

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ФАКУЛЬТЕТ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ  
Кафедра хімічної інженерії

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Зав. кафедри

\_\_\_\_\_  
підпис, дата

**Кваліфікаційна робота бакалавра**  
**зі спеціальності 133 "Галузеве машинобудування"**  
**ОП "Обладнання нафто- та газопереробних виробництв"**

Тема роботи: Газофракціонуюча установка. Розробити  
випарник колони-деетанізатора

Виконав:

студент групи ХМ-71/3хо.і

Жумабоев Мухаммадалі Таваккілжон огли

\_\_\_\_\_  
підпис

Залікова книжка

№ \_\_\_\_\_

Кваліфікаційна робота бакалавра  
захищена на засіданні ЕК

з оцінкою \_\_\_\_\_

" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ р.

**Підпис голови**  
(заступника голови) комісії

Керівник:

канд. техн. наук, ст. викладач

Острога Руслан Олексійович

\_\_\_\_\_  
підпис, дата

**СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**ФАКУЛЬТЕТ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**  
**Кафедра хімічної інженерії**

Спеціальність 133 "Галузеве машинобудування"  
Освітня програма "Обладнання нафто- та газопереробних виробництв"

Курс 4 Група ХМ-71/3хо.і Семестр 8

**ЗАВДАННЯ**  
**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА**

Студенту Жумабоєву Мухаммадалі Таваккілжон огли

1 Тема роботи: Газофракціонуєча установка. Розробити випарник колони-деетанізатора

2 Вихідні дані: Розробити випарник з паровим простором для випаровування вуглеводнів. Продуктивність апарату 180 т/добу. Вуглеводнева суміш потрапляє у міжтрубний простір випарника при температурі 90°C під тиском 0,45 МПа. Гарячий теплоносій у трубах – насичена водяна пара під тиском 0,2 МПа.

3 Перелік обов'язкового графічного матеріалу (аркуші А1):

1. Технологічна схема газофракціонуєчої установки – 1,0 арк.
2. Складальне креслення випарника – 1,5 арк.
3. Складальне креслення кришки апарату – 0,5 арк.

4 Рекомендована література: 1. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра / укладачі: Р.О. Острога, М.С. Скиданенко, Я.Е. Михайловський, А.В. Іванія. – Суми : СумДУ, 2019. – 32 с.; 2. Кузнецов А. А. Расчеты процессов и аппаратов нефтеперерабатывающей промышленности. Изд. 2-е, пер. и доп. / А. А. Кузнецов, С. М. Кагерманов, Е. Н. Судаков. – Л. : Химия, 1974. – 344 с.

5 Етапи виконання кваліфікаційної роботи:

Етапи та розділи проектування	ТИЖНІ				
	1	2,3	4,5	6,7	8
1 Вступна частина	х				
2 Технологічна частина		хх			
3 Проектно-конструкторська частина			хх		
4 Розробка креслень				хх	
5 Оформлення записки					х
6 Захист роботи					х

6 Дата видачі завдання

жовтень 2020 р.

Керівник

\_\_\_\_\_

підпис

ст. викл. Острога Р.О.

## РЕФЕРАТ

Пояснительная записка: 80 с., 15 рис., 1 приложение, 16 источников.

Графические материалы: технологическая схема газофракционирующей установки, сборочный чертеж испарителя, сборочный чертеж крышки – всего 3 листа графической части формата А1.

Тема квалификационной работы: «Газофракционирующая установка. Разработать испаритель колонны-деэтанатора».

В работе приведено описание технологической схемы газофракционирующей установки. Рассмотрены теоретические особенности теплообменных процессов, изучено конструкцию и принцип действия испарителя с паровым пространством, обоснован выбор конструкционных материалов для изготовления основных деталей и узлов аппарата, приведены их физико-механические и технологические свойства. Выполнен технологический и конструктивный расчеты процесса и аппарата, выбрано вспомогательное оборудование. Проведенными проверочными расчетами на прочность и герметичность подтверждена механическая надежность проектируемого аппарата. Отдельным разделом представлены организации монтажных и ремонтных работ. В разделе «Охрана труда» рассмотрена методика расчета молниезащиты.

Ключевые слова: ГАЗОФРАКЦИОНИРУЮЩАЯ УСТАНОВКА, ВОДЯНОЙ ПАР, ПРОПАН, БУТАН, ПЕНТАН, МОНТАЖ, РЕМОНТ, МОЛНИЕЗАЩИТА.

## Содержание

	С.
Введение	5
1 Технологическая часть	6
1.1 Описание технологической схемы газофракционирующей установки	6
1.2 Теоретические основы теплообменных процессов	8
1.3 Описание конструкции испарителя с паровым пространством и выбор основных конструкционных материалов	11
2 Технологические расчеты процесса и аппарата	15
2.1 Технологические расчеты	15
2.2 Конструктивные расчеты	21
2.3 Гидравлические расчеты	23
2.4 Выбор вспомогательного оборудования	25
3 Расчеты аппарата на прочность и герметичность	31
4 Монтаж и ремонт аппарата	67
4.1 Монтаж аппарата	67
4.2 Ремонт аппарата	69
5 Охрана труда	74
Список использованных источников	79
Приложение – Спецификации к графической части проекта	

					<i>ХИ.Т.00.00.00.ПЗ</i>		
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>			
<i>Разраб.</i>		<i>Жумабоев</i>			<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>		<i>Острога</i>				4	80
<i>Реценз.</i>					<i>СумГУ, ХМ-71/Эхо.и</i>		
<i>Н. Контр.</i>							
<i>Утверд.</i>		<i>Складинский</i>					
					<b><i>Испаритель с паровым пространством</i></b>		
					<b><i>Пояснительная записка</i></b>		

## Введение

Нефтехимическая промышленность выпускает достаточно разнообразную по ассортименту и конкурентоспособную на мировом рынке продукцию. Данные товары получают на предприятиях, которые представляют собой сложный технологический комплекс [1].

Номенклатура нефтехимического оборудования достаточно широка: теплообменники, колонны, сушилки, реакционные аппараты, сепараторы, емкостная аппаратура, аппараты высокого давления и прочее. Каждая из этих групп делится на типы, а последние – на десятки типоразмеров. К одним из основных процессов нефтехимической промышленности относится ректификация, предназначенная для разделения различных по температуре кипения жидкостей на отдельные компоненты или их фракции [1].

Широкий ассортимент получаемых продуктов обуславливает сложность и разнообразие технологических процессов, а также типов, конструкций машин и аппаратов для их проведения [2].

В нефтехимической промышленности наибольшее распространение получили поверхностные теплообменники, отличающиеся разнообразием конструкций. Отдельную группу представляют трубчатые теплообменники, такие как: кожухотрубчатые, оросительные, погруженные и «труба в трубе». По конструкции они представляют собой аппараты, выполненные из пучков труб, концы которых закреплены в специальных трубных решетках путем развальцовки, сварки и пайки. Пучок труб расположен внутри общего кожуха, причем один из теплоносителей движется по трубам, а другой – в пространстве между кожухом и трубами [2].

В данной квалификационной работе спроектирован испаритель с паровым пространством, который предназначен для частичного испарения кубового остатка (углеводороды) этановой колонны. Данный проект выполнен в соответствии с методическими указаниями [3].

					<i>ХИ.Т.00.00.00.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		5

## 1 Технологическая часть

### 1.1 Описание технологической схемы газофракционирующей установки

Газофракционирование – это процесс, который предназначен для получения индивидуальных легких углеводородов или углеводородных фракций высокой чистоты из нефтезаводских или попутных газов. Газофракционирующие установки состоят из следующих укрупненных блоков [4]:

- 1) выделение углеводородов  $C_{3+}$  из газообразного сырья конденсационно-компрессионным или абсорбционным способом;
- 2) деэтанзация сырья;
- 3) ректификация жидких углеводородов;
- 4) очистка сырья и готовой продукции.

Основным назначением газофракционирующих установок является разделение углеводородного сырья с целью получения индивидуальных компонентов или углеводородных фракций высокой чистоты, отличающихся температурами кипения. Необходимым условием работы установки является обеспечение высокой степени разделения газовой и жидкой фаз за счет использования системы ректификационных колонн, количество которых определяется по количеству разделяемых компонентов. В общем случае число колонн для ректификации многокомпонентной смеси должно быть на одну меньше, чем число компонентов, на которые разделяется смесь, т. е. для разделения смеси из  $n$  компонентов требуется  $n - 1$  колонна [5].

На рис. 1.1 представлена типовая технологическая схема газофракционирующей установки (ГФУ). Принцип ее работы заключается в следующем. Широкая фракция легких углеводородов (ШФЛУ), после подогрева в теплообменниках, подается в верхнюю часть деэтанизатора. Нижним продуктом этановой колонны является деэтанизированная ШФЛУ, а верхним – пары этана. Верхний продукт деэтанизатора в газообразном состоянии поступает в аппарат воздушного охлаждения для последующей его конденсации.

					<i>ХИ.Т.00.00.00.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		6

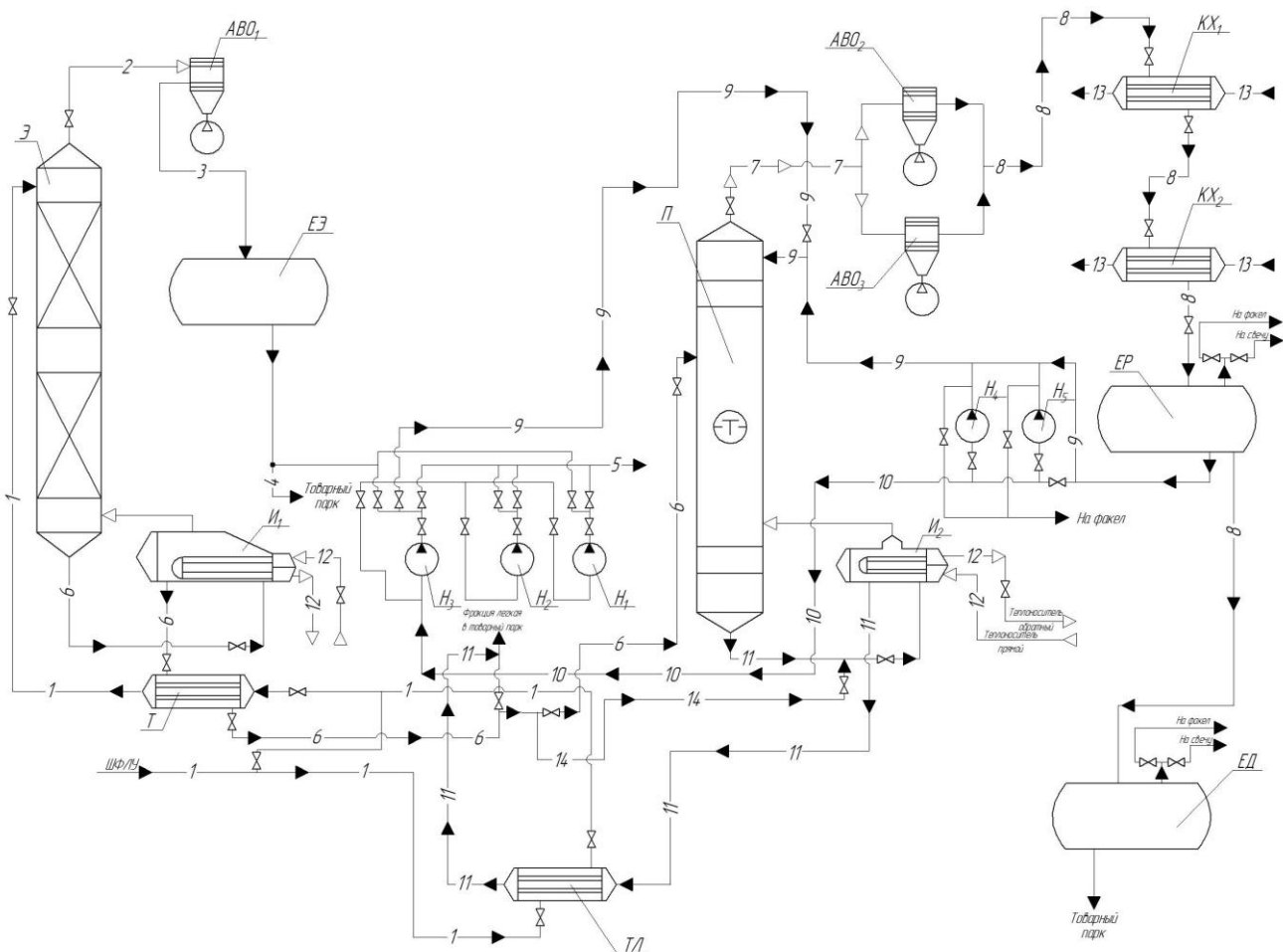


Рисунок 1.1 – Технологическая схема газодифференцирующей установки

Далее уже жидкий этан поступает в соответствующую емкость, откуда часть продукта идет на технологические нужды, а другая часть направляется в товарный парк.

Кубовый продукт деэтанатора поступает в испаритель с паровым пространством, где происходит частичное испарение деэтанированной ШФЛУ и таким образом продуцируется паровое орошение для колонны. Жидкая часть продукта, переливаясь через уровневую планку в испарителе, направляется в депропанатор, предварительно подогреваясь в теплообменнике.

Нижним продуктом пропановой колонны является депропанированная ШФЛУ, а верхним – пары пропана. Верхний продукт в газообразном состоянии поступает на охлаждение в аппараты воздушного охлаждения, а после последовательно – в конденсаторы-холодильники для конденсации. Далее уже жидкая пропановая фракция поступает в емкость технического пропана, откуда

часть идет в виде флегмы на орошение колонны, а часть направляется в товарный парк. Кубовый продукт частично испаряется и возвращается в колонну в виде парового орошения, а остальная часть – идет на дальнейшую переработку.

## 1.2 Теоретические основы теплообменных процессов [1, 2]

Испарители кожухотрубчатого типа применяют в ректификационных установках как парообразующее оборудование для обогрева нижней части колонны потоками пара кипящего компонента.

В горизонтальных испарителях горячий теплоноситель подают в трубное пространство, а испарение холодного теплоносителя происходит в межтрубном пространстве. В межтрубном пространстве поддерживается постоянный уровень кипящей жидкости над трубным пучком с помощью переливной перегородки, что в отдельных случаях позволяет производить отпаривание индивидуальных компонентов жидкой смеси при ее движении вдоль трубчатки и непрерывном отводе отпаренной жидкости.

В качестве горячего теплоносителя, подаваемого в трубное пространство, используют насыщенный водяной пар, нагретые нефтепродукты или горячие газы в зависимости от температурного режима.

В различных отраслях промышленности процессы передачи тепла от нагретых теплоносителей к холодным занимают ведущее место. Тепловые процессы используются в промышленности для охлаждения нагретых сред, для нагревания холодных теплоносителей, для проведения процессов испарения, конденсации, плавления, кристаллизации и т. п.

Процессы, связанные с передачей тепла от горячих теплоносителей к холодным, называются теплообменными. Аппараты и устройства, в которых протекают процессы теплообмена, называются теплообменниками.

В химической промышленности теплообменное оборудование по весу и стоимости составляет порядка 15–18 % от всего оборудования, а в нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности до 50 %.

					<i>ХИ. Т.00.00.00.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		8



Под теплообменным аппаратом понимают такой аппарат, в котором горячий теплоноситель отдает свое тепло холодному теплоносителю. Движущей силой процесса теплообмена является разность температур.

Горячим теплоносителем называется теплоноситель с более высокой температурой, а холодный теплоноситель – это теплоноситель с менее высокой температурой.

Теплоотдача при кипении жидкости относится к числу особенно сложных процессов. При кипении пар образуется в виде пузырьков в определенных местах (центрах) поверхности нагрева. При хорошей смачиваемости жидкостью поверхности нагрева, жидкость подтекает под пузырьки и облегчает их отрыв от поверхности нагрева. При плохой смачиваемости пузырьки пара имеют широкое основание и достигают при отрыве больших размеров; фактически отрывается только вершина пузырька, а у поверхности нагрева все время имеется паровая прослойка. При большом числе центров парообразования поверхность нагрева может покрываться сплошной паровой пленкой.

Таким образом, при кипении жидкостей, плохо смачивающих поверхность нагрева, коэффициенты теплоотдачи значительно меньше, чем при кипении жидкостей, хорошо смачивающих поверхности нагрева.

Кипение при наличии сплошной пленки пара на поверхности нагрева называют пленочным, в отличие от кипения с парообразованием лишь в отдельных центрах, которое называют пузырьковым.

Расчет теплообменного аппарата включает: определение необходимой поверхности теплопередачи, выбор типа аппарата и нормализованного варианта конструкции, удовлетворяющих заданным технологическим условиям оптимальным образом. Необходимую поверхность теплопередачи, по которой осуществляется выбор теплообменника, определяют из основного уравнения теплопередачи:

$$F = \frac{Q}{\Delta t_{cp} \cdot K}, \quad (1.1)$$

					<i>ХИ.Т.00.00.00.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		9

где  $\Delta t_{cp}$  – средняя разность температур, °С;

$K$  – коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$Q$  – тепловой поток в аппарате, Вт.

Коэффициент теплопередачи для плоской стенки или при большом радиусе ее кривизны ( $d_B/d_H > 0,5$ ) составит ([4]):

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{CT}}{\lambda_{CT}} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (1.2)$$

где  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – коэффициенты теплоотдачи теплоносителей, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$\delta_{CT}$  – толщина стенки теплопередающей поверхности, м;

$\lambda_{CT}$  – коэффициент теплопроводности материала стенки, Вт/(м·К).

Ориентировочные значения коэффициентов теплопередачи и коэффициентов теплоотдачи приведены в [1].

Средняя разность температур при прямотоке или противотоке теплоносителей равна:

$$\Delta t_{CP} = \frac{\Delta t_B - \Delta t_M}{\ln \frac{\Delta t_B}{\Delta t_M}}, \quad (1.3)$$

где  $\Delta t_B$  и  $\Delta t_M$  – разности температур (большая и меньшая) теплоносителей на концах теплообменника.

Средняя температура теплоносителя, по которой определяются его теплофизические свойства, находится двумя способами. Для теплоносителей, температуры которых изменяются от начальной  $t_1$  до конечной  $t_2$  и  $t_2/t_1 < 2$ , принимают среднеарифметическую температуру  $t_{CP} = (t_1 + t_2)/2$ .

### 1.3 Описание конструкции испарителя с паровым пространством и выбор основных конструкционных материалов

В проектируемом аппарате по трубному пространству движется водяной пар, а по межтрубному – углеводородное сырье.

Кубовый остаток этановой колонны представляет собой смесь, состоящую в основном из жидкого пропана, бутана и более тяжелых углеводородов.

Общий вид проектируемого аппарата (испаритель с паровым пространством типа П) представлен на рис. 1.2.

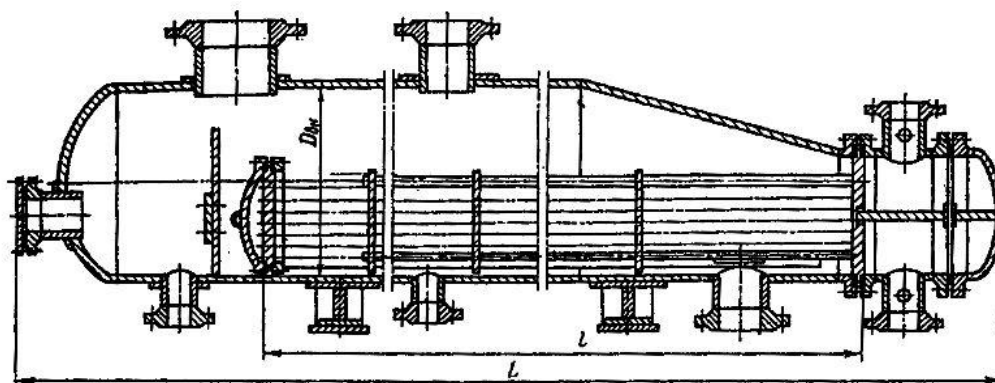


Рисунок 1.2 – Схема испарителя с паровым пространством типа П

При температуре  $90^{\circ}\text{C}$  под абсолютным давлением 0,45 МПа в межтрубное пространство испарителя подается холодный теплоноситель – углеводородное сырье. При этом в распределительную камеру аппарата поступает горячий теплоноситель – насыщенный водяной пар (при давлении 0,2 МПа). Посредством теплопередачи через разделяющую стенку теплообменных труб происходит активное испарение смеси.

**Основные свойства используемых веществ.** В проектируемом аппарате по межтрубному пространству движется кубовый остаток этановой колонны, а по трубам циркулирует перегретый водяной пар. Кубовый остаток представляет собой смесь, состоящую в основном из бутана и пентана.

**Углеводороды** – это простейшие органические соединения, состоящие из двух элементов: углерода и водорода. Предельными углеводородами, или алканами (международное название), называются соединения, состав которых

выражается общей формулой  $C_nH_{2n+2}$ ,  $n$  – число атомов углерода. В молекулах предельных углеводородов атомы углерода связаны между собой простой (одинарной) связью, а все остальные валентности насыщены атомами водорода.

**Бутан ( $C_4H_{10}$ )** – органическое соединение, углеводород класса алканов. В химии название используется в основном для обозначения н-бутана. Такое же название имеет смесь н-бутана и его изомера изобутана  $CH(CH_3)_3$ . Вдыхание бутана вызывает дисфункцию легочно-дыхательного аппарата. По степени воздействия на организм газ относится к веществам 4-го класса опасности (малоопасные) по ГОСТ 12.1.007-76. Вредно воздействует на нервную систему.

**Пентан ( $C_5H_{12}$ )** – насыщенный ациклический углеводород класса алканов. Имеет три структурных изомера: н-пентан, изопентан, неопентан. Следует отметить, что пентан имеет четвертый класс опасности. Молекулярная масса пентана составляет 72,15 г/моль.

**Водяной пар** – это газообразное состояние воды. Не имеет цвета, вкуса и запаха. Образуется молекулами воды при ее испарении. Водяной пар используют в качестве горячего теплоносителя в различных технологических процессах.

Материалы для изготовления химических аппаратов и машин нужно выбирать в соответствии со спецификой их эксплуатации, учитывая при этом возможное изменение исходных физико-химических свойств материалов под воздействием рабочей среды, температуры и протекающих химико-технологических процессов [6–8].

Выбор материала необходимо начинать с уточнения рабочих условий: температуры, давления, концентрации обрабатываемой среды, чтобы при низкой стоимости и не дефицитности материала обеспечить эффективную технологию изготовления элемента. Главным же требованием для материалов химических аппаратов в большинстве случаев является их коррозионная стойкость, так как она определяет долговечность химического оборудования.

В нашем случае, выбор конструкционного материала производим, исходя из низкой стоимости и не дефицитности материала, который может обеспечить эффективную технологию изготовления изделия.

					<i>ХИ. Т.00.00.00.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		12

Для изготовления корпуса, фланцев, распределительных камер, а также деталей, работающих под давлением рационально использовать сталь 09Г2С ГОСТ 19282-89 (заменители: сталь 09Г2, сталь 09Г2ДТ, сталь 09Г2Т, сталь 10Г2С).

Вид поставки (сортамент): фасонный прокат (квадрат г/катаный ГОСТ 2591-88, круг г/катаный ГОСТ 2590-2006), листовой прокат (лист толстый г/катаный ГОСТ 19903-90, лист тонкий х/катаный ГОСТ 19904-90, полоса ГОСТ 103-2006), профильный прокат (швеллер г/катаный ГОСТ 8240-97, балка двутавровая г/катаная ГОСТ 8239-89) [8].

Основные физико-механические свойства приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1 – Физико-механические свойства стали 09Г2С

Показатель	Значение
Модуль упругости E, МПа	200000
Модуль сдвига G, МПа	77000
Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	7850
Предел прочности $\sigma_B$ , МПа	не менее 360
Предел текучести $\sigma_T$ , МПа	не менее 180
Относительное сужение $\psi$ , %	56
Относительное удлинение $\delta$ , %	25
Твердость по Бринеллю, НВ	115
Свариваемость	без ограничений

Для изготовления теплообменных труб, штуцеров, крепежных деталей (болты, шпильки, гайки), панелей, оснований, платы, кронштейнов, угольников, ребер жесткости используем сталь 20 ГОСТ 1050-88 (заменители: сталь 15, сталь 25) [8].

Вид поставки (сортамент): фасонный прокат (шестигранник калиброванный ГОСТ 8560-88, квадрат г/катаный ГОСТ 2591-2006, круг г/катаный ГОСТ 2590-2006, круг калиброванный, х/катаный ГОСТ 7417-75), листовой прокат (лист толстый г/катаный ГОСТ 19903-90, лист тонкий х/катаный ГОСТ 19904-90 [8]).

Основные физико-механические свойства приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2 – Физико-механические свойства стали 20

Показатель	Значение
Модуль упругости E, МПа	200000
Модуль сдвига G, МПа	74000
Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	7850
Предел прочности $\sigma_B$ , МПа	не менее 420
Предел текучести $\sigma_T$ , МПа	не менее 250
Относительное сужение $\psi$ , %	40
Относительное удлинение $\delta$ , %	16
Твердость по Бринеллю, НВ	156
Свариваемость	без ограничений (кроме химико-термически обработанных деталей)

Для изготовления неметаллических прокладочных материалов для уплотнения разъемов фланцевых соединений аппарата используем паронит ПОН (ПОН-1) ГОСТ 481-80. Это листовой прокладочный материал, изготавливаемый прессованием асбокаучуковой массы, состоящей из асбеста, каучука и порошковых ингредиентов. Применяется для уплотнения соединений, работающих в средах: воды и пара с давлением 5 МН/м<sup>2</sup> и температурой +450°С; нефти и нефтяных продуктов при температурах 200–400°С и давлениях 7–4 МН/м<sup>2</sup> соответственно. Для повышения механических свойств паронита в некоторых случаях армируют металлической сеткой (называемой ферронит).

## 2 Технологические расчеты процесса и аппарата

### 2.1 Технологические расчеты

Средняя молекулярная масса потока:

$$M = M_{n-C_4H_{10}} \cdot x_{n-C_4H_{10}} + M_{C_5H_{12+}} \cdot x_{C_5H_{12+}}, \text{ кг/кмоль} \quad (2.1)$$

где  $M_{n-C_4H_{10}}$ ,  $M_{C_5H_{12+}}$  – соответственно молярные массы бутана и пентана;

$$M = 58 \cdot 0,02 + 72 \cdot 0,98 = 71,72 \text{ кг/кмоль.}$$

Энтальпия потока:

$$q = q_{385}^{ж} \cdot M, \text{ кДж/кмоль} \quad (2.2)$$

где  $q_{385}^{ж}$  – энтальпия нефтяных жидкостей, кДж/кг [4].

$$q = 483 \cdot 71,72 = 34641 \text{ кДж/кмоль}$$

Часовой расход тепла в испарителе:

$$Q_p = \frac{q \cdot G}{M}, \text{ кВт} \quad (2.3)$$

$$Q_p = \frac{34641 \cdot 7420}{71,72} = 3,6 \cdot 10^6 \frac{\text{кДж}}{\text{ч}} = 996 \text{ кВт.}$$

Параметры греющего водяного пара при его давлении  $p = 0,2$  МПа:  
температура  $t_{2H} = 120^\circ\text{C}$ , удельная теплота конденсации  $r = 2208$  кДж/кг [5].

					<i>ХИ.Т.00.00.00.ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		15

На основе данных промышленной эксплуатации и с целью обеспечения достаточного температурного напора при передаче от водяного пара к флегме примем: конечная температура водяного пара  $t_{2к} = 109^{\circ}\text{C}$ ; конечная температура углеводородных паров  $t_{1к} = 111^{\circ}\text{C}$  [5].

Расход пара:

$$Z = \frac{Q_p}{r \cdot \eta_T}, \text{ кг/ч} \quad (2.4)$$

где  $\eta_T$  — коэффициент удержания тепла, в среднем  $\eta_T = 0,95$ .

$$Z = \frac{996 \cdot 10^3 \cdot 3600}{2208 \cdot 10^3 \cdot 0,95} = 1709 \text{ кг/ч.}$$

Определение температурных напоров.

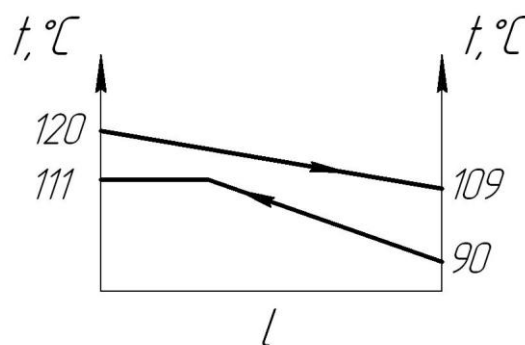


Рисунок 2.1 – Температурная схема процесса испарения

Средняя разность температур:

$$\Delta t_{CP} = \frac{\Delta t_B - \Delta t_M}{\ln \left( \frac{\Delta t_B}{\Delta t_M} \right)}, \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (2.5)$$

- большая разность температур равна  $\Delta t_B = 109 - 90 = 19^{\circ}\text{C}$ ;

					<i>ХИ. Т.00.00.00.ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		16



- меньшая разность температур равна  $\Delta t_M = 120 - 111 = 9^\circ\text{C}$ .

$$\Delta t_{CP} = \frac{19 - 9}{\ln\left(\frac{19}{9}\right)} = 13,4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Коэффициент теплоотдачи со стороны углеводородного сырья [5]:

$$\alpha_2 = 7,77 \cdot 10^{-2} \cdot \left(\frac{\rho_{II} \cdot r}{\rho_{Ж} - \rho_{II}}\right)^{0,033} \cdot \left(\frac{\rho_{Ж}}{\sigma}\right)^{0,33} \cdot \frac{\lambda_{Ж}^{0,75}}{\mu_{Ж}^{0,45} \cdot c_{РЖ}^{0,12} \cdot T_S^{0,37}} \cdot q^{0,7}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \quad (2.6)$$

где  $\rho_{II}$ ,  $\rho_{Ж}$  — соответственно плотности паровой и жидкой фаз,  $\text{кг/м}^3$ ;

$r$  — теплота парообразования,  $r = q = 483 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}$ ;

$\sigma$  — поверхностное натяжение на границе раздела между жидкостью и паром,  $\text{Н/м}$ ;

$\lambda_{Ж}$  — теплопроводность жидкости,  $\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ;

$\mu_{Ж}$  — коэффициент динамической вязкости жидкости,  $\text{Па}\cdot\text{с}$ ;

$c_{РЖ}$  — теплоемкость жидкости,  $c_{РЖ} = 1600 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$  [8];

$T_S$  — температура кипения флегмы,  $\text{К}$ ;

$q$  — теплонапряжение поверхности нагрева,  $\text{Вт/м}^2$ .

Все физические параметры определяются при конечной температуре углеводородного сырья  $T_S = 384 \text{ К}$ .

Плотность паровой фазы определим по уравнению Менделеева-Клайперона:

$$\rho_{II} = \rho_0 \cdot \frac{T_0}{T_S} \cdot \frac{P}{P_0}, \text{ кг/м}^3 \quad (2.7)$$

где  $\rho_0$  — плотность пара при нормальных условиях,  $\text{кг/м}^3$ .

$$\rho_0 = \frac{M}{22,4} = \frac{71,72}{22,4} = 3,2 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3};$$

$$\rho_{II} = 3,2 \cdot \frac{273}{384} \cdot \frac{0,45 \cdot 10^6}{98,1 \cdot 10^3} = 10,4 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Поверхностное натяжение на границе пар-жидкость [5]:

$$\sigma = \frac{21,2 \cdot 10^{-6}}{\left(\frac{M}{\rho_{ж}}\right)^{\frac{2}{3}}} \cdot (T_{кр} - T_s - \delta), \frac{H}{M} \quad (2.8)$$

где  $M$  — молярная масса остатка,  $M = 72$  кг/кмоль;

$\rho_{ж}$  — плотность остатка при конечной температуре  $T = T_s = 384$  К,

$\rho_{ж} = 530$  кг/м<sup>3</sup>.

$T_{кр}$  — псевдокритическая температура остатка, К;

$\delta$  — постоянная,  $\delta = 7$  К [5].

$$T_{кр} = T_{кр, n-C_4H_{10}} \cdot x_{n-C_4H_{10}} + T_{кр, C_5H_{12+}} \cdot x_{C_5H_{12+}}, \text{ К} \quad (2.9)$$

где  $T_{кр, n-C_4H_{10}} = 426$  К;  $T_{кр, C_5H_{12+}} = 470,2$  К — критические температуры компонентов [4].

$$T_{кр} = 426 \cdot 0,02 + 470,2 \cdot 0,98 = 469 \text{ К};$$

$$\sigma = \frac{21,2 \cdot 10^{-6}}{\left(\frac{71,72}{530}\right)^{\frac{2}{3}}} \cdot (469 - 384 - 7) = 6,27 \cdot 10^{-3} \frac{H}{M}.$$

Коэффициент динамической вязкости жидкости для смеси неассоциированных жидкостей [5]:

$$\lg \mu_s = \lg \mu_{n-C_4H_{10}} \cdot x_{n-C_4H_{10}} + \lg \mu_{C_5H_{12+}} \cdot x_{C_5H_{12+}} \quad (2.10)$$

					<i>ХИ. Т. 00.00.00.ПЗ</i>	Лист
						18
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

где  $\mu_{C_4H_{10}} = 0,22 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$ ;  $\mu_{C_5H_{12}} = 0,13 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$  — коэффициенты динамической вязкости компонентов жидкости.

$$\lg \mu_s = \lg 0,22 \cdot 10^{-3} \cdot 0,02 + \lg 0,13 \cdot 10^{-3} \cdot 0,98,$$

$$\mu_s = 0,09 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с};$$

$$\alpha_2 = 7,77 \cdot 10^{-2} \cdot \left( \frac{10,4 \cdot 483 \cdot 10^3}{530 - 10,4} \right)^{0,033} \cdot \left( \frac{530}{6,27 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,33} \cdot \frac{(0,95 \cdot 10^{-2})^{0,75}}{(0,09 \cdot 10^{-3})^{0,45} \cdot 1600^{0,12} \cdot 384^{0,37}} \cdot q^{0,7};$$

$$\alpha_2 = 0,325 \cdot q^{0,7}.$$

Коэффициент теплоотдачи со стороны конденсирующегося водяного пара:

$$\alpha_1 = 1,36 \cdot A \cdot q^{0,5} \cdot l^{0,35} \cdot d_B^{-0,25}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \quad (2.11)$$

где  $A$  — коэффициент, зависящий от средней температуры конденсата,  $A = 8$ ;

$l$  — длина трубы,  $l = 6$  м;

$d_B$  — внутренний диаметр трубы,  $d_B = 0,025 - 2 \cdot 2 = 0,021$  м.

$$\alpha_1 = 1,36 \cdot 8 \cdot q^{0,5} \cdot 6^{0,35} \cdot 0,021^{-0,25};$$

$$\alpha_1 = 53,509 \cdot q^{0,5}.$$

Коэффициент теплопередачи с учетом тепловых сопротивлений стенки и загрязнений ее обеих поверхностей:

					<i>ХИ.Т.00.00.00.ПЗ</i>	Лист
						19
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{CT}}{\lambda_{CT}} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_2}}, \frac{Bm}{m^2 \cdot K} \quad (2.12)$$

где  $\delta_{CT}$  — толщина стенки трубы,  $\delta_{CT} = 0,002$  м;

$\lambda_{CT}$  — коэффициент теплопроводности материала стенки трубы,  
 $\lambda_{CT} = 33,53$  Вт/(м·К);

$\delta_1 / \lambda_1$  — тепловое сопротивление загрязнения внутренней поверхности  
 трубы,  $\delta_1 / \lambda_1 = 0,000215(m^2 \cdot K) / Bm$  [5];

$\delta_2 / \lambda_2$  — тепловое сопротивление загрязнения наружной поверхности тру-  
 бы,  $\delta_2 / \lambda_2 = 0,0006(m^2 \cdot K) / Bm$  [5].

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{0,002}{33,53} + 0,000215 + 0,0006 + \frac{1}{\alpha_2}};$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + 0,000875 + \frac{1}{\alpha_2}}.$$

Теплонапряжение  $q = 31100$  Вт/м<sup>2</sup> [4].

$$\alpha_1 = 53,509 \cdot 31100^{0.5} = 9436 \frac{Bm}{m^2 \cdot K};$$

$$\alpha_2 = 0,325 \cdot 31100^{0.7} = 454 \frac{Bm}{m^2 \cdot K};$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{9436} + 0,000875 + \frac{1}{454}} = 314 \frac{Bm}{m^2 \cdot K}.$$

Рассчитанный коэффициент теплопередачи попадает в требуемый диапазон [4, 5], следовательно, расчет произведен правильно.

## 2.2 Конструктивные расчеты [4, 5]

Расчетная поверхность теплообмена:

$$F_P = \frac{Q_P}{q}, \text{ м}^2 \quad (2.13)$$

$$F_P = \frac{996000}{31100} = 32 \text{ м}^2$$

Выбираем стандартный испаритель с паровым пространством типа П [5].

Конструктивные данные по аппарату:

- внутренний диаметр кожуха D, мм	800
- сортамент труб	25 × 2
- длина труб, м	6
- число ходов по трубам	1
- число труб общее	82
- число труб в одном ходу	82
- поверхность теплообмена, м <sup>2</sup>	38

Коэффициент запаса теплообменной поверхности аппарата:

$$\beta = \frac{F - F_{MAX}}{F} \cdot 100\% , \quad (2.14)$$

$$\beta = \frac{38 - 32}{38} \cdot 100\% = 16\% .$$

Диаметры штуцеров d испарителя для подвода-отвода теплоносителей определяем по формуле [9]:

					<i>ХИ.Т.00.00.00.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		21

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot V}{\pi \cdot w}} = \sqrt{\frac{4 \cdot G}{\pi \cdot \rho \cdot w}}, \quad (2.15)$$

где V и G – объемный и массовый расходы жидкости/пара соответственно, м<sup>3</sup>/с и кг/с;

$\rho$  – плотность потока среды, кг/м<sup>3</sup>;

w – скорость истечения среды, м/с.

Рекомендуемые скорости движения теплоносителей [9]:

- для жидкости 0,1–0,5 м/с при самотеке и 0,5–2,5 м/с в напорных трубопроводах;

- для пара и газа 5–30 м/с.

Диаметр патрубка для входа углеводородного сырья в аппарат:

$$d_{XBH} = \sqrt{\frac{4 \cdot 7420 / 3600}{3,14 \cdot 530 \cdot 0,25}} = 0,141 \text{ м}$$

Диаметр патрубка для выхода паров пропан-пентана:

$$d_{XBYX} = \sqrt{\frac{4 \cdot 7420 / 3600}{3,14 \cdot 10,4 \cdot 5}} = 0,225 \text{ м}$$

Диаметр патрубка для входа водяного пара:

$$d_{ГBH} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1709 / 3600}{3,14 \cdot 1,107 \cdot 30}} = 0,135 \text{ м}$$

Диаметр патрубка для выхода водяного пара:

$$d_{ГBYX} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1709 / 3600}{3,14 \cdot 1,107 \cdot 30}} = 0,135 \text{ м}$$

					<i>ХИ. Т.00.00.00.ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		22

По полученным значениям принимаем стандартные патрубки:

- для входа углеводородного сырья  $D_y=150$  мм;
- для выхода паров пропан-пентана  $D_y=250$  мм;
- для входа водяного пара  $D_y=150$  мм;
- для выхода водяного пара  $D_y=150$  мм.

### 2.3 Гидравлические расчеты

Расчет гидравлического сопротивления испарителя определяет количество энергии, затраченной на движение теплоносителей через аппарат. Гидравлическое сопротивление по межтрубному пространству не определяем, так как его значение мало вследствие небольших скоростей [10].

Расчет производим согласно методике, представленной в [10].

Полный напор  $\Delta P$ , необходимый для движения жидкости или газа через теплообменник, определяем по следующей формуле:

$$\Delta P = \Sigma \Delta P_{TP} + \Sigma \Delta P_M + \Sigma \Delta P_y + \Sigma \Delta P_\Gamma, \quad (2.16)$$

где  $\Sigma \Delta P_{TP}$  – сумма гидравлических потерь на трение, Па;

$\Sigma \Delta P_M$  – сумма потерь напора в местных сопротивлениях, Па;

$\Sigma \Delta P_y$  – сумма потерь напора, обусловленных ускорением потока, Па;

$\Sigma \Delta P_\Gamma$  – перепад давления для преодоления столба жидкости, Па.

Гидравлические потери на трение в каналах при продольном омывании пучка труб теплообменного аппарата определяем по формуле:

$$\Delta P_{TP} = \lambda_{TP} \cdot \frac{L}{d_\Sigma} \cdot \frac{w_\Sigma^2 \cdot \rho_\Sigma}{2}, \quad (2.17)$$

где  $\lambda_{TP}$  – коэффициент сопротивления трения.

					<i>ХИ.Т.00.00.00.ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		23

$$\lambda_{TP} = 0,11 \cdot \left( \frac{\Delta}{d_3} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}, \quad (2.18)$$

где  $\Delta$  – абсолютная шероховатость поверхности труб (для стальных новых труб  $\Delta = 0,06-0,1$  мм, для стальных труб, бывших в эксплуатации, с незначительной коррозией  $\Delta = 0,1-0,2$  мм), мм.

$$Re = \frac{w \cdot d \cdot \rho}{\mu},$$

$$Re = \frac{0,5 \cdot 0,021 \cdot 1,107}{0,09 \cdot 10^{-3}} = 129;$$

$$\lambda_{TP} = 0,11 \cdot \left( \frac{0,1}{0,021} + \frac{68}{129} \right)^{0,25} = 0,17;$$

$$\Delta P_{TP} = 0,17 \cdot \frac{6}{0,021} \cdot \frac{0,5^2 \cdot 530}{2} = 3218 \text{ Па}.$$

Гидравлические потери давления в местных сопротивлениях определяем по формуле:

$$\Delta P_M = \xi \cdot \frac{w_z^2 \cdot \rho_z}{2}, \quad (2.19)$$

где  $\xi$  – коэффициент местного сопротивления, его находят как сумму сопротивлений каждого элемента испарителя:  $\xi = 2 \cdot \xi_1 + \xi_2 + \xi_3 + \xi_4$  (входная и выходная камеры  $\xi_1 = 1,5$ , вход в трубы  $\xi_2 = 0,5$  и выход из них  $\xi_3 = 1$ , поворот на  $180^\circ$  между ходами  $\xi_4 = 1,4$  [10]).

$$\xi = 2 \cdot 1,5 + 0,5 + 1 + 1,4 = 5,9;$$

					<i>ХИ.Т.00.00.00.ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		24



$$\Delta P_{TP} = 5,9 \cdot \frac{0,5^2 \cdot 530}{2} = 391 \text{ Па}.$$

Так как для капельных жидкостей потери давления  $\Delta P_y$  ничтожно малы, то они в расчет не принимаются ( $\Delta P_y = 0$ ). Перепад давления для преодоления гидростатического столба жидкости равен нулю ( $\Delta P_{\Gamma} = 0$ ), так как испаритель не сообщается с окружающей средой.

Полный напор, необходимый для движения воды через аппарат составит:

$$\Delta P = 3218 + 391 = 3609 \text{ Па}.$$

## 2.4 Выбор вспомогательного оборудования

**Расчет и выбор насоса для подачи исходного сырья (ШФЛУ) в деэтаннатор [11].**

Для всасывающего и нагнетательного трубопроводов примем одинаковую скорость течения жидкости, равную  $w = 2 \text{ м/с}$ .

Диаметр трубопровода определяем по уравнению:

$$d = \sqrt{\frac{V}{0,785 \cdot w}}, \quad (2.20)$$

где  $V$  – объемный расход жидкости, перекачиваемой насосом,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

$$V = \frac{G}{3600 \cdot \rho_{ж}}, \quad (2.21)$$

где  $G$  – массовый расход жидкости, перекачиваемой насосом,  $\text{кг/ч}$ .

$$V = \frac{2000}{3600 \cdot 400} = 1,39 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{с}}.$$

					<i>ХИ.Т.00.00.00.ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		25

$$d = \sqrt{\frac{1,39 \cdot 10^{-3}}{0,785 \cdot 2}} = 0,029 \text{ м.}$$

Принимаем стандартный диаметр трубопровода 32 мм.

Определяем критерий Рейнольдса для жидкости в трубопроводе:

$$\text{Re} = \frac{w \cdot d \cdot \rho_{ж}}{\mu}; \quad (2.22)$$

$$\text{Re} = \frac{2 \cdot 0,032 \cdot 400}{1,27 \cdot 10^{-4}} = 201575,$$

т. е. режим турбулентный. Абсолютную шероховатость трубопровода принимаем  $\Delta = 2 \cdot 10^{-4}$  м. Тогда:

$$e = \frac{\Delta}{d} = \frac{2 \cdot 10^{-4}}{0,032} = 0,00625.$$

Далее получим:

$$\frac{1}{e} = 160; \quad 560 \cdot \frac{1}{e} = 89600; \quad 10 \cdot \frac{1}{e} = 1600;$$

$$\text{Re} > 560 \cdot \frac{1}{e}.$$

Для зоны, автомодельной по отношению к Re:

$$\lambda = 0,11 \cdot e^{0,25}; \quad (2.23)$$

$$\lambda = 0,11 \cdot 0,00625^{0,25} = 0,031.$$

					<i>ХИ.Т.00.00.00.ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		26

Определяем сумму коэффициентов местных сопротивлений отдельно для всасывающей и нагнетательной линий.

Для всасывающей линии:

- 1) вход в трубу (принимаем с острыми краями)  $\xi_1 = 0,5$ ;
- 2) 2 колена с углом  $90^\circ$   $\xi_2 = 2 \cdot 1,1 = 2,2$ .

$$\Sigma \xi = \xi_1 + \xi_2;$$

$$\Sigma \xi = 0,5 + 2,2 = 2,7.$$

Для нагнетательной линии:

- 1) вентиль прямооточный  $\xi_1 = 0,65$ ;
- 2) 3 колена с углом  $90^\circ$   $\xi_2 = 3 \cdot 1,1 = 3,3$ ;
- 3) выход из трубы  $\xi_3 = 1$ .

$$\Sigma \xi = \xi_1 + \xi_2 + \xi_3;$$

$$\Sigma \xi = 0,65 + 3,3 + 1 = 4,95.$$

Потерянный напор во всасывающей линии находим по формуле:

$$h_{П.вс.} = \left( \lambda \cdot \frac{l}{d_э} + \Sigma \xi \right) \cdot \frac{w^2}{2 \cdot g}, \quad (2.24)$$

где  $l, d_э$  – соответственно длина и эквивалентный диаметр трубопровода.

$$h_{П.вс.} = \left( 0,031 \cdot \frac{4}{0,032} + 2,7 \right) \cdot \frac{2^2}{2 \cdot 9,81} = 1,34 \text{ м.}$$

					<i>ХИ.Т.00.00.00.ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		27

Потерянный напор в нагнетательной линии находим по формуле (2.24):

$$h_{\Pi.НАГ.} = \left( 0,031 \cdot \frac{7}{0,032} + 4,95 \right) \cdot \frac{2^2}{2 \cdot 9,81} = 2,39 \text{ м.}$$

Общие потери напора:

$$h_{\Pi} = h_{\Pi.ВС.} + h_{\Pi.НАГ.}; \quad (2.25)$$

$$h_{\Pi} = 1,34 + 2,39 = 3,73 \text{ м.}$$

Находим напор насоса по уравнению:

$$H = \frac{P_2 - P_1}{\rho_{жс} \cdot g} + H_{\Gamma} + h_{\Pi}, \quad (2.26)$$

где  $(P_2 - P_1)$  – разность давлений в аппарате и в емкости, из которой подается жидкость. В нашем случае эта разность равна 0;

$H_{\Gamma}$  – геометрическая высота подъема жидкости.

$$H = 5,5 + 3,73 = 9,23 \text{ м.}$$

Полезную мощность насоса определяем по уравнению:

$$N_{\Pi} = \rho_{жс} \cdot g \cdot Q \cdot H, \quad (2.27)$$

где  $Q$  – расход жидкости;

$H$  – напор насоса.

$$N_{\Pi} = 400 \cdot 9,81 \cdot 1,39 \cdot 10^{-3} \cdot 9,23 = 50,3 \text{ Вт.}$$

					<i>ХИ.Т.00.00.00.ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		28

Мощность, которую должен развивать электродвигатель насоса на выходном валу при установившемся режиме работы:

$$N = \frac{N_{II}}{\eta_{пер} \cdot \eta_n}, \quad (2.28)$$

где  $\eta_n, \eta_{пер}$  – коэффициенты полезного действия соответственно насоса и передачи от электродвигателя к насосу. Принимая  $\eta_n = 0,6$  и  $\eta_{пер} = 1$ , получим:

$$N = \frac{50,3}{1 \cdot 0,6} = 83,9 \text{ Вт}.$$

По [11] выбираем центробежный насос марки X8/18 с такими параметрами: объемная подача насоса  $2,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ ; напор насоса 11,3 м; мощность, потребляемая электродвигателем насоса 3 кВт; частота вращения 48,3 об/с.

#### **Расчет и выбор рефлюксной емкости для жидкого дистиллята [9].**

Емкость для хранения дистиллята рассчитывают исходя из 6–8 часового резерва рабочего времени и с учетом коэффициента заполнения  $\psi = 0,8 \dots 0,85$ .

Принимаем  $\psi = 0,825$ .

Расчетный объем емкости:

$$V_{EP} = \frac{G \cdot \tau}{\psi \cdot \rho}, \quad (2.29)$$

где  $G$  – общий расход дистиллята;

$\tau$  – резерв рабочего времени,  $\tau = 7 \text{ часов}$ ;

$\rho$  – плотность жидкого дистиллята.

$$V_{EP} = \frac{270,6 \cdot 7}{0,825 \cdot 400} = 5,74 \text{ м}^3.$$

Выбираем емкость вертикального положения для продуктов нефти, химикатов и водных растворов. Вместимость таких емкостей может быть от 5 до 10000 м<sup>3</sup>.

Задаемся стандартизованным диаметром емкости  $D = 1,8 \text{ м}$ , тогда ее высота будет равна:

$$H = \frac{V_{EP}}{0,785 \cdot D^2}; \quad (2.30)$$

$$H = \frac{5,74}{0,785 \cdot 1,8^2} = 2,25 \text{ м}.$$

					<i>ХИ. Т.00.00.00.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		30

### 3 Расчеты аппарата на прочность и герметичность

**Расчет толщины стенки цилиндрической обечайки.** Расчет производим, согласно методики, изложенной в [12]. Рабочее давление в межтрубном пространстве составляет 0,45 МПа.

Находим величину нормативного допускаемого напряжения для стали 09Г2С при расчетной температуре:  $\sigma^* = 159$  МПа.

Допускаемое напряжение:

$$[\sigma] = \sigma^* \cdot \eta, \quad (3.1)$$

где  $\eta = 1$  – поправочный коэффициент для листового проката.

$$[\sigma] = 159 \cdot 1 = 159 \text{ МПа}.$$

Допускаемое напряжение при гидравлических испытаниях:

$$[\sigma]_{II} = \frac{\sigma_T^{20}}{1,1}, \quad (3.2)$$

где  $\sigma_T^{20} = 280$  МПа – предел текучести стали 09Г2С при температуре 20°C.

$$[\sigma]_{II} = \frac{280}{1,1} = 254,5 \text{ МПа}.$$

Далее определяем расчетное давление:

$$P_P = P + P_G, \quad (3.3)$$

где  $P$  – рабочее давление;

$P_G$  – гидростатическое давление среды.

					<i>ХИ.Т.00.00.00.ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		31

Если,  $\frac{P_{\Gamma}}{P} \cdot 100 < 5\%$ , то  $P_p = P$

Гидростатическое давление среды:

$$P_{\Gamma} = g \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot H_p, \quad (3.4)$$

где  $\rho_{\text{ж}}$  – плотность среды в аппарате, кг/м<sup>3</sup>;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$H_p$  – высота столба жидкости, м;

$$H_p = D = 0,8 \text{ м}$$

$$p_{\Gamma} = 9,81 \cdot 1000 \cdot 0,8 \cdot 10^{-6} = 0,008 \text{ МПа};$$

$$\frac{P_{\Gamma}}{P} \cdot 100 = \frac{0,08}{0,45} \cdot 100\% = 2\% < 5\% ;$$

$$P_p = 0,45 \text{ МПа}.$$

Так как расчетное давление меньше 0,5 МПа, то пробное давление при гидравлических испытаниях определяем по уравнению:

$$P_{\text{И}} = \max \left\{ \frac{1,5 \cdot P_p \cdot [\sigma]_{20}}{[\sigma]}, 0,2 \right\}, \quad (3.5)$$

где  $[\sigma]_{20} = \sigma^* = 170 \text{ МПа}$  – допускаемое напряжение стали 09Г2С при температуре 20°C ( $\eta = 1$ ).

$$P_{\text{И}} = \max \left\{ \frac{1,5 \cdot 0,45 \cdot 170}{159} = 0,72, 0,2 \right\} = 0,72 \text{ МПа}$$

					<i>ХИ.Т.00.00.00.ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		32



Расчетная толщина цилиндрической обечайки:

$$S_P^H = \max \left\{ \begin{array}{l} \frac{P_P \cdot D}{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma] - P_P} \\ \frac{P_H \cdot D}{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma]_H - P_H} \end{array} \right\}, \quad (3.6)$$

где  $\varphi = 1$  – коэффициент прочности сварных швов с двусторонним сплошным проваром, выполненных автоматической или полуавтоматической сваркой.

$$s_P^H = \max \left\{ \begin{array}{l} \frac{0,45 \cdot 800}{2 \cdot 1 \cdot 159 - 0,45} = 1,13 \\ \frac{0,72 \cdot 800}{2 \cdot 1 \cdot 254,5 - 0,72} = 1,1 \end{array} \right\} = 1,13 \text{ мм}$$

Исполнительная толщина цилиндрической обечайки:

$$S_{II} \geq S_P^H + c, \quad (3.7)$$

где  $c$  – прибавка к расчетным толщинам конструктивных элементов:

$$c = c_1 + c_2 + c_3, \quad (3.8)$$

$c_1$  – прибавка для компенсации коррозии и эрозии;

$c_2$  – прибавка для компенсации минусового допуска;

$c_3$  – технологическая прибавка.

Принимаем, что  $c_2 = c_3 = 0$ . Прибавку для компенсации коррозии и эрозии определяем по уравнению:

$$c_1 = \Pi \cdot \tau, \quad (3.9)$$

					<i>ХИ.Т.00.00.00.ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		33

где  $\Pi = 0,12 \frac{\text{мм}}{\text{год}}$  – проницаемость материала;

$\tau = 15 \text{ лет}$  – срок службы аппарата.

$$c = c_1 = 0,12 \cdot 15 = 1,8 \text{ мм}$$

$$s_{\text{ц}} = 1,13 + 1,8 = 2,93 \text{ мм}$$

Принимаем  $s_{\text{ц}} = 4 \text{ мм}$ .

### Расчет толщины стенки эллиптического днища.

Расчетная толщина эллиптического днища:

$$S_p^{\text{э}} = \max \left\{ \begin{array}{l} \frac{P_p \cdot D}{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma] - 0,5 \cdot P_p} \\ \frac{P_H \cdot D}{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma]_H - 0,5 \cdot P_H} \end{array} \right\}, \quad (3.10)$$

$$s_p^{\text{э}} = \max \left\{ \begin{array}{l} \frac{0,45 \cdot 800}{2 \cdot 1 \cdot 159 - 0,5 \cdot 0,45} = 1,13 \\ \frac{0,72 \cdot 800}{2 \cdot 1 \cdot 254,5 - 0,5 \cdot 0,72} = 1,13 \end{array} \right\} = 1,13 \text{ мм}$$

Исполнительная толщина эллиптического днища:

$$S_{\text{э}} \geq S_p^{\text{э}} + c, \quad (3.11)$$

$$s_{\text{э}} = 1,13 + 1,8 = 2,93 \text{ мм}$$

Принимаем  $S_{\text{э}} = 4 \text{ мм}$ .

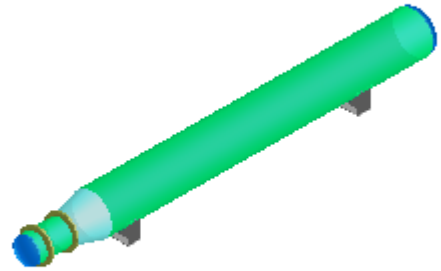
Все остальные прочностные расчеты выполнены с применением ЭВМ (программа Passat) и представлены ниже.

					<i>ХИ.Т.00.00.00.ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		34

## Общий вид аппарата



*Вид спереди*



*Изометрический вид*

Дата расчета	
Группа аппарата	I

Рабочая среда	углеводороды
К заполнения аппарата	1,00
Плотность жидкости/газа	10,4 кг/куб.м

Вид испытаний	Гидроиспытания
---------------	----------------

Давление испытаний	0,72 МПа
--------------------	----------

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

*XИ. Т.00.00.00.ПЗ*

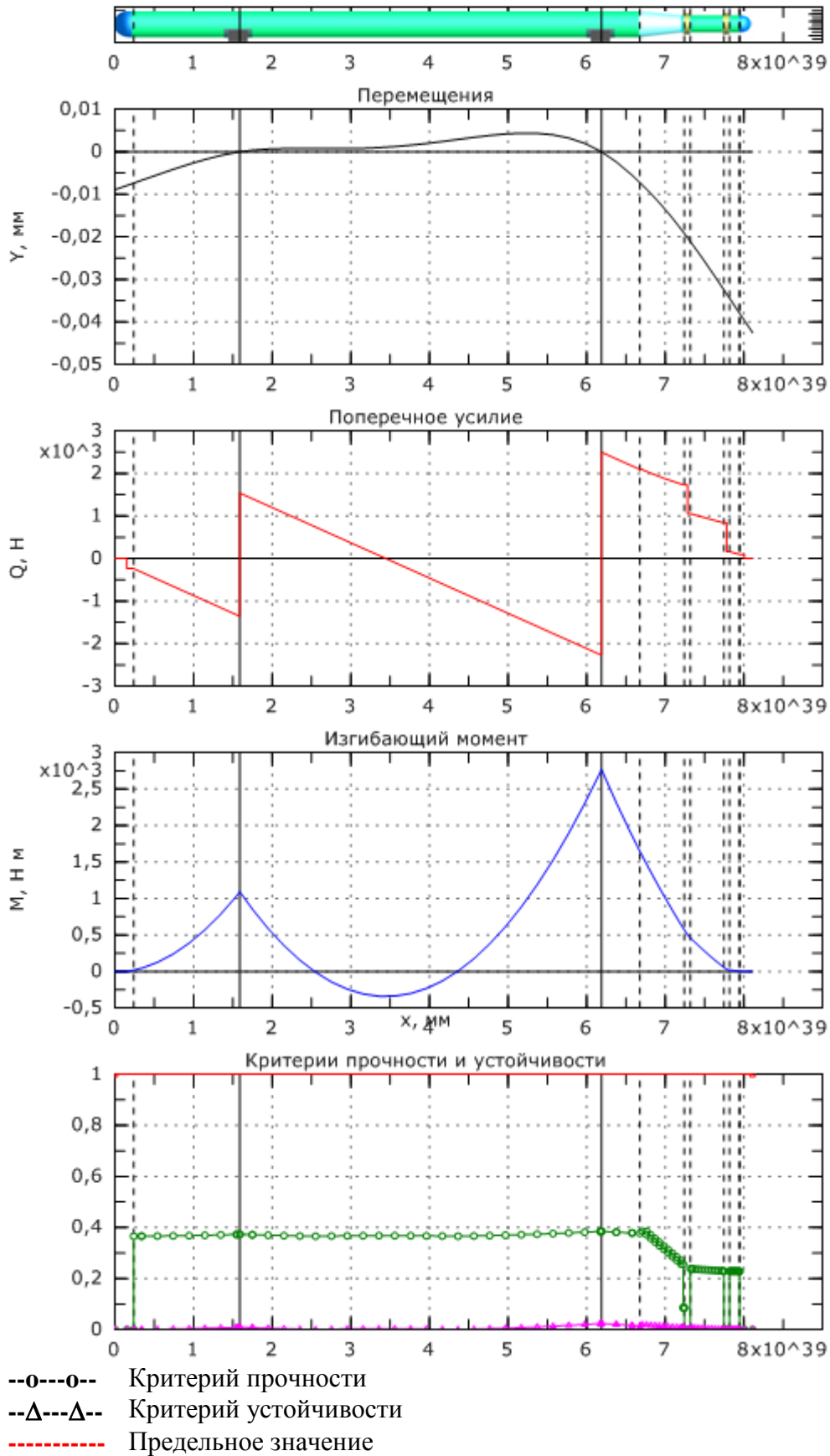
Лист

35

# Эпюры сил и моментов

## Расчёт в рабочих условиях

### Результаты расчёта:



Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

XI.T.00.00.00.ПЗ

Условие работоспособности выполнено

Вес элементов аппарата:

Номер элемента, i	Название элемента	Вес элемента*, G <sub>i</sub> , Н
1	Днище эллиптическое №1	236,367
2	Обечайка цилиндрическая №1	5,335425·10 <sup>3</sup>
5	Переход конический №1	379,3648
6	Фланцевое соединение №1	676,4207
7	Обечайка цилиндрическая №2	215,5788
8	Фланцевое соединение №2	676,4207
9	Обечайка цилиндрическая №3	65,94176
10	Днище эллиптическое №2	96,53121

\*Включая вес продукта при его наличии

Общий вес:

$$\sum G_i = 7,67 \cdot 10^3 \text{ Н}$$

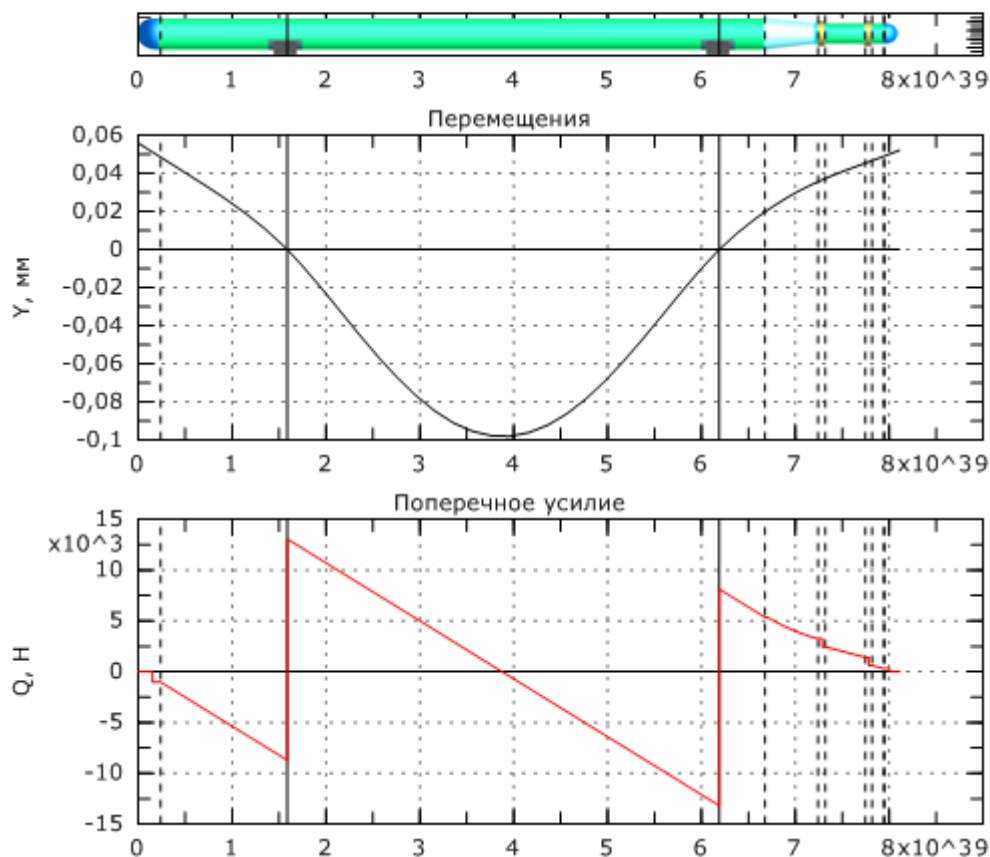
Дополнительные вертикальные нагрузки:

$$\sum F_{y_i} = 0 \text{ Н}$$

Опорные нагрузки:

№ опоры	Название опоры	Опорное усилие, F, Н	Поперечное усилие в сечении оболочки над опорой, Q, Н	Изгибающий момент в сечении оболочки над опорой, M, Н м
1	Опора седловая №1	2,895227·10 <sup>3</sup>	1,474389·10 <sup>3</sup>	1,092251·10 <sup>3</sup>
2	Опора седловая №2	4,769901·10 <sup>3</sup>	2,421363·10 <sup>3</sup>	2,771822·10 <sup>3</sup>

### Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)

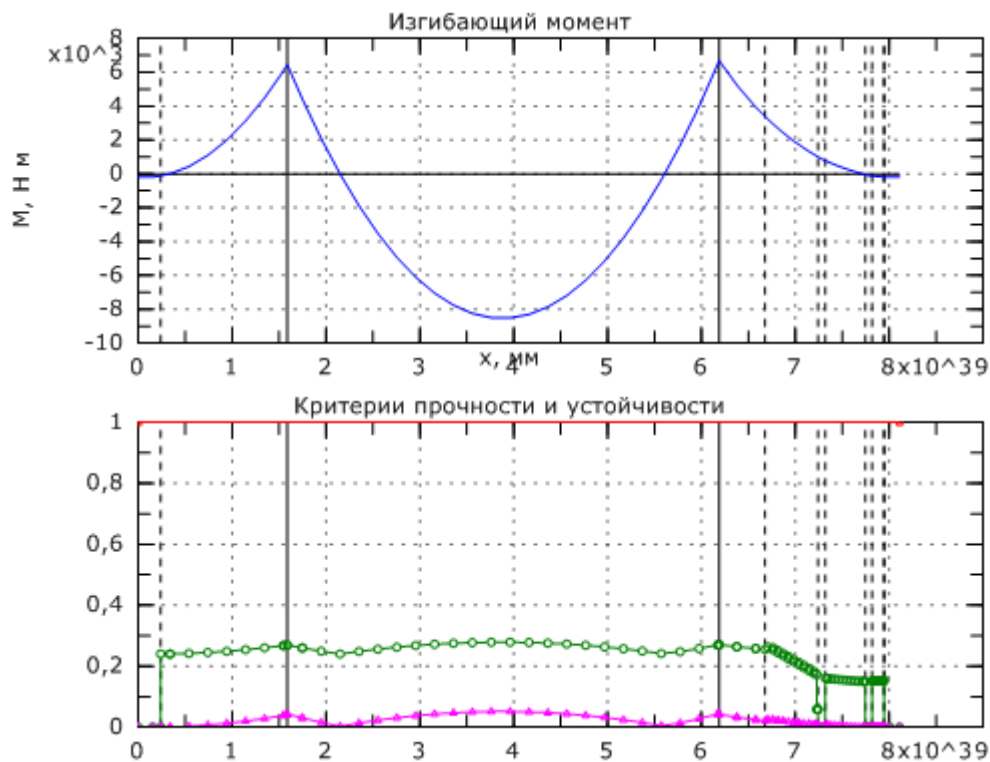


Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

ХИ.Т.00.00.00.ПЗ

Лист

37



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

Условие работоспособности выполнено

Вес элементов аппарата:

Номер элемента, i	Название элемента	Вес элемента *, $G_i$ , Н
1	Днище эллиптическое №1	$1,008208 \cdot 10^3$
2	Обечайка цилиндрическая №1	$3,672905 \cdot 10^4$
5	Переход конический №1	$2,180757 \cdot 10^3$
6	Фланцевое соединение №1	809,7156
7	Обечайка цилиндрическая №2	$1,02487 \cdot 10^3$
8	Фланцевое соединение №2	809,7156
9	Обечайка цилиндрическая №3	313,4895
10	Днище эллиптическое №2	302,821

\*Включая вес продукта при его наличии

Общий вес:

$$\sum G_i = 4,31 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Дополнительные вертикальные нагрузки:

$$\sum F_{y_i} = 0 \text{ Н}$$

Опорные нагрузки:

№ опоры	Название опоры	Опорное усилие, F, Н	Поперечное усилие в сечении оболочки над опорой, Q, Н	Изгибающий момент в сечении оболочки над опорой, M, Н м
1	Опора седловая №2	$2,132243 \cdot 10^4$	$1,313432 \cdot 10^4$	$6,69741 \cdot 10^3$
2	Опора седловая №1	$2,177091 \cdot 10^4$	$1,260881 \cdot 10^4$	$6,447202 \cdot 10^3$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

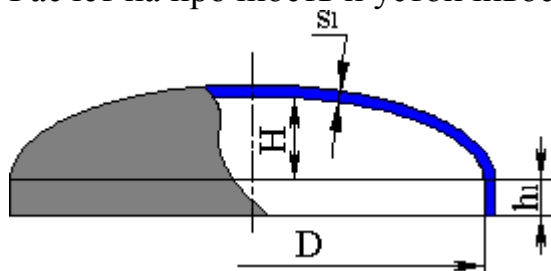
ХИ.Т.00.00.00.ПЗ

Лист

38

## Днище эллиптическое №1

Расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ 14249-89



### Исходные данные

Материал:	09Г2С
Внутр. диаметр, D:	800 мм
Толщина стенки днища, s <sub>1</sub> :	4 мм
Прибавка для компенсации коррозии и эрозии, c <sub>1</sub> :	1,8 мм
Прибавка для компенсации минусового допуса, c <sub>2</sub> :	0 мм
Прибавка технологическая, c <sub>3</sub> :	0 мм
Суммарная прибавка к толщине стенки, c:	1,8 мм
Высота днища, H:	200 мм
Длина отбортовки, h <sub>1</sub> :	25 мм

Радиус кривизны в вершине днища:

$$R = \frac{D^2}{4 \cdot H} = 800^2 / (4 \cdot 200) = 800 \text{ мм}$$

Коэффициент прочности сварного шва:

$$\varphi = 1$$

### Расчёт в рабочих условиях

#### Условия нагружения:

Расчётная температура, T:	90	°С
Расчётное внутреннее избыточное давление, p:	0,72	МПа

#### Результаты расчёта:

##### Допускаемые напряжения:

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре t = 90 °С (рабочие условия):  
 [σ] = 179 МПа

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С при температуре 90 °С:  
 E = 1,92 · 10<sup>5</sup> МПа

##### Днища, нагруженные внутренним избыточным давлением (п. 3.3.1.).

Расчётная толщина стенки с учётом прибавок:

$$s_{\text{р}} + c = \frac{p \cdot R}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi - 0,5 \cdot p} + c = (0,72 \cdot 800) / (2 \cdot 179 \cdot 1 - 0,5 \cdot 0,72) + 1,8 = 3,410558 \text{ мм}$$

Допускаемое давление:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi \cdot (s_1 - c)}{R + 0,5 \cdot (s_1 - c)} = 2 \cdot 179 \cdot 1 \cdot (4 - 1,8) / (800 + 0,5 \cdot (4 - 1,8)) = 0,9831482 \text{ МПа}$$

0,9831482 МПа ≥ 0,72 МПа

Заключение: **Условие прочности выполнено**

					ХИ. Т. 00.00.00.ПЗ	Лист 39
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

## Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)

### Условия нагружения при испытаниях:

Расчётная температура, T: 20 °C

Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 0,72 МПа

По ГОСТ 14249–89 расчёт на прочность при испытаниях не проводится, если выполнено условие:

$$P_{\text{исп}} < 1,35 \cdot P_{\text{расч}} \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]}$$
$$1,35 \cdot P_{\text{расч}} \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]} = 1,35 \cdot 0,72 \cdot 196 / 179 = 1,064313 \text{ МПа} \geq 0,72 \text{ МПа}$$

### Допускаемые напряжения:

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

$$[\sigma]^{20} = \eta \cdot R_{e/20} / n_T = 1 \cdot 300 / 1,1 = 272,7273 \text{ МПа}$$

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

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

### Днища, нагруженные внутренним избыточным давлением (п. 3.3.1.).

Радиус кривизны в вершине днища:

$$R = \frac{D^2}{4 \cdot H} = 800^2 / (4 \cdot 200) = 800 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки с учётом прибавок:

$$s_p + c = \frac{p \cdot R}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi - 0,5 \cdot p} + c = (0,72 \cdot 800) / (2 \cdot 272,7273 \cdot 1 - 0,5 \cdot 0,72) + 1,8 = 2,856697 \text{ мм}$$

Допускаемое давление:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi \cdot (s_1 - c)}{R + 0,5 \cdot (s_1 - c)} = 2 \cdot 272,7273 \cdot 1 \cdot (4 - 1,8) / (800 + 0,5 \cdot (4 - 1,8)) = 1,49794 \text{ МПа}$$

1,49794 МПа ≥ 0,72 МПа

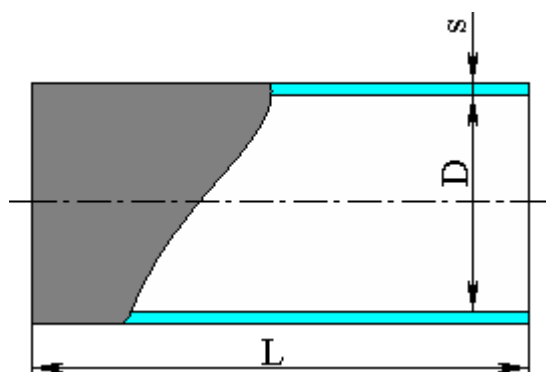
Заключение: **Условие прочности выполнено**

										Лист
										40
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

ХИ.Т.00.00.00.ПЗ



## Обечайка цилиндрическая №1



### Исходные данные

Материал:	09Г2С
Внутр. диаметр, D:	800 мм
Толщина стенки, s:	4 мм
Прибавка для компенсации коррозии и эрозии, c <sub>1</sub> :	1,8 мм
Прибавка для компенсации минусового допуска, c <sub>2</sub> :	0 мм
Прибавка технологическая, c <sub>3</sub> :	0 мм
Сумма прибавок к расчётной толщине стенки, c:	1,8 мм
Длина обечайки, L:	6,44·10 <sup>3</sup> 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, T:	90 °С
Расчётное внутреннее избыточное давление, p:	0,72 МПа
Расчётный изгибающий момент, M:	0 Н м
Расчётное поперечное усилие, Q:	0 Н
Расчётное осевое растягивающее усилие, F:	0 Н

### Результаты расчёта:

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре t = 90 °С (рабочие условия):

$$[\sigma] = 179 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С при температуре 90 °С:

$$E = 1,92 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

### Расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ 14249-89

*Гладкая обечайка, нагруженная внутренним избыточным давлением (п. 2.3.1.).*

Допускаемое давление:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p \cdot (s - c)}{D + (s - c)} = \frac{2 \cdot 179 \cdot 1 \cdot (4 - 1,8)}{800 + 4 - 1,8} = 0,9818 \text{ МПа}$$

$$0,9818 \text{ МПа} \geq 0,72 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Расчётная толщина стенки с учётом прибавок:

$$s_p + c = \frac{p \cdot D}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p - p} + c = \frac{0,72 \cdot 800}{2 \cdot 179 \cdot 1 - 0,72} + 1,8 = 3,412181 \text{ мм}$$

										Лист
										41
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ХИ. Т.00.00.00.ПЗ					

Расчетный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$$d_0 = 2 \cdot \left( \frac{s-c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s-c)} = 2 \cdot ((4-1,8)/1,612181 - 0,8) \cdot (800 \cdot (4-1,8))^{1/2} = 47,37353 \text{ мм}$$

Минимальное расстояние между “одиночными” штуцерами:

$$b_0 = 2 \cdot \sqrt{D \cdot (s-c)} = 2 \cdot (800 \cdot (4-1,8))^{1/2} = 83,90471 \text{ мм}$$

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

$$B_1 = \min \left\{ 1,0, 9,45 \cdot \frac{D}{1} \cdot \sqrt{\frac{D}{100 \cdot (s-c)}} \right\} = \min \{1,0, 9,45 \cdot 800 / 7,020556 \cdot 10^3 \cdot (800 / (100 \cdot (4-1,8)))^{1/2}\} = 1$$

Допускаемое наружное давление из условия устойчивости:

$$[p]_e = \frac{20,8 \cdot 10^{-6} \cdot E}{n_y \cdot B_1} \cdot \frac{D}{1} \cdot \left[ \frac{100(s-c)}{D} \right]^{2,5} = \frac{20,8 \cdot 10^{-6} \cdot 1,92 \cdot 10^5 \cdot 800}{-1,8 / 800)^{2,5}} \cdot (2,4 \cdot 1 \cdot 7,020556 \cdot 10^3) \cdot (100 \cdot (4-1,8) / 800)^{2,5} = 0,007519753 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление из условия прочности:

$$[p]_{\pi} = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot (s-c)}{D + (s-c)} = \frac{2 \cdot 179 \cdot (4-1,8)}{800 + 4 - 1,8} = 0,9818 \text{ МПа}$$

$$[p] = \frac{[p]_{\pi}}{\sqrt{1 + \left( \frac{[p]_{\pi}}{[p]_e} \right)^2}} = \frac{0,9818}{(1 + (0,9818 / 0,007519753)^2)^{1/2}} = 0,007519532 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление:  $[p] = 0,007519532 \text{ МПа}$

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

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия прочности:

$$[F]_{\pi} = \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma] = 3,141593 \cdot (800 + 4 - 1,8) \cdot (4 - 1,8) \cdot 179 = 9,924491 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия местной устойчивости:

$$[F]_{E1} = \frac{310 \cdot 10^{-6} \cdot E}{n_y} \cdot D^2 \cdot \left[ \frac{100 \cdot (s-c)}{D} \right]^{2,5} = \frac{310 \cdot 10^{-6} \cdot 1,92 \cdot 10^5 \cdot 800^2}{(2,4) \cdot (100 \cdot (4-1,8) / 800)^{2,5}} = 6,294531 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие:

$$[F] = \frac{[F]_{\pi}}{\sqrt{1 + \left( \frac{[F]_{\pi}}{[F]_{E1}} \right)^2}} = \frac{9,924491 \cdot 10^5}{(1 + (9,924491 \cdot 10^5 / 6,294531 \cdot 10^5)^2)^{1/2}} = 5,315555 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

**Обечайка, нагруженная осевым растягивающим усилием (п. 2.3.3.).**

Допускаемое осевое растягивающее усилие:

$$[F] = [F]_{\pi} \cdot \varphi_t = 9,924491 \cdot 10^5 \cdot 1 = 9,924491 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности со стороны растяжения:

$$[M]_{\pi p} = \frac{D}{4} \cdot [F] = \frac{800}{4} \cdot 9,924491 \cdot 10^5 = 1,984898 \cdot 10^5 \text{ Н м}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности со стороны сжатия:

$$[M]_{\pi} = \frac{D}{4} \cdot [F]_{\pi} = \frac{800}{4} \cdot 9,924491 \cdot 10^5 = 1,984898 \cdot 10^5 \text{ Н м}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости в пределах упругости:

$$[M]_{E} = \frac{D}{3,5} \cdot [F]_{E1} = \frac{800}{3,5} \cdot 6,294531 \cdot 10^5 = 1,43875 \cdot 10^5 \text{ Н м}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости:

$$[M]_{уст} = \frac{[M]_{\pi}}{\sqrt{1 + \left( \frac{[M]_{\pi}}{[M]_{E}} \right)^2}} = \frac{1,984898 \cdot 10^5}{(1 + (1,984898 \cdot 10^5 / 1,43875 \cdot 10^5)^2)^{1/2}} = 1,164911 \cdot 10^5 \text{ Н м}$$

Допускаемый изгибающий момент:

$$[M] = \min \{ [M]_{\pi p}, [M]_{уст} \} = \min \{ 1,984898 \cdot 10^5, 1,164911 \cdot 10^5 \} = 1,164911 \cdot 10^5 \text{ Н м}$$

Допускаемое поперечное усилие из условия прочности:

$$[Q]_{\pi} = 0,25 \cdot \pi \cdot D \cdot (s-c) \cdot [\sigma] = 0,25 \cdot 3,141593 \cdot 800 \cdot (4-1,8) \cdot 179 = 2,474318 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Расчётная длина для расчёта седловых опор:

$$l_s = 4,6 \cdot 10^3 \text{ мм}$$

Допускаемое поперечное усилие из условия устойчивости:

$$[Q]_E = \frac{2,4 \cdot E \cdot (s-c)^2}{n_y} \cdot \left[ 0,18 + 3,3 \frac{D(s-c)}{l_s^2} \right] = \frac{2,4 \cdot 1,92 \cdot 10^5 \cdot (4-1,8)^2 / 2,4 \cdot (0,18 + 3,3 \cdot 800 \cdot (4-1,8) / (4,6 \cdot 10^3)^2)}{1} = 1,675255 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Допускаемое поперечное усилие:

$$[Q] = \frac{[Q]_E}{\sqrt{1 + \left( \frac{[Q]_E}{[Q]_E} \right)^2}} = \frac{2,474318 \cdot 10^5}{\sqrt{1 + (2,474318 \cdot 10^5 / 1,675255 \cdot 10^5)^2}} = 1,387208 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)

### Условия нагружения при испытаниях:

Расчётная температура, T:	20 °С
Расчётное внутреннее избыточное давление (с учётом гидростатического), p:	0,72 МПа
Расчётный изгибающий момент, M:	0 Н м
Расчётное поперечное усилие, Q:	0 Н
Расчётное осевое растягивающее усилие, F:	0 Н

По ГОСТ 14249–89 расчёт на прочность при испытаниях не проводится, если выполнено условие:

$$F_{исп} < 1,35 \cdot F_{расч} \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]}$$
$$1,35 \cdot F_{расч} \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]} = 1,35 \cdot 0,72 \cdot 196 / 179 = 1,064313 \text{ МПа} \geq 0,72 \text{ МПа}$$

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

$$[\sigma]^{20} = \eta \cdot R_{e/20} / n_T = 1 \cdot 300 / 1,1 = 272,7273 \text{ МПа}$$

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

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

### Расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ 14249-89

*Гладкая обечайка, нагруженная внутренним избыточным давлением (п. 2.3.1.).*

Допускаемое давление:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p \cdot (s-c)}{D + (s-c)} = \frac{2 \cdot 272,7273 \cdot 1 \cdot (4-1,8)}{800 + 4-1,8} = 1,495886 \text{ МПа}$$

$$1,495886 \text{ МПа} \geq 0,72 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Расчётная толщина стенки с учётом прибавок:

$$s_p + c = \frac{p \cdot D}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p - p} + c = \frac{(0,72 \cdot 800)}{2 \cdot 272,7273 \cdot 1 - 0,72} + 1,8 = 2,857396 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$$d_0 = 2 \cdot \left( \frac{s-c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s-c)} = 2 \cdot ((4-1,8) / 1,057396 - 0,8) \cdot (800 \cdot (4-1,8))^{1/2} = 107,447 \text{ мм}$$

Минимальное расстояние между “одиночными” штуцерами:

$$b_0 = 2 \cdot \sqrt{D \cdot (s-c)} = 2 \cdot (800 \cdot (4-1,8))^{1/2} = 83,90471 \text{ мм}$$

### Для расчёта обечайки от действия седловых опор:

$$B_1 = \min \left\{ 1,0, 9,45 \cdot \frac{D}{1} \cdot \sqrt{\frac{D}{100 \cdot (s-c)}} \right\} = \min \{ 1,0, 9,45 \cdot 800 / 7,020556 \cdot 10^3 \cdot (800 / (100 \cdot (4-1,8)))^{1/2} \} = 1$$

Допускаемое наружное давление из условия устойчивости:

$$[p]_e = \frac{20,8 \cdot 10^{-6} \cdot E}{n_y \cdot B_1} \cdot \frac{D}{1} \cdot \left[ \frac{100(s-c)}{D} \right]^{2,5} = \frac{20,8 \cdot 10^{-6} \cdot 1,99 \cdot 10^5 \cdot 800 / (1,8 \cdot 1 \cdot 7,020556 \cdot 10^3)}{(100 \cdot (4-1,8) / 800)^{2,5}} = 0,01039188 \text{ МПа}$$

					Лист
					43
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ХИ.Т.00.00.00.ПЗ

Допускаемое наружное давление из условия прочности:

$$[p]_{\pi} = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot (s - c)}{D + (s - c)} = 2 \cdot 272,7273 \cdot (4 - 1,8) / (800 + 4 - 1,8) = 1,495886 \text{ МПа}$$

$$[p] = \frac{[p]_{\pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_{\pi}}{[p]_{\text{E}}}\right)^2}} = 1,495886 / (1 + (1,495886 / 0,01039188)^2)^{1/2} = 0,01039163 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление:  $[p] = 0,01039163 \text{ МПа}$

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

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия прочности:

$$[F]_{\pi} = \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma] = 3,141593 \cdot (800 + 4 - 1,8) \cdot (4 - 1,8) \cdot 272,7273 = 1,512111 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия местной устойчивости:

$$[F]_{\text{E1}} = \frac{310 \cdot 10^{-6} \cdot E}{n_y} \cdot D^2 \cdot \left[\frac{100 \cdot (s - c)}{D}\right]^{2,5} = 310 \cdot 10^6 \cdot 1,99 \cdot 10^5 \cdot 800^2 / (1,8) \cdot (100 \cdot (4 - 1,8) / 800)^{2,5} = 8,698692 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие:

$$[F] = \frac{[F]_{\pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[F]_{\pi}}{[F]_{\text{E1}}}\right)^2}} = 1,512111 \cdot 10^6 / (1 + (1,512111 \cdot 10^6 / 8,698692 \cdot 10^5)^2)^{1/2} = 7,540078 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

### **Обечайка, нагруженная осевым растягивающим усилием (п. 2.3.3.).**

Допускаемое осевое растягивающее усилие:

$$[F] = [F]_{\pi} \cdot \varphi_t = 1,512111 \cdot 10^6 \cdot 1 = 1,512111 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности со стороны растяжения:

$$[M]_{\text{пр}} = \frac{D}{4} \cdot [F] = 800 / 4 \cdot 1,512111 \cdot 10^6 = 3,024223 \cdot 10^5 \text{ Н м}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности со стороны сжатия:

$$[M]_{\text{п}} = \frac{D}{4} \cdot [F]_{\pi} = 800 / 4 \cdot 1,512111 \cdot 10^6 = 3,024223 \cdot 10^5 \text{ Н м}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости в пределах упругости:

$$[M]_{\text{E}} = \frac{D}{3,5} \cdot [F]_{\text{E1}} = 800 / 3,5 \cdot 8,698692 \cdot 10^5 = 1,988273 \cdot 10^5 \text{ Н м}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости:

$$[M]_{\text{уст}} = \frac{[M]_{\text{п}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_{\text{п}}}{[M]_{\text{E}}}\right)^2}} = 3,024223 \cdot 10^5 / (1 + (3,024223 \cdot 10^5 / 1,988273 \cdot 10^5)^2)^{1/2} = 1,661377 \cdot 10^5 \text{ Н м}$$

Допускаемый изгибающий момент:

$$[M] = \min\{M_{\text{пр}}, M_{\text{уст}}\} = \min\{3,024223 \cdot 10^5, 1,661377 \cdot 10^5\} = 1,661377 \cdot 10^5 \text{ Н м}$$

Допускаемое поперечное усилие из условия прочности:

$$[Q]_{\pi} = 0,25 \cdot \pi \cdot D \cdot (s - c) \cdot [\sigma] = 0,25 \cdot 3,141593 \cdot 800 \cdot (4 - 1,8) \cdot 272,7273 = 3,769911 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Расчётная длина для расчёта седловых опор:

$$l_s = 4,6 \cdot 10^3 \text{ мм}$$

Допускаемое поперечное усилие из условия устойчивости:

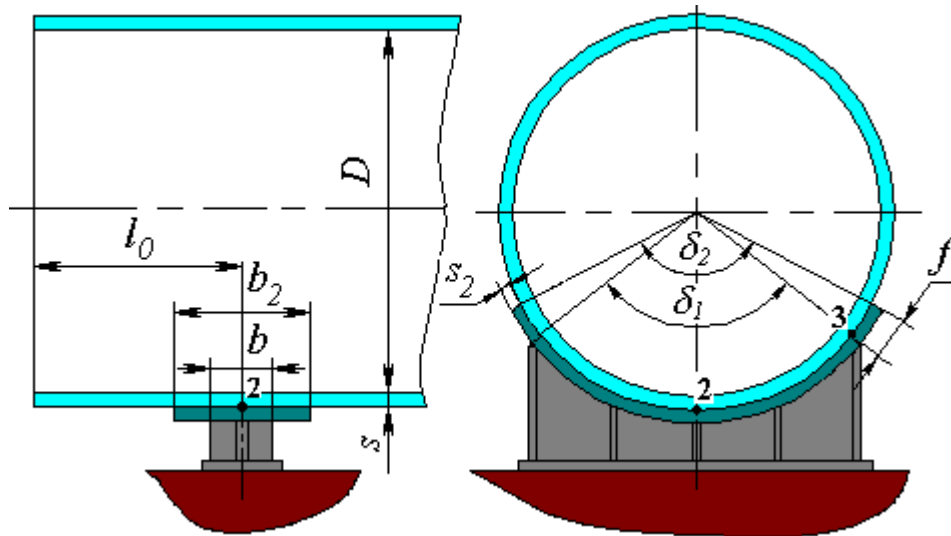
$$[Q]_{\text{E}} = \frac{2,4 \cdot E \cdot (s - c)^2}{n_y} \cdot \left[0,18 + 3,3 \frac{D(s - c)}{l_s^2}\right] = \frac{2,4 \cdot 1,99 \cdot 10^5 \cdot (4 - 1,8)^2 / 1,8 \cdot (0,18 + 3,3 \cdot 800 \cdot (4 - 1,8) / (4,6 \cdot 10^3)^2)}{1} = 2,315109 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Допускаемое поперечное усилие:

$$[Q] = \frac{[Q]_{\pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[Q]_{\pi}}{[Q]_{\text{E}}}\right)^2}} = 3,769911 \cdot 10^5 / (1 + (3,769911 \cdot 10^5 / 2,315109 \cdot 10^5)^2)^{1/2} = 1,972811 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

## Опора седловая

Расчёт на прочность обечаек и днищ от воздействия опорных нагрузок по ГОСТ 26202–84



### Исходные данные

Элемент, связанный с опорой:	Обечайка цилиндрическая №1
Внутренний диаметр обечайки, D:	800 мм
Толщина стенки обечайки, s:	4 мм
Прибавка для компенсации коррозии и эрозии, c <sub>1</sub> :	1,8 мм
Прибавка для компенсации минусового допуска, c <sub>2</sub> :	0 мм
Прибавка технологическая, c <sub>3</sub> :	0 мм
Сумма прибавок к стенке обечайки, c:	1,8 мм
Ширина опоры, b:	250 мм
Угол охвата опоры, δ <sub>1</sub> :	120 градус
Расстояние от края элемента, l <sub>0</sub> :	5,95·10 <sup>3</sup> мм
Расстояние до днища, a:	1,78·10 <sup>3</sup> мм
Высота опоры, H:	154 мм
Толщина листа, s <sub>2</sub> :	10 мм
Ширина листа, b <sub>2</sub> :	360 мм
Угол охвата листа, δ <sub>2</sub> :	140 градус
Длина выступающей части листа, f:	71,5585 мм

### Расчёт в рабочих условиях

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

Расчётная температура, T:	90 °С
Коэффициент заполнения жидкостью, ξ:	1
Плотность жидкости, ρ <sub>ж</sub> :	10,4 кг/куб.м
Расчётное внутреннее избыточное давление, действующее в элементе над опорой, p:	0,72 МПа

					<i>ХИ.Т.00.00.00.ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		45

Изгибающий момент в сечении оболочки над опорой, М:  $2,771822 \cdot 10^3$  Н м  
 Опорное усилие, F:  $4,769901 \cdot 10^3$  Н  
 Поперечное усилие в сечении оболочки над опорой, Q:  $2,421363 \cdot 10^3$  Н

**Допускаемые нагрузки для элемента, связанного с обечайкой (см. расчёт “Обечайка цилиндрическая №1”):**

Допускаемое наружное давление, [р]:  $0,007519532$  МПа  
 Допускаемый изгибающий момент, [М]<sub>уст</sub>:  $1,164911 \cdot 10^5$  Н м  
 Допускаемая осевое сжимающее усилие, [F]:  $5,315555 \cdot 10^5$  Н  
 Допускаемая поперечное усилие, [Q]:  $1,387208 \cdot 10^5$  Н

**Опора с подкладным листом (п. 4.5.3.).**

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

$$K_{19} = \frac{5}{6 \cdot 3 \sqrt[3]{\frac{D}{s-c} \cdot \delta_1}} = 5 / [6 * (800 / (4 - 1,8))^{1/3} * 2,094395] = 0,0557448$$

$$K_{19} \cdot D + 1,5 \cdot b = 0,0557448 * 800 + 1,5 * 250 = 419,5958 \text{ мм}$$

Условие не выполнено, проводятся два расчёта

**Расчёт №1:**

Подкладной лист рассматривают как седловую опору шириной  $b_2$  с углом охвата  $\delta_2$ . Во всех формулах принимают  $b = b_2 = 360$  мм,  $\delta_1 = \delta_2 = 140$  градус ( $2,443461$  рад)

$$K_{13} = \frac{\max \left\{ 1,7 - \frac{2,1 \cdot \delta_1}{\pi}; 0 \right\}}{\sin(0,5 \cdot \delta_1)} = \max \{ 1,7 - 2,1 * 2,443461 / 3,141593; 0 \} / \sin(0,5 * 2,443461) = 0,07094518$$

Параметр, определяемый расстоянием до днища:

$$\gamma = 2,83 \cdot \frac{a}{D} \cdot \sqrt{\frac{s-c}{D}} = 2,83 * 1,78 \cdot 10^3 / 800 * ((4 - 1,8) / 800)^{1/2} = 0,3309464$$

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

$$K_{15} = \min \left\{ 1,0; \frac{0,8 \cdot \sqrt{\gamma + 6 \cdot \gamma}}{\delta_1} \right\} = \min \{ 1,0; (0,8 * 0,3309464^{1/2} + 6 * 0,3309464) / 2,443461 \} = 1$$

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

$$K_{12} = \frac{1,15 - 0,1432 \cdot \delta_1}{\sin(0,5 \cdot \delta_1)} = (1,15 - 0,1432 * 2,443461) / \sin(0,5 * 2,443461) = 0,8514448$$

Параметр, определяемый шириной пояса опоры:

$$\beta = 0,91 \cdot \frac{b}{\sqrt{D \cdot (s-c)}} = 0,91 * 360 / (800 * (4 - 1,8))^{1/2} = 7,808859$$

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

$$K_{10} = \max \left\{ \frac{e^{-\beta} \cdot \sin \beta}{\beta}; 0,25 \right\} = \max \{ e^{-7,808859} * \sin(7,808859) / 7,808859; 0,25 \} = 0,25$$

$$\vartheta_1 = - \frac{0,23 \cdot K_{13} \cdot K_{15}}{K_{12} \cdot K_{10}} = -0,23 * 0,07094518 * 1 / (0,8514448 * 0,25) = (-0,07665743)$$

Общее осевое мембранное напряжение изгиба в области опорного узла:

$$\sigma_{\max} = \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D^2 \cdot (s-c)} = 4 * 2,771822 \cdot 10^3 / (3,141593 * 800^2 * (4 - 1,8)) = 2,50653 \text{ МПа}$$

$$\vartheta_{21} = -\frac{\bar{\sigma}_{\max}}{n_T [\sigma]} \cdot \frac{K_2}{n_T [\sigma]} = -2,50653 * 1,2 / (1,5 * 179) = (-0,01120237)$$

$$\vartheta_{22} = \left( \frac{p \cdot D}{4 \cdot (s-c)} - \frac{\bar{\sigma}_{\max}}{n_T [\sigma]} \right) \cdot \frac{K_2}{n_T [\sigma]} = [0,72 * 800 / (4 * (4 - 1,8)) - 2,50653] * 1,2 / (1,5 * 179) = 0,2813319$$

Примечание: в соответствии с п. 1.2.3 ГОСТ 26202-84 при  $\vartheta_{2i} < 0$  в расчёте  $K_1$  знаки  $\vartheta_1$  и  $\vartheta_2$  меняют на противоположные

$$K_1 = \left\{ \begin{array}{l} \left( \frac{1+3 \cdot \vartheta_1 \cdot \vartheta_2}{3 \cdot \vartheta_1^2} \right) \left( \pm \sqrt{\frac{9 \cdot \vartheta_1^2 (1-\vartheta_2^2)}{(1+3 \cdot \vartheta_1 \cdot \vartheta_2)^2} + 1} - 1 \right); \quad K_1 \geq 0 \text{ при } \vartheta_1 \neq 0 \\ 1,5 \cdot (1 - \vartheta_2^2) \quad \text{при } \vartheta_1 = 0 \end{array} \right\} \begin{array}{l} = 1,476784 \quad \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{21} \\ = 1,456826 \quad \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{22} \end{array}$$

$$K_1 = \min\{1,476784, 1,456826\} = 1,456826$$

Расчёт в точке 2:

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma_i]_2 = K_1 \cdot [\sigma] \cdot \frac{n_T}{K_2} = 1,456826 * 179 * 1,5 / 1,2 = 325,9647 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в осевом направлении:

$$[F]_2 = \frac{0,7 \cdot [\sigma_i]_2 \cdot \sqrt{D \cdot (s-c)} \cdot (s-c)}{K_{10} \cdot K_{12}} = 0,7 * 325,9647 * (800 * (4 - 1,8))^{1/2} * (4 - 1,8) / (0,25 * 0,8514448) = 9,893527 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

$$K_{11} = \frac{1 - e^{-\beta} \cdot \cos \beta}{\beta} = (1 - e^{-7,808859} * \cos(7,808859)) / 7,808859 = 0,1280573$$

$$K_{14} = \frac{1,45 - 0,43 \cdot \delta_1}{\sin(0,5 \cdot \delta_1)} = (1,45 - 0,43 * 2,443461) / \sin(0,5 * 2,443461) = 0,4249387$$

$$K_{16} = 1 - \frac{0,65}{1 + (\beta \cdot \gamma)^2} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{3 \cdot \delta_1}} = 1 - 0,65 / (1 + (6 * 0,3309464)^2) * [3,141593 / (3 * 2,443461)]^{1/2} = 0,9139122$$

$$K_{17} = \frac{1}{1 + 0,6 \cdot \sqrt[3]{\frac{D}{s-c}} \cdot \frac{b}{D} \cdot \delta_1} = 1 / [1 + 0,6 * (800 / (4 - 1,8))^{1/3} * 360 / 800 * 2,443461] = 0,1751633$$

$$\vartheta_1 = -\frac{0,53 \cdot K_{11}}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17} \cdot \sin(0,5 \cdot \delta_1)} = -0,53 * 0,1280573 / [0,4249387 * 0,9139122 * 0,1751633 * \sin(0,5 * 2,443461)] = (-1,061746)$$

$$\vartheta_{21} = 0$$

$$\vartheta_{22} = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s-c)} \cdot \frac{K_2}{n_T [\sigma]} = 0,72 * 800 / (2 * (4 - 1,8)) * 1,2 / (1,5 * 179) = 0,5850686$$

Примечание: в соответствии с п. 1.2.3 ГОСТ 26202-84 при  $\vartheta_{2i} < 0$  в расчёте  $K_1$  знаки  $\vartheta_1$  и  $\vartheta_2$  меняют на противоположные

$$K_1 = \left\{ \begin{array}{l} \left( \frac{1+3 \cdot \vartheta_1 \cdot \vartheta_2}{3 \vartheta_1^2} \right) \left( \pm \sqrt{\frac{9 \cdot \vartheta_1^2 (1-\vartheta_2^2)}{(1+3 \cdot \vartheta_1 \cdot \vartheta_2)^2} + 1} - 1 \right); \quad K_1 \geq 0 \text{ при } \vartheta_1 \neq 0 \\ 1,5 \cdot (1 - \vartheta_2^2) \quad \text{при } \vartheta_1 = 0 \end{array} \right\} \begin{array}{l} = 0,6914794 \quad \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{21} \\ = 1,060727 \quad \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{22} \end{array}$$

$$K_1 = \min\{0,6914794, 1,060727\} = 0,6914794$$

Расчёт в точке 3:

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma_i]_3 = K_1 \cdot [\sigma] \cdot \frac{n_T}{K_2} = 0,6914794 * 179 * 1,5 / 1,2 = 154,7185 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в окружном направлении:

$$[F]_3 = \frac{0,9 \cdot [\sigma_i]_3 \cdot \sqrt{D \cdot (s-c)} \cdot (s-c)}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17}} = 0,9 * 154,7185 * (800 * (4 - 1,8))^{1/2} * (4 - 1,8) / (0,4249387 * 0,9139122 * 0,1751633) = 1,889252 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

						Лист
					ХИ.Т.00.00.00.ПЗ	47
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$s_{ef} = (s - c) \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{s_2}{s - c}\right)^2} = (4 - 1,8) * (1 + (10 / (4 - 1,8))^2)^{1/2} = 10,23914 \text{ мм}$$

### Расчёт №2:

Подкладной лист рассматривают как усиление стенки сосуда. Во всех формулах принимают  $b = 250$  мм,  $\delta_1 = 120$  градус (2,094395 рад),  $s = s_{ef} + c = 10,23914 + 1,8 = 12,03914$  мм.

$$K_{13} = \frac{\max\left\{1,7 - \frac{2,1 \cdot \delta_1}{\pi}; 0\right\}}{\sin(0,5 \cdot \delta_1)} = \max\{1,7 - 2,1 * 2,094395 / 3,141593; 0\} / \sin(0,5 * 2,094395) = 0,3464102$$

Параметр, определяемый расстоянием до днища:

$$\gamma = 2,83 \cdot \frac{a}{D} \cdot \sqrt{\frac{s - c}{D}} = 2,83 * 1,78 \cdot 10^3 / 800 * ((12,03914 - 1,8) / 800)^{1/2} = 0,7139669$$

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

$$K_{15} = \min\left\{1,0; \frac{0,8 \cdot \sqrt{\gamma} + 6 \cdot \gamma}{\delta_1}\right\} = \min\{1,0; (0,8 * 0,7139669^{1/2} + 6 * 0,7139669) / 2,094395\} = 1$$

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

$$K_{12} = \frac{1,15 - 0,1432 \cdot \delta_1}{\sin(0,5 \cdot \delta_1)} = (1,15 - 0,1432 * 2,094395) / \sin(0,5 * 2,094395) = 0,9815909$$

Параметр, определяемый шириной пояса опоры:

$$\beta = 0,91 \cdot \frac{b}{\sqrt{D \cdot (s - c)}} = 0,91 * 250 / (800 * (12,03914 - 1,8))^{1/2} = 2,513649$$

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

$$K_{10} = \max\left\{\frac{e^{-\beta} \cdot \sin \beta}{\beta}; 0,25\right\} = \max\{e^{-2,513649} * \sin(2,513649) / 2,513649; 0,25\} = 0,25$$

$$\vartheta_1 = -\frac{0,23 \cdot K_{13} \cdot K_{15}}{K_{12} \cdot K_{10}} = -0,23 * 0,3464102 * 1 / (0,9815909 * 0,25) = (-0,3246743)$$

Общее осевое мембранное напряжение изгиба в области опорного узла:

$$\bar{\sigma}_{mx} = \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D^2 \cdot (s - c)} = 4 * 2,771822 \cdot 10^3 / (3,141593 * 800^2 * (12,03914 - 1,8)) = 0,5385574 \text{ МПа}$$

$$\vartheta_{21} = -\bar{\sigma}_{mx} \cdot \frac{K_2}{n_T [\sigma]} = -0,5385574 * 1,2 / (1,5 * 179) = (-0,002406961)$$

$$\vartheta_{22} = \left(\frac{p \cdot D}{4 \cdot (s - c)} - \bar{\sigma}_{mx}\right) \cdot \frac{K_2}{n_T \cdot [\sigma]} = [0,72 * 800 / (4 * (12,03914 - 1,8)) - 0,5385574] * 1,2 / (1,5 * 179) = 0,06044748$$

Примечание: в соответствии с п. 1.2.3 ГОСТ 26202-84 при  $\vartheta_{2i} < 0$  в расчёте  $K_1$  знаки  $\vartheta_1$  и  $\vartheta_2$  меняют на противоположные

$$K_1 = \begin{cases} \left\{ \frac{1 + 3 \cdot \vartheta_1 \cdot \vartheta_2}{3 \cdot \vartheta_1^2} \right\} \left( \pm \sqrt{\frac{9 \cdot \vartheta_1^2 \cdot (1 - \vartheta_2^2)}{(1 + 3 \cdot \vartheta_1 \cdot \vartheta_2)^2} + 1} - 1 \right); & K_1 \geq 0 \text{ при } \vartheta_1 \neq 0 \\ 1,5 \cdot (1 - \vartheta_2^2) & \text{при } \vartheta_1 = 0 \end{cases} \begin{cases} = 1,249999 & \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{21} \\ = 1,302836 & \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{22} \end{cases}$$

$$K_1 = \min\{1,249999, 1,302836\} = 1,249999$$

Расчёт в точке 2:

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_2 = K_1 \cdot [\sigma] \cdot \frac{n_T}{K_2} = 1,249999 * 179 * 1,5 / 1,2 = 279,6872 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в осевом направлении:

$$[F]_2 = \frac{0,7 \cdot [\sigma]_2 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c)} \cdot (s - c)}{K_{10} \cdot K_{12}} = \frac{0,7 * 279,6872 * (800 * (12,03914 - 1,8))^{1/2} * (12,03914 - 1,8)}{0,9815909 * 0,25} = 7,393334 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

					Лист
					48
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ХИ. Т.00.00.00.ПЗ



$$K_{11} = \frac{1 - e^{-\beta} \cdot \cos \beta}{\beta} = (1 - e^{-2.513649} \cdot \cos(2,513649)) / 2,513649 = 0,423896$$

$$K_{14} = \frac{1.45 - 0.43 \cdot \delta_1}{\sin(0.5 \cdot \delta_1)} = (1.45 - 0.43 \cdot 2,094395) / \sin(0.5 \cdot 2,094395) = 0,6344041$$

$$K_{16} = 1 - \frac{0.65}{1 + (\delta \cdot \gamma)^2} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{3 \cdot \delta_1}} = 1 - 0.65 / (1 + (6 \cdot 0,7139669)^2) \cdot [3,141593 / (3 \cdot 2,094395)]^{1/2} = 0,9762482$$

$$K_{17} = \frac{1}{1 + 0.6 \cdot \sqrt[3]{\frac{D}{s-c} \cdot \frac{b}{D} \cdot \delta_1}} = 1 / [1 + 0.6 \cdot (800 / (12,03914 - 1,8))^{1/3} \cdot 250 / 800 \cdot 2,094395] = 0,3732998$$

$$\vartheta_1 = - \frac{0.53 \cdot K_{11}}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17} \cdot \sin(0.5 \cdot \delta_1)} = -0.53 \cdot 0,423896 / [0,6344041 \cdot 0,9762482 \cdot 0,3732998 \cdot \sin(0.5 \cdot 2,094395)] = (-1,122071)$$

$$\vartheta_{21} = 0$$

$$\vartheta_{22} = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s-c) \cdot n_T \cdot [\sigma]} = 0,72 \cdot 800 / (2 \cdot (12,03914 - 1,8)) \cdot 1,2 / (1,5 \cdot 179) = 0,1257089$$

Примечание: в соответствии с п. 1.2.3 ГОСТ 26202-84 при  $\vartheta_{2i} < 0$  в расчёте  $K_1$  знаки  $\vartheta_1$  и  $\vartheta_2$  меняют на противоположные

$$K_1 = \left\{ \begin{array}{l} \left( \frac{1 + 3 \cdot \vartheta_1 \cdot \vartheta_2}{3 \vartheta_1^2} \right) \left( \pm \sqrt{\frac{9 \cdot \vartheta_1^2 \cdot (1 - \vartheta_2^2)}{(1 + 3 \cdot \vartheta_1 \cdot \vartheta_2)^2} + 1} - 1 \right); \quad K_1 \geq 0 \text{ при } \vartheta_1 \neq 0 \\ 1.5 \cdot (1 - \vartheta_2^2) \quad \text{при } \vartheta_1 = 0 \end{array} \right. \left. \begin{array}{l} = 0,6649512 \quad \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{21} \\ = 0,7445135 \quad \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{22} \end{array} \right.$$

$$K_1 = \min\{ 0,6649512, 0,7445135 \} = 0,6649512$$

Расчёт в точке 3:

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_B = K_1 \cdot [\sigma] \cdot \frac{n_T}{K_2} = 0,6649512 \cdot 179 \cdot 1,5 / 1,2 = 148,7828 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в окружном направлении:

$$[F]_B = \frac{0.9 \cdot [\sigma]_B \cdot \sqrt{D \cdot (s-c)} \cdot (s-c)}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17}} = 0.9 \cdot 148,7828 \cdot (800 \cdot (12,03914 - 1,8))^{1/2} \cdot (12,03914 - 1,8) / (0,6344041 \cdot 0,9762482 \cdot 0,3732998) = 5,367247 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Условие прочности:

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

$$[F] = 9,893527 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

$$4,769901 \cdot 10^3 \text{ Н} \leq 9,893527 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

**Проверка условия устойчивости (п. 4.5.5.2).**

**Расчёт №1:**

Подкладной лист рассматривают как седловую опору шириной  $b_2$  с углом охвата  $\delta_2$ . Во всех формулах принимают  $b = b_2 = 250 \text{ мм}$ ,  $\delta_1 = \delta_2 = 120 \text{ градус}$  ( $2,094395 \text{ рад}$ )

Эффективное осевое усилие от местных мембранных напряжений:

$$F_e = F \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \sqrt{\frac{D}{s-c}} \cdot K_{13} \cdot K_{15} = 4,769901 \cdot 10^3 \cdot 3,141593 / 4 \cdot (800 / (4 - 1,8))^{1/2} \cdot 0,07094518 \cdot 1 = 5,068225 \cdot 10^3 \text{ Н}$$

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

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

$$\frac{|p|}{[p]} + \frac{F_e}{[F]} + \frac{M}{[M]_{уст}} + \left(\frac{Q}{[Q]}\right)^2 = 0 / 0,007519532 + 5,068225 \cdot 10^3 / 5,315555 \cdot 10^5 + 2,771822 \cdot 10^3 / 1,164911 \cdot 10^5 +$$

$$(2,421363 \cdot 10^3 / 1,387208 \cdot 10^5)^2 = 0,03363366$$

$$0,03363366 \leq 1,0$$

Заключение: **Условие устойчивости выполнено**

### Расчёт №2:

Подкладной лист рассматривают как усиление стенки сосуда. Во всех формулах принимают  $b = 250$  мм,  $\delta_1 = 120$  градус (2,094395 рад),  $s = s_{ef} + c = 10,23914 + 1,8 = 4$  мм.

Эффективное осевое усилие от местных мембранных напряжений:

$$F_e = F \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \sqrt{\frac{D}{s-c}} \cdot K_{13} \cdot K_{15} = 4,769901 \cdot 10^3 * 3,141593 / 4 * (800 / (12,03914 - 1,8))^{1/2} * 0,3464102 * 1 = 1,147105 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

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

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

$$\frac{|p|}{[p]} + \frac{F_e}{[F]} + \frac{M}{[M]_{уст}} + \left(\frac{Q}{[Q]}\right)^2 = 0 / 0,007519532 + 1,147105 \cdot 10^4 / 5,315555 \cdot 10^5 + 2,771822 \cdot 10^3 / 1,164911 \cdot 10^5 +$$

$$(2,421363 \cdot 10^3 / 1,387208 \cdot 10^5)^2 = 0,04567911$$

$$0,04567911 \leq 1,0$$

Заключение: **Условие устойчивости выполнено**

### Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)

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

Расчётная температура, T:	20 °С
Коэффициент заполнения жидкостью, $\xi$ :	1
Плотность жидкости, $\rho_j$ :	$1 \cdot 10^3$ кг/куб.м
Расчётное внутреннее избыточное давление, действующее в элементе над опорой, p:	0,72 МПа

Изгибающий момент над опорой, M:	$6,69741 \cdot 10^3$ Н м
Опорное усилие, F:	$2,132243 \cdot 10^4$ Н
Поперечное усилие в сечении оболочки над опорой, Q:	$1,313432 \cdot 10^4$ Н

#### Допускаемые нагрузки для элемента, связанного с обечайкой (см. расчёт "Обечайка цилиндрическая №1"):

Допускаемое наружное давление, [p]:	0,01039163 МПа
Допускаемый изгибающий момент, [M] <sub>уст</sub> :	$1,661377 \cdot 10^5$ Н м
Допускаемая осевое сжимающее усилие, [F]:	$7,540078 \cdot 10^5$ Н
Допускаемая поперечное усилие, [Q]:	$1,972811 \cdot 10^5$ Н

#### Опора с подкладным листом (п. 4.5.3).

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

										Лист
										50
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ХИ.Т.00.00.00.ПЗ					

$$K_{19} = \frac{5}{6 \cdot \sqrt[3]{\frac{D}{s-c}} \cdot \delta_1} = 5 / [6 * (800 / (4 - 1,8))^{1/3} * 2,094395] = 0,0557448$$

$$K_{19} \cdot D + 1,5 \cdot b = 0,0557448 \cdot 800 + 1,5 \cdot 250 = 419,5958 \text{ мм}$$

Условие не выполнено, проводятся два расчёта

**Расчёт №1:**

Подкладной лист рассматривают как седловую опору шириной  $b_2$  с углом охвата  $\delta_2$ . Во всех формулах принимают  $b = b_2 = 360 \text{ мм}$ ,  $\delta_1 = \delta_2 = 140 \text{ градус}$  (2,443461 рад)

$$K_{13} = \frac{\max\left\{1,7 - \frac{2,1 \cdot \delta_1}{\pi}; 0\right\}}{\sin(0,5 \cdot \delta_1)} = \max\{1,7 - 2,1 * 2,443461 / 3,141593; 0\} / \sin(0,5 * 2,443461) = 0,07094518$$

Параметр, определяемый расстоянием до днища:

$$\gamma = 2,83 \cdot \frac{a}{D} \cdot \sqrt{\frac{s-c}{D}} = 2,83 * 1,78 \cdot 10^3 / 800 * ((4 - 1,8) / 800)^{1/2} = 0,3309464$$

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

$$K_{15} = \min\left\{1,0; \frac{0,8 \cdot \sqrt{\gamma + 6 \cdot \gamma}}{\delta_1}\right\} = \min\{1,0; (0,8 * 0,3309464^{1/2} + 6 * 0,3309464) / 2,443461\} = 1$$

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

$$K_{12} = \frac{1,15 - 0,1432 \cdot \delta_1}{\sin(0,5 \cdot \delta_1)} = (1,15 - 0,1432 * 2,443461) / \sin(0,5 * 2,443461) = 0,8514448$$

Параметр, определяемый шириной пояса опоры:

$$\beta = 0,91 \cdot \frac{b}{\sqrt{D \cdot (s-c)}} = 0,91 * 360 / (800 * (4 - 1,8))^{1/2} = 7,808859$$

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

$$K_{10} = \max\left\{\frac{e^{-\beta} \cdot \sin \beta}{\beta}; 0,25\right\} = \max\{e^{-7,808859} * \sin(7,808859) / 7,808859; 0,25\} = 0,25$$

$$\varphi_1 = -\frac{0,23 \cdot K_{13} \cdot K_{15}}{K_{12} \cdot K_{10}} = -0,23 * 0,07094518 * 1 / (0,8514448 * 0,25) = (-0,07665743)$$

Общее осевое мембранное напряжение изгиба в области опорного узла:

$$\bar{\sigma}_{\max} = \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D^2 \cdot (s-c)} = 4 * 6,69741 \cdot 10^3 / (3,141593 * 800^2 * (4 - 1,8)) = 6,056398 \text{ МПа}$$

$$\varphi_{2,1} = -\bar{\sigma}_{\max} \cdot \frac{K_2}{n_T \cdot [\sigma]} = -6,056398 * 1 / (1,1 * 272,7273) = (-0,02018799)$$

$$\varphi_{2,2} = \left(\frac{p \cdot D}{4 \cdot (s-c)} - \bar{\sigma}_{\max}\right) \cdot \frac{K_2}{n_T \cdot [\sigma]} = [0,72 * 800 / (4 * (4 - 1,8)) - 6,056398] * 1 / (1,1 * 272,7273) = 0,1979938$$

Примечание: в соответствии с п. 1.2.3 ГОСТ 26202-84 при  $\varphi_{2,i} < 0$  в расчёте  $K_1$  знаки  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  меняют на противоположные

$$K_1 = \begin{cases} \left(\frac{1+3 \cdot \varphi_1 \cdot \varphi_2}{3 \cdot \varphi_1^2}\right) \left(\pm \sqrt{\frac{9 \cdot \varphi_1^2 \cdot (1-\varphi_2^2)}{(1+3 \cdot \varphi_1 \cdot \varphi_2)^2} + 1} - 1\right); & K_1 \geq 0 \text{ при } \varphi_1 \neq 0 \\ 1,5 \cdot (1 - \varphi_2^2) & \text{при } \varphi_1 = 0 \end{cases} \begin{cases} = 1,473412 & \text{при } \varphi_2 = \varphi_{2,1} \\ = 1,489462 & \text{при } \varphi_2 = \varphi_{2,2} \end{cases}$$

$$K_1 = \min\{1,473412, 1,489462\} = 1,473412$$

Расчёт в точке 2:

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_2 = K_1 \cdot [\sigma] \cdot \frac{n_T}{K_2} = 1,473412 * 272,7273 * 1,1 / 1 = 442,0237 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в осевом направлении:

$$[F]_2 = \frac{0.7 \cdot [\sigma_1]_2 \cdot \sqrt{D \cdot (s-c)} \cdot (s-c)}{K_{10} \cdot K_{12}} = 0.7 * 442,0237 * (800 * (4 - 1,8))^{1/2} * (4 - 1,8) / (0,25 * 0,8514448) = 1,341609 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

$$K_{11} = \frac{1 - e^{-\beta} \cdot \cos \beta}{\beta} = (1 - e^{-7,808859 * \cos(7,808859)}) / 7,808859 = 0,1280573$$

$$K_{14} = \frac{1.45 - 0.43 \cdot \delta_1}{\sin(0.5 \cdot \delta_1)} = (1.45 - 0.43 * 2,443461) / \sin(0.5 * 2,443461) = 0,4249387$$

$$K_{16} = 1 - \frac{0.65}{1 + (\delta \cdot \gamma)^2} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{3 \cdot \delta_1}} = 1 - 0.65 / (1 + (6 * 0,3309464)^2) * [3,141593 / (3 * 2,443461)]^{1/2} = 0,9139122$$

$$K_{17} = \frac{1}{1 + 0.6 \cdot \sqrt[3]{\frac{D}{s-c}} \cdot \frac{b}{D} \cdot \delta_1} = 1 / [1 + 0.6 * (800 / (4 - 1,8))^{1/3} * 360 / 800 * 2,443461] = 0,1751633$$

$$\vartheta_1 = - \frac{0.53 \cdot K_{11}}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17} \cdot \sin(0.5 \cdot \delta_1)} = -0.53 * 0,1280573 / [0,4249387 * 0,9139122 * 0,1751633 * \sin(0.5 * 2,443461)] = (-1,061746)$$

$$\vartheta_{21} = 0$$

$$\vartheta_{22} = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s-c)} \cdot \frac{K_2}{n_T \cdot [\sigma]} = 0,72 * 800 / (2 * (4 - 1,8)) * 1 / (1,1 * 272,7273) = 0,4363636$$

Примечание: в соответствии с п. 1.2.3 ГОСТ 26202-84 при  $\vartheta_{2i} < 0$  в расчёте  $K_1$  знаки  $\vartheta_1$  и  $\vartheta_2$  меняют на противоположные

$$K_1 = \begin{cases} \left( \frac{1 + 3 \cdot \vartheta_1 \cdot \vartheta_2}{3 \vartheta_1^2} \right) \left( \pm \sqrt{\frac{9 \cdot \vartheta_1^2 \cdot (1 - \vartheta_2^2)}{(1 + 3 \cdot \vartheta_1 \cdot \vartheta_2)^2} + 1} - 1 \right); & K_1 \geq 0 \text{ при } \vartheta_1 \neq 0 \\ 1.5 \cdot (1 - \vartheta_2^2) & \text{при } \vartheta_1 = 0 \end{cases} \begin{cases} = 0,6914794 & \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{21} \\ = 0,9705475 & \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{2,2} \end{cases}$$

$$K_1 = \min\{0,6914794, 0,9705475\} = 0,6914794$$

Расчёт в точке 3:

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_B = K_1 \cdot [\sigma] \cdot \frac{n_T}{K_2} = 0,6914794 * 272,7273 * 1,1 / 1 = 207,4438 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в окружном направлении:

$$[F]_3 = \frac{0.9 \cdot [\sigma_1]_3 \cdot \sqrt{D \cdot (s-c)} \cdot (s-c)}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17}} = 0.9 * 207,4438 * (800 * (4 - 1,8))^{1/2} * (4 - 1,8) / (0,4249387 * 0,9139122 * 0,1751633) = 2,533076 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

$$s_{ef} = (s-c) \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{s_2}{s-c}\right)^2} = (4 - 1,8) * (1 + (10 / (4 - 1,8))^2)^{1/2} = 10,23914 \text{ мм}$$

### Расчёт №2:

Подкладной лист рассматривают как усиление стенки сосуда. Во всех формулах принимают  $b = 250$  мм,  $\delta_1 = 120$  градус (2,094395 рад),  $s = s_{ef} + c = 10,23914 + 1,8 = 12,03914$  мм.

$$K_{13} = \frac{\max\left\{1.7 - \frac{2.1 \cdot \delta_1}{\pi}; 0\right\}}{\sin(0.5 \cdot \delta_1)} = \max\{1.7 - 2.1 * 2,094395 / 3,141593; 0\} / \sin(0.5 * 2,094395) = 0,3464102$$

Параметр, определяемый расстоянием до днища:

$$\gamma = 2.83 \cdot \frac{a}{D} \cdot \sqrt{\frac{s-c}{D}} = 2.83 * 1,78 \cdot 10^3 / 800 * ((12,03914 - 1,8) / 800)^{1/2} = 0,7139669$$

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

									Лист
									52
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					

ХИ.Т.00.00.00.ПЗ

$$K_{15} = \min \left\{ 1.0; \frac{0.8 \cdot \sqrt{\gamma + 6 \cdot \gamma}}{\delta_1} \right\} = \min \{ 1.0; (0.8 * 0,7139669)^{1/2} + 6 * 0,7139669 / 2,094395 \} = 1$$

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

$$K_{12} = \frac{1.15 - 0.1432 \cdot \delta_1}{\sin(0.5 \cdot \delta_1)} = (1.15 - 0.1432 * 2,094395) / \sin(0.5 * 2,094395) = 0,9815909$$

Параметр, определяемый шириной пояса опоры:

$$\beta = 0.91 \cdot \frac{b}{\sqrt{D \cdot (s - c)}} = 0.91 * 250 / (800 * (12,03914 - 1,8))^{1/2} = 2,513649$$

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

$$K_{10} = \max \left\{ \frac{e^{-\beta} \cdot \sin \beta}{\beta}; 0.25 \right\} = \max \{ e^{-2,513649} * \sin(2,513649) / 2,513649; 0.25 \} = 0,25$$

$$\vartheta_1 = - \frac{0.23 \cdot K_{13} \cdot K_{15}}{K_{12} \cdot K_{10}} = -0.23 * 0,3464102 * 1 / (0,9815909 * 0,25) = (-0,3246743)$$

Общее осевое мембранное напряжение изгиба в области опорного узла:

$$\bar{\sigma}_{\max} = \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D^2 \cdot (s - c)} = 4 * 6,69741 \cdot 10^3 / (3,141593 * 800^2 * (12,03914 - 1,8)) = 1,301288 \text{ МПа}$$

$$\vartheta_{2,1} = - \bar{\sigma}_{\max} \cdot \frac{K_2}{n_T [\sigma]} = -1,301288 * 1 / (1,1 * 272,7273) = (-0,004337628)$$

$$\vartheta_{2,2} = \left( \frac{p \cdot D}{4 \cdot (s - c)} - \bar{\sigma}_{\max} \right) \cdot \frac{K_2}{n_T [\sigma]} = [0,72 * 800 / (4 * (12,03914 - 1,8)) - 1,301288] * 1 / (1,1 * 272,7273) = 0,04254131$$

Примечание: в соответствии с п. 1.2.3 ГОСТ 26202-84 при  $\vartheta_{2,i} < 0$  в расчёте  $K_1$  знаки  $\vartheta_1$  и  $\vartheta_2$  меняют на противоположные

$$K_1 = \left\{ \begin{array}{l} \left( \frac{1+3 \cdot \vartheta_1 \cdot \vartheta_2}{3 \cdot \vartheta_1^2} \right) \left( \pm \sqrt{\frac{9 \cdot \vartheta_1^2 (1-\vartheta_2^2)}{(1+3 \cdot \vartheta_1 \cdot \vartheta_2)^2} + 1} - 1 \right); \quad K_1 \geq 0 \text{ при } \vartheta_1 \neq 0 \\ 1.5 \cdot (1 - \vartheta_2^2) \quad \text{при } \vartheta_1 = 0 \end{array} \right\} \begin{array}{l} = 1,248305 \quad \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{2,1} \\ = 1,288251 \quad \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{2,2} \end{array}$$

$$K_1 = \min \{ 1,248305, 1,288251 \} = 1,248305$$

Расчёт в точке 2:

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_2 = K_1 \cdot [\sigma] \cdot \frac{n_T}{K_2} = 1,248305 * 272,7273 * 1,1 / 1 = 374,4914 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в осевом направлении:

$$[F]_2 = \frac{0.7 \cdot [\sigma]_2 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c)} \cdot (s - c)}{K_{10} \cdot K_{12}} = \frac{0.7 * 374,4914 * (800 * (12,03914 - 1,8))^{1/2} * (12,03914 - 1,8)}{0,25 * 0,9815909} = 9,899418 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

$$K_{11} = \frac{1 - e^{-\beta} \cdot \cos \beta}{\beta} = (1 - e^{-2,513649} * \cos(2,513649)) / 2,513649 = 0,423896$$

$$K_{14} = \frac{1.45 - 0.43 \cdot \delta_1}{\sin(0.5 \cdot \delta_1)} = (1.45 - 0.43 * 2,094395) / \sin(0.5 * 2,094395) = 0,6344041$$

$$K_{16} = 1 - \frac{0.65}{1 + (\delta \cdot \gamma)^2} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{3 \cdot \delta_1}} = 1 - 0.65 / (1 + (6 * 0,7139669)^2) * [3,141593 / (3 * 2,094395)]^{1/2} = 0,9762482$$

$$K_{17} = \frac{1}{1 + 0.6 \cdot 3 \sqrt{\frac{D}{s - c}} \cdot \frac{b}{D} \cdot \delta_1} = 1 / [1 + 0.6 * (800 / (12,03914 - 1,8))^{1/3} * 250 / 800 * 2,094395] = 0,3732998$$

$$\vartheta_1 = - \frac{0.53 \cdot K_{11}}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17} \cdot \sin(0.5 \cdot \delta_1)} = -0.53 * 0,423896 / [0,6344041 * 0,9762482 * 0,3732998 * \sin(0.5 * 2,094395)] = (-1,122071)$$

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

					<i>Лист</i>
					<i>53</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>	<i>ХИ.Т.00.00.00.ПЗ</i>

$$\vartheta_{2,2} = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (s - c)} \cdot \frac{K_2}{n_T \cdot [\sigma]} = 0,72 \cdot 800 / (2 \cdot (12,03914 - 1,8)) \cdot 1 / (1,1 \cdot 272,7273) = 0,09375787$$

Примечание: в соответствии с п. 1.2.3 ГОСТ 26202-84 при  $\vartheta_{2i} < 0$  в расчёте  $K_1$  знаки  $\vartheta_1$  и  $\vartheta_2$  меняют на противоположные

$$K_1 = \left\{ \begin{array}{l} \left( \frac{1 + 3 \cdot \vartheta_1 \cdot \vartheta_2}{3 \vartheta_1^2} \right) \left( \pm \sqrt{\frac{9 \cdot \vartheta_1^2 \cdot (1 - \vartheta_2^2)}{(1 + 3 \cdot \vartheta_1 \cdot \vartheta_2)^2} + 1} - 1 \right); \quad K_1 \geq 0 \text{ при } \vartheta_1 \neq 0 \\ 1,5 \cdot (1 - \vartheta_2^2) \quad \text{при } \vartheta_1 = 0 \end{array} \right. \left. \begin{array}{l} = 0,6649512 \quad \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{2,1} \\ = 0,7244018 \quad \text{при } \vartheta_2 = \vartheta_{2,2} \end{array} \right\}$$

$$K_1 = \min \{ 0,6649512, 0,7244018 \} = 0,6649512$$

Расчёт в точке 3:

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma]_B = K_1 \cdot [\sigma] \cdot \frac{n_T}{K_2} = 0,6649512 \cdot 272,7273 \cdot 1,1 / 1 = 199,4854 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в окружном направлении:

$$[F]_3 = \frac{0,9 \cdot [\sigma]_B \cdot \sqrt{D} \cdot (s - c) \cdot (s - c)}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17}} = \frac{0,9 \cdot 199,4854 \cdot (800 \cdot (12,03914 - 1,8))^{1/2} \cdot (12,03914 - 1,8)}{(0,6344041 \cdot 0,9762482 \cdot 0,3732998)} = 7,196308 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Условие прочности:

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

$$[F] = 1,341609 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

$$2,132243 \cdot 10^4 \text{ Н} \leq 1,341609 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

**Проверка условия устойчивости (п. 4.5.5.2).**

**Расчёт №1:**

Подкладной лист рассматривают как седловую опору шириной  $b_2$  с углом охвата  $\delta_2$ . Во всех формулах принимают  $b = b_2 = 250$  мм,  $\delta_1 = \delta_2 = 120$  градус (2,094395 рад)

Эффективное осевое усилие от местных мембранных напряжений:

$$F_e = F \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \sqrt{\frac{D}{(s - c)}} \cdot K_{13} \cdot K_{15} = 2,132243 \cdot 10^4 \cdot 3,141593 / 4 \cdot (800 / (4 - 1,8))^{1/2} \cdot 0,07094518 \cdot 1 = 2,265599 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

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

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

$$\frac{|p|}{[p]} + \frac{F_e}{[F]} + \frac{M}{[M]_{уст}} + \left( \frac{Q}{[Q]} \right)^2 = 0 / 0,01039163 + 2,265599 \cdot 10^4 / 7,540078 \cdot 10^5 + 6,69741 \cdot 10^3 / 1,661377 \cdot 10^5 + (1,313432 \cdot 10^4 / 1,972811 \cdot 10^5)^2 = 0,0747923$$

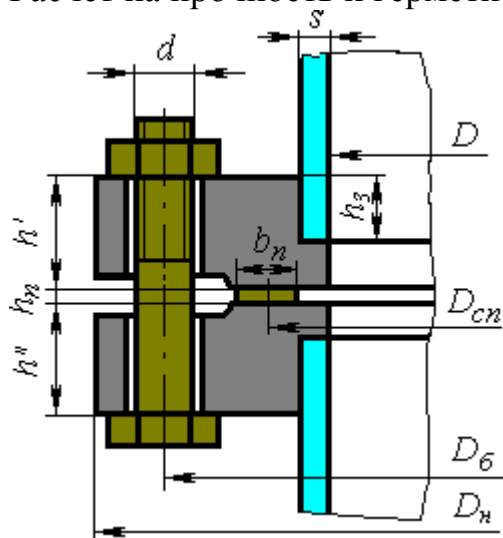
$$0,0747923 \leq 1,0$$

Заключение: **Условие устойчивости выполнено**

					<i>Лист</i>
					<i>54</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>	<i>XI.T.00.00.00.ПЗ</i>

## Фланцевое соединение

Расчёт на прочность и герметичность по РД 26-15-88



### Исходные данные

Тип фланцев: Плоские приварные  
 Исполнение: Плоские  
 Теплоизоляция: Нет  
 Диаметр болтовой окружности,  $D_б$ : 600 мм

#### Болты:

Материал: 35  
 Наружный диаметр,  $d$ : 20 мм  
 Количество,  $n$ : 24  
 Контроль затяжки: Нет

#### Прокладка:

Материал прокладки: Паронит по ГОСТ 481 при толщине не более 2 мм  
 Толщина,  $h_п$ : 2 мм  
 Средний диаметр,  $D_{сп}$ : 550,5 мм  
 Ширина,  $b_п$ : 12,5 мм

#### Данные первого фланца (кольца):

Материал фланца (кольца): 16ГС  
 Смежный элемент: Обечайка цилиндрическая №2  
 Материал смежного элемента: 16ГС  
 Внутренний диаметр фланца (кольца),  $D$ : 500 мм  
 Наружный диаметр фланца (кольца),  $D_н$ : 640 мм  
 Высота фланца (кольца),  $h$ : 35 мм  
 Толщина стенки смежного элемента: 4 мм  
 Сумма прибавок,  $s$  (задаётся в смежном элементе): 1,8 мм

#### Данные второго фланца (кольца):

Материал фланца (кольца): 16ГС  
 Смежный элемент: Обечайка цилиндрическая №3  
 Материал смежного элемента: 16ГС  
 Внутренний диаметр фланца (кольца),  $D$ : 500 мм  
 Наружный диаметр фланца (кольца),  $D_н$ : 640 мм  
 Высота фланца (кольца),  $h$ : 35 мм  
 Толщина стенки смежного элемента: 4 мм  
 Сумма прибавок,  $s$  (задаётся в смежном элементе): 1,8 мм

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

*XI.T.00.00.00.ПЗ*

Лист

55

## Расчёт в рабочих условиях

### Условия нагружения:

Расчётное осевое растягивающее усилие, F: 0 Н  
Расчётный изгибающий момент, M: 0 Н м  
Расчётная температура, T: 90 °С  
Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 0,72 МПа

### Результаты расчёта:

Расчётная температура элементов соединения (по табл. 1 РД 26–15–88):

Температура фланца (кольца),  $t_f$ : 86,4 °С  
Температура болтов (шпилек),  $t_b$ : 76,5 °С

### Допускаемые напряжения для болтов (шпилек)

Допускаемые напряжения для материала 35 при температуре 76,5 °С (рабочие условия):

$$[\sigma]_b = 127 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 35 при температуре 76,5 °С:

$$E_b = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Коэффициент линейного расширения для материала 35 при температуре 76,5 °С:

$$\alpha_b = 0,111 \cdot 10^{-4} \text{ 1/}^\circ\text{C}$$

Допускаемые напряжения для материала 35 при температуре 20 °С (рабочие условия):

$$[\sigma]_b^{20} = 130 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 35 при температуре 20 °С:

$$E_b^{20} = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

### Допускаемые напряжения для смежного элемента фланца 1 Обечайка цилиндрическая №2

Допускаемые напряжения для материала 16ГС при температуре  $t = 90$  °С (рабочие условия):

$$[\sigma]_{ш1} = 179 \text{ МПа}$$

Допускаемые напряжения для материала 16ГС при температуре  $t = 20$  °С (рабочие условия):

$$[\sigma]_{ш1}^{20} = 196 \text{ МПа}$$

### Допускаемые напряжения для смежного элемента фланца 2 Обечайка цилиндрическая №3

Допускаемые напряжения для материала 16ГС при температуре  $t = 90$  °С (рабочие условия):

$$[\sigma]_{ш2} = 179 \text{ МПа}$$

Допускаемые напряжения для материала 16ГС при температуре  $t = 20$  °С (рабочие условия):

$$[\sigma]_{ш2}^{20} = 196 \text{ МПа}$$

### Допускаемые напряжения для фланца (кольца) 1

Допускаемые напряжения для материала 16ГС при температуре 86,4 °С (рабочие условия):

$$[\sigma]_1 = \eta * \min\{R_e/n_T; R_m/n_B\} = 1 * \min(246,5/1,5; 394/2,4) = 164,1667 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 16ГС при температуре 86,4 °С:

$$E_1 = 1,9236 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Коэффициент линейного расширения для материала 16ГС при температуре 86,4 °С:

$$\alpha_1 = 0,1243 \cdot 10^{-4} \text{ 1/}^\circ\text{C}$$

Допускаемые напряжения для материала 16ГС при температуре 20 °С (рабочие условия):

$$[\sigma]_1^{20} = \eta * \min\{R_e^{20}/n_T; R_m^{20}/n_B\} = 1 * \min(280/1,5; 440/2,4) = 183,3333 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 16ГС при температуре 20 °С:

$$E_1^{20} = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

					ХИ. Т.00.00.00.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		56



## Допускаемые напряжения для фланца (кольца) 2

Допускаемые напряжения для материала 16ГС при температуре 86,4 °С (рабочие условия):

$$[\sigma]_2 = \eta \cdot \min\{R_e/n_T; R_m/n_B\} = 1 \cdot \min\{246,5/1,5; 394/2,4\} = 164,1667 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 16ГС при температуре 86,4 °С:

$$E_2 = 1,9236 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Коэффициент линейного расширения для материала 16ГС при температуре 86,4 °С:

$$\alpha_2 = 0,1243 \cdot 10^{-4} \text{ 1/}^\circ\text{C}$$

Допускаемые напряжения для материала 16ГС при температуре 20 °С (рабочие условия):

$$[\sigma]_2^{20} = \eta \cdot \min\{R_e^{20}/n_T; R_m^{20}/n_B\} = 1 \cdot \min\{280/1,5; 440/2,4\} = 183,3333 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 16ГС при температуре 20 °С:

$$E_2^{20} = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

## Расчётные параметры болтов (шпилек):

Рабочая длина болта (шпильки):

$$L_{\text{Б0}} = h^I + h^{II} + h_{\text{П}} = 35 + 35 + 2 = 72 \text{ мм}$$

Площадь сечения болта (по внутреннему диаметру резьбы):

$$f_{\text{Б}} = 0,225 \cdot 10^{-3} \text{ кв. м}$$

Эффективная длина болта:

$$L_{\text{Б}} = L_{\text{Б0}} + 0,28 \cdot d = 72 + 0,28 \cdot 20 = 77,6 \text{ мм}$$

Податливость болтов (п. 3.4):

$$y_{\text{Б}} = \frac{L_{\text{Б}}}{E_{\text{Б}}^{20} \cdot f_{\text{Б}} \cdot n} = \frac{77,6}{(2 \cdot 10^5 \cdot 0,225 \cdot 10^{-3} \cdot 24)} = 0,7185185 \cdot 10^{-7} \text{ мм/Н}$$

## Расчётные параметры первого фланца (п.3.6):

Эквивалентная толщина втулки (п.3.6.1):

$$s_3 = (s - c) = (4 - 1,8) = 2,2 \text{ мм}$$

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{(D + 2 \cdot c) \cdot s_3}} = \frac{35}{\sqrt{(500 + 2 \cdot 1,8) \cdot 2,2}} = 1,051511$$

$$\psi_1 = 1,28 \cdot \lg \frac{D_{\text{Н}}}{(D + 2 \cdot c)} = 1,28 \cdot \lg(640 / (500 + 2 \cdot 1,8)) = 0,1332406$$

$$j = \frac{h}{s_3} = 35 / 2,2 = 15,90909$$

$$\omega = \frac{1}{1 + 0,9 \cdot \lambda \cdot (1 + \psi_1 \cdot j^2)} = \frac{1}{1 + 0,9 \cdot 1,051511 \cdot (1 + 0,1332406 \cdot 15,90909^2)} = 0,02953289$$

$$\psi_T = \frac{D_{\text{Н}} + D + 2 \cdot c}{D_{\text{Н}} - D - 2 \cdot c} = \frac{640 + 500 + 2 \cdot 1,8}{640 - 500 - 2 \cdot 1,8} = 8,384164$$

Угловая податливость фланца (кольца) (п.3.6.3):

$$y_{\text{Ф}} = \frac{[1 - \omega \cdot (1 + 0,9 \cdot \lambda)] \cdot \psi_T}{E^{20} \cdot h^3} = \frac{[1 - 0,02953289 \cdot (1 + 0,9 \cdot 1,051511)] \cdot 8,384164}{(1,99 \cdot 10^5 \cdot 35^3)} = 0,5306584 \cdot 10^{-4} \text{ гр/Н м}$$

Угловая податливость фланца, нагруженного внешним изгибающим моментом (п.3.9):

$$y_{\text{ФМ}} = \left(\frac{\pi}{4}\right)^3 \cdot \frac{D_{\text{Б}}}{E^{20} \cdot D_{\text{Н}} \cdot h^3} = \frac{(3,141593/4)^3 \cdot 600}{(1,99 \cdot 10^5 \cdot 640 \cdot 35^3)} = 0,3050046 \cdot 10^{-5} \text{ гр/Н м}$$

Плечи моментов (п.3.10):

$$a = 0$$

$$b = 0,5 \cdot (D_{\text{Б}} - D_{\text{сп}}) = 0,5 \cdot (600 - 550,5) = 24,75 \text{ мм}$$

					Лист
					57
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ХИ. Т.00.00.00.ПЗ

$$e = 0,5 \cdot (D_{\text{сп}} - (D + 2 \cdot c) - s_3) = 0,5 \cdot (550,5 - (500 + 2 \cdot 1,8) - 2,2) = 22,35 \text{ мм}$$

Параметры первого и второго фланцев полностью совпадают, расчёт второго фланца не проводится

**Характеристики прокладки (по табл. 4 РД 26–15–88):**

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
Паронит по ГОСТ 481 при толщине не более 2 мм	2,5	20	130	0,9	$2 \cdot 10^3$

Эффективная ширина прокладки (п. 3.1):

$$b_0 = \quad = \quad 12,5 \text{ мм}$$

$$\text{Примечание: } \begin{cases} b_0 = b_{\pi} \\ b_0 = 3,8 \cdot \sqrt{b_{\pi}} \end{cases} \text{ при } b_{\pi} \leq 15,0 \text{ мм}$$

при  $b_{\pi} > 15,0 \text{ мм}$

Податливость прокладки (п. 3.3):

$$y_{\pi} = \frac{b_{\pi} \cdot K}{E_{\pi} \cdot \pi \cdot D_{\text{сп}} \cdot b_{\pi}} = 2 * 0,9 / (2 \cdot 10^3 * 3,141593 * 550,5 * 12,5) = 0,4163181 \cdot 10^{-7} \text{ мм/Н}$$

**Расчёт нагрузок (п. 5):**

Равнодействующая давления (п. 5.1):

$$Q_{\pi} = p \frac{\pi D_{\text{сп}}^2}{4} = 0,72 * 3,141593 * 550,5^2 / 4 = 1,713709 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Реакция прокладки в рабочих условиях (п. 5.2):

$$R_{\pi} = \pi D_{\text{сп}} b_0 m |p| = 3,141593 * 550,5 * 12,5 * 2,5 * 0,72 = 3,891255 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

$$\eta_t = y_{\pi} + y_{\epsilon} \frac{E_{\epsilon}^{20}}{E_{\epsilon}} + \left( y'_{\Phi} \frac{E_{\Phi}^{20}}{E_{\Phi}} + y''_{\Phi} \frac{E_{\Phi}^{20}}{E_{\Phi}} \right) b^2 = \frac{0,4163181 \cdot 10^{-7} + 0,7185185 \cdot 10^{-7} * 2 \cdot 10^5 / 2 \cdot 10^5 + (0,5306584 \cdot 10^{-4} * 1,99 \cdot 10^5 / 1,9236 \cdot 10^5 + 0,5306584 \cdot 10^{-4} * 1,99 \cdot 10^5 / 1,9236 \cdot 10^5) * 24,75^2}{1,99 \cdot 10^5 / 1,9236 \cdot 10^5} = 0,128733 \cdot 10^{-5} \text{ мм/Н}$$

Нагрузка от температурных деформаций (п. 5.3):

$$Q_t = \frac{1}{\eta_t} \left( \alpha'_{\Phi} \cdot h' \cdot (t_{\Phi} - 20^{\circ}\text{C}) + \alpha''_{\Phi} \cdot h'' \cdot (t_{\Phi} - 20^{\circ}\text{C}) - \alpha_{\epsilon} \cdot 1_{\epsilon 0} \cdot (t_{\epsilon} - 20^{\circ}\text{C}) \right) = \frac{1 / 0,128733 \cdot 10^{-5} * (0,1243 \cdot 10^{-4} * 35 * (86,4 - 20^{\circ}\text{C}) + 0,1243 \cdot 10^{-4} * 35 * (86,4 - 20^{\circ}\text{C}) - 0,111 \cdot 10^{-4} * 72 * (76,5 - 20^{\circ}\text{C}))}{9,803115 \cdot 10^3} = 9,803115 \cdot 10^3 \text{ Н}$$

$$\eta = y_{\pi} + y_{\epsilon} + y'_{\Phi} \cdot b'^2 + y''_{\Phi} \cdot b''2 = \frac{0,4163181 \cdot 10^{-7} + 0,7185185 \cdot 10^{-7} + 0,5306584 \cdot 10^{-4} * 24,75^2 + 0,5306584 \cdot 10^{-4} * 24,75^2}{0,5306584 \cdot 10^{-4} * 24,75^2} = 0,1248162 \cdot 10^{-5} \text{ мм/Н}$$

Коэффициенты жёсткости для фланцевого соединения, нагруженного внутренним давлением и внешней осевой силой (п. 4.1 с учётом изм. 1):

$$\alpha = \max \left\{ 1 - \frac{y_{\pi} - (y'_{\Phi} \cdot e' \cdot b' + y''_{\Phi} \cdot e'' \cdot b'')}{\eta}, 1,0 \right\} = \frac{\max(1 - (0,4163181 \cdot 10^{-7} - (0,5306584 \cdot 10^{-4} * 22,35 * 24,75 + 0,5306584 \cdot 10^{-4} * 22,35 * 24,75)) / 0,1248162 \cdot 10^{-5}; 1,0)}{1,787572} = 1,787572$$

$$\beta_M = \frac{y'_{\Phi M} b' e' \left( 1 - \frac{e'}{D_{\text{сп}}} \right) + y''_{\Phi M} b'' e'' \left( 1 - \frac{e''}{D_{\text{сп}}} \right) - y_{\pi} \left( \frac{D_{\epsilon}}{D_{\text{сп}}} \right)^2}{y_{\epsilon} + y_{\pi} \left( \frac{D_{\epsilon}}{D_{\text{сп}}} \right)^2 + y'_{\Phi M} b'^2 + y''_{\Phi M} b''2}$$

$$= [ 0,3050046 \cdot 10^{-5} * 24,75 * 22,35 * (1 - 22,35 / 550,5) + 0,3050046 \cdot 10^{-5} * 24,75 * 22,35 * (1 - 22,35 / 550,5) - 0,4163181 \cdot 10^{-7} * (600 /$$

									Лист
									58
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ХИ. Т.00.00.00.ПЗ				

$$= 0,03778052$$

Коэффициенты жёсткости для фланцевого соединения, нагруженного внешним изгибающим моментом (п.4.2):

$$\alpha_M = -(1 + \beta_M) = -(1 + 0,03778052) = (-1,037781)$$

Болтовая нагрузка  $P_6$  в условиях монтажа (п. 5.4):

$$P_6 = \max \left\{ \begin{array}{l} \alpha \cdot (Q_{\pi} + F) + R_{\pi} - Q_t + \left| \frac{4 \cdot \alpha_M \cdot M}{D_{\text{ст}}} \right| \\ 0,5 \cdot \pi \cdot D_{\text{ст}} \cdot b_0 \cdot q_{\text{обж}} \\ 0,4 \cdot [\sigma]_6^{20} \cdot n \cdot f_6 \end{array} \right\}$$

$$P_6 = \max \left\{ \begin{array}{l} 1,787572 \cdot (1,713709 \cdot 10^5 + 0) + 3,891255 \cdot 10^4 - 0 + |4 \cdot (-1,037781) \cdot 0 / 550,5| = 3,452503 \cdot 10^5 \\ 0,5 \cdot 3,141593 \cdot 550,5 \cdot 12,5 \cdot 20 = 2,161808 \cdot 10^5 = 3,452503 \cdot 10^5 \text{ Н} \\ 0,4 \cdot 130 \cdot 24 \cdot 0,225 \cdot 10^{-3} = 2,808 \cdot 10^5 \end{array} \right.$$

где  $F < 0$ , если усилие сжимающее;  $Q_t$  учитывается только при  $Q_t < 0$ ;

Приращение нагрузки в болтах (шпильках) в рабочих условиях (п. 5.5):

$$\Delta P_6 = (1 - \alpha) \cdot (Q_{\pi} + F) + Q_t + \frac{4 \beta_M M}{D_{\text{ст}}} = \frac{(1 - 1,787572) \cdot (1,713709 \cdot 10^5 + 0) + 9,803115 \cdot 10^3 + 4 \cdot 0,03778052 \cdot 0 / 550,5}{1} = (-1,251637 \cdot 10^5) \text{ Н}$$

**Расчёт болтов(шпилек) (п. 6):**

$$\sigma_{61} = \frac{P_6}{n \cdot f_6} \leq \xi \cdot [\sigma]_6^{20}$$

$$\sigma_{61} = \frac{P_6}{n \cdot f_6} = \frac{3,452503 \cdot 10^5}{(24 \cdot 0,225 \cdot 10^{-3})} = 63,93524 \text{ МПа}$$

$$\xi \cdot [\sigma]_6^{20} = 1,1 \cdot 130 = 143 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{62} = \frac{P_6 + \Delta P_6}{n \cdot f_6} \leq [\sigma]_6$$

$$\sigma_{62} = \frac{P_6 + \Delta P_6}{n \cdot f_6} = \frac{(3,452503 \cdot 10^5 + (-1,251637 \cdot 10^5))}{(24 \cdot 0,225 \cdot 10^{-3})} = 40,75677 \text{ МПа}$$

где  $\xi = 1,1 \dots 1,2$ , принято  $\xi = 1,1$ ;

$$[\sigma]_6 = 127 \text{ МПа}$$

63,93524 МПа  $\leq$  143 МПа, **Условие прочности выполнено**

40,75677 МПа  $\leq$  127 МПа, **Условие прочности выполнено**

**Условие прочности выполнено**

**Расчёт прокладки (п. 7):**

Условие прочности мягких прокладок:

$$q = \frac{P_6}{\pi \cdot D_{\text{ст}} \cdot b_{\pi}} \leq [q]$$

$$q = \frac{P_6}{\pi \cdot D_{\text{ст}} \cdot b_{\pi}} = \frac{3,452503 \cdot 10^5}{(3,141593 \cdot 550,5 \cdot 12,5)} = 15,97044 \text{ МПа}$$

$$[q] = 130 \text{ МПа}$$

**Условие работоспособности выполнено**

**Расчёт первого фланца (п. 8):**

$T = 1,809723$ , определяется по черт. 8

Изгибающий момент при затяжке:

$$M_{01} = P_6 \cdot b = 3,452503 \cdot 10^5 \cdot 24,75 = 8,544945 \cdot 10^3 \text{ Н м}$$

$$\sigma_1 = \frac{T \cdot \varpi \cdot M_{01}}{(D + 2 \cdot c) \cdot (s - c)^2} = \frac{1,809723 \cdot 0,02953289 \cdot 8,544945 \cdot 10^3}{((500 + 2 \cdot 1,8) \cdot (4 - 1,8))^2} = 187,3683 \text{ МПа}$$

Осевые напряжения при затяжке в обечайке (втулке) на наружной и внутренней поверхностях (п. 8.3):

$$\sigma_{21} = \sigma_1 = 187,3683 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{22} = -\sigma_1 = (-187,3683) \text{ МПа}$$

Окружные напряжения в обечайке (втулке) (п. 8.5):

$$\sigma_{23} = 0.3 \cdot \sigma_1 = 56,2105 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{24} = -0.3 \cdot \sigma_1 = (-56,2105) \text{ МПа}$$

Условие прочности в сечении  $s_0$ :

При затяжке:

$$\sigma_{s0} = \max \left\{ \begin{array}{l} \sqrt{\sigma_{21}^2 + \sigma_{23}^2 - \sigma_{21}\sigma_{23}} \\ \sqrt{\sigma_{22}^2 + \sigma_{24}^2 - \sigma_{22}\sigma_{24}} \end{array} \right\} \leq \min \left\{ \begin{array}{l} \left( 4.5 - 2.0 \frac{R_{\text{эф}}^{20}}{R_{\text{мф}}^{20}} \right) [\sigma]_{\text{ф}}^{20} \\ \left( 4.5 - 2.0 \frac{R_{\text{вн}}^{20}}{R_{\text{мн}}^{20}} \right) [\sigma]_{\text{н}}^{20} \end{array} \right\}$$

$$\sigma_{s0} = \max \left\{ \begin{array}{l} (187,3683^2 + 56,2105^2 - 187,3683 * 56,2105)^{1/2} = 166,5366 \text{ МПа} \\ ((-187,3683)^2 + (-56,2105)^2 - (-187,3683) * (-56,2105))^{1/2} = 166,5366 \text{ МПа} \end{array} \right\} = 166,5366 \text{ МПа}$$

$$\min \left\{ \begin{array}{l} \left( 4.5 - 2.0 \frac{R_{\text{эф}}^{20}}{R_{\text{мф}}^{20}} \right) [\sigma]_{\text{ф}}^{20} \\ \left( 4.5 - 2.0 \frac{R_{\text{вн}}^{20}}{R_{\text{мн}}^{20}} \right) [\sigma]_{\text{н}}^{20} \end{array} \right\} = \min \{ (4.5 - 2.0 * 280 / 440) * 183,3333 = 591,6667 \text{ МПа} \} = 591,6667 \text{ МПа}$$

$$(4.5 - 2.0 * 300 / 470) * 196 = 631,7872 \text{ МПа}$$

166,5366 МПа ≤ 591,6667 МПа, **Условие прочности выполнено**

$$\Delta\sigma_M = \frac{Q_{\pi} + \frac{4 \cdot M}{D_{\text{ст}}} + F}{\pi \cdot (D + 2 \cdot c) \cdot (s - c)} = (1,713709 \cdot 10^5 + 4 * 0 / 550,5 + 0) / (3,141593 * (500 + 2 * 1,8) * (4 - 1,8)) = 49,23554 \text{ МПа}$$

$$\Delta M_{01} = \Delta P_{\text{г}} \cdot b + \left( Q_{\pi} + \frac{4 \cdot M}{D_{\text{ст}}} + F \right) \cdot e = (-1,251637 \cdot 10^5) * 24,75 + (1,713709 \cdot 10^5 + 4 * 0 / 550,5 + 0) * 22,35 = 732,3364 \text{ Н м}$$

$$\Delta\sigma_1 = \frac{T \cdot \varpi \cdot \Delta M_{01}}{(D + 2 \cdot c) \cdot (s - c)^2} = 1,809723 * 0,02953289 * 732,3364 / ((500 + 2 * 1,8) * (4 - 1,8)^2) = 16,05823 \text{ МПа}$$

Приращения осевых напряжений (п. 8.4):

$$\Delta\sigma_{21} = \Delta\sigma_M + \Delta\sigma_1 = 49,23554 + 16,05823 = 65,29377 \text{ МПа}$$

$$\Delta\sigma_{22} = \Delta\sigma_M - \Delta\sigma_1 = 49,23554 - 16,05823 = 33,17732 \text{ МПа}$$

Приращения окружных напряжений (п. 8.6):

$$\Delta\sigma_{23} = \frac{p \cdot (D + 2 \cdot c)}{2 \cdot (s - c)} + 0.3 \cdot \Delta\sigma_1 = 0,72 * (500 + 2 * 1,8) / (2 * (4 - 1,8)) + 0.3 * 16,05823 = 87,22474 \text{ МПа}$$

$$\Delta\sigma_{24} = \frac{p \cdot (D + 2 \cdot c)}{2 \cdot (s - c)} - 0.3 \cdot \Delta\sigma_1 = 0,72 * (500 + 2 * 1,8) / (2 * (4 - 1,8)) - 0.3 * 16,05823 = 77,5898 \text{ МПа}$$

В рабочих условиях:

$$\sigma_{s0} = \max \left\{ \begin{array}{l} \sqrt{(\sigma_{21} + \Delta\sigma_{21})^2 + (\sigma_{23} + \Delta\sigma_{23})^2 - (\sigma_{21} + \Delta\sigma_{21})(\sigma_{23} + \Delta\sigma_{23})} \\ \sqrt{(\sigma_{22} + \Delta\sigma_{22})^2 + (\sigma_{24} + \Delta\sigma_{24})^2 - (\sigma_{22} + \Delta\sigma_{22})(\sigma_{24} + \Delta\sigma_{24})} \end{array} \right\} \leq \min \left\{ \begin{array}{l} \left( 4.5 - 2.0 \frac{R_{\text{эф}}}{R_{\text{мф}}} \right) [\sigma]_{\text{ф}} \\ \left( 4.5 - 2.0 \frac{R_{\text{вн}}}{R_{\text{мн}}} \right) [\sigma]_{\text{н}} \end{array} \right\}$$

$$\sigma_{s0} = \max \left\{ \begin{array}{l} ((187,3683 + 65,29377)^2 + (56,2105 + 87,22474)^2 - (187,3683 + 65,29377) * (56,2105 + 87,22474))^{1/2} = 219,4793 \text{ МПа} \\ ((-187,3683 + 33,17732)^2 + (-56,2105 + 77,5898)^2 - (-187,3683 + 33,17732) * (-56,2105 + 77,5898))^{1/2} = 219,4793 \text{ МПа} \end{array} \right\} = 219,4793 \text{ МПа}$$

					Лист
					60
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ХИ.Т.00.00.00.ПЗ

$$\left( (-187,3683) + 33,17732 \right)^2 + \left( (-56,2105) + 77,5898 \right)^2 - \left( (-187,3683) + 33,17732 \right) \cdot \left( (-56,2105) + 77,5898 \right)^{1/2} = 165,917 \text{ МПа}$$

$$\min \left\{ \begin{array}{l} \left( 4,5 - 2,0 \frac{R_{\sigma\Phi}}{R_{m\Phi}} \right) [\sigma]_{\Phi} \\ \left( 4,5 - 2,0 \frac{R_{\sigma\text{шп}}}{R_{m\text{шп}}} \right) [\sigma]_{\text{шп}} \end{array} \right\} (4,5 - 2,0 * 246,5 / 394) * 164,1667 = 533,3333 \text{ МПа} = 533,3333 \text{ МПа}$$

$$(4,5 - 2,0 * 271 / 432,5) * 179 = 581,1809 \text{ МПа}$$

219,4793 МПа ≤ 533,3333 МПа, **Условие прочности выполнено**  
**Условие прочности выполнено**

### Жёсткость фланца (п. 11):

Угол поворота фланца (кольца) при затяжке (п.8.1):

$$\theta = M_{01} \cdot \frac{[1 - \omega \cdot (1 + 0,9 \cdot \lambda)] \cdot \Psi_{\Gamma}}{E^{20} \cdot h^3} = \frac{8,544945 \cdot 10^3 * [1 - 0,02953289 * (1 + 0,9 * 1,051511)] * 8,384164}{(1,99 \cdot 10^5 * 35^3)} = 0,4534446 \text{ град}$$

Приращение угла поворота фланца (п.8.2):

$$\Delta\theta = \Delta M_{01} \cdot \frac{[1 - \omega \cdot (1 + 0,9 \cdot \lambda)] \cdot \Psi_{\Gamma}}{E \cdot h^3} = \frac{732,3364 * [1 - 0,02953289 * (1 + 0,9 * 1,051511)] * 8,384164}{(1,9236 \cdot 10^5 * 35^3)} = 0,04020351 \text{ град}$$

Допускаемый угол поворота для фланцев в рабочих условиях:  $[\theta] = 0,013 \text{ рад}$

Условие выполнения жесткости фланцев:

$$\theta + \Delta\theta \leq [\theta] = 0,4534446 + 0,04020351 = 0,4936482 \text{ градус} \leq [\theta] = 0,7448451 \text{ градус}$$

**Условие жёсткости выполнено**

### Расчёт второго фланца (п. 8):

Параметры первого и второго фланцев полностью совпадают, расчёт второго фланца не проводится

**Условие прочности выполнено**

### Жёсткость фланца (п. 11):

Параметры первого и второго фланцев полностью совпадают, расчёт второго фланца не проводится

### Расчёт в условиях испытаний (Гидроиспытания)

#### Условия нагружения:

Расчётное осевое растягивающее усилие, F: 0 Н  
 Расчётный изгибающий момент, M: 0 Н м  
 Температура испытаний, T: 20 °С  
 Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 0,72 МПа

### Результаты расчёта:

Расчётная температура элементов соединения (по табл. 1 РД 26–15–88):

Температура фланца (кольца),  $t_{\Phi}$ : 20 °С

Температура болтов (шпилек),  $t_{\text{б}}$ : 20 °С

### Допускаемые напряжения для болтов (шпилек)

Допускаемые напряжения для материала 35 при температуре 20 °С:

$$[\sigma]_{\sigma}^{20} = [\sigma]^{*1,3} = 169 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 35 при температуре 20 °С:

$$E_{\sigma}^{20} = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Коэффициент линейного расширения для материала 35 при температуре 20 °С:  
 $\alpha^{20}_6 = 0,111 \cdot 10^{-4} \text{ 1/}^\circ\text{C}$

### **Допускаемые напряжения для смежного элемента фланца 1 Обечайка цилиндрическая №2**

Допускаемые напряжения для материала 16ГС при температуре  $t = 20^\circ\text{C}$  (условия гидротестирования):

$$[\sigma]^{20}_{ш1} = \eta * R_{e/20} / n_T = 1 * 300 / 1,1 = 272,7273 \text{ МПа}$$

### **Допускаемые напряжения для смежного элемента фланца 2 Обечайка цилиндрическая №3**

Допускаемые напряжения для материала 16ГС при температуре  $t = 20^\circ\text{C}$  (условия гидротестирования):

$$[\sigma]^{20}_{ш2} = \eta * R_{e/20} / n_T = 1 * 300 / 1,1 = 272,7273 \text{ МПа}$$

### **Допускаемые напряжения для фланца (кольца) 1**

Допускаемые напряжения для материала 16ГС при температуре 20 °С (условия гидротестирования):

$$[\sigma]^{20}_1 = R_e^{20} / n_T = 280 / 1,5 = 186,6667 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 16ГС при температуре 20 °С:

$$E^{20}_1 = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Коэффициент линейного расширения для материала 16ГС при температуре 20 °С:

$$\alpha^{20}_1 = 0,116 \cdot 10^{-4} \text{ 1/}^\circ\text{C}$$

### **Допускаемые напряжения для фланца (кольца) 2**

Допускаемые напряжения для материала 16ГС при температуре 20 °С (условия гидротестирования):

$$[\sigma]^{20}_2 = R_e^{20} / n_T = 280 / 1,5 = 186,6667 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 16ГС при температуре 20 °С:

$$E^{20}_2 = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Коэффициент линейного расширения для материала 16ГС при температуре 20 °С:

$$\alpha^{20}_2 = 0,116 \cdot 10^{-4} \text{ 1/}^\circ\text{C}$$

### **Расчётные параметры болтов (шпилек):**

Рабочая длина болта (шпильки):

$$L_{Б0} = h^I + h^{II} + h_{\text{п}} = 35 + 35 + 2 = 72 \text{ мм}$$

Площадь сечения болта (по внутреннему диаметру резьбы):

$$f_{\text{б}} = 0,225 \cdot 10^{-3} \text{ кв. м}$$

Эффективная длина болта:

$$L_{\text{б}} = L_{\text{Б0}} + 0,28 \cdot d = 72 + 0,28 \cdot 20 = 77,6 \text{ мм}$$

Податливость болтов (п. 3.4):

$$y_{\text{б}} = \frac{L_{\text{б}}}{E_{\text{б}}^{20} \cdot f_{\text{б}} \cdot n} = 77,6 / (2 \cdot 10^5 * 0,225 \cdot 10^{-3} * 24) = 0,7185185 \cdot 10^{-7} \text{ мм/Н}$$

### **Расчётные параметры первого фланца (п.3.6):**

Эквивалентная толщина втулки (п.3.6.1):

$$s_3 = (s - c) = (4 - 1,8) = 2,2 \text{ мм}$$

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{(D + 2 \cdot c) \cdot s_3}} = 35 / ((500 + 2 \cdot 1,8) \cdot 2,2)^{1/2} = 1,051511$$

$$\psi_1 = 1,28 \cdot \lg \frac{D_H}{(D + 2 \cdot c)} = 1,28 \cdot \lg(640 / (500 + 2 \cdot 1,8)) = 0,1332406$$

$$j = \frac{h}{s_3} = 35 / 2,2 = 15,90909$$

$$\omega = \frac{1}{1 + 0,9 \cdot \lambda \cdot (1 + \psi_1 \cdot j^2)} = 1 / [1 + 0,9 \cdot 1,051511 \cdot (1 + 0,1332406 \cdot 15,90909^2)] = 0,02953289$$

$$\psi_r = \frac{D_H + D + 2 \cdot c}{D_H - D - 2 \cdot c} = (640 + 500 + 2 \cdot 1,8) / (640 - 500 - 2 \cdot 1,8) = 8,384164$$

Угловая податливость фланца (кольца) (п.3.6.3):

$$y_{\phi} = \frac{[1 - \omega \cdot (1 + 0,9 \cdot \lambda)] \cdot \psi_r}{E^{20} \cdot h^3} = \frac{[1 - 0,02953289 \cdot (1 + 0,9 \cdot 1,051511)] \cdot 8,384164}{(1,99 \cdot 10^5 \cdot 35^3)} = 0,5306584 \cdot 10^{-4} \text{ гр/Н м}$$

Угловая податливость фланца, нагруженного внешним изгибающим моментом (п.3.9):

$$y_{\phi M} = \left(\frac{\pi}{4}\right)^3 \cdot \frac{D_B}{E^{20} \cdot D_H \cdot h^3} = (3,141593 / 4)^3 \cdot 600 / (1,99 \cdot 10^5 \cdot 640 \cdot 35^3) = 0,3050046 \cdot 10^{-5} \text{ гр/Н м}$$

Плечи моментов (п.3.10):

$$a = 0$$

$$b = 0,5 \cdot (D_B - D_{\text{сп}}) = 0,5 \cdot (600 - 550,5) = 24,75 \text{ мм}$$

$$e = 0,5 \cdot (D_{\text{сп}} - (D + 2 \cdot c) - s_3) = 0,5 \cdot (550,5 - (500 + 2 \cdot 1,8) - 2,2) = 22,35 \text{ мм}$$

**Параметры первого и второго фланцев полностью совпадают, расчёт второго фланца не проводится**

**Характеристики прокладки (по табл. 4 РД 26–15–88):**

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
Паронит по ГОСТ 481 при толщине не более 2 мм	2,5	20	130	0,9	$2 \cdot 10^3$

Эффективная ширина прокладки (п. 3.1):

$$b_0 = 12,5 \text{ мм}$$

$$\text{Примечание: } \begin{cases} b_0 = b_{\text{п}} \\ b_0 = 3,8 \cdot \sqrt{b_{\text{п}}} \end{cases} \text{ при } b_{\text{п}} \leq 15,0 \text{ мм}$$

при  $b_{\text{п}} > 15,0 \text{ мм}$

Податливость прокладки (п. 3.3):

$$y_{\text{п}} = \frac{h_{\text{п}} \cdot K}{E_{\text{п}} \cdot \pi \cdot D_{\text{сп}} \cdot b_{\text{п}}} = 2 \cdot 0,9 / (2 \cdot 10^3 \cdot 3,141593 \cdot 550,5 \cdot 12,5) = 0,4163181 \cdot 10^{-7} \text{ мм/Н}$$

**Расчёт нагрузок (п. 5):**

Равнодействующая давления (п. 5.1):

$$Q_{\text{п}} = p \frac{\pi D_{\text{сп}}^2}{4} = 0,72 \cdot 3,141593 \cdot 550,5^2 / 4 = 1,713709 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Реакция прокладки в рабочих условиях (п. 5.2):

										Лист
										63
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ХИ. Т.00.00.00.ПЗ					

$$R_{\pi} = \pi D_{\text{ст}} b_0 m |p| = 3,141593 * 550,5 * 12,5 * 2,5 * 0,72 = 3,891255 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Нагрузка от температурных деформаций:  $Q_t = 0$  (в условиях испытаний)

$$\eta = y_{\pi} + y_{\xi} + y'_{\Phi} \cdot b'^2 + y''_{\Phi} \cdot b''^2 = \frac{0,4163181 \cdot 10^{-7} + 0,7185185 \cdot 10^{-7} + 0,5306584 \cdot 10^{-4} * 24,75^2 + 0,5306584 \cdot 10^{-4} * 24,75^2}{0,5306584 \cdot 10^{-4} * 24,75^2} = 0,1248162 \cdot 10^{-5} \text{ мм/Н}$$

Коэффициенты жёсткости для фланцевого соединения, нагруженного внутренним давлением и внешней осевой силой (п. 4.1 с учётом изм. 1):

$$\alpha = \max \left\{ 1 - \frac{y_{\pi} - (y'_{\Phi} \cdot e' \cdot b' + y''_{\Phi} \cdot e'' \cdot b'')}{\eta}; 1,0 \right\} = \max \{ 1 - (0,4163181 \cdot 10^{-7} - (0,5306584 \cdot 10^{-4} * 22,35 * 24,75 + 0,5306584 \cdot 10^{-4} * 22,35 * 24,75)) / 0,1248162 \cdot 10^{-5}; 1,0 \} = 1,787572$$

$$\beta_M = \frac{y'_{\Phi M} b' e' \left( 1 - \frac{e'}{D_{\text{ст}}} \right) + y''_{\Phi M} b'' e'' \left( 1 - \frac{e''}{D_{\text{ст}}} \right) - y_{\pi} \left( \frac{D_{\xi}}{D_{\text{ст}}} \right)^2}{y_{\xi} + y_{\pi} \left( \frac{D_{\xi}}{D_{\text{ст}}} \right)^2 + y'_{\Phi M} b'^2 + y''_{\Phi M} b''^2} = \frac{[0,3050046 \cdot 10^{-5} * 24,75 * 22,35 * (1 - 22,35 / 550,5) + 0,3050046 \cdot 10^{-5} * 24,75 * 22,35 * (1 - 22,35 / 550,5)] - 0,4163181 \cdot 10^{-7} * (600 / 550,5)^2}{[0,7185185 \cdot 10^{-7} + 0,4163181 \cdot 10^{-7} * (600 / 550,5)^2 + 0,3050046 \cdot 10^{-5} * 24,75^2 + 0,3050046 \cdot 10^{-5} * 24,75^2]} = 0,03778052$$

Коэффициенты жёсткости для фланцевого соединения, нагруженного внешним изгибающим моментом (п.4.2):

$$\alpha_M = -(1 + \beta_M) = -(1 + 0,03778052) = (-1,037781)$$

Болтовая нагрузка  $P_{\xi}$  в условиях монтажа (п. 5.4):

$$P_{\xi} = \max \left\{ \begin{array}{l} \alpha \cdot (Q_{\pi} + F) + R_{\pi} - Q_t + \left| \frac{4 \cdot \alpha_M \cdot M}{D_{\text{ст}}} \right| \\ 0,5 \cdot \pi \cdot D_{\text{ст}} \cdot b_0 \cdot q_{\text{обж}} \\ 0,4 \cdot [\sigma]_{\xi}^{20} \cdot n \cdot f_{\xi} \end{array} \right\} = \max \left\{ \begin{array}{l} 1,787572 * (1,713709 \cdot 10^5 + 0) + 3,891255 \cdot 10^4 - 0 + |4 * (-1,037781) * 0 / 550,5| = 3,452503 \cdot 10^5 \\ 0,5 * 3,141593 * 550,5 * 12,5 * 20 = 2,161808 \cdot 10^5 \\ 0,4 * 169 * 24 * 0,225 \cdot 10^{-3} = 3,6504 \cdot 10^5 \end{array} \right\} = 3,6504 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

где  $F < 0$ , если усилие сжимающее;  $Q_t$  учитывается только при  $Q_t < 0$ ;

Приращение нагрузки в болтах (шпильках) в рабочих условиях (п. 5.5):

$$\Delta P_{\xi} = (1 - \alpha)(Q_{\pi} + F) + Q_t + \frac{4\beta_M M}{D_{\text{ст}}} = \frac{(1 - 1,787572) * (1,713709 \cdot 10^5 + 0) + 0 + 4 * 0,03778052 * 0}{550,5} = (-1,349669 \cdot 10^5) \text{ Н}$$

**Расчёт болтов(шпилек) (п. 6):**

$$\sigma_{\xi 1} = \frac{P_{\xi}}{n \cdot f_{\xi}} \leq \xi \cdot [\sigma]_{\xi}^{20}$$

$$\sigma_{\xi 1} = \frac{P_{\xi}}{n \cdot f_{\xi}} = \frac{3,6504 \cdot 10^5}{24 * 0,225 \cdot 10^{-3}} = 67,6 \text{ МПа}$$

$$\xi \cdot [\sigma]_{\xi}^{20} = 1,1 * 169 = 185,9 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{\xi 2} = \frac{P_{\xi} + \Delta P_{\xi}}{n \cdot f_{\xi}} \leq [\sigma]_{\xi}$$

$$\sigma_{\xi 2} = \frac{P_{\xi} + \Delta P_{\xi}}{n \cdot f_{\xi}} = \frac{(3,6504 \cdot 10^5 + (-1,349669 \cdot 10^5))}{24 * 0,225 \cdot 10^{-3}} = 42,60614 \text{ МПа}$$

где  $\xi = 1,1 \dots 1,2$ , принято  $\xi = 1,1$ ;

$$[\sigma]_{\xi} = 169 \text{ МПа}$$

67,6 МПа ≤ 185,9 МПа, **Условие прочности выполнено**

42,60614 МПа ≤ 169 МПа, **Условие прочности выполнено**

**Условие прочности выполнено**

**Расчёт прокладки (п. 7):**

										Лист
										64
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ХИ.Т.00.00.00.ПЗ					





$$\Delta\sigma_{22} = \Delta\sigma_M - \Delta\sigma_1 = 49,23554 - 10,73805 = 38,4975 \text{ МПа}$$

Приращения окружных напряжений (п. 8.6):

$$\Delta\sigma_{23} = \frac{p \cdot (D + 2 \cdot c)}{2 \cdot (s - c)} + 0,3 \cdot \Delta\sigma_1 = 0,72 \cdot (500 + 2 \cdot 1,8) / (2 \cdot (4 - 1,8)) + 0,3 \cdot 10,73805 = 85,62869 \text{ МПа}$$

$$\Delta\sigma_{24} = \frac{p \cdot (D + 2 \cdot c)}{2 \cdot (s - c)} - 0,3 \cdot \Delta\sigma_1 = 0,72 \cdot (500 + 2 \cdot 1,8) / (2 \cdot (4 - 1,8)) - 0,3 \cdot 10,73805 = 79,18586 \text{ МПа}$$

В условиях испытаний:

$$\sigma_{s0} = \max \left\{ \begin{array}{l} \sqrt{(\sigma_{21} + \Delta\sigma_{21})^2 + (\sigma_{23} + \Delta\sigma_{23})^2} - (\sigma_{21} + \Delta\sigma_{21})(\sigma_{23} + \Delta\sigma_{23}) \\ \sqrt{(\sigma_{22} + \Delta\sigma_{22})^2 + (\sigma_{24} + \Delta\sigma_{24})^2} - (\sigma_{22} + \Delta\sigma_{22})(\sigma_{24} + \Delta\sigma_{24}) \end{array} \right\} \leq \min \left\{ \begin{array}{l} \left( 6,0 - 2,7 \frac{R_{\text{эф}}^{20}}{R_{\text{мф}}^{20}} \right) [\sigma]_{\text{ф}}^{20} \\ \left( 6,0 - 2,7 \frac{R_{\text{эф}}^{20}}{R_{\text{мф}}^{20}} \right) [\sigma]_{\text{нр}}^{20} \end{array} \right\}$$

$$\sigma_{s0} = \max \left\{ \begin{array}{l} ((198,1083 + 59,97359)^2 + (59,43248 + 85,62869)^2 - (198,1083 + 59,97359) \cdot (59,43248 + 85,62869))^{1/2} = 224,0789 \text{ МПа} \\ ((-198,1083) + 38,4975)^2 + ((-59,43248) + 79,18586)^2 - ((-198,1083) + 38,4975) \cdot ((-59,43248) + 79,18586))^{1/2} = 170,3486 \text{ МПа} \end{array} \right\} = 224,0789 \text{ МПа}$$

$$\min \left\{ \begin{array}{l} \left( 6,0 - 2,7 \frac{R_{\text{эф}}^{20}}{R_{\text{мф}}^{20}} \right) [\sigma]_{\text{ф}}^{20} \\ \left( 6,0 - 2,7 \frac{R_{\text{эф}}^{20}}{R_{\text{мф}}^{20}} \right) [\sigma]_{\text{нр}}^{20} \end{array} \right\} = \min \left\{ \begin{array}{l} (6,0 - 2,7 \cdot 280 / 440) \cdot 186,6667 = 799,2727 \text{ МПа} \\ (6,0 - 2,7 \cdot 300 / 470) \cdot 272,7273 = 1,166344 \cdot 10^3 \text{ МПа} \end{array} \right\} = 799,2727 \text{ МПа}$$

224,0789 МПа ≤ 799,2727 МПа, **Условие прочности выполнено**

**Условие прочности выполнено**

### Жёсткость фланца (п. 11):

Угол поворота фланца (кольца) при затяжке (п.8.1):

$$\theta = M_{01} \cdot \frac{[1 - \omega \cdot (1 + 0,9 \cdot \lambda)] \cdot \Psi_T}{E^{20} \cdot h^3} = \frac{9,03474 \cdot 10^3 \cdot [1 - 0,02953289 \cdot (1 + 0,9 \cdot 1,051511)] \cdot 8,384164}{(1,99 \cdot 10^5 \cdot 35^3)} = 0,479436 \text{ град}$$

Приращение угла поворота фланца (п.8.2):

$$\Delta\theta = \Delta M_{01} \cdot \frac{[1 - \omega \cdot (1 + 0,9 \cdot \lambda)] \cdot \Psi_T}{E \cdot h^3} = \frac{489,7093 \cdot [1 - 0,02953289 \cdot (1 + 0,9 \cdot 1,051511)] \cdot 8,384164}{(1,99 \cdot 10^5 \cdot 35^3)} = 0,02598684 \text{ град}$$

Допускаемый угол поворота для фланцев в условиях испытаний:  $[\theta] = 0,017 \text{ рад}$

Условие выполнения жесткости фланцев:

$$\theta + \Delta\theta \leq [\theta] = 0,479436 + 0,02598684 = 0,5054229 \text{ градус} \leq [\theta] = 0,9740283 \text{ градус}$$

**Условие жёсткости выполнено**

### Расчёт второго фланца (п. 8):

Параметры первого и второго фланцев полностью совпадают, расчёт второго фланца не проводится

**Условие прочности выполнено**

### Жёсткость фланца (п. 11):

									Лист
									66
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ХИ. Т.00.00.00.ПЗ				

## 4 Монтаж та ремонт аппарата

### 4.1 Монтаж аппарата [13, 14]

Монтажные работы являются составной частью общего процесса строительства предприятия или одного из его объектов. Монтаж оборудования на химических и нефтехимических заводах производится как при строительстве новых объектов, так и при реконструкции и ремонте действующих. В последних двух случаях монтажу предшествует демонтаж оборудования.

Монтажные площадки оснащают необходимыми грузоподъемными механизмами и приспособлениями. Это чаще всего канаты, тросы, стропы, блоки, полиспасты, различные тали и лебедки, а также грузоподъемные машины и механизмы. Такелажные средства должны быть простыми в изготовлении, удобными для транспортирования, монтажа, перестановки и демонтажа и, конечно же, безопасными в работе.

Монтаж теплообменных аппаратов должен, как правило, производиться в максимально собранном виде с установленными узлами трубопроводов и металлоконструкциями каркасов. До установки в проектное положение аппарат подвергают гидравлическому испытанию на прочность. При этом отдельно испытывают межтрубное (при снятых крышках) и трубное пространство.

Монтаж, пуск, эксплуатация и ремонт испарителя должны производиться с соблюдением всех правил безопасности, установленных для отдельных видов работ, общих правил безопасности и пожарной безопасности, изложенных в соответствующих инструкциях, действующих на данном предприятии и в соответствии с действующими строительными нормами и правилами.

К корпусу аппарата приваривают две опоры, расстояние между которыми соответствует нормам. Для установки теплообменника на уже существующий фундамент расстояние между опорами можно изменить в небольших пределах. Между корпусом и опорами должны помещаться подкладки из листовой стали, предотвращающие вмятины на корпусе.

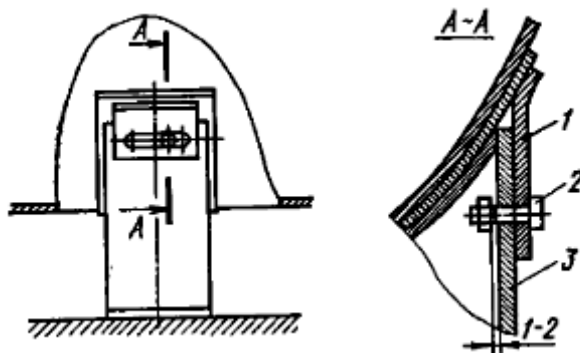
В проектное положение теплообменник устанавливают с помощью самоходного крана.

					ХИ.Т.00.00.00.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		67

К трубопроводной обвязке приступают после окончательной проверки положения корпуса и закрепления болтов, соединяющих его опоры с постаментом. Положение теплообменника выверяют уровнем, подкладывая, если это необходимо, под опорные плоскости стальные планки.

Монтируемые теплообменники должны быть опрессованы на пробное давление на заводе-изготовителе, поэтому на монтажной площадке их отдельно не опрессовывают, ограничиваясь проверкой общей системы теплообмена вместе с трубопроводной обвязкой после завершения монтажных работ.

При монтаже кожухотрубчатых теплообменников необходимо обращать особое внимание на прилегание лап аппаратов к опорным конструкциям (рис. 4.1). Скользящие опоры смазывают при монтаже графитовой смазкой. Болты в скользящей лапе 1 должны иметь зазор в овальном отверстии опоры 3 в направлении температурного удлинения аппарата, а гайки не должны быть затянуты. Одна из опор аппарата должна быть подвижной, для компенсации температурных деформаций корпуса. Неподвижную опору обычно устанавливают со стороны неподвижной трубной решетки, закрепляют намертво; гайки болтов подвижной опоры, имеющие овальные вырезы, не затягивают на 1 – 1,5 мм, но фиксируют контргайками.



1 – скользящая лапа; 2 – болт; 3 – опора

Рисунок 4.1 – Сборка скользящей опоры

Все болтовые соединения затянуть с использованием стандартных ключей, без применения удлинителей. Перед затяжкой гаек произвести тщательный осмотр привалочных поверхностей фланцев: риски, забоины и др. дефекты на

этих поверхностях не допускаются. Необходимо проверить размеры и состояние прокладок на соответствие их размерам привалочных поверхностей стыкуемых фланцев. Далее проверить правильность установки прокладок, убедиться в наличии полного комплекта шпилек в отверстиях фланцев и в том, что прокладки вошли в пазы, предназначенные для них. Неполный комплект шпилек или перекос фланцев не допускается.

Все выявленные дефекты в процессе монтажа и методы их устранения должны быть зарегистрированы в паспорте испарителя.

Выполнить подсоединение испарителя ко всем необходимым коммуникациям и арматуре. Очистить от грязи и посторонних предметов все подводящие и отводящие трубопроводы перед присоединением к аппарату.

#### 4.2 Ремонт аппарата [13, 14]

Испаритель, подлежащий вскрытию для ремонта и очистки, должен быть остановлен, освобожден от продукта и заглушен от работающих аппаратов, пропарен и продут азотом. В испарителе должно быть давление атмосферное, температура снижена до нормальной, взрыво- и пожароопасная среда отсутствовать.

В некоторых случаях пропарку и промывку чередуют несколько раз. Промывка водой способствует более быстрому остыванию испарителя. Нельзя приступать к ремонтным работам, если температура промывной воды превышает 50°C.

Пропаренный и промытый теплообменник отсоединяют от всех аппаратов и коммуникаций глухими заглушками, устанавливаемыми во фланцевых соединениях штуцеров. Установку каждой заглушки и последующее ее снятие регистрируют в специальном журнале.

С целью сокращения продолжительности ремонтных работ еще при промывке испарителя водой отворачивают часть болтов на тех люках, которые будут вскрываться, не нарушая при этом герметичности.

					<i>ХИ. Т.00.00.00.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		69

После открывания люка аппарат некоторое время проветривается в результате естественной конвекции воздуха. После окончания проветривания нужно провести анализ проб воздуха, взятых с аппарата. К работам внутри испарителя разрешается приступать только тогда, когда анализ покажет, что концентрация вредных газов в нем не превышает предельно допустимых санитарных норм.

Далее необходимо выполнить тщательный наружный и внутренний осмотр аппарата для выявления возможных дефектов, образовавшихся в процессе эксплуатации (механические повреждения, трещины, коррозия и др.). При необходимости осмотра всей поверхности корпуса разбирают внутренние устройства или их часть.

Чистка трубного пространства должна производиться в соответствии с действующей инструкцией на предприятии, эксплуатирующем испаритель.

Основными конструктивными недостатками теплообменных аппаратов являются следующие:

- 1) большая трудоемкость разборки-сборки аппарата при чистке и замене трубного пучка;
- 2) малая надежность вальцовочных соединений трубок с трубной доской;
- 3) сложность уплотнения крышкой трубной доски плавающей головки.

Отказы теплообменников происходят в основном из-за пропуска продукта через вальцовочные соединения и через уплотнение крышки плавающей головки и из-за коррозии труб трубного пучка.

Наиболее трудоемкими операциями при ремонте теплообменной аппаратуры являются:

- 1) монтаж и демонтаж резьбовых соединений, очистка теплообменной аппаратуры;
- 2) извлечение трубных пучков, ремонт и изготовление трубных пучков и их установка;
- 3) испытание теплообменников.

Снижение трудоемкости работ по монтажу и демонтажу резьбовых соединений достигается применением пневматических и гидравлических

					<i>ХИ. Т.00.00.00.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		70

гайковертов. После разбалчивания снимается крышка аппарата. Уменьшение трудозатрат на опускание и подъем тяжелой крышки обеспечивается изготовлением поворотных кронштейнов, которые позволяют после разбалчивания отвести в сторону крышку и распределительную головку. Извлекать трубные пучки можно только из теплообменников с плавающей головкой.

Очистка труб от отложений включает в себя обработку как внутренних, так и наружных поверхностей. Используются следующие методы очистки:

- 1) химические;
- 2) абразивные (для нерастворимых отложений);
- 3) специальные.

Химическая очистка осуществляется без вскрытия и разборки теплообменника. Для очистки от накипи применяют 5—15% раствор соляной кислоты с добавками ингибиторов. Для очистки от органических отложений используются углеводородные растворители. Очистка от твердых отложений оказывается эффективной при заполнении теплообменника на сутки 5% раствором соляной кислоты с добавкой жидкого стекла. Твердый осадок разрыхляется в этом растворе и затем легко смывается водой.

Абразивные методы очистки подразделяются на механический, гидropневматический, гидромеханический (струей воды высокого давления) и пескоструйный.

Механическая очистка проводится при помощи шомполов, сверл, щеток, шарошек, резцов, буров с подачей воды или воздуха для удаления продуктов очистки. Простейшим приспособлением является стальной пруток с ершом из стальной проволоки, приваренным к прутку. Часто при механическом способе чистка осуществляется с помощью приводных или ручных инструментов. Крышки теплообменника при этом снимаются. Время очистки одной трубы равно 10—15 с. Установки обычно изготавливаются передвижными. Широкий диапазон изменения давления (от 15 до 70 МПа) дает возможность удалять отложения практически любой твердости. К специальным методам очистки относится ультразвуковой. Ультразвуковые преобразователи через посредство головок с

										<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>	<i>ХИ. Т. 00. 00. 00. ПЗ</i>					<i>71</i>

вибраторами, устанавливаемыми в жидкости (воде) внутри очищаемого объема, позволяют полностью удалить твердые отложения, разрушаемые под действием ультразвуковых колебаний и вымываемые звукопередающей средой.

При ремонте трубного пучка допускается установка пробок на 15% трубок в каждом потоке пучка. При выходе из строя более 15% трубок все они заменяются полностью. Выбор материала трубок проводится с учетом характеристики среды, ее параметров и в соответствии с действующими нормами. Применение бывших в употреблении трубок допускается, если они потеряли вследствие износа не более 30% первоначального веса.

Завальцованные трубки, не выступающие над решеткой, при замене отрезают ножовкой или специальным приспособлением за трубной решеткой. Трубки, выступающие над трубной решеткой, отрезают головкой с резцом. Оставшиеся в гнездах решеток концы трубок сплющивают и выбивают.

Удаление дефектных приваренных труб осуществляется вырубкой сварного кольцевого шва вручную или срезанием торца трубы и валикового шва специальной фрезой с приводом от гибкого вала или переносной дрели. Вставляемые новые трубки отрезают по длине трубного пучка с прибавкой 8—10 мм длины. Концы трубок зачищают до металлического блеска на длину, равную толщине решетки с прибавкой 10 мм на сторону. В трубной решетке все отверстия зачищают от заусенцев, ржавчины и грязи. Наличие продольных рисок в отверстиях трубной решетки не допускается. Перед установкой трубок отверстия в решетке продувают воздухом и насухо протирают. Зазор между наружным диаметром трубки и отверстием в решетке не должен превышать 1,5% диаметра трубки.

В трубных решетках концы трубок крепятся развальцовкой. При этом отверстия под развальцовку обрабатываются не ниже седьмого класса шероховатости. Концы трубок должны выступать на 3—5 мм у наружного торца каждой решетки и быть отбортованными. Ввиду того, что трубки при развальцовке удлиняются, сначала развальцовывают все концы трубок в одной решетке, а потом в другой. При этом вальцуют четыре трубки крест-на крест, затем все трубки по периметру и далее остальные.

					<i>ХИ. Т.00.00.00.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		72



Дефектные штуцера и трубные решетки при достижении максимальных величин износа и прогиба заменяются.

Свищи и трещины устраняются путем заварки или постановкой накладок с предварительным удалением дефектного участка.

При помощи цветной дефектоскопии определяют протяженность и положение концов трещин, обнаруженных в корпусе. Эти концы до заварки засверливают сверлами диаметром 3—4 мм. Несквозные трещины глубиной не более 0,4 толщины стенки разделяются под заварку односторонней вырубкой на максимальную глубину трещины со снятием кромок под углом 50—60°. При трещине более 100мм сварку проводят обратноступенчатым методом. Сквозные и несквозные трещины глубиной более 0,4 толщины стенки разделяют на всю толщину вырубкой зубилом или газорезкой. При появлении гнездообразных трещин поврежденные места вырезаются и закрываются заплатами без острых углов. Заплаты ввариваются заподлицо с основным металлом. Площадь заплата не должна превышать площади листа аппарата.

При наличии повреждений наружной поверхности (вмятин, коррозионных разрушений и др.) необходимо удалить дефектный металл шлифованием. Надежность ликвидации поверхностных дефектов контролируют магнитной или ультразвуковой дефектоскопией. Допускается глубина повреждения в пределах 10-20 % толщины стенки в зависимости от размеров повреждения.

Все уплотнительные поверхности следует контролировать магнитной или ультразвуковой дефектоскопией на отсутствие трещин.

После ремонта испарителя его подвергают гидравлическим или пневматическим испытаниям.

					<i>ХИ. Т.00.00.00.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		73

## 5 Охрана труда

### Молниезащита. Методика расчета [15, 16]

Система мероприятий, направленных на нейтрализацию атмосферного электричества, называется **молниезащитой**.

Сила тока в канале молнии достигает 200 тыс. ампер, а напряжение 1 млрд. вольт. При переходе на объект потенциал вследствие потерь снижается до 30-50 млн. вольт. Длина искры молнии достигает сотен и тысяч метров. Время существования искры молнии составляет от 0,1 до 1 сек. Температура канала может достигать 6000 – 10000<sup>0</sup>С.

Различают первичный (1) и вторичный (2) проявления молнии: 1 – прямой удар; 2 – проявление электростатической и электромагнитной индукции.

Прямой удар может разрушить здания, сооружения и оборудования в результате мгновенного нагрева воздуха, резкого его расширения и ударной волны, а также может вызвать зажигания горючих веществ и материалов.

Здания и сооружения защищаются от удара молнии в зависимости от:

- 1) назначения;
- 2) интенсивности грозовой деятельности в районе их местонахождения;
- 3) от предполагаемого количества поражений молнией в год в соответствии с категориями устройства молниезащиты и типа зоны защиты.

Интенсивность грозовой деятельности (часов в год) определяется по специальной карте или на основании данных метеостанций. Наша область относится к местности, где наблюдается 60-80 часов в год грозовой деятельности.

Среднегодовое число ударов молнии на 1 км<sup>2</sup> земной поверхности в месте расположения зданий n определяется по таблице (для Сумской области n=9).

Ожидаемое количество N поражений молнией в год зданий и сооружений, не оборудованных молниезащитой определяется по формуле:

$$N = (B + 6 \cdot h_x) \cdot (L + 6 \cdot h_x) \cdot n \cdot 10^{-6},$$

					<i>ХИ. Т.00.00.00.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		74

где  $B$  – ширина защищаемого объекта, м;

$L$  – длина защищаемого объекта, м;

$h_x$  – высота объекта по его боковым сторонам, м;

$n$  – среднее число поражений молнией 1 кв.км. земной поверхности в год.

Производственные, жилые и общественные здания и сооружения в зависимости от их назначения, а также интенсивности грозовой деятельности в районе их местонахождения выделены в категории по степени устройства молниезащиты. Под зоной защиты молниеотвода понимают часть пространства, внутри которого здание или сооружение защищено от прямых ударов молнии с определенной степенью надежности.

Различают следующие зоны защиты:

1) тип А – степень надежности 99,5% и выше;

2) тип Б – степень надежности 95% и выше.

В практике для защиты зданий и сооружений от прямых ударов молнии наибольшее распространение получили стержневые и тросовые молниеотводы.

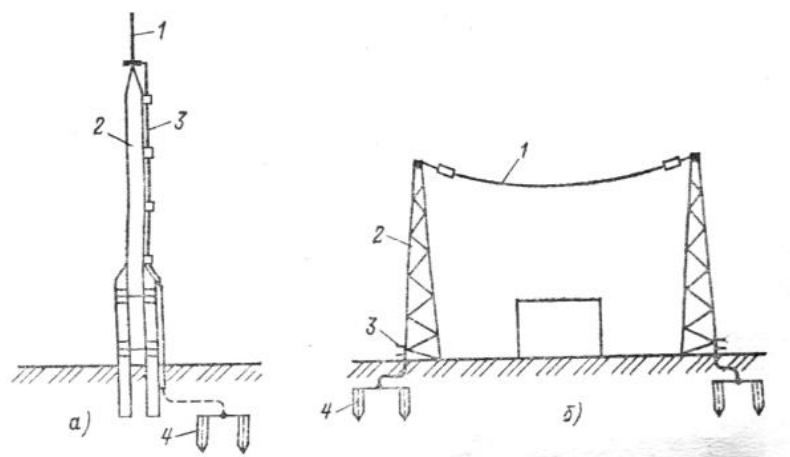


Рисунок 5.1 – Конструкция стержневого (а) и тросового (б) молниеотводов

1 – молниеприемник, непосредственно принимающий прямой удар молнии;

2 – несущая конструкция, предназначенная для установки молниеотвода;

3 – токоотвод, обеспечивающий отвод молнии в землю;

4 – заземлитель, отводящий ток молнии в землю.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ХИ.Т.00.00.00.ПЗ

Лист

75

**Стержневой** молниеприемник: пруток и водогазопроводные трубы.

**Тросовый** молниеприемник: стальной оцинкованный спиральный канат марки ТАК КАК сечением 48,26 кв.мм.

**Токоотвод:** круглая сталь и стальной канат диаметром 5-6 мм или полосовая сталь с площадью поперечного сечения 24 и 48 кв.мм.

**Несущая конструкция:**

- 1) **древесина** – защита сельскохозяйственных объектов (8-20 м);
- 2) **железобетон** – любые объекты (8-20 м);
- 3) **металл** – высокие, протяженные объекты (20-30 м).

Наибольшая оптимальная высота несущих конструкций не превышает 45-50 м.

В зависимости от особенностей конструкции защищаемого объекта и условий его размещения молниеотводы разделяют на **одиночные, двойные и многократные**. Многократные располагаются не на одной прямой.

Тип, количество и взаимное расположение молниеотводов определяют геометрическую форму зоны защиты.

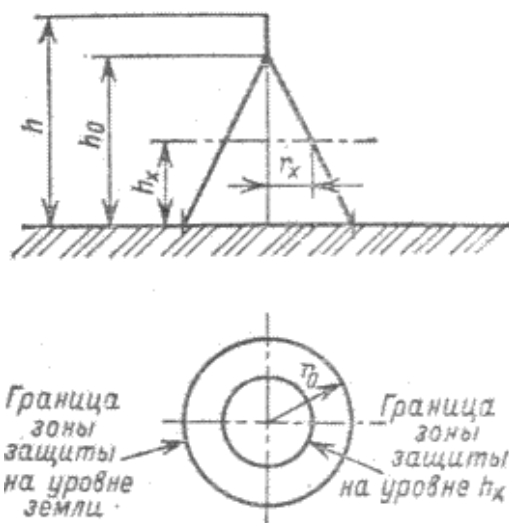


Рисунок 5.2 – Зона защиты одиночного стержневого молниетотода высотой менее 150 м представляет собой конус, вершина которого находится на высоте  $h_0$

Радиус зон защиты одиночных стержневых молниеотводов и высоту расположения  $h_0$  минимальной зоны определяют по следующим формулам:

для зоны А

$$r_0 = (1,1 - 0,002 \cdot h) \cdot h;$$

$$r_x = (1,1 - 0,002 \cdot h) \cdot \left( h - \frac{h_x}{0,85} \right);$$

$$h_0 = 0,85 \cdot h$$

для зоны Б

$$r_0 = 1,5 \cdot h;$$

$$r_x = 1,5 \cdot \left( h - \frac{h_x}{0,92} \right);$$

$$h_0 = 0,92 \cdot h$$

### Одиночный тросовый молниеотвод.

При известной высоте опор  $h_{оп}$  высоту стального троса сечением 35-50 кв.мм.

В точке наибольшего провеса определяют:

- при длине пролета  $a < 120$  м –  $h = h_{оп} - 2$ ;
- при длине пролета  $a = 120-150$  м –  $h = h_{оп} - 3$ .

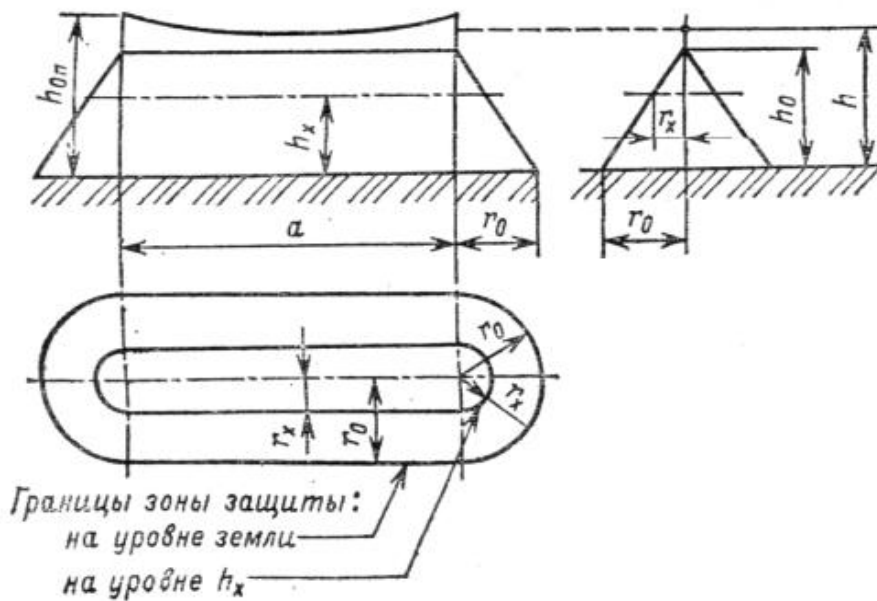


Рисунок 5.3 – Зона защиты одиночного тросового молниеотвода

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ХИ.Т.00.00.00.ПЗ

Лист

77

Параметры зоны защиты одиночных тросовых молниеотводов определяют по формулам:

для зоны А

$$r_0 = (1,35 - 0,0025 \cdot h) \cdot h;$$

$$r_x = (1,35 - 0,0025) \cdot \left( h - \frac{h_x}{0,85} \right);$$

$$h_0 = 0,85 \cdot h$$

для зоны Б

$$r_0 = 1,7 \cdot h;$$

$$r_x = 1,7 \cdot \left( h - \frac{h_x}{0,92} \right);$$

$$h_0 = 0,92 \cdot h$$

## Список использованных источников

1. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А. Г. Касаткин. – М. : Химия, 1973. – 752 с.
2. Вихман Г. Л. Расчет и конструирование аппаратуры нефтеперерабатывающих заводов. – Изд. 2-е, перераб. и доп. / Г. Л. Вихман, Н. Ф. Бабицкий. – М., 1965. – 904 с.
3. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра / укладачі: Р. О. Острога, М. С. Скиданенко, Я. Е. Михайловський, А. В. Іванія. – Суми : Сумський державний університет, 2019. – 32 с.
4. Кузнецов А.А. Расчеты процессов и аппаратов нефтеперерабатывающей промышленности / А.А. Кузнецов, С.М. Кагерманов, Е.Н. Судаков. – Л. : Химия, 1974 – 344 с.
5. Эмирджанов Р.Т. Основы технологических расчетов в нефтепереработке и нефтехимии / Р.Т. Эмирджанов, Р.А. Лемберанский . – М. : Химия, 1989. – 192 с.
6. Лащинский А. А. Основы конструирования и расчета химической аппаратуры / А. А. Лащинский, А. Р. Толчинский. – Л. : Машиностроение, 1970. – 752 с.
7. Лащинский А. А. Конструирование сварных химических аппаратов : Справочник / А. А. Лащинский. – Л. : Машиностроение, 1981. – 382 с.
8. Марочник сталей и сплавов / В. Г. Сорокин, А. В. Волосникова, С. А. Вяткин [и др.]. – Под общ. ред. Сорокина В. Г. – М. : Машиностроение, 1989. – 640 с.
9. Павлов К. Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии : Учеб. пос. для вузов / К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков. – 10-е изд., перераб. и доп. – Л. : Химия, 1987. – 576 с.
10. Машины и аппараты химических производств. Примеры и задачи / Под общ. ред. В. Н. Соколова. – Л. : Машиностроение, 1982. – 384 с.
11. Основные процессы и аппараты химической технологии : Пособие по проектированию / Под ред. Дытнерского Ю. И. – М. : Химия, 1983. – 272 с.

					<i>ХИ. Т.00.00.00.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		79

12. Расчет и конструирование машин и аппаратов химических производств. Примеры и задачи : Учеб. пособие для студентов вузов / М. Ф. Михалев, Н. П. Третьяков, А. И. Мильченко [и др.]. – Под общ. ред. Михалева М. Ф. – Л. : Машиностроение, 1984. – 301 с.
13. Фарамазов С. А. Ремонт и монтаж оборудования химических и нефтеперерабатывающих заводов / С. А. Фарамазов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Химия, 1980. – 312 с.
14. Ермаков В.И. Ремонт и монтаж химического оборудования / В.И. Ермаков, В.С. Шейн. – Л. : Химия, 1981. – 368 с.
15. Кушелев В. П. Охрана труда в нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности : Учебник для вузов / В. П. Кушелев, Г. Г. Орлов, Ю. Г. Сорокин. – М. : Химия, 2009. – 472 с.
16. Макаров Г. В. Охрана труда в химической промышленности / Г. В. Макаров, А. Я. Васин, Л. К. Маринина [и др.]. – М. : Химия, 2003. – 496 с.