{e''^2}{D_{\text{фл}}} \right)}{y_6 + y_{\text{п}} \cdot \left( \frac{D_{\text{б}}}{D_{\text{фл}}} \right)^2 + y_{\text{фМ}}' \cdot b'^2 + y_{\text{фМ}}'' \cdot b''^2}$$

$$= [0.36761 \cdot 10^{-6} + 0.22181 \cdot 10^{-4} \cdot 22.25 \cdot (22.25 + 22.25 - 22.25^2 / 80.5) + 0.22181 \cdot 10^{-4} \cdot 22.25 \cdot (22.25 + 11.158 - 11.158^2 / 80.5)] / [0.36761 \cdot 10^{-6} + 0 \cdot (125 / 80.5)^2 + 0.22181 \cdot 10^{-4} \cdot 22.25^2 + 0.22181 \cdot 10^{-4} \cdot 22.25^2]$$

$$= 1.2949$$

Взам. инв. №	
Подп. и дата	
Инв. № подл.	

90651-20600-AM-02-220 РР

Лист

348



88.638 МПа ≤ 310.5 МПа, **Условие прочности выполнено.**

### Расчёт второго фланца:

Коэффициент, учитывающий изгиб тарелки фланца между шпильками:

$$C_F = \max \left\{ 1; \sqrt{\frac{\frac{\pi \cdot D_6}{n}}{2 \cdot d + \frac{6 \cdot h}{m + 0.5}}} \right\} = \max \{1; (3.1416 \cdot 125 / 4 / (2 \cdot 16 + 6 \cdot 17 / (3 + 0.5)))^{1/2}\} = 1.2671$$

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при затяжке:

$$M^M = C_F \cdot P_6^M \cdot b = 1.2671 \cdot 56712 \cdot 22.25 = 1599 \text{ Н·м}$$

$$f = \max \left\{ \frac{C_{36}}{1 + A}; 1.0 \right\} = \max \{0.44314 / (1 + 1.8); 1.0\} = 1$$

$$D^* = D + c + s_1 \text{ при } (D + 2 \cdot c) < 20 \cdot (s_1 - c) \text{ и } f = 1 = 48 + 0 + 14 \text{ при } 48 < 20 \cdot (14 - 0) \text{ и } f = 1 = 62 \text{ мм}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении s<sub>1</sub>:

$$\sigma_1^M = \frac{M^M}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D^*} = 1599 / (2.0242 \cdot (14 - 3)^2 \cdot 62) = 105.3 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в условиях затяжки:

$$\sigma_R^M = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + 1_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot 1_0 \cdot D} \cdot M^M = (1.33 \cdot 0.65336 \cdot 17 + 15.492) / (2.0242 \cdot 17^2 \cdot 15.492 \cdot 48) \cdot 1599 = 111.24 \text{ МПа}$$

$$\beta_Y = \frac{1}{K - 1} \cdot \left( 0.69 + 5.72 \cdot \frac{K^2 \cdot \lg K}{K^2 - 1} \right) = 1 / (3.3333 - 1) \cdot (0.69 + 5.72 \cdot 3.3333^2 \cdot \lg 3.3333 / (3.3333^2 - 1)) = 1.7043$$

$$\beta_Z = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = (3.3333^2 + 1) / (3.3333^2 - 1) = 1.1978$$

Окружное напряжение в тарелке в условиях затяжки:

$$\sigma_T^M = \frac{\beta_Y \cdot M^M}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^M = 1.7043 \cdot 1599 / (17^2 \cdot 48) - 1.1978 \cdot 111.24 = 63.195 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении s<sub>1</sub> (п. 8.5.1):

$$\max \{ |\sigma_1^M + \sigma_R^M|; |\sigma_1^M + \sigma_T^M| \} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{ст}}^{20}$$

$$\max \{ |\sigma_1^M + \sigma_R^M|; |\sigma_1^M + \sigma_T^M| \} = \max \{ |105.3 + 111.24|; |105.3 + 63.195| \} = 216.54 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_{\text{ст}}^{20} = 1.5 \cdot [\sigma]_{\text{ф}}^{20} = 1.5 \cdot 222.73 = 334.09 \text{ МПа}$$

$$K = \frac{D_H}{D} = 160 / 48 = 3.3333$$

Коэффициент учета размеров тарелки фланца: K<sub>S</sub> = 1.2

$$K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{ст}}^{20} = 1.2 \cdot 1 \cdot 334.09 = 400.91 \text{ МПа}$$

216.54 МПа ≤ 400.91 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Приведенная нагрузка от внешней силы и момента:

$$Q_{FM}^+ = F + \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{ст}}} = 0 + 4 \cdot |0| / 80.5 = 0 \text{ Н}$$

$$Q_{FM}^- = F - \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{ст}}} = 0 - 4 \cdot |0| / 80.5 = 0 \text{ Н}$$

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец при рабочих условиях:

$$M^P = C_F \cdot \max \{ P_6^P \cdot b + (Q_d + Q_{FM}) \cdot e; |Q_d + Q_{FM}| \cdot e \} = \frac{1.2671 \cdot \max \{ 51056 \cdot 22.25 + (11544 + 0) \cdot 11.158; |11544 + 0| \cdot 11.158 \}}{11.158} = 1602.7 \text{ Н·м}$$

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении s<sub>1</sub>:

Взам. инв. №					
Подп. и дата					
Инв. № подл.					
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	

90651-20600-AM-02-220 РР

Лист

350



$$\sigma_1^P = \frac{M^P}{\lambda \cdot (s_1 - c)^2 \cdot D} = 1602.7 / (2.0242 \cdot (14 - 3)^2 \cdot 62) = 105.54 \text{ МПа}$$

Радиальное напряжение в тарелке в рабочих условиях :

$$\sigma_R^P = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + l_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot l_0 \cdot D} \cdot M^P = (1.33 \cdot 0.65336 \cdot 17 + 15.492) / (2.0242 \cdot 17^2 \cdot 15.492 \cdot 48) \cdot 1602.7 = 111.5 \text{ МПа}$$

Окружное напряжение в тарелке в рабочих условиях :

$$\sigma_T^P = \frac{\beta_Y \cdot M^P}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^P = 1.7043 \cdot 1602.7 / (17^2 \cdot 48) - 1.1978 \cdot 111.5 = 63.343 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_1$  (+):

$$\sigma_{1mm}^{P+} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_1}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = (0.785 \cdot 48^2 \cdot 2.2694 + 0 + 4 \cdot 0 / (48 + 14)) / (3.1416 \cdot (48 + 14) \cdot (14 - 3)) = 1.9157 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_1$  (п. 8.5.1):

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P+} + \sigma_R^P \right|, \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P+} + \sigma_T^P \right|, \left| \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^{P+} \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{мк}}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P+} + \sigma_R^P \right|, \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P+} + \sigma_T^P \right|, \left| \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^{P+} \right| \right\} = \frac{\max\{|105.54 - 1.9157 + 111.5|; |105.54 - 1.9157 + 63.343|; |105.54 + 1.9157|\}}{1.9157} = 215.13 \text{ МПа}$$

Допускаемые общие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_{\text{м}} = 1.5 \cdot [\sigma]_{\text{ф}} = 1.5 \cdot 222.73 = 334.09 \text{ МПа}$$

$$K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{мк}} = 1.2 \cdot 1 \cdot 334.09 = 400.91 \text{ МПа}$$

215.13 МПа ≤ 400.91 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_1$  (-):

$$\sigma_{1mm}^{P-} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F - \frac{4 \cdot M}{D + s_1}}{\pi \cdot (D + s_1) \cdot (s_1 - c)} = (0.785 \cdot 48^2 \cdot 2.2694 + 0 - 4 \cdot 0 / (48 + 14)) / (3.1416 \cdot (48 + 14) \cdot (14 - 3)) = 1.9157 \text{ МПа}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P-} + \sigma_R^P \right|, \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P-} + \sigma_T^P \right|, \left| \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^{P-} \right| \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_{\text{мк}}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P-} + \sigma_R^P \right|, \left| \sigma_1^P - \sigma_{1mm}^{P-} + \sigma_T^P \right|, \left| \sigma_1^P + \sigma_{1mm}^{P-} \right| \right\} = \frac{\max\{|105.54 - 1.9157 + 111.5|; |105.54 - 1.9157 + 63.343|; |105.54 + 1.9157|\}}{1.9157} = 215.13 \text{ МПа}$$

215.13 МПа ≤ 400.91 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в условиях затяжки в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_0^M = f \cdot \sigma_1^M = 1 \cdot 105.3 = 105.3 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности при затяжке в сечении  $s_0$  (п. 8.5.2):

$$\sigma_0^M \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R^{20}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_R^{20} = 3 \cdot [\sigma]_{\text{ф}}^{20} = 3 \cdot 222.73 = 668.18 \text{ МПа}$$

$$1.3 \cdot [\sigma]_R^{20} = 1.3 \cdot 668.18 = 868.64 \text{ МПа}$$

105.3 МПа ≤ 868.64 МПа, **Условие прочности выполнено.**

Меридиональное изгибное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_0^P = f \cdot \sigma_1^P = 1 \cdot 105.54 = 105.54 \text{ МПа}$$

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_0$  (+):

$$\sigma_{0mm}^{P+} = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F + \frac{4 \cdot M}{D + s_0}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = (0.785 \cdot 48^2 \cdot 2.2694 + 0 + 4 \cdot 0 / (48 + 5)) / (3.1416 \cdot (48 + 5) \cdot (5 - 3)) = 12.325 \text{ МПа}$$

Окружное мембранное напряжение от действия давления во втулке в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

$$\sigma_{0mo}^P = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s_0 - c)} = 2.2694 \cdot 48 / (2 \cdot (5 - 3)) = 27.232 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $s_0$ :

Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	90651-20600-AM-02-220 РР	Лист
						351
						Формат А4

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^P \pm \sigma_{0mm}^{P+} \right|, \left| 0.3 \cdot \sigma_0^P \pm \sigma_{0mo}^P \right|, \left| 0.7 \cdot \sigma_0^P \pm \left( \sigma_{0mm}^{P+} - \sigma_{0mo}^P \right) \right| \right\} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^p \pm \sigma_{0\text{mm}}^{p+} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^p \pm \sigma_{0\text{mo}}^p \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^p \pm \left( \sigma_{0\text{mm}}^{p+} - \sigma_{0\text{mo}}^p \right) \right| \right\} = \max \{ |105.54 \pm 12.325|; |0.3 * 105.54 \pm 27.232|; |0.7 * 105.54 \pm (12.325 - 27.232)| \} = 117.87 \text{ MPa}$$

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения (п. 8.10 ГОСТ 34233.1):

$$[\sigma]_R = 3 \cdot [\sigma]_{\phi} = 3 \cdot 222.73 = 668.18 \text{ МПа}$$

$$1.3 \cdot [\sigma]_p = 1.3 \cdot 668.18 = 868.64 \text{ МПа}$$

$117.87 \text{ МПа} \leq 868.64 \text{ МПа}$ . Условие прочности выполнено.

Меридиональное мембранное напряжение во втулке в рабочих условиях в сечении  $S_0$  (–):

$$\sigma_{0mm}^p = \frac{0.785 \cdot D^2 \cdot p + F - \frac{4 \cdot M}{D + s_0}}{\pi \cdot (D + s_0) \cdot (s_0 - c)} = (0.785 \cdot 48^2 \cdot 2.2694 + 0 - 4 \cdot 0 / (48 + 5)) / (3.1416 \cdot (48 + 5) \cdot (5 - 3)) = 12.325 \text{ МПа}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^p \pm \sigma_{0mm}^{p-} \right|, \left| 0.3 \cdot \sigma_0^p \pm \sigma_{0mo}^p \right|, \left| 0.7 \cdot \sigma_0^p \pm \left( \sigma_{0mm}^{p-} - \sigma_{0mo}^p \right) \right| \right\} \leq 1.3 \cdot [\sigma]_R$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_0^p \pm \sigma_{0mm}^{p-} \right|; \left| 0.3 \cdot \sigma_0^p \pm \sigma_{0mo}^p \right|; \left| 0.7 \cdot \sigma_0^p \pm \left( \sigma_{0mm}^{p-} - \sigma_{0mo}^p \right) \right| \right\} = \max \{ 105.54 \pm 12.325; |0.3 * 105.54 \pm 27.232|; |0.7 * 105.54 \pm (12.325 - 27.232)| \} = 117.87 \text{ MPa}$$

$117.87 \text{ МПа} \leq 868.64 \text{ МПа}$ . Условие прочности выполнено.

**Расчет в сечении  $s_0$  в рабочих условиях (п. 8.5.5 ГОСТ 34233.4-2017):**

Условие статической прочности в рабочих условиях в сечении  $S_0$ :

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0m0}^p \right|, \left| \sigma_{0mm}^p \right| \right\} \leq [\sigma]_{\Phi}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_{0\text{по}}^p \right|, \left| \sigma_{0\text{пл}}^p \right| \right\} = \max \{27.232; 12.325\} = 27.232 \text{ МПа}$$

$$27.232 \text{ МПа} \leq 222.73 \text{ МПа, Условие прочности выполнено.}$$

Условие статической прочности при затяжке для тарелок:

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^M \right|, \left| \sigma_T^M \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_{\Phi}^{20}$$

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^M \right|, \left| \sigma_T^M \right| \right\} = \max \{ |111.24|; |63.195| \} = 111.24 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_{\text{ш}}^{20} = 1 \cdot 222.73 = 222.73 \text{ МПа}$$

$$111.24 \text{ МПа} \leq 222.73 \text{ МПа. Условие прочности выполнено.}$$

Условие статической прочности в рабочих условиях для тарелок:

$$\max \left\{ \left| \sigma_R^p \right|, \left| \sigma_T^p \right| \right\} \leq K_T \cdot [\sigma]_{\Phi}$$

$$\max \{ |\sigma_R^P|; |\sigma_T^P| \} = \max \{ 111.5; 63.343 \} = 111.5 \text{ МПа}$$

$$K_T \cdot [\sigma]_h = 1 \cdot 222.73 = 222.73 \text{ МПа}$$

$$111.5 \text{ МПа} \leq 222.73 \text{ МПа, Условие прочности выполнено.}$$

### Жёсткость фланца:

Угол поворота фланца в рабочих условиях:

$$\Theta = M^P \cdot y_{\Phi} \cdot \frac{E^{20}}{F} = 1602.7 * 0.2482 \cdot 10^{-4} * 1.99 \cdot 10^5 / 1.99 \cdot 10^5 = 0.039779^{\circ}$$

Допускаемый угол поворота фланца:

$$[\text{H}] = 0.34377^\circ$$

Коэффициент увеличения допускаемого угла поворота фланцев:  $K_{\phi} = 1.3$

Условие выполнения жесткости фланцев:

$$[\text{H}^+] \leq K_{\text{a}} \cdot [\text{H}_2\text{A}] = 1.3 \cdot 0.34377 = 0.44691 \text{ } ^\circ$$

**Условие жёсткости выполнено.**

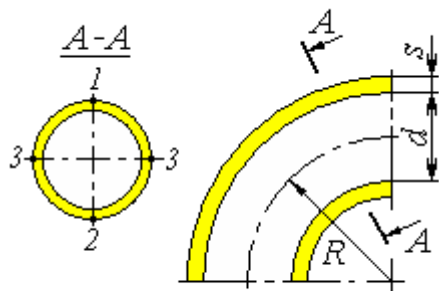
Взам. инв. №	Подп. и дата	Инв. № подл.	<p><b>Жесткость фланца:</b></p> <p>Угол поворота фланца в рабочих условиях:</p> $\Theta = M^P \cdot y_{\Phi} \cdot \frac{E^{20}}{E} = 1602.7 * 0.2482 \cdot 10^{-4} * 1.99 \cdot 10^5 / 1.99 \cdot 10^5 = 0.039779^{\circ}$ <p>Допускаемый угол поворота фланца:</p> $[\Theta] = 0.34377^{\circ}$ <p>Коэффициент увеличения допускаемого угла поворота фланцев: <math>K_{\Theta} = 1.3</math></p> <p>Условие выполнения жесткости фланцев :</p> $\Theta \leq K_{\Theta} \cdot [\Theta] = 1.3 * 0.34377 = 0.44691^{\circ}$ <p><b>Условие жёсткости выполнено.</b></p>										
			<table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>Изм.</td><td>Лист</td><td>№ док.</td><td>Подп.</td><td>Дата</td></tr></table>						Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата									
							352						





Отвод D1

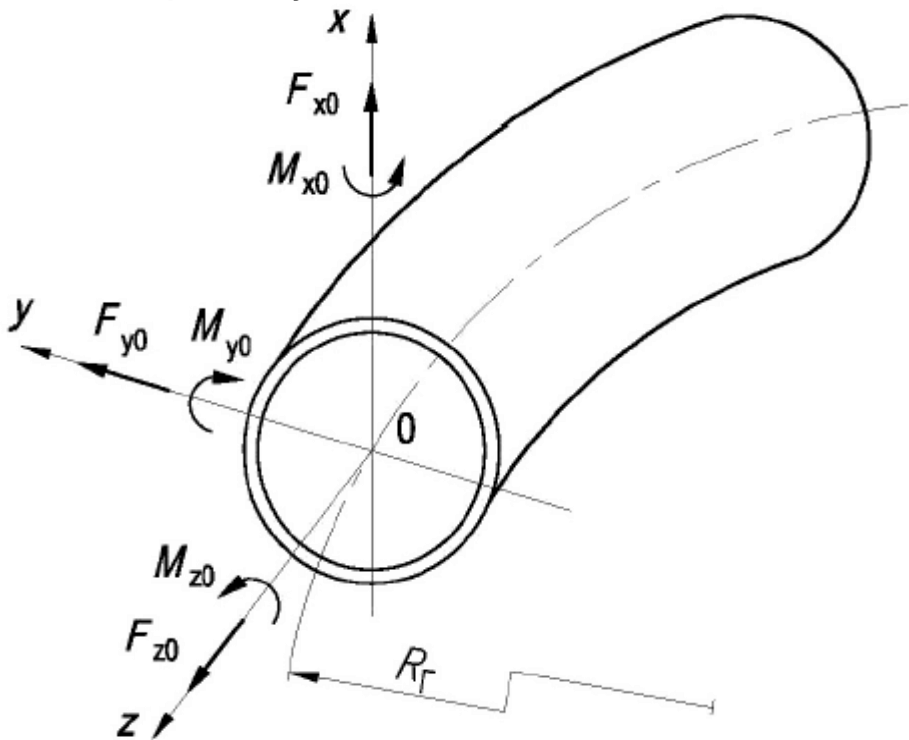
Исходные данные



Элемент:	Отвод D1
Материал отвода:	09Г2С Труба
Внутренний диаметр отвода, d:	77 мм
Толщина стенки отвода, s:	6 мм
Прибавка для компенсации коррозии и эрозии, с1:	3 мм
Прибавка для компенсации минусового допуска, с2:	0 мм
Прибавка технологическая, с31:	0 мм
Прибавка технологическая, с32:	0 мм
Прибавка технологическая, с33:	0 мм
Радиус отвода, R:	120 мм
Угол, γ0:	90 °
Овальность, $a_r = \frac{D_{max} - D_{min}}{2 \cdot (D_{max} + D_{min})}$	0 %
Коэффициенты прочности сварных швов:	
Продольный шов:	
$\varphi_y = 1$	

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	90651-20600-AM-02-220 РР					Лист
								355
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата				

Расчёт в рабочих условиях



Условия нагружения:

Расчётная температура, Т:	100 °С
Расчётное внутреннее избыточное давление, р:	1.644 МПа
Осевое усилие, Fz0:	0 Н
Поперечное усилие, Fx0:	0 Н
Поперечное усилие, Fy0:	549.62 Н
Крутящий момент, Mz0:	0 Н·м
Изгибающий момент, Mx0:	(-478.45) Н·м
Изгибающий момент, My0:	0 Н·м

Расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ 34233.2-2017

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Труба при температуре 100 °С (рабочие условия):

[σ]= 160 МПа

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Труба при температуре Т = 100 °С:

E= 1.91·10<sup>5</sup> МПа

Наружный диаметр отвода:

$$D_{\text{н}} = d + 2 \cdot s_{\text{т}} = (77 + 2 \cdot 6) = 89 \text{ мм}$$

Вспомогательный коэффициент:

$$b = \max \left\{ \frac{p}{2 \cdot [\sigma] + p}; 0.03 \right\} = \max \{ 1.644 / [2 \cdot 160 + 1.644]; 0.03 \} = 0.030000$$

Вспомогательный коэффициент:

$$q = \max \left\{ 2 \cdot b \cdot \frac{R_r}{D_{\text{н}}} + 0.5; 1.0 \right\} = \max \{ 2 \cdot 0.030000 \cdot 120 / 89 + 0.5; 1.0 \} = 1$$

Коэффициент формы для внешней стороны отвода:

$$Y_1 = \max \left\{ 0.12 \cdot \left( 1 + \sqrt{1 + 0.4 \cdot \frac{a_r}{b} \cdot q} \right); 1.0 \right\} = \max \{ 0.12 \cdot (1 + (1 + 0.4 \cdot 0 / 0.030000 \cdot 1)^{1/2}); 1.0 \} = 1$$

Торовый коэффициент для внешней стороны отвода:

Взам. инв. №	
Подп. и дата	
Инв. № подл.	

Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата

90651-20600-AM-02-220 РР

Лист

356



**Условие прочности выполнено.**

Средний радиус поперечного сечения отвода:

$$r_{\text{ср}} = \frac{D_{\text{н}} - s_{\text{г}}}{2} = (89 - 6) / 2 = 41.5 \text{ мм}$$

Безразмерный геометрический параметр:

$$\lambda_{\text{г}} = \frac{R_{\text{г}} \cdot s_{\text{г}}}{r_{\text{ср}}^2} = 120 \cdot 6 / 41.5^2 = 0.41806$$

Составляющая окружного напряжения от давления:

$$\sigma_{\text{чр}} = \frac{p \cdot [D_{\text{н}} - 2 \cdot (s_{\text{г}} - c_1 - c_2)]}{2 \cdot \varphi_{\text{р}} \cdot (s_{\text{г}} - c_1 - c_2)} = 1.644 \cdot [89 - 2 \cdot (6 - 3 - 0)] / [2 \cdot 1 \cdot (6 - 3 - 0)] = 22.742 \text{ МПа}$$

Расчетное окружное напряжение:

$$\sigma_{\text{ч}} = \sigma_{\text{чр}} = 22.742 \text{ МПа}$$

Расчетное радиальное напряжение:

$$\sigma_{\text{г}} = -\frac{p}{2} = -1.644 / 2 = -0.82198 \text{ МПа}$$

**Расчет в 0-й точке:**

$$\gamma_i = \frac{i}{n} \cdot \gamma_0 = 0 / 6 \cdot 90 = 0^\circ$$

$$M_x = M_{x0} \cdot \cos \gamma_i + M_{y0} \cdot \sin \gamma_i - F_{x0} \cdot R_{\text{г}} \cdot (1 - \cos \gamma_i) = 0 \cdot \cos 0 + 0 \cdot \sin 0 - 0 \cdot 120 \cdot (1 - \cos 0) = 0 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Момент сопротивления изгибу поперечного сечения отвода:

$$W = \frac{\pi}{32} \cdot \frac{D_{\text{н}}^4 - [D_{\text{н}} - 2 \cdot (s_{\text{г}} - c_1 - c_2)]^4}{D_{\text{н}}} = 3.1416 / 32 \cdot (89^4 - [89 - 2 \cdot (6 - 3 - 0)]^4) / 89 = 0.16859 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$$

Расчетное напряжение кручения:

$$\tau = \frac{M_x}{2 \cdot W} = 0 / (2 \cdot 0.16859 \cdot 10^{-4}) = 0 \text{ МПа}$$

$$M_x = M_{x0} - F_{y0} \cdot R_{\text{г}} \cdot \sin \gamma_i + F_{x0} \cdot R_{\text{г}} \cdot (1 - \cos \gamma_i) = (-478.45) - 549.62 \cdot 120 \cdot \sin 0 + 0 \cdot 120 \cdot (1 - \cos 0) = (-478.45) \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$M_y = M_{y0} \cdot \cos \gamma_i - M_{x0} \cdot \sin \gamma_i + F_{x0} \cdot R_{\text{г}} \cdot \sin \gamma_i = 0 \cdot \cos 0 - 0 \cdot \sin 0 + 0 \cdot 120 \cdot \sin 0 = 0 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$F_x = F_{x0} \cdot \cos \gamma_i + F_{y0} \cdot \sin \gamma_i = 0 \cdot \cos 0 + 549.62 \cdot \sin 0 = 0 \text{ Н}$$

Площадь поперечного сечения отвода:

$$A_{\text{г}} = \frac{\pi}{4} \cdot \{D_{\text{н}}^2 - [D_{\text{н}} - 2 \cdot (s_{\text{г}} - c_1 - c_2)]^2\} = 3.1416 / 4 \cdot \{89^2 - [89 - 2 \cdot (6 - 3 - 0)]^2\} = 810.53 \text{ мм}^2$$

Составляющая осевого напряжения от давления:

$$\sigma_{\text{ф}} = \frac{\pi \cdot p \cdot [D_{\text{н}} - 2 \cdot (s_{\text{г}} - c_1 - c_2)]^2}{4 \cdot A_{\text{г}}} = 3.1416 \cdot 1.644 \cdot [89 - 2 \cdot (6 - 3 - 0)]^2 / [4 \cdot 810.53] = 10.974 \text{ МПа}$$

Расчетное осевое напряжение:

$$\sigma_x = \pm \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{\varphi_{\text{т}} \cdot W} + \frac{F_x}{A_{\text{г}}} + \sigma_{\text{ф}} = \pm ((-478.45)^2 + 0^2)^{0.5} / (1 \cdot 0.16859 \cdot 10^{-4}) + 0 / 810.53 + 10.974 = 39.353 \text{ МПа}$$

Суммарное мембранное и общее изгибное напряжение в поперечном сечении на 0-й точке оси отвода:

$$\sigma_2 = \max \left\{ \frac{1}{2} \cdot \left[ 2 \cdot \sigma_x - \sigma_{\text{ч}} - \sigma_{\text{г}} \pm \sqrt{(\sigma_{\text{ч}} - \sigma_{\text{г}})^2 + 4 \cdot \tau^2} \right] \right\} = \max \left\{ \frac{1}{2} \cdot [2 \cdot 39.353 - 22.742 - 0.82198 \pm ((22.742 - 0.82198)^2 + 4 \cdot 0^2)^{0.5}] \right\} = 38.531 \text{ МПа}$$

Допускаемое общее напряжение:

$$[\sigma]_{\text{м}} = 1.5 \cdot [\sigma] = 1.5 \cdot 160 = 240 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\sigma_2 \leq [\sigma]_{\text{м}}$$

38.531 МПа < 240 МПа

**Условие прочности выполнено.**

Взам. инв. №		Расчетное осевое напряжение:					
		$\sigma_z = \pm \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{\varphi_T \cdot W} + \frac{F_z}{A_T} + \sigma_{\varphi} = \pm((-478.45)^2 + 0^2)^{0.5} / (1 * 0.16859 \cdot 10^{-4}) + 0 / 810.53 + 10.974 = 39.353 \text{ МПа}$					
Подп. и дата		Суммарное мембранное и общее изгибное напряжение в поперечном сечении на 0-й точке оси отвода:					
		$\sigma_2 = \max \left\{ \frac{1}{2} \cdot \left[ 2 \cdot \sigma_z - \sigma_{\psi} - \sigma_T \pm \sqrt{(\sigma_{\psi} - \sigma_T)^2 + 4 \cdot \tau^2} \right] \right. \\ \left. \sqrt{(\sigma_{\psi} - \sigma_T)^2 + 4 \cdot \tau^2} \right\} = \max \left\{ \frac{1}{2} \cdot [2 * 39.353 - 22.742 - 0.82198 \pm ((22.742 - 0.82198)^2 + 4 * 0^2)^{0.5}] \right. \\ \left. ((22.742 - 0.82198)^2 + 4 * 0^2)^{0.5} \right\} = 38.531 \text{ МПа}$					
Инв. № подл.		Допускаемое общее напряжение:					
		$[\sigma]_{\text{м}} = 1.5 \cdot [\sigma] = 1.5 * 160 = 240 \text{ МПа}$					
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	Условие прочности:		
					$\sigma_2 \leq [\sigma]_{\text{м}}$		
					38.531 МПа < 240 МПа		
					Условие прочности выполнено.		
					90651-20600-AM-02-220 PP		Лист
							358



Коэффициент, определяемый по таблице А.1 в зависимости от параметра  $\lambda_r = 0.41806$ :

$$\Omega = 1.6747$$

Коэффициент, определяемый по таблице А.2 в зависимости от степени нагруженности окружным напряжением от давления  $\sigma_{yp}[\sigma] = 22.742/160$ :

$$\Psi = 0.98579$$

Суммарное мембранное и общее изгибное напряжение в поперечном сечении на 0-й точке оси отвода:

$$\sigma_2 = \frac{\Omega}{\Psi} \cdot \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2 + M_z^2}}{\varphi_T \cdot W} = 1.6747 / 0.98579 * ((-478.45)^2 + 0^2 + 0^2)^{0.5} / (1 * 0.16859 \cdot 10^{-4}) = 48.212 \text{ МПа}$$

Дополнительное условие прочности:

$$\sigma_2 \leq [\sigma]_{\text{м}}$$

48.212 МПа < 240 МПа

**Условие прочности выполнено.**

$$B = \frac{2 \cdot R_r - r_{r\text{Ф}}}{2 \cdot (R_r - r_{r\text{Ф}})} = (2 * 120 - 41.5) / [2 * (120 - 41.5)] = 1.2643$$

Безразмерный параметр внутреннего давления:

$$\omega = 1.82 \cdot \frac{p}{E} \cdot \frac{R_r^2}{s_r \cdot r_{r\text{Ф}}} = 1.82 * 1.644 / 1.91 \cdot 10^5 * 120^2 / (6 * 41.5) = 0.90593 \cdot 10^{-3}$$

$$a_1 = 1.01 + 1633.5 \cdot \lambda_r^2 + 99 \cdot \omega = 1.01 + 1633.5 * 0.41806^2 + 99 * 0.90593 \cdot 10^{-3} = 286.59$$

$$a_2 = 1.0156 + 661.5 \cdot \lambda_r^2 + 63 \cdot \omega - \frac{0.2316}{a_1} = 1.0156 + 661.5 * 0.41806^2 + 63 * 0.90593 \cdot 10^{-3} - 0.2316 / 286.59 = 116.68$$

$$a_3 = 1.0278 + 204.2 \cdot \lambda_r^2 + 35 \cdot \omega - \frac{0.2197}{a_2} = 1.0278 + 204.2 * 0.41806^2 + 35 * 0.90593 \cdot 10^{-3} - 0.2197 / 116.68 = 36.746$$

$$a_4 = 1.0625 + 37.5 \cdot \lambda_r^2 + 15 \cdot \omega - \frac{0.1914}{a_3} = 1.0625 + 37.5 * 0.41806^2 + 15 * 0.90593 \cdot 10^{-3} - 0.1914 / 36.746 = 7.6248$$

$$b_{\pi} = 0.125 + 1.5 \cdot \lambda_r^2 + 3 \cdot \omega - \frac{0.09766}{a_4} = 0.125 + 1.5 * 0.41806^2 + 3 * 0.90593 \cdot 10^{-3} - 0.09766 / 7.6248 = 0.37707$$

$$A_{22} = -\frac{1}{b_{\pi}} = -1 / 0.37707 = (-2.652)$$

$$A_{42} = \frac{0.3125}{a_4} \cdot A_{22} = 0.3125 / 7.6248 * (-2.652) = (-0.10869)$$

$$A_{62} = \frac{0.4375}{a_3} \cdot A_{42} = 0.4375 / 36.746 * (-0.10869) = (-0.0012941)$$

$$A_{82} = \frac{0.4687}{a_2} \cdot A_{62} = 0.4687 / 116.68 * (-0.0012941) = (-0.51982 \cdot 10^{-5})$$

$$A_{102} = \frac{0.4812}{a_1} \cdot A_{82} = 0.4812 / 286.59 * (-0.51982 \cdot 10^{-5}) = (-0.8728 \cdot 10^{-8})$$

Коэффициент интенсификации напряжений:

$$\gamma_{\text{м}} = 0.75 \cdot \lambda_r \cdot \sum_{i=2,4,\dots}^{10} A_{i2} \cdot (1 - i^2) = 3.0201$$

Коэффициент податливости:

$$K_p = 1 + \frac{1.125}{b_{\pi}} = 1 + 1.125 / 0.37707 = 3.9835$$

Коэффициент интенсификации напряжений:

$$\beta_{\text{м}} = K_p + 1.5 \cdot \sum_{i=2,4,\dots}^{10} \frac{A_{i2}}{i} = 1.9534$$

Суммарное местное мембранное и изгибное напряжение:

Взам. инв. №		$A_{102} = \frac{0.4812}{a_1} \cdot A_{82} = 0.4812/286.59 \cdot (-0.51982 \cdot 10^{-5}) = (-0.8728 \cdot 10^{-8})$ <p>Коэффициент интенсификации напряжений:</p> $\gamma_m = 0.75 \cdot \lambda_r \cdot \sum_{i=2,4,\dots}^{10} A_{i2} \cdot (1-i^2) = 3.0201$ <p>Коэффициент податливости:</p> $K_p = 1 + \frac{1.125}{b_{\pi}} = 1 + 1.125/0.37707 = 3.9835$ <p>Коэффициент интенсификации напряжений:</p> $\beta_m = K_p + 1.5 \cdot \sum_{i=2,4,\dots}^{10} \frac{A_{i2}}{i} = 1.9534$ <p>Суммарное местное мембранное и изгибное напряжение:</p>						
Подп. и дата								
Изм. № подл.								
		Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	90651-20600-AM-02-220 PP	Лист
								359





Формат А4





$$\sigma_{RK} = \max \left\{ \begin{aligned} &\frac{1}{W} \cdot \sqrt{(|M_x| \cdot \gamma_m + |M_y| \cdot \beta_m + W \cdot \sigma_{\varphi})^2 + M_z^2} \\ &\frac{1}{W} \cdot \sqrt{(|M_x| \cdot \beta_m + |M_y| \cdot \gamma_m + W \cdot \sigma_{\varphi})^2 + M_z^2} \\ &\frac{1}{W} \cdot \sqrt{(|M_x| \cdot \gamma_m + W \cdot B \cdot \sigma_{\varphi})^2 + M_z^2} \\ &\frac{1}{W} \cdot \sqrt{(|M_y| \cdot \gamma_m + W \cdot B \cdot \sigma_{\varphi})^2 + M_z^2} \end{aligned} \right\} = \max \left\{ \begin{aligned} &1 / 0.16859 \cdot 10^{-4} \cdot (|(-542.16)| \cdot 3.0201 + |0| \cdot 1.9534 + 0.16859 \cdot 10^{-4} \cdot 10.974^2 + 0^2)^{0.5} / 0.16859 \cdot 10^{-4} \cdot (|(-542.16)| \cdot 1.9534 + |0| \cdot 3.0201 + 0.16859 \cdot 10^{-4} \cdot 10.974^2 + 0^2)^{0.5} \\ &1 / 0.16859 \cdot 10^{-4} \cdot (|(-542.16)| \cdot 3.0201 + 0.16859 \cdot 10^{-4} \cdot 1.2643 \cdot 22.742^2 + 0^2)^{0.5} / 0.16859 \cdot 10^{-4} \cdot (|0| \cdot 3.0201 + 0.16859 \cdot 10^{-4} \cdot 1.2643 \cdot 22.742^2 + 0^2)^{0.5} \end{aligned} \right\} = 125.87 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\sigma_{RK} \leq [\sigma]_R$$

125.87 МПа < 480 МПа

**Условие прочности выполнено.**

**Расчет в 6-й точке:**

$$\gamma_i = \frac{i}{n} \cdot \gamma_0 = 6/6 \cdot 90 = 90^\circ$$

$$M_z = M_{x0} \cdot \cos \gamma_i + M_{y0} \cdot \sin \gamma_i - F_{x0} \cdot R_r \cdot (1 - \cos \gamma_i) = 0 \cdot \cos 90 + 0 \cdot \sin 90 - 0 \cdot 120 \cdot (1 - \cos 90) = 0 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Расчетное напряжение кручения:

$$\tau = \frac{M_z}{2 \cdot W} = 0 / (2 \cdot 0.16859 \cdot 10^{-4}) = 0 \text{ МПа}$$

$$M_x = M_{x0} - F_{y0} \cdot R_r \cdot \sin \gamma_i + F_{x0} \cdot R_r \cdot (1 - \cos \gamma_i) = (-478.45) - 549.62 \cdot 120 \cdot \sin 90 + 0 \cdot 120 \cdot (1 - \cos 90) = (-544.4) \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$M_y = M_{y0} \cdot \cos \gamma_i - M_{x0} \cdot \sin \gamma_i + F_{x0} \cdot R_r \cdot \sin \gamma_i = 0 \cdot \cos 90 - 0 \cdot \sin 90 + 0 \cdot 120 \cdot \sin 90 = 0 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$F_z = F_{x0} \cdot \cos \gamma_i + F_{y0} \cdot \sin \gamma_i = 0 \cdot \cos 90 + 549.62 \cdot \sin 90 = 549.62 \text{ Н}$$

Расчетное осевое напряжение:

$$\sigma_z = \pm \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{\varphi_T \cdot W} + \frac{F_z}{A_r} + \sigma_{\varphi} = \pm ((-544.4)^2 + 0^2)^{0.5} / (1 \cdot 0.16859 \cdot 10^{-4}) + 549.62 / 810.53 + 10.974 = 43.943 \text{ МПа}$$

Суммарное мембранное и общее изгибное напряжение в поперечном сечении на 6-й точке оси отвода:

$$\sigma_2 = \max \left\{ \begin{aligned} &\frac{1}{2} \cdot \left[ 2 \cdot \sigma_z - \sigma_{\varphi} - \sigma_r \pm \sqrt{(\sigma_{\varphi} - \sigma_r)^2 + 4 \cdot \tau^2} \right] \\ &\sqrt{(\sigma_{\varphi} - \sigma_r)^2 + 4 \cdot \tau^2} \end{aligned} \right\} = \max \left\{ \begin{aligned} &\frac{1}{2} \cdot [2 \cdot 43.943 - 22.742 - 0.82198 \pm ((22.742 - 0.82198)^2 + 4 \cdot 0^2)^{0.5}] / ((22.742 - 0.82198)^2 + 4 \cdot 0^2)^{0.5} \\ &0.82198 \end{aligned} \right\} = 43.121 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\sigma_2 \leq [\sigma]_m$$

43.121 МПа < 240 МПа

**Условие прочности выполнено.**

Суммарное мембранное и общее изгибное напряжение в поперечном сечении на 6-й точке оси отвода:

$$\sigma_2 = \frac{\Omega}{\Psi} \cdot \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2 + M_z^2}}{\varphi_T \cdot W} = 1.6747 / 0.98579 \cdot ((-544.4)^2 + 0^2 + 0^2)^{0.5} / (1 \cdot 0.16859 \cdot 10^{-4}) = 54.858 \text{ МПа}$$

Дополнительное условие прочности:

$$\sigma_2 \leq [\sigma]_m$$

54.858 МПа < 240 МПа

**Условие прочности выполнено.**

Суммарное местное мембранное и изгибное напряжение:

Взам. инв. №	
Подп. и дата	
Инв. № подл.	
Изм.	Лист
№ док.	Подп.
Дата	Дата
90651-20600-AM-02-220 РР	
Лист	
365	









Коэффициент, определяемый по таблице А.2 в зависимости от степени нагруженности окружным напряжением от давления  $\sigma_{np}/[\sigma] = 31.575/254.55$ :

$$\Psi = 0.9876$$

Суммарное мембранное и общее изгибное напряжение в поперечном сечении на 0-й точке оси отвода:

$$\sigma_2 = \frac{\Omega}{\Psi} \cdot \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2 + M_z^2}}{\varphi_T \cdot W} = 1.6747 / 0.9876 * ((-479.56)^2 + 0^2 + 0^2)^{0.5} / (1 * 0.16859 \cdot 10^{-4}) = 48.234 \text{ МПа}$$

Дополнительное условие прочности:

$$\sigma_2 \leq [\sigma]_{\text{м}}$$

$$48.234 \text{ МПа} < 381.82 \text{ МПа}$$

**Условие прочности выполнено.**

$$B = \frac{2 \cdot R_r - r_{\text{тф}}}{2 \cdot (R_r - r_{\text{тф}})} = (2 * 120 - 41.5) / [2 * (120 - 41.5)] = 1.2643$$

Безразмерный параметр внутреннего давления:

$$\omega = 1.82 \cdot \frac{p}{E} \cdot \frac{R_r^2}{s_r \cdot r_{\text{тф}}} = 1.82 * 2.2825 / 1.99 \cdot 10^5 * 120^2 / (6 * 41.5) = 0.0012072$$

$$a_1 = 1.01 + 1633.5 \cdot \lambda_r^2 + 99 \cdot \omega = 1.01 + 1633.5 * 0.41806^2 + 99 * 0.0012072 = 286.62$$

$$a_2 = 1.0156 + 661.5 \cdot \lambda_r^2 + 63 \cdot \omega - \frac{0.2316}{a_1} = 1.0156 + 661.5 * 0.41806^2 + 63 * 0.0012072 - 0.2316 / 286.62 = 116.7$$

$$a_3 = 1.0278 + 204.2 \cdot \lambda_r^2 + 35 \cdot \omega - \frac{0.2197}{a_2} = 1.0278 + 204.2 * 0.41806^2 + 35 * 0.0012072 - 0.2197 / 116.7 = 36.757$$

$$a_4 = 1.0625 + 37.5 \cdot \lambda_r^2 + 15 \cdot \omega - \frac{0.1914}{a_3} = 1.0625 + 37.5 * 0.41806^2 + 15 * 0.0012072 - 0.1914 / 36.757 = 7.6294$$

$$b_{\pi} = 0.125 + 1.5 \cdot \lambda_r^2 + 3 \cdot \omega - \frac{0.09766}{a_4} = 0.125 + 1.5 * 0.41806^2 + 3 * 0.0012072 - 0.09766 / 7.6294 = 0.37798$$

$$A_{22} = -\frac{1}{b_{\pi}} = -1 / 0.37798 = (-2.6456)$$

$$A_{42} = \frac{0.3125}{a_4} \cdot A_{22} = 0.3125 / 7.6294 * (-2.6456) = (-0.10837)$$

$$A_{62} = \frac{0.4375}{a_3} \cdot A_{42} = 0.4375 / 36.757 * (-0.10837) = (-0.0012898)$$

$$A_{82} = \frac{0.4687}{a_2} \cdot A_{62} = 0.4687 / 116.7 * (-0.0012898) = (-0.51802 \cdot 10^{-5})$$

$$A_{102} = \frac{0.4812}{a_1} \cdot A_{82} = 0.4812 / 286.62 * (-0.51802 \cdot 10^{-5}) = (-0.8697 \cdot 10^{-8})$$

Коэффициент интенсификации напряжений:

$$\gamma_m = 0.75 \cdot \lambda_r \cdot \sum_{i=2,4,\dots}^{10} A_{i2} \cdot (1 - i^2) = 3.0125$$

Коэффициент податливости:

$$K_p = 1 + \frac{1.125}{b_{\pi}} = 1 + 1.125 / 0.37798 = 3.9764$$

Коэффициент интенсификации напряжений:

$$\beta_m = K_p + 1.5 \cdot \sum_{i=2,4,\dots}^{10} \frac{A_{i2}}{i} = 1.9512$$

Суммарное местное мембранное и изгибное напряжение:

Взам. инв. №		Коэффициент интенсификации напряжений: $\gamma_m = 0.75 \cdot \lambda_r \cdot \sum_{i=2,4,\dots}^{10} A_{i2} \cdot (1 - i^2) = 3.0125$					
		Коэффициент податливости: $K_p = 1 + \frac{1.125}{b_{\pi}} = 1 + 1.125 / 0.37798 = 3.9764$					
Подп. и дата		Коэффициент интенсификации напряжений: $\beta_m = K_p + 1.5 \cdot \sum_{i=2,4,\dots}^{10} \frac{A_{i2}}{i} = 1.9512$					
		Суммарное местное мембранное и изгибное напряжение:					
Инв. № подл.						90651-20600-AM-02-220 PP	Лист 369
		Изм.	Лист	№ док.	Подп.		

НЕФТЕХИМПРОЕКТ NEFTECHIMPROEKT					МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ					РР	
<div><div><div><math display="block">\sigma_{RK} = \max \left\{ \begin{aligned} &amp;\frac{1}{W} \cdot \sqrt{( M_x  \cdot \gamma_m +  M_y  \cdot \beta_m + W \cdot \sigma_{\varphi})^2 + M_z^2} \\ &amp;\frac{1}{W} \cdot \sqrt{( M_x  \cdot \beta_m +  M_y  \cdot \gamma_m + W \cdot \sigma_{\varphi})^2 + M_z^2} \\ &amp;\frac{1}{W} \cdot \sqrt{( M_x  \cdot \gamma_m + W \cdot B \cdot \sigma_{\varphi})^2 + M_z^2} \\ &amp;\frac{1}{W} \cdot \sqrt{( M_y  \cdot \gamma_m + W \cdot B \cdot \sigma_{\varphi})^2 + M_z^2} \end{aligned} \right\} = \max \{</math><math display="block">\frac{1 / 0.16859 \cdot 10^{-4} * ( (-479.56)  * 3.0125 +  0  * 1.9512 + 0.16859 \cdot 10^{-4} * 15.237^2 + 0^2)^{0.5}}{0.16859 \cdot 10^{-4}} / \frac{1 / 0.16859 \cdot 10^{-4} * ( (-479.56)  * 1.9512 +  0  * 3.0125 + 0.16859 \cdot 10^{-4} * 15.237^2 + 0^2)^{0.5}}{0.16859 \cdot 10^{-4}} / \frac{1 / 0.16859 \cdot 10^{-4} * ( 0  * 3.0125 + 0.16859 \cdot 10^{-4} * 1.2643 * 31.575^2 + 0^2)^{0.5}}{0.16859 \cdot 10^{-4}} / \frac{1 / 0.16859 \cdot 10^{-4} * ( 0  * 3.0125 + 0.16859 \cdot 10^{-4} * 1.2643 * 31.575^2 + 0^2)^{0.5}}{0.16859 \cdot 10^{-4}}</math><math display="block">\} = 125.61 \text{ МПа}</math></div><div>Допускаемое суммарное местное мембранное и изгибное напряжение: <math display="block">[\sigma]_R = 3 \cdot [\sigma] = 3 * 254.55 = 763.64 \text{ МПа}</math></div><div>Условие прочности: <math display="block">\sigma_{RK} \leq [\sigma]_R</math> 125.61 МПа &lt; 763.64 МПа <b>Условие прочности выполнено.</b></div><div>Расчет в 1-й точке: <math display="block">\gamma_i = \frac{i}{n} \cdot \gamma_0 = 1 / 6 * 90 = 15^\circ</math> <math display="block">M_x = M_{x0} \cdot \cos \gamma_i + M_{y0} \cdot \sin \gamma_i - F_{x0} \cdot R_r \cdot (1 - \cos \gamma_i) = 0 * \cos 15 + 0 * \sin 15 - 0 * 120 * (1 - \cos 15) = 0 \text{ Н} \cdot \text{м}</math></div><div>Расчетное напряжение кручения: <math display="block">\tau = \frac{M_x}{2 \cdot W} = 0 / (2 * 0.16859 \cdot 10^{-4}) = 0 \text{ МПа}</math> <math display="block">M_x = M_{x0} - F_{y0} \cdot R_r \cdot \sin \gamma_i + F_{x0} \cdot R_r \cdot (1 - \cos \gamma_i) = (-479.56) - 551.06 * 120 * \sin 15 + 0 * 120 * (1 - \cos 15) = (-496.67) \text{ Н} \cdot \text{м}</math> <math display="block">M_y = M_{y0} \cdot \cos \gamma_i - M_{x0} \cdot \sin \gamma_i + F_{x0} \cdot R_r \cdot \sin \gamma_i = 0 * \cos 15 - 0 * \sin 15 + 0 * 120 * \sin 15 = 0 \text{ Н} \cdot \text{м}</math> <math display="block">F_x = F_{x0} \cdot \cos \gamma_i + F_{y0} \cdot \sin \gamma_i = 0 * \cos 15 + 551.06 * \sin 15 = 142.63 \text{ Н}</math></div><div>Расчетное осевое напряжение: <math display="block">\sigma_x = \pm \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{\varphi_T \cdot W} + \frac{F_x}{A_r} + \sigma_{\varphi} = \pm ((-496.67)^2 + 0^2)^{0.5} / (1 * 0.16859 \cdot 10^{-4}) + 142.63 / 810.53 + 15.237 = 44.872 \text{ МПа}</math></div><div>Суммарное мембранное и общее изгибное напряжение в поперечном сечении на 1-й точке оси отвода: <math display="block">\sigma_2 = \max \left\{ \begin{aligned} &amp;\frac{1}{2} \cdot \left  2 \cdot \sigma_x - \sigma_{\varphi} - \sigma_r \pm \sqrt{(\sigma_{\varphi} - \sigma_r)^2 + 4 \cdot \tau^2} \right  \\ &amp;\sqrt{(\sigma_{\varphi} - \sigma_r)^2 + 4 \cdot \tau^2} \end{aligned} \right\} = \max \{</math><math display="block">\frac{1}{2} *  2 * 44.872 - 31.575 - 1.1412 \pm ((31.575 - 1.1412)^2 + 4 * 0^2)^{0.5}  ((31.575 - 1.1412)^2 + 4 * 0^2)^{0.5}</math><math display="block">\} = 43.731 \text{ МПа}</math></div><div>Условие прочности: <math display="block">\sigma_2 \leq [\sigma]_m</math> 43.731 МПа &lt; 381.82 МПа <b>Условие прочности выполнено.</b></div><div>Суммарное мембранное и общее изгибное напряжение в поперечном сечении на 1-й точке оси отвода: <math display="block">\sigma_2 = \frac{\Omega}{\Psi} \cdot \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2 + M_z^2}}{\varphi_T \cdot W} = 1.6747 / 0.9876 * ((-496.67)^2 + 0^2 + 0^2)^{0.5} / (1 * 0.16859 \cdot 10^{-4}) = 49.956 \text{ МПа}</math></div><div>Дополнительное условие прочности: <math display="block">\sigma_2 \leq [\sigma]_m</math> 49.956 МПа &lt; 381.82 МПа <b>Условие прочности выполнено.</b></div><div>Суммарное местное мембранное и изгибное напряжение:</div></div></div>											
					90651-20600-AM-02-220 РР					Лист	
										370	
Изм.		Лист		№ док.		Подп.		Дата			

Этот документ является собственностью "НЕФТЕХИМПРОЕКТ" и не подлежит копированию и распространению без его согласия

90651-20600-AM-02-220 РР\_изм.0.docx

Формат А4

$$\sigma_{RK} = \max \left\{ \begin{aligned} &\frac{1}{W} \cdot \sqrt{[M_x \cdot \gamma_m + |M_y| \cdot \beta_m + W \cdot \sigma_{\varphi}]^2 + M_z^2} \\ &\frac{1}{W} \cdot \sqrt{[M_x \cdot \beta_m + |M_y| \cdot \gamma_m + W \cdot \sigma_{\varphi}]^2 + M_z^2} \\ &\frac{1}{W} \cdot \sqrt{[M_x \cdot \gamma_m + W \cdot B \cdot \sigma_{\varphi}]^2 + M_z^2} \\ &\frac{1}{W} \cdot \sqrt{[M_y \cdot \gamma_m + W \cdot B \cdot \sigma_{\varphi}]^2 + M_z^2} \end{aligned} \right\} = \max \left\{ \begin{aligned} &1 / 0.16859 \cdot 10^{-4} \cdot [((-496.67)) \cdot 3.0125 + |0| \cdot 1.9512 + 0.16859 \cdot 10^{-4} \cdot 15.237]^2 + 0^2)^{0.5} / 0.16859 \cdot 10^{-4} \cdot [((-496.67)) \cdot 1.9512 + |0| \cdot 3.0125 + 0.16859 \cdot 10^{-4} \cdot 15.237]^2 + 0^2)^{0.5} \\ &1 / 0.16859 \cdot 10^{-4} \cdot [((-496.67)) \cdot 3.0125 + 0.16859 \cdot 10^{-4} \cdot 1.2643 \cdot 31.575]^2 + 0^2)^{0.5} / 0.16859 \cdot 10^{-4} \cdot [((-496.67)) \cdot 1.9512 + |0| \cdot 3.0125 + 0.16859 \cdot 10^{-4} \cdot 1.2643 \cdot 31.575]^2 + 0^2)^{0.5} \end{aligned} \right\} = 128.67 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\sigma_{RK} \leq [\sigma]_R$$

128.67 МПа < 763.64 МПа

**Условие прочности выполнено.**

**Расчет в 2-й точке:**

$$\gamma_i = \frac{i}{n} \cdot \gamma_0 = 2/6 \cdot 90 = 30^\circ$$

$$M_x = M_{x0} \cdot \cos \gamma_i + M_{y0} \cdot \sin \gamma_i - F_{x0} \cdot R_r \cdot (1 - \cos \gamma_i) = 0 \cdot \cos 30 + 0 \cdot \sin 30 - 0 \cdot 120 \cdot (1 - \cos 30) = 0 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Расчетное напряжение кручения:

$$\tau = \frac{M_x}{2 \cdot W} = 0 / (2 \cdot 0.16859 \cdot 10^{-4}) = 0 \text{ МПа}$$

$$M_x = M_{x0} - F_{y0} \cdot R_r \cdot \sin \gamma_i + F_{x0} \cdot R_r \cdot (1 - \cos \gamma_i) = (-479.56) - 551.06 \cdot 120 \cdot \sin 30 + 0 \cdot 120 \cdot (1 - \cos 30) = (-512.62) \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$M_y = M_{y0} \cdot \cos \gamma_i - M_{x0} \cdot \sin \gamma_i + F_{x0} \cdot R_r \cdot \sin \gamma_i = 0 \cdot \cos 30 - 0 \cdot \sin 30 + 0 \cdot 120 \cdot \sin 30 = 0 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$F_z = F_{x0} \cdot \cos \gamma_i + F_{y0} \cdot \sin \gamma_i = 0 \cdot \cos 30 + 551.06 \cdot \sin 30 = 275.53 \text{ Н}$$

Расчетное осевое напряжение:

$$\sigma_z = \pm \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{\varphi_T \cdot W} + \frac{F_z}{A_r} + \sigma_{\varphi} = \pm ((-512.62)^2 + 0^2)^{0.5} / (1 \cdot 0.16859 \cdot 10^{-4}) + 275.53 / 810.53 + 15.237 = 45.982 \text{ МПа}$$

Суммарное мембранное и общее изгибное напряжение в поперечном сечении на 2-й точке оси отвода:

$$\sigma_2 = \max \left\{ \begin{aligned} &\frac{1}{2} \cdot \left[ 2 \cdot \sigma_z - \sigma_{\varphi} - \sigma_r \pm \sqrt{(\sigma_{\varphi} - \sigma_r)^2 + 4 \cdot \tau^2} \right] \\ &\sqrt{(\sigma_{\varphi} - \sigma_r)^2 + 4 \cdot \tau^2} \end{aligned} \right\} = \max \left\{ \begin{aligned} &\frac{1}{2} \cdot [2 \cdot 45.982 - 31.575 - 1.1412 \pm ((31.575 - 1.1412)^2 + 4 \cdot 0^2)^{0.5}] \\ &\sqrt{(31.575 - 1.1412)^2 + 4 \cdot 0^2} \end{aligned} \right\} = 44.841 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$\sigma_2 \leq [\sigma]_m$$

44.841 МПа < 381.82 МПа

**Условие прочности выполнено.**

Суммарное мембранное и общее изгибное напряжение в поперечном сечении на 2-й точке оси отвода:

$$\sigma_2 = \frac{\Omega}{\Psi} \cdot \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2 + M_z^2}}{\varphi_T \cdot W} = 1.6747 / 0.9876 \cdot ((-512.62)^2 + 0^2 + 0^2)^{0.5} / (1 \cdot 0.16859 \cdot 10^{-4}) = 51.56 \text{ МПа}$$

Дополнительное условие прочности:

$$\sigma_2 \leq [\sigma]_m$$

51.56 МПа < 381.82 МПа

**Условие прочности выполнено.**

Суммарное местное мембранное и изгибное напряжение:

Взам. инв. №	
Подп. и дата	
Инв. № подл.	
Изм.	Лист
Лист	№ док.
Подп.	Дата
90651-20600-AM-02-220 РР	
Лист	
371	









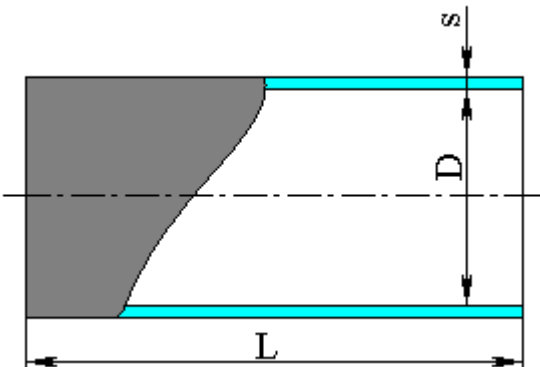


Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №

Этот документ является собственностью "НЕФТЕХИМПРОЕКТ" и не подлежит копированию и распространению без его согласия

НЕФТЕХИМПРОЕКТ NEFTECHIMPROEKT					МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ					РР	
<div><math display="block">\sigma_{RK} = \max \left\{ \begin{aligned} &amp;\frac{1}{W} \cdot \sqrt{\left(  M_x  \cdot \gamma_m +  M_y  \cdot \beta_m + W \cdot \sigma_{\varphi} \right)^2 + M_z^2} \\ &amp;\frac{1}{W} \cdot \sqrt{\left(  M_x  \cdot \beta_m +  M_y  \cdot \gamma_m + W \cdot \sigma_{\varphi} \right)^2 + M_z^2} \\ &amp;\frac{1}{W} \cdot \sqrt{\left(  M_x  \cdot \gamma_m + W \cdot B \cdot \sigma_{\varphi} \right)^2 + M_z^2} \\ &amp;\frac{1}{W} \cdot \sqrt{\left(  M_y  \cdot \gamma_m + W \cdot B \cdot \sigma_{\varphi} \right)^2 + M_z^2} \end{aligned} \right\} = \max \{</math><div><math>1 / 0.16859 \cdot 10^{-4} \cdot ( (-545.68)  \cdot 3.0125 +  0  \cdot 1.9512 + 0.16859 \cdot 10^{-4} \cdot 15.237)^2 + 0^2)^{0.5} / 0.16859 \cdot 10^{-4} \cdot ( (-545.68)  \cdot 1.9512 +  0  \cdot 3.0125 + 0.16859 \cdot 10^{-4} \cdot 15.237)^2 + 0^2)^{0.5} / 0.16859 \cdot 10^{-4} \cdot ( 0  \cdot 3.0125 + 0.16859 \cdot 10^{-4} \cdot 1.2643 \cdot 31.575)^2 + 0^2)^{0.5} / 0.16859 \cdot 10^{-4} \cdot ( 0  \cdot 3.0125 + 0.16859 \cdot 10^{-4} \cdot 1.2643 \cdot 31.575)^2 + 0^2)^{0.5}</math></div><math>\} = 137.42 \text{ МПа}</math><p>Условие прочности:</p><math display="block">\sigma_{RK} \leq [\sigma]_R</math><p>137.42 МПа &lt; 763.64 МПа</p><p>Условие прочности выполнено.</p></div>											
					90651-20600-AM-02-220 РР						Лист
											376
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата							

Патрубок D1



Исходные данные

Материал: 09Г2С Труба  
 Внутр. диаметр, D: 78 мм  
 Толщина стенки, s: 12 мм  
 Прибавка для компенсации коррозии и эрозии, с1: 3 мм  
 Прибавка для компенсации минусового допуска, с2: 0 мм  
 Прибавка технологическая, с3: 0 мм  
 Сумма прибавок к расчётной толщине стенки, с: 3 мм  
 Длина обечайки, L: 1425 мм

Коэффициенты прочности сварных швов:

Продольный шов:

φ<sub>р</sub> = 1

Окружной шов :

φ<sub>т</sub> = 1

Расчёт в рабочих условиях

Условия нагружения:

Расчётная температура, Т: 100 °С  
 Расчётное внутреннее избыточное давление, р: 1.644 МПа  
 Расчётный изгибающий момент, М: 0 Н·м  
 Расчётное поперечное усилие, Q: 0 Н  
 Расчётное осевое растягивающее усилие, F: 0 Н  
 Расчётный крутящий момент, М<sub>к</sub>: 0 Н·м

Расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ 34233.2-2017

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Труба при температуре 100 °С (рабочие условия):  
 [σ]= 160 МПа

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Труба при температуре Т = 100 °С:  
 E= 1.91·10<sup>5</sup> МПа

Гладкая обечайка, нагруженная внутренним избыточным давлением

Расчётная толщина стенки с учётом прибавок:

$$s_p + c = \frac{p \cdot D}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p - p} + c = (1.644 \cdot 78) / (2 \cdot 160 \cdot 1 - 1.644) + 3 = 3.4028 \text{ мм}$$

3.4028 мм ≤ 12 мм

Заключение: **Условие работоспособности выполнено.**

Изм. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №

Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата

90651-20600-AM-02-220 РР

Лист

377

Этот документ является собственностью "НЕФТЕХИМПРОЕКТ" и не подлежит копированию и распространению без его согласия

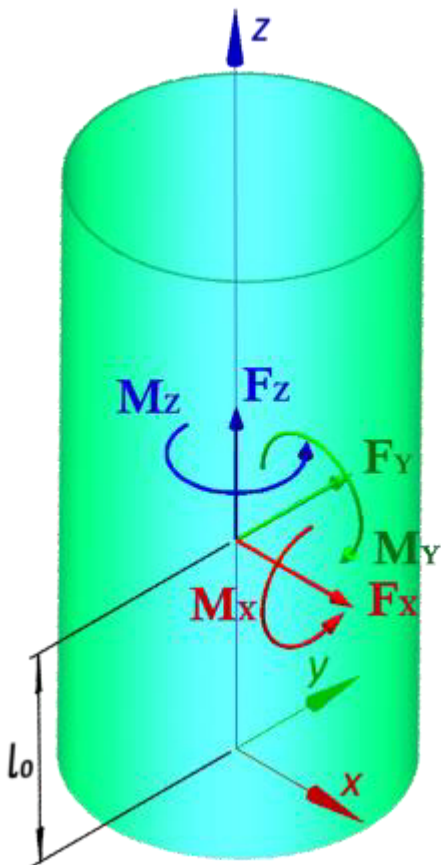
НЕФТЕХИМПРОЕКТ NEFTECHIMPROEKT		МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ			РР
Взам. инв. №	Подп. и дата	Инв. № подл.	Допускаемое давление :		
			$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p \cdot (s - c)}{D + (s - c)} = 2 \cdot 160 \cdot 1 \cdot (12 - 3) / (78 + 12 - 3) = 33.103 \text{ МПа}$		
			33.103 МПа ≥ 1.644 МПа		
			Заключение: <b>Условие прочности выполнено.</b>		
			Минимальное расстояние между "одиночными" штуцерами:		
Взам. инв. №	Подп. и дата	Инв. № подл.	$b_0 = 2 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c)} = 2 \cdot (78 \cdot (12 - 3))^{1/2} = 52.991 \text{ мм}$		
			<b>Расчет давления испытаний</b>		
			Пробное давление при гидравлическом испытании, при работе элемента под внутренним давлением:		
			$P_{гр} = 1.25 \cdot p \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]_t} = 1.25 \cdot 1.644 \cdot 183 / 160 = 2.3504 \text{ МПа}$		
			<b>Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)</b>		
Взам. инв. №	Подп. и дата	Инв. № подл.	<b>Условия нагружения при испытаниях:</b>		
			Расчётная температура, Т: 20 °С		
			Расчётное внутреннее избыточное давление (с учётом гидростатического), р: 2.2825 МПа		
			Расчётный изгибающий момент, М: 0 Н·м		
			Расчётное поперечное усилие, Q: 0 Н		
Взам. инв. №	Подп. и дата	Инв. № подл.	Расчётное осевое растягивающее усилие, F: 0 Н		
			Расчётный крутящий момент, М <sub>к</sub> : 0 Н·м		
			По ГОСТ 34233.1-2017 расчёт на прочность при испытаниях допускается не проводить, если выполнено условие:		
			$P_{исп} < 1.35 \cdot P_{расч} \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]}$		
			$1.35 \cdot P_{расч} \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]} = 1.35 \cdot 1.644 \cdot 183 / 160 = 2.5384 \text{ МПа} \geq 2.2825 \text{ МПа}$		
Взам. инв. №	Подп. и дата	Инв. № подл.	<b>Расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ 34233.2-2017</b>		
			Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Труба при температуре 20 °С (условия гидроиспытаний):		
			$[\sigma]_{20} = \frac{R_{eH20}}{n_T} = 280 / 1.1 = 254.55 \text{ МПа}$		
			Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Труба при температуре Т = 20 °С:		
			E <sup>20</sup> = 1.99·10 <sup>5</sup> МПа		
Взам. инв. №	Подп. и дата	Инв. № подл.	<b>Гладкая обечайка, нагруженная внутренним избыточным давлением</b>		
			Расчётная толщина стенки с учётом прибавок:		
			$s_p + c = \frac{p \cdot D}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p - p} + c = (2.2825 \cdot 78) / (2 \cdot 254.55 \cdot 1 - 2.2825) + 3 = 3.3513 \text{ мм}$		
			3.3513 мм ≤ 12 мм		
			Заключение: <b>Условие работоспособности выполнено.</b>		
Взам. инв. №	Подп. и дата	Инв. № подл.	Допускаемое давление :		
			$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p \cdot (s - c)}{D + (s - c)} = 2 \cdot 254.55 \cdot 1 \cdot (12 - 3) / (78 + 12 - 3) = 52.665 \text{ МПа}$		
			52.665 МПа ≥ 2.2825 МПа		
			Заключение: <b>Условие прочности выполнено.</b>		
			Минимальное расстояние между "одиночными" штуцерами:		
Взам. инв. №	Подп. и дата	Инв. № подл.	$b_0 = 2 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c)} = 2 \cdot (78 \cdot (12 - 3))^{1/2} = 52.991 \text{ мм}$		
			<b>Расчёт в условиях монтажа</b>		
90651-20600-AM-02-220 РР					Лист
					378
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	

90651-20600-AM-02-220 РР\_изм.0.docx

Формат А4



Внешние нагрузки на аппарат N1



Исходные данные

Несущий элемент:

Обечайка цилиндриче-  
ская

Расстояние от начала элемента,  $l_0$ :

440 мм

Присутствует в условиях монтажа:

Да

Присутствует в условиях испытаний:

Да

Расчёт в рабочих условиях

Условия нагружения:

$F_x = 14142 \text{ Н}$

$F_y = 0 \text{ Н}$

$F_z = (-10000) \text{ Н}$

$M_x = 0 \text{ Н·м}$

$M_y = 32659 \text{ Н·м}$

$M_z = 0 \text{ Н·м}$

Расчёт в условиях монтажа

Условия нагружения:

$F_x = 0 \text{ Н}$

$F_y = 0 \text{ Н}$

$F_z = 0 \text{ Н}$

$M_x = 0 \text{ Н·м}$

$M_y = 0 \text{ Н·м}$

$M_z = 0 \text{ Н·м}$

Изм. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №

Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата

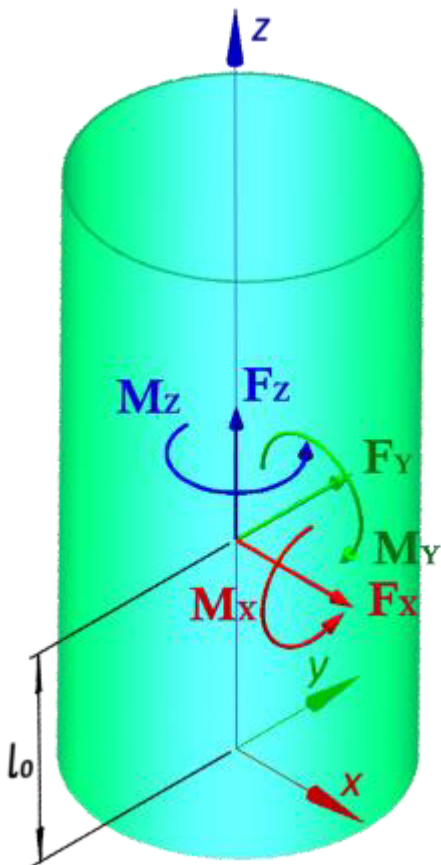
90651-20600-AM-02-220 РР

Лист

380



### Внешние нагрузки на аппарат N2



#### Исходные данные

Несущий элемент:	Обечайка цилиндриче- ская
Расстояние от начала элемента, $l_0$ :	440 мм
Присутствует в условиях монтажа:	Да
Присутствует в условиях испытаний:	Да

#### Расчёт в рабочих условиях

##### Условия нагружения:

$F_x =$	14142	Н
$F_y =$	0	Н
$F_z =$	(-10000)	Н
$M_x =$	0	Н·м
$M_y =$	32659	Н·м
$M_z =$	0	Н·м

#### Расчёт в условиях монтажа

##### Условия нагружения:

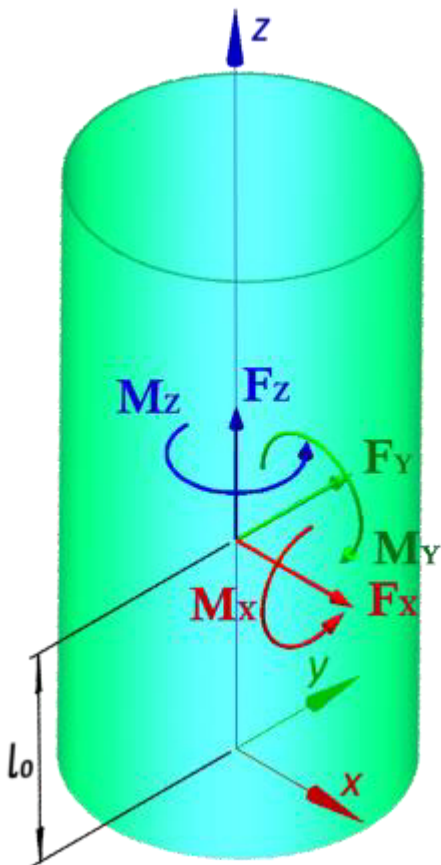
$F_x =$	0	Н
$F_y =$	0	Н
$F_z =$	0	Н
$M_x =$	0	Н·м
$M_y =$	0	Н·м
$M_z =$	0	Н·м

Изм. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №



$$M_z = 0 \quad H \cdot M$$

Внешние нагрузки на аппарат N3



Исходные данные

Несущий элемент:

Расстояние от начала элемента,  $l_0$ :

Присутствует в условиях монтажа:

Присутствует в условиях испытаний:

Обечайка цилиндриче-  
ская

3990 мм

Да

Да

Расчёт в рабочих условиях

Условия нагружения:

$F_x = 4384$  Н  
 $F_y = 0$  Н  
 $F_z = (-3100)$  Н  
 $M_x = 0$  Н·м  
 $M_y = 7359$  Н·м  
 $M_z = 0$  Н·м

Расчёт в условиях монтажа

Условия нагружения:

$F_x = 0$  Н  
 $F_y = 0$  Н  
 $F_z = 0$  Н  
 $M_x = 0$  Н·м  
 $M_y = 0$  Н·м  
 $M_z = 0$  Н·м

Изм. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №

Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата

90651-20600-AM-02-220 РР

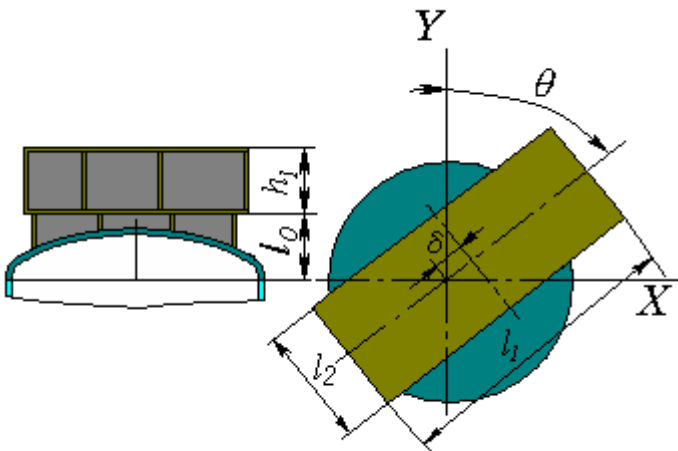
Лист

384



Площадка обслуживания №1

Исходные данные



Несущий элемент:	Днище эллиптическое верхнее
Расстояние от начала элемента, $l_0$ :	760 мм
Угол поворота площадки, $\vartheta$ :	0 °
Ширина площадки, $l_1$ :	2400 мм
Высота площадки, $h_1$ :	1250 мм
Ширина кронштейна, $l_2$ :	2400 мм
Смещение площадки, $\delta$ :	0 мм
Удельный вес площадки, $G_a$ :	0.0032000 МПа



Аэродинамический коэффициент, $K$ :	0.85
Площадь элемента, $A$ :	$4.824 \cdot 10^6 \text{ мм}^2$
Наличие лестницы:	Нет
Вес элемента, $W$ :	18432 Н
Моменты от площадки :	
$M_{пх}$ :	0 Н·м
$M_{пу}$ :	0 Н·м
Присутствует в условиях монтажа:	Да
Присутствует в условиях испытаний:	Да

Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата

Взам. инв. №

Подп. и дата

Инв. № подл.

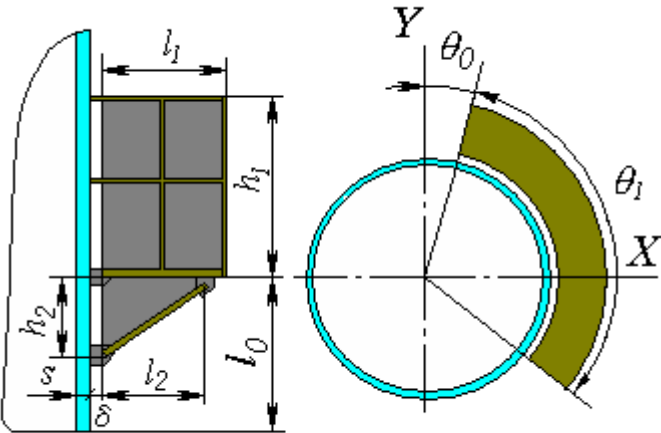
90651-20600-AM-02-220 РР

Лист

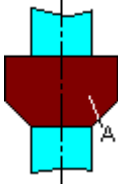
386

Площадка обслуживания №2

Исходные данные



Несущий элемент:	Обечайка цилиндрическая
Расстояние от начала элемента, $l_0$ :	3100 мм
Начальный угол площадки, $\vartheta_0$ :	0 °
Угол сектора площадки, $\vartheta_1$ :	360 °
Ширина площадки, $l_1$ :	1200 мм
Высота площадки, $h_1$ :	1250 мм
Ширина кронштейна, $l_2$ :	1000 мм
Высота кронштейна, $h_2$ :	1000 мм
Зазор между площадкой и обечайкой, $\delta$ :	100 мм
Удельный вес площадки, $G_a$ :	0.0032000 МПа



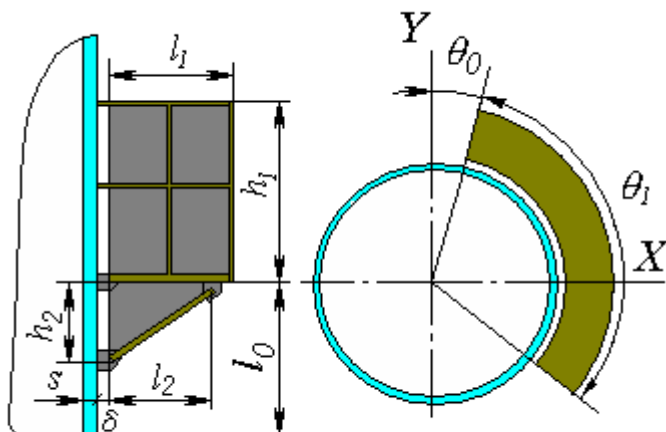
Аэродинамический коэффициент, $K$ :	0.85
Площадь элемента, $A$ :	$1.0131 \cdot 10^7$ мм²
Наличие лестницы:	Нет
Вес элемента, $W$ :	46276 Н
Моменты от площадки :	
$M_{пх}$ :	0 Н·м
$M_{пу}$ :	0 Н·м
Присутствует в условиях монтажа:	Да
Присутствует в условиях испытаний:	Да

Инов. № подл.	Взам. инв. №
Подп. и дата	

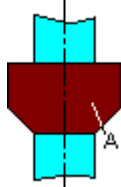
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата

## Площадка обслуживания №3

### Исходные данные



Несущий элемент:	Обечайка цилиндрическая
Расстояние от начала элемента, $l_0$ :	100 мм
Начальный угол площадки, $\theta_0$ :	0 °
Угол сектора площадки, $\theta_1$ :	360 °
Ширина площадки, $l_1$ :	1200 мм
Высота площадки, $h_1$ :	1250 мм
Ширина кронштейна, $l_2$ :	1000 мм
Высота кронштейна, $h_2$ :	1000 мм
Зазор между площадкой и обечайкой, $\delta$ :	100 мм
Удельный вес площадки, $G_a$ :	0.0032000 МПа



Аэродинамический коэффициент, $K$ :	0.85
Площадь элемента, $A$ :	$1.0131 \cdot 10^7$ мм <sup>2</sup>
Наличие лестницы:	Нет
Вес элемента, $W$ :	46276 Н
Моменты от площадки :	
$M_{пх}$ :	0 Н·м
$M_{пу}$ :	0 Н·м
Присутствует в условиях монтажа:	Да
Присутствует в условиях испытаний:	Да

Изм. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №

Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата

90651-20600-AM-02-220 РР

Лист

388

Список литературы

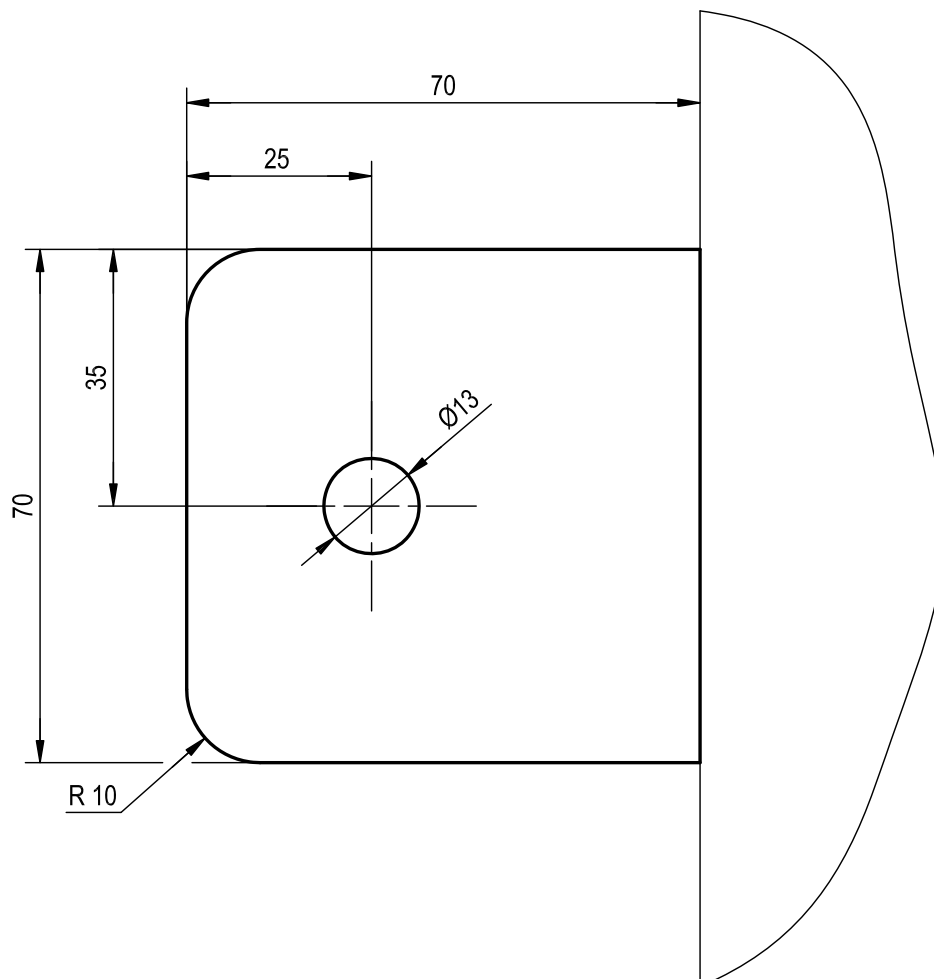
- ГОСТ 34233.1-2017. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Общие требования.
- ГОСТ 34233.2-2017. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет цилиндрических и конических обечаек, выпуклых и плоских днищ и крышек.
- ГОСТ 34233.3-2017. Сосуды и аппараты. Нормы и методы 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.
- ГОСТ 34233.4-2017. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет на прочность и герметичность фланцевых соединений.
- ГОСТ 34283-2017. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность при ветровых, сейсмических и других внешних нагрузках.
- ГОСТ 34347-2017. Сосуды и аппараты стальные сварные. Общие технические условия
- РТМ 26-110-77. Расчет на прочность цилиндрических горизонтальных аппаратов, установленных на седловых опорах.
- СА 03-003-07. Расчет на прочность и вибрацию стальных технологических трубопроводов. Стандарт ассоциации экспертных организаций техногенных объектов повышенной опасности "Ростехэкспертиза"
- СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия

Инв. № подл.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	</
--------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	----













[illegible]

390

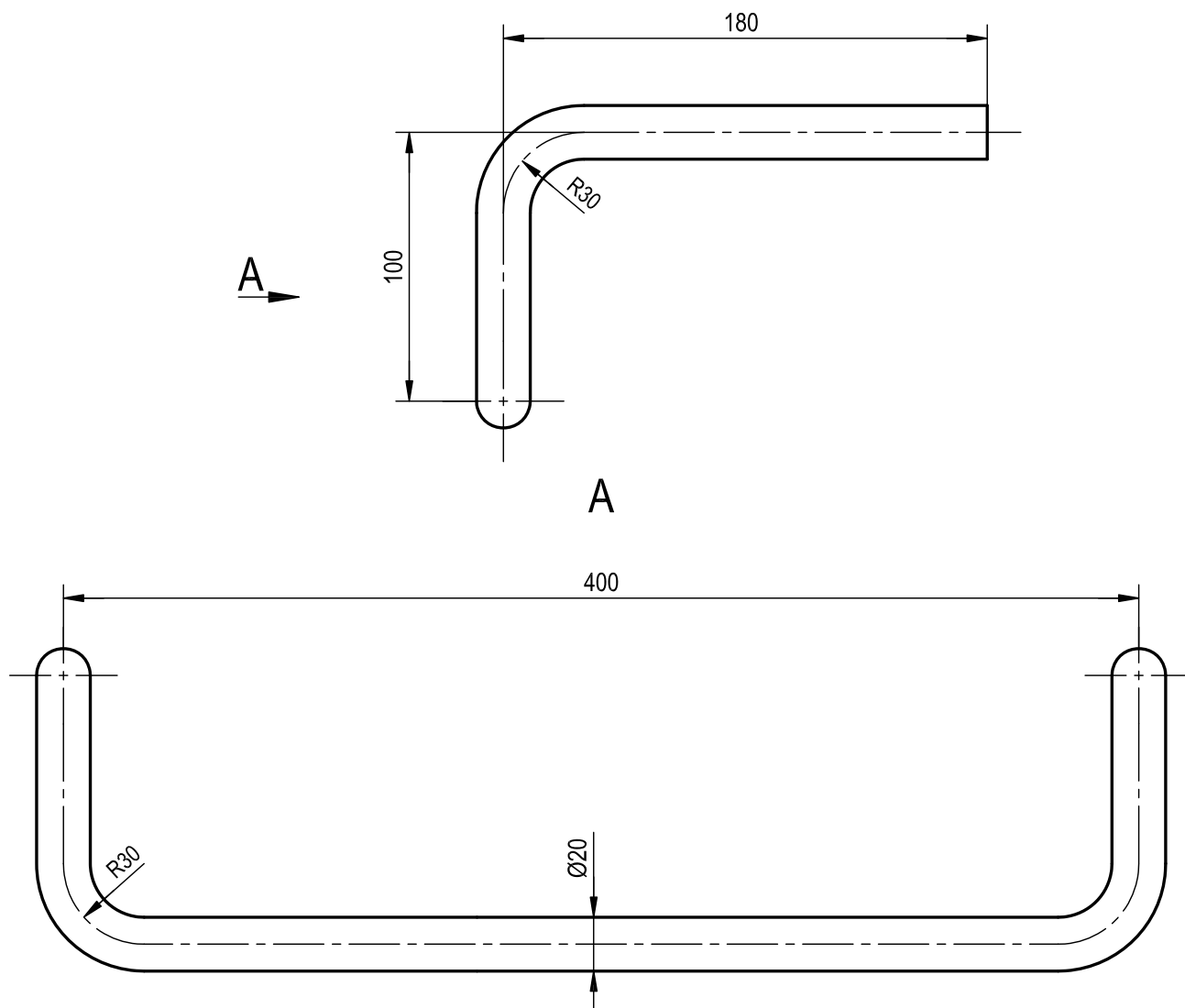




1. Материальное исполнение определяется техническим проектом.
2. Масса рассчитана из условия плотности материала  $7850 \text{ кг/м}^3$ .
3. Толщина листа пластины 6 мм.





Взам. инв. №	Примечания: 1. Материальное исполнение определяется техническим проектом. 2. Масса рассчитана из условия плотности материала 7850 кг/м³. 3. Толщина листа пластины 6 мм.																																																									
	Подп. и дата																																																									
Инв. № подл.		<table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td rowspan="4">АМ-02-ДТ-01-03</td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>Изм.</td><td>Лист</td><td>№ док.</td><td>Подп.</td><td>Дата</td><td rowspan="4">Пластина заземления</td></tr><tr><td>Разраб.</td><td></td><td>Зеленин</td><td></td><td>04.06.20</td></tr><tr><td>Проверил</td><td></td><td>Ковалёв</td><td></td><td>04.06.20</td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>Н. контр.</td><td></td><td>Сотник</td><td></td><td>04.06.20</td><td rowspan="2">НЕФТЕХИМПРОЕКТ NEFTECHIMPROEKT</td></tr><tr><td>Утв.</td><td></td><td>Гилёв</td><td></td><td>04.06.20</td></tr></table>										АМ-02-ДТ-01-03																Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	Пластина заземления	Разраб.		Зеленин		04.06.20	Проверил		Ковалёв		04.06.20						Н. контр.		Сотник		04.06.20	НЕФТЕХИМПРОЕКТ NEFTECHIMPROEKT	Утв.		Гилёв	
						АМ-02-ДТ-01-03																																																				
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	Пластина заземления																																																					
Разраб.		Зеленин		04.06.20																																																						
Проверил		Ковалёв		04.06.20																																																						
Н. контр.		Сотник		04.06.20	НЕФТЕХИМПРОЕКТ NEFTECHIMPROEKT																																																					
Утв.		Гилёв		04.06.20																																																						
<table><tr><td colspan="2">Лит.</td><td>Масса</td><td>Масштаб</td></tr><tr><td></td><td></td><td>0,23</td><td>1:1</td></tr><tr><td colspan="2">Лист</td><td colspan="2">Листов 1</td></tr></table>						Лит.		Масса	Масштаб			0,23	1:1	Лист		Листов 1																																										
Лит.		Масса	Масштаб																																																							
		0,23	1:1																																																							
Лист		Листов 1																																																								

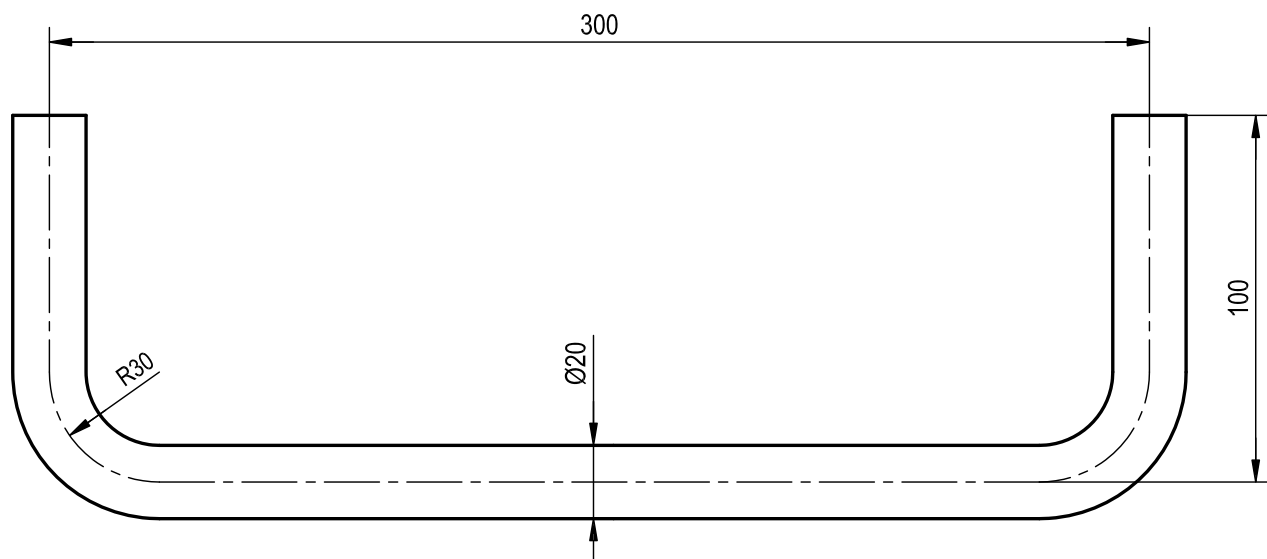
AM-02-DT-02-01







Примечания:

1. Материальное исполнение определяется техническим проектом.
2. Масса ступеньки рассчитана из условия плотности материала 7850 кг/м³.
3. Если сосуд изготовлен из коррозионно-стойкой стали, то круг заменить на трубу Ø20x4.

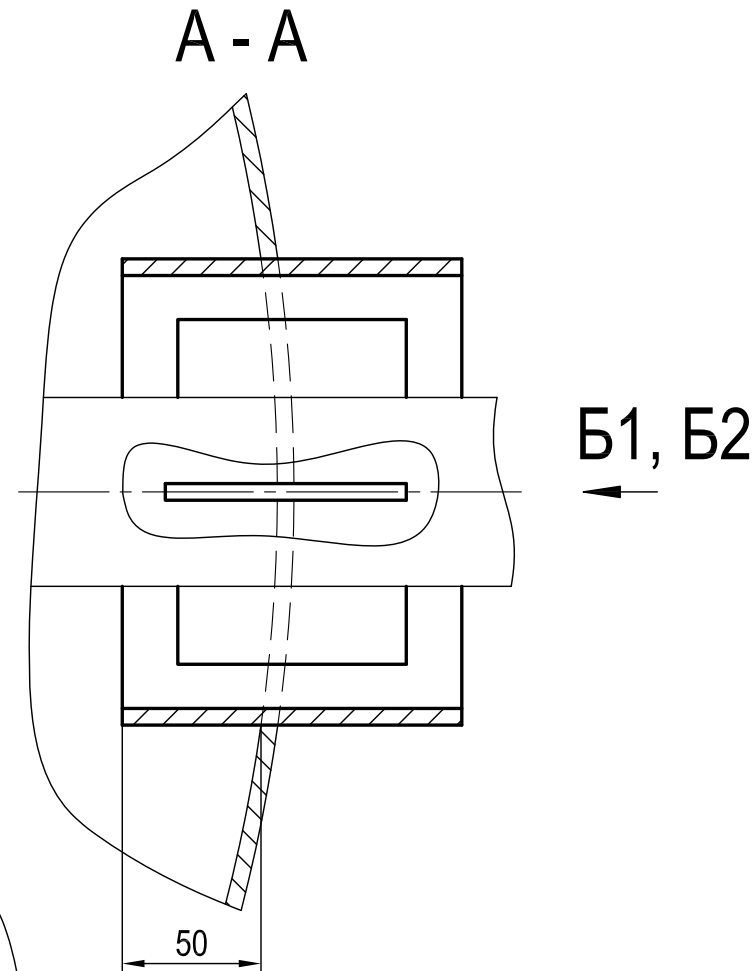
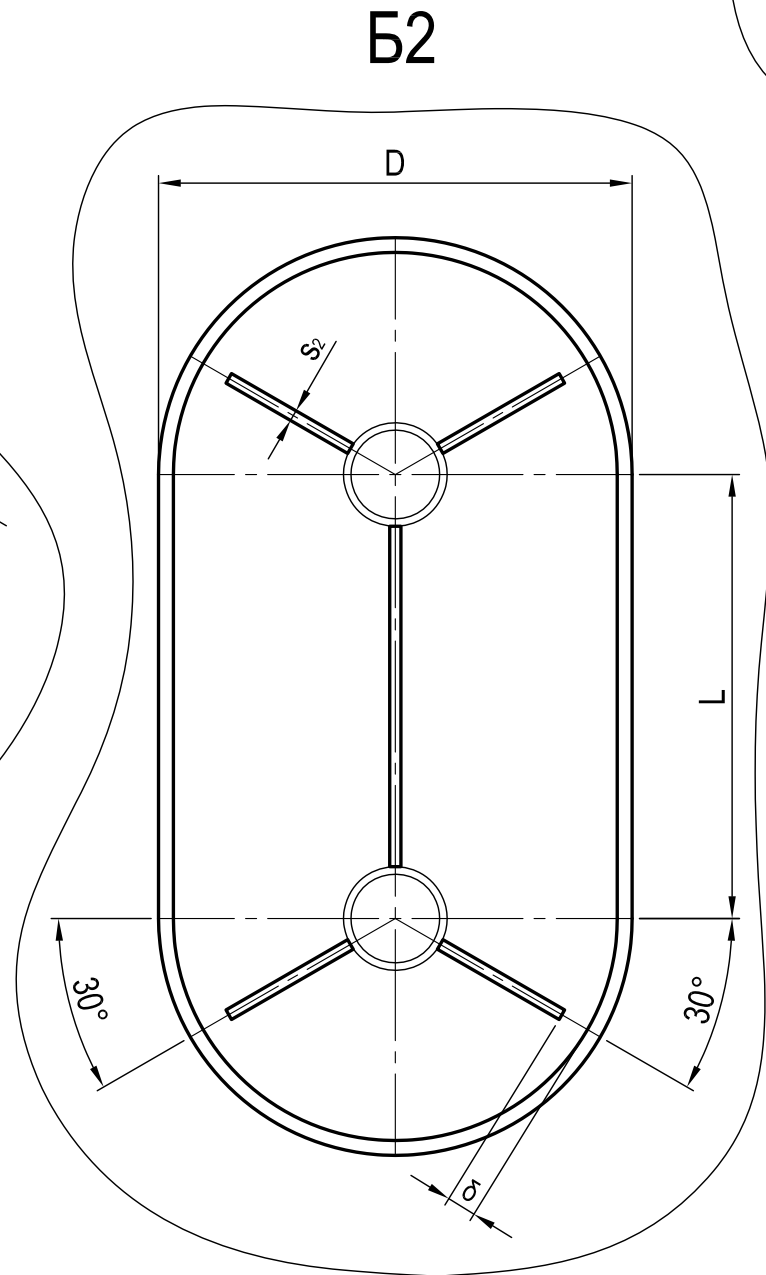
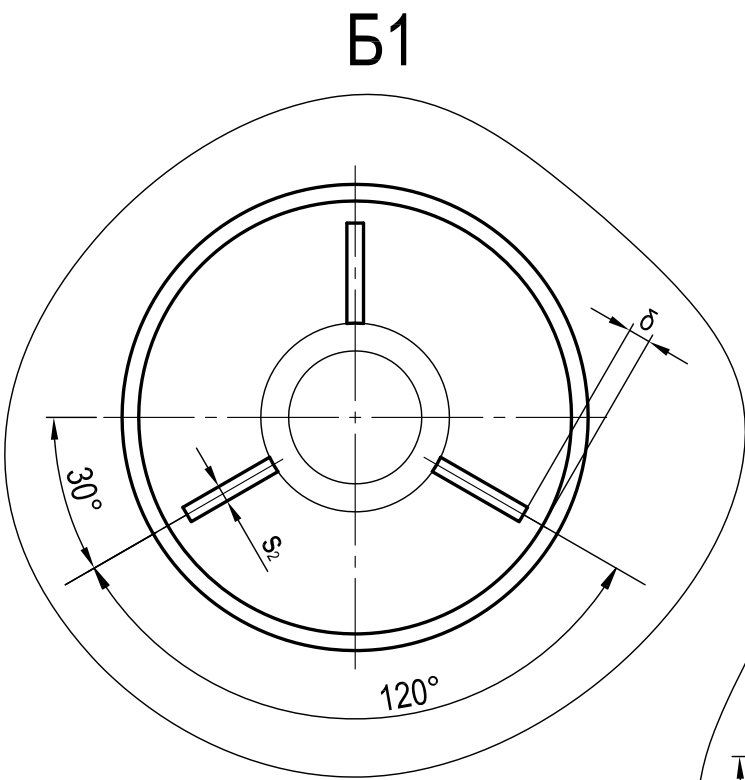
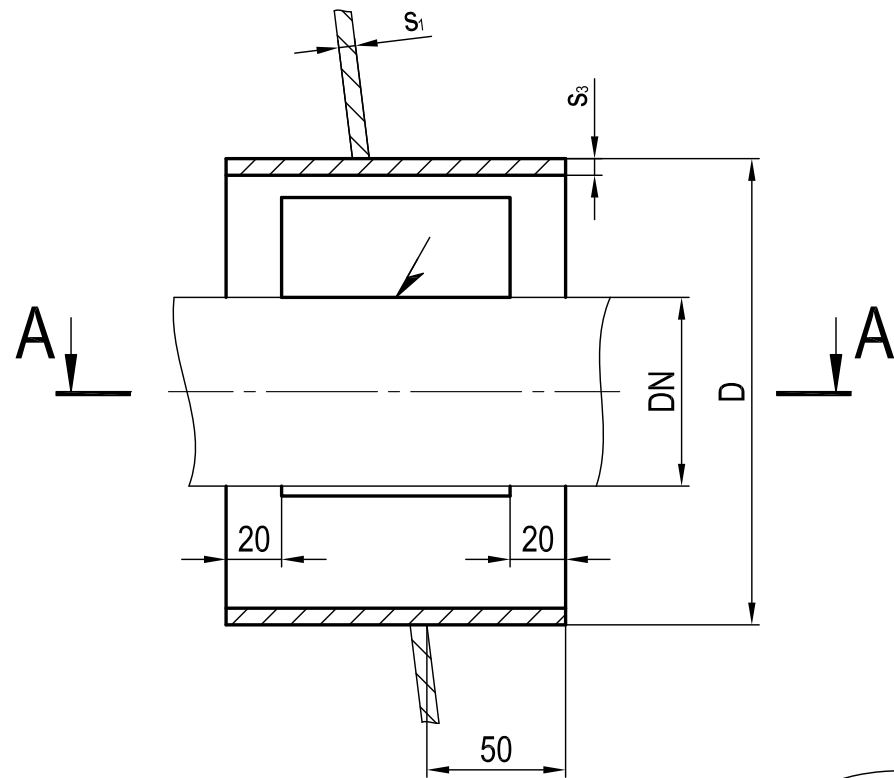
Взам. инв. №	Примечания: 1. Материальное исполнение определяется техническим проектом. 2. Масса ступеньки рассчитана из условия плотности материала 7850 кг/м³. 3. Если сосуд изготовлен из коррозионно-стойкой стали, то круг заменить на трубу Ø20x4.									
Подп. и дата					АМ-02-ДТ-02-01					
Инв. № подл.	Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	Ступенька	Лит.	Масса	Масштаб	
	Разраб.		Зеленин		04.06.20				2,4	1:2,5
	Проверил		Ковалёв		04.06.20					
							Лист	Листов 1		
							НЕФТЕХИМПРОЕКТ NEFTECHIMPROEKT			
	Н. контр.		Сотник		04.06.20					
	Утв.		Гилёв		04.06.20					



1. Материальное исполнение определяется техническим проектом.
2. Масса скобы рассчитана из условия плотности материала 7850 кг/м³.
3. Если сосуд изготовлен из коррозионно-стойкой стали, то круг заменить на трубу Ø20x4.

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №							АМ-02-ДТ-02-02				
			Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	Скоба	Лит.			Масса	Масштаб
			Разраб.		Зеленин		04.06.20						
			Проверил		Ковалёв		04.06.20						
									Лист			Листов 1	
			Н. контр.		Сотник		04.06.20		НЕФТЕХИМПРОЕКТ NEFTECHIMPROEKT				
Утв.		Гилёв		04.06.20									

AM-02-ДТ-03-02



Обозначение	Размеры, мм			
	DN	D	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>
AM-02-ДТ-03-02	25	133	4	8
-01	40	133	6	8
-02	50	159	6	8
-03	65	159	6	8
-04	80	219	6	8
-05	100	273	6	8
-06	150	377	8	8
-07	200	377	8	8
-08	250	426	8	8
-09	300	530	8	10
-10	350	530	8	10
-11	400	630	8	10
-12	450	630	8	10
-13	500	820	10	10
-14	600	820	10	10

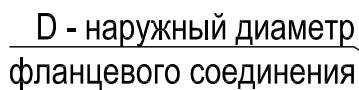
DN - номинальный диаметр патрубка туцера  
D - наружный диаметр трубы  
S<sub>2</sub> - толщина ребра  
S<sub>3</sub> - толщина патрубка прохода через обечайку

Примечания:

1. Масса и материальное исполнение определяются техническим проектом.
2. Толщина опорной обечайки аппарата s<sub>1</sub> определяются техническим проектом.
3. Вид B1 - для крепления одной трубы, вид B2 - для крепления двух труб.
4. По умолчанию δ = 2 мм, если не указано иное в техническом проекте.
5. Размер L в соответствии с техническим проектом.
6. Пример условного обозначения: Крепление трубы δ = 3 мм.

Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата
Разраб.	Широкоград	АМ	04.06.20	
Проверил	Ковалёв	Ков	04.06.20	
Н. контр.	Сотник	Сот	04.06.20	
Утв.	Гилёв	Гил	04.06.20	

AM-02-ДТ-03-02				
Крепление трубы				
Лит. Масса Масштаб				
Лист Листов 1				
НЕФТЕХИМПРОЕКТ NEFTECHIMPROEKT				



Отв. Ø5  
только для кольца

$D_1$  - наружный диаметр  
заглушки / кольца

Уплотнительная  
поверхность

1. Для заглушек и колец массой  $\geq 50$  кг – 4 строповых устройства;  
                   $< 50$  кг – 1 строповое устройство.
2. Размеры D, D<sub>1</sub> в соответствии с техническим проектом.
3. Материал строповых устройств соответствует материалу заглушки и кольца.

Взам. инв. №	1. Для заглушек и колец массой $\geq 50$ кг – 4 строповых устройства; 									
--------------	---	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Этот документ является собственностью "НЕФТЕХИМПРОЕКТ" и не подлежит копированию и распространению без его согласия






НЕФТЕХИМПРОЕКТ  
NEFTECHIMPROEKT

ТРЕБОВАНИЯ К ТЕХНИЧЕСКИМ  
ПРЕДЛОЖЕНИЯМ ПОСТАВЩИКА

Д

ТРЕБОВАНИЯ К ТЕХНИЧЕСКИМ  
ПРЕДЛОЖЕНИЯМ ПОСТАВЩИКА

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №

					27-АМ-02 Д			
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	Требования к техническим предложениям поставщика	Лит.	Лист	Листов
Разраб.		Ковалёв		02.09.22		Т	1	3
Проверил		Островский		02.09.22		НЕФТЕХИМПРОЕКТ NEFTECHIMPROEKT		
Нач. отд.		Гилёв		02.09.22				
Н. контр.		Сотник		02.09.22				
Утвердил		Сырков		02.09.22				

## ТРЕБОВАНИЯ К ТЕХНИЧЕСКИМ ПРЕДЛОЖЕНИЯМ ПОСТАВЩИКА

Для оценки соответствия требованиям технического проекта (ТП) Поставщик оборудования должен предоставить Техническое предложение на выполнение рабочей конструкторской документации, изготовление, испытания и поставку сосудов.

В Техническое предложение должны быть включены:

1. Данные о заводе-изготовителе (наименование и местоположение) поставляемого оборудования и организации, выполняющей расчет и проект оборудования.
2. Проштампованные и подписанные Поставщиком чертеж общего вида, ведомость ТП, титульные листы Пояснительной записки и Механического расчета, подтверждающие принятие полного объема поставки, технических требований, материалов, объема и методов контроля согласно ТП.
3. Сертификаты или декларации соответствия Техническому регламенту Таможенного союза: ТР ТС 010/2011 "О безопасности машин и оборудования" и ТР ТС 032/2013 "О безопасности оборудования, работающего под избыточным давлением" на предлагаемое оборудование или гарантии на их предоставление на стадии поставки оборудования.
4. Гарантии на предоставление на стадии поставки оборудования Обоснования безопасности в соответствии с требованиями ТР ТС 010/2011 "О безопасности машин и оборудования" и ТР ТС 032/2013 "О безопасности оборудования, работающего под избыточным давлением".
5. Референц-лист, показывающий опыт изготовления и поставки аналогичного оборудования за последние 6 лет, с указанием технических характеристик (давление, температура) и материалов, а также наименования конечного потребителя оборудования.
6. Предлагаемый метод транспортировки (автомобильный, железнодорожный, комбинированный и т.п.) исходя из габаритов и весов сосудов.
7. Предложения по доизготовлению сосудов, собираемых на площадке конечного потребителя, включая описание монтажа, материалов для сварки, термообработки, испытаний, исполнителей и т.п.
8. Перечень дополнительных услуг (опций) по монтажу, включая шефмонтаж.
9. Перечень запасных частей и принадлежностей, включая (если указано в ТП) шаблон основания опоры для анкерных болтов.
10. Перечень предоставляемой документации поставщика на стадии:

- рассмотрение (согласование) РКД;

- поставка оборудования.

Подтверждение предоставления финальной документации в бумажном формате (количество экземпляров в соответствии с контрактом) и электронном виде "pdf".

11. Подтверждение, что поставка оборудования будет осуществлена с учетом нанесения покрытия (окраски) в соответствии с требованием ТП и указанием системы покрытий и лакокрасочных материалов, применяемых Поставщиком для согласования Заказчиком.

Все документы и чертежи (кроме сертификатов) иностранного Поставщика должны быть выполнены в двоязычном исполнении: на английском и русском языках.

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №						
<p>- рассмотрение (согласование) РКД;</p> <p>- поставка оборудования.</p> <p>Подтверждение предоставления финальной документации в бумажном формате (количество экземпляров в соответствии с контрактом) и электронном виде "pdf".</p> <p>11. Подтверждение, что поставка оборудования будет осуществлена с учетом нанесения покрытия (окраски) в соответствии с требованием ТП и указанием системы покрытий и лакокрасочных материалов, применяемых Поставщиком для согласования Заказчиком.</p> <p>Все документы и чертежи (кроме сертификатов) иностранного Поставщика должны быть выполнены в двуязычном исполнении: на английском и русском языках.</p>								
					27-AM-02 Д			Лист
								2
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата				

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №

Этот документ является собственностью "НЕФТЕХИМПРОЕКТ" и не подлежит копированию и распространению без его согласия

НЕФТЕХИМПРОЕКТ NEFTECHIMPROEKT		ТРЕБОВАНИЯ К ТЕХНИЧЕСКИМ ПРЕДЛОЖЕНИЯМ ПОСТАВЩИКА			Д
<p>Поставщик может представить альтернативное предложение с отступлением от требований ТП при условии выполнения следующих условий:</p> <p>а) Получено предварительное согласие Заказчика.</p> <p>б) Представлены технические обоснования отступлений, показывающие преимущества предлагаемых альтернативных решений (в отношении цены, поставки, транспортировки, монтажа и т. д.).</p> <p>Все отклонения и отступления от требований ТП должны быть представлены поставщиком на чертеже общего вида. Отсутствие отклонений или отступлений при наличии подписанного и проштампованного чертежа будет рассматриваться как полное соответствие требованиям ТП.</p>					
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	<div>27-АМ-02 Д</div> <div>Лист 3</div>








Этот документ является собственностью "НЕФТЕХИМПРОЕКТ" и не подлежит копированию и распространению без его согласия

НЕФТЕХИМПРОЕКТ  
NEFTECHIMPROEKT

ТРЕБОВАНИЯ К РАБОЧЕЙ  
КОНСТРУКТОРСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

Д

## ТРЕБОВАНИЯ К РАБОЧЕЙ КОНСТРУКТОРСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

Взам. инв. №	Подп. и дата							
Инв. № подл.	2	Зам.	—		18.10.24	27-АМ-03 Д		
	Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата			
	Разраб.	Бабин		18.10.24	Требования к рабочей конструкторской документации	Лит.	Лист	Листов
	Проверил	Елисеева		18.10.24		Т	1	3
	Нач. отд.	Фаустов		18.10.24		НЕФТЕХИМПРОЕКТ NEFTECHIMPROEKT		
	Н. контр.	Сотник		18.10.24				
	Утвердил	Сырков		18.10.24				

## ТРЕБОВАНИЯ К РАБОЧЕЙ КОНСТРУКТОРСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

1. Поставщиком сосуда для рассмотрения на соответствие техническому проекту (ТП) предоставляется рабочая конструкторская документация (РКД) в следующем объеме:

1.1. Сборочный чертёж.

На сборочном чертеже должна быть предоставлена следующая информация:

- Все габаритные размеры, размеры узлов и деталей, справочные размеры, указанные в ТП. Все измененные размеры стандартных деталей должны быть отражены на сборочном чертеже (например: увеличенная толщина тарелки стандартного фланца, увеличенная толщина рёбер стандартных седловых опор и т.п.).
- Ориентация всех приварных к корпусу деталей и всех штуцеров.
- Опорный узел и расположение отверстий под фундаментные болты с указанием количества и номинального диаметра болтов.
- Таблица технических характеристик и технологических параметров среды.
- Технические требования.
- Сводная таблица материального исполнения основных узлов, деталей и используемых прокладок с указанием категории, группы стали, класса прочности.
- Таблица максимальных усилий и моментов на штуцерах.
- Таблица крутящих моментов при затяжке гаек фланцевых соединений с уточнением наличия и отсутствия смазки.
- В дополнительной графе основной надписи (в дополнительной графе 30 по ГОСТ 2.104-2023) должна быть приведена информация о заказчике и об объекте размещения сосуда (установка / комплекс) в соответствии с ТП.
- Таблица штуцеров с указанием номинального диаметра, наружного диаметра и толщины патрубков, рейтинга фланцевых соединений, типа уплотнительных поверхностей фланцев, типа ответных деталей (фланец, заглушка, бобышка), размеров укрепляющих колец, наличие поворотной заглушки, вылетов от корпуса, вылетов от оси/линии TL до присоединяемого трубопровода.
- Масса пустого сосуда.
- Наличие термообработки корпуса.
- Толщина теплоизоляции.
- Схема строповки, утверждённая Заказчиком и монтажной организацией.

1.2. Чертежи деталей и сборочных единиц:

1.2.1. Днища, обечайки, опоры, конические переходы.

1.2.2. Штуцеры, люки, фланцы.

1.2.3. Шаблон основания цилиндрической или конической опоры (кондуктор) (только для колонного и реакторного оборудования).

1.2.4. Чертежи внутренних приварных деталей (распределители, опорные элементы, антизавихрители и т.п.).

1.2.5. Чертежи наружных приварных деталей (ребра жёсткости, устройства крепления изоляции, подъёмно-поворотные устройства и т.п.).

1.2.6. Схема расположения закладных деталей под обслуживающие площадки с указанием расположения сварных швов корпуса. Таблица нагрузок на закладные детали.

1.2.7. Схема расположения сварных швов (раскрой) корпуса (при выполнении пункта 1.2.6 – необязательно).


1.2.8. Чертежи съёмных внутренних устройств, входящих в объём поставки.

1.3. Спецификации.

1.4. Ведомость ЗИП.

1.5. Таблицы (схемы) методов и объёмов контроля сварных соединений.

Инов. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №

2	Зам.	—		18.10.24
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата


27-AM-03 Д

Лист

2

2. Поставщиком выполняются в полном объёме и могут быть запрошены следующие расчёты:
  - 2.1. Механический расчёт элементов корпуса в соответствии со стандартной методикой и с учётом выбранных свойств материалов и прибавок в зависимости от технологии изготовления.
  - 2.2. Расчёты мест врезок штуцеров в соответствии со стандартной методикой.
  - 2.3. Конечно-элементные расчёты смещённых штуцеров с нагрузками (при наличии).
  - 2.4. Расчёты фланцевых соединений с указанием моментов затяжки.
  - 2.5. Оценка локальной прочности корпуса от действия внешних присоединяемых устройств (площадки обслуживания, опоры трубопроводов, ребойлеров, маршевых лестниц и т.д.) методами WRC 107/297/537 или МКЭ.
  - 2.6. Термоупругий расчёт элемента Hot-box (при наличии).
  - 2.7. Расчёт цапф, хвостовых проушин, монтажных крышек и устройств с учётом согласованной с Заказчиком схемой строповки.
3. Каждый документ должен направляться отдельным файлом в формате "PDF".
4. Основная надпись документов должна быть заполнена и подписана ответственными лицами.
5. Поставщик несёт ответственность за достоверность предоставляемой документации. Поступающая от Поставщика документация должна всецело отражать информацию, содержащуюся в ТП. В случае отсутствия в объёме сборочного чертежа размеров и другой информации по отдельным узлам, следует направлять чертежи подборок, содержащие необходимые размеры и информацию. За непредоставленную информацию ответственность несёт Поставщик.
6. В случае отклонения от требований ТП Поставщик обязан предоставить вместе с РКД список изменений и их обоснование. Отступления без обоснований не принимаются.
7. НХП возвращает поставщику комплект рассмотренной документации со штампом "WITH / WITHOUT COMMENTS" (с комментариями / без комментариев). Документы, такие как инструкция по эксплуатации, документация субпоставщиков и др. принимаются для информации. Документация возвращается Поставщику с пометкой "WITHOUT COMMENTS" (без комментариев), в случае отсутствия замечаний и комментариев путём простановки штампа "WITHOUT COMMENTS" на первый лист основного сборочного чертежа и первый лист спецификации. Чертежи и документы, которые являются некорректными или которые не содержат необходимую информацию, будут возвращены Поставщику с пометкой "WITH COMMENTS" для внесения поправок. Данные чертежи и документы должны быть откорректированы Поставщиком и предоставлены на повторное рассмотрение.
8. Для сокращения сроков повторного рассмотрения откорректированной / изменённой документации на чертеже должен быть обозначен номер изменения (ревизии, версии) и дата выпуска изменённого документа. Все изменённые места в документации должны быть отмечены.

Инов. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №

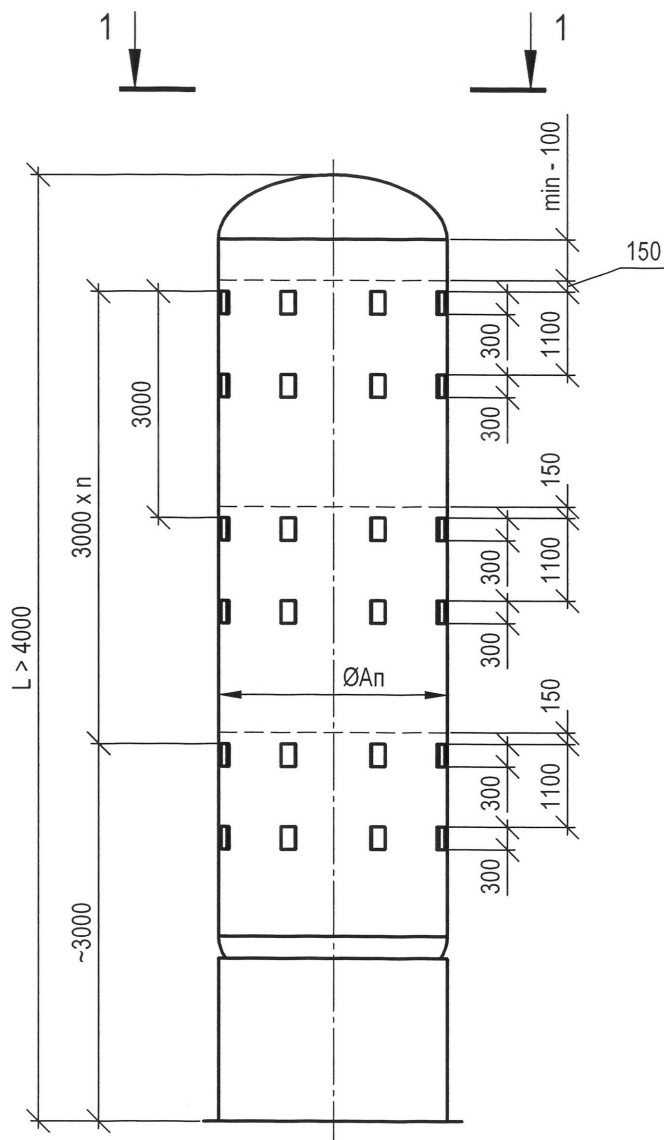
2	Зам.	—		18.10.24
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата

27-AM-03 Д

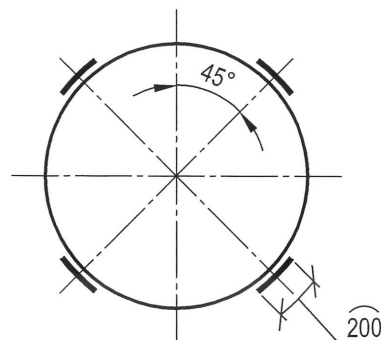
Лист

3

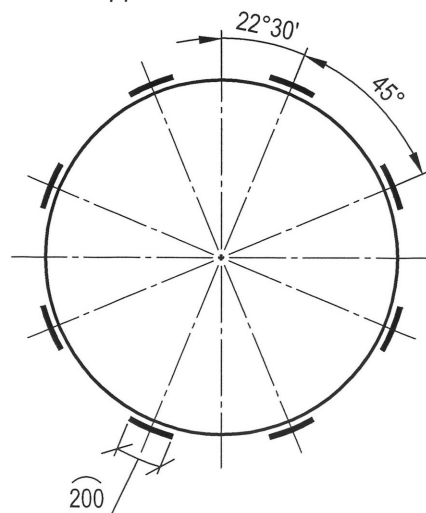
Схема расположения закладных деталей (накладок, платиков)  
для крепления площадок обслуживания  
на вертикальных сосудах






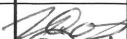

1 - 1  
для  $1000 \leq \varnothing_{\text{Ап}} \leq 1600$



1 - 1  
для  $\varnothing_{\text{Ап}} \geq 1700$



1. Схема выполнена для определения необходимого количества закладных деталей и требует уточнения в техническом проекте на сосуд.
2. Толщину закладных деталей принять равной толщине обечайки сосуда, но не более 14 мм.
3. Закладные детали изготовить из материала того же структурного класса, что и обечайка сосуда.
4. Количество закладных деталей определяется по схеме в зависимости от высоты сосуда.

Взам. инв. №	<div>1. Схема выполнена для определения необходимого количества закладных деталей и требует уточнения в техническом проекте на сосуд.</div> <div>2. Толщину закладных деталей принять равной толщине обечайки сосуда, но не более 14 мм.</div> <div>3. Закладные детали изготовить из материала того же структурного класса, что и обечайка сосуда.</div> <div>4. Количество закладных деталей определяется по схеме в зависимости от высоты сосуда.</div>					
Подп. и дата	<div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div></div> <div>ПЛ-В-КМ-02</div>					
Инв. № подл.	1	-	Зам.	-		23.01.24
	Изм.	Кол.уч.	Лист	№ док.	Подп.	Дата
	Разраб.		Синельников А.			23.01.24
	Проверил		Островский			23.01.24
	Н. контр.		Сотник			23.01.24
	Утв.		Фаустов			23.01.24
<div>Схема расположения закладных деталей для крепления площадок обслуживания на вертикальных сосудах</div> <div>Типовой чертеж</div>						<div>Стадия</div> <div>Лист</div> <div>Листов</div> <div>1</div> <div>НЕФТЕХИМПРОЕКТ</div> <div>NEFTECHIMPROEKT</div>