

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Институт Электронного обучения  
Специальность Машины и аппараты химических производств  
Кафедра Общей химии и химической технологии

**ДИПЛОМНЫЙ ПРОЕКТ**

Тема проекта
<b>Разработка основного оборудования цеха разделения воздуха</b>

УДК 669.33.621.59.002.5.071.6

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-5001	Комилов Абдор Мирзали угли		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Балмашнов М.А.	к.т.н., доцент		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Рыжакина Т.Г.	к.э.н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Антоневич О.А.	к.б.н., доцент		

По разделу «Механо-технологический раздел»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Семакина О.К.	к.т.н., доцент		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Тихонов В.В.	к.т.н., доцент		

Томск – 2016 г.

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Институт электронного обучения

Направление подготовки (специальность) машины и аппараты химических производств

Кафедра общей химии и химической технологии

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой

\_\_\_\_\_ Тихонов В.В.  
(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ**

**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Дипломного проекта

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
3-5001	Комилов Аброр Мирзали угли

Тема работы:

**Разработка основного оборудования цеха разделения воздуха**

Утверждена приказом директора (дата, номер)

25.04.16 № 3107/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:

10.06.16

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<b>Исходные данные к работе</b> (наименование объекта исследования или проектирования; производительность или	<i>Технологическая схема цеха разделения воздуха. Провести технологический и механический расчет основного оборудования Тип колонны и теплообменника .</i>
--	--

<p><i>нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	
<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b> (аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</p>	<p>1. Технологический расчет:  - описание технологической схемы;  - определение поверхности теплообмена;  - подбор колонны и теплообменника.  2. Конструктивно-механический расчет колонны и переохладителя:  3. Социальная ответственность:  - анализ опасных факторов проектируемой производственной среды;  - охрана окружающей среды;  - защита в чрезвычайной ситуации.  4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение:  - анализ производственной мощности;  - расчет себестоимости продукции;  - анализ безубыточности производства;  - определение технико-экономических показателей.</p>
<p><b>Перечень графического материала</b></p>	<p>Лист 1 – Технологическая схема (А1).  Лист 2-3- Колонна Чертеж общего вида (А0).</p>

<i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	<i>Лист 4-5 – Переохладитель. Чертеж общего вида (A0) Лист 6-7 – Переохладитель. Чертеж общего вида. (A1) Лист 8 Маршрутная карта(A1) Лист 9 Технико-экономические показатели(A1)</i>
<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b> <i>(с указанием разделов)</i>	
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.	к.э.н., доцент Рыжакина Т.Г..
Социальная ответственность	к.б.н., доцент Антоневи́ч О.А.

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	04.02.16
---	----------

**Задание выдал руководитель:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
доцент	Балмашнов М.А.	к.т.н., доцент		04.02.16

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
3-5001	Комилов А.М.		04.02.16

## РЕФЕРАТ

Дипломная работа 203 страниц, 10 рисунков, 30 таблиц, 28 источников, 9 листов графического материала.

Ключевые слова: колонна, тарелки, теплообменник, поверхность теплообмена, трубная решетка, трубы, механическая прочность, механическая устойчивость, тепловой расчет, сера, серная кислота

Объектом исследования является цех разделение воздуха по производству кислорода мощностью 160000 т/год

Цель работы — подбор и проведение поверочного расчета основного технологического оборудования при увеличении производительности на 10%

В результате расчетов установлено, что при росте планов на переработку кислорода на 10% подобранный колонна и переохладители сохраняют механическую прочность и обеспечивает бесперебойное течение процесса. Также были рассмотрены следующие вопросы: описание ныне действующей технологической схемы и принцип работы колонны и переохладителей. В разделе «социальная ответственность» описание рабочего места (рабочей зоны, технологического процесса, механического оборудования), отбор законодательных и нормативных документов по теме, анализ выявленных опасных и вредных факторов проектируемой производственной среды, охрана окружающей среды, правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности. Разработаны мероприятия по ведению безопасного технологического процесса. В разделе «финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» произведен расчет и сравнительный анализ себестоимости до и после повышения производительности получаемого продукта.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	
1 Техничо - экономическое обоснование.....	
Теоретические основы .....	
2.1 Схема и работа установки .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.8</b>
2.2 Режим I. Получение газа.....	20
2.3 Блок разделение.....	23
2.4 Требования безопасности.....	
3 ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.....	25
3.1 Технологический расчет колонны.....	25
3.2 Оптимальное флегмовое число.....	26
3.3 Тепловой расчет .....	35
4 Конструктивный расчет колонны.....	36
5.1 Расчет толщины стенки эллиптической крышки и днища.....	39
5.1.1 Допускаемое напряжение в рабочем состоянии .....	39
5.1.2 Сливная и переливная перегородки .....	40
5.2.1 Определение диаметра патрубка для исходной смеси.....	43
6. Определение диаметра патрубка для отвода кубовой жидкости .....	44
7. Определение диаметра патрубка для отвода пара-дистиллята .....	44
7.1 Укрепление отверстий .....	46
7.2 Расчет фланцевого соединения.....	
7.4 Нормы и методы расчета на прочность .....	64
7.5 Сочетание нагрузок.....	68
8. Корпус колонного аппарата .....	69
8.1 Расчет опорной обечайки .....	72
8.2 Расчет анкерных болтов .....	86
3.3 Гидравлический расчет.....	86
9. Расчет тепловой изоляции.....	88
11. РАСЧЕТ ПЕРЕОХЛАДИТЕЛЯ А2 .....	89

10. Теплоотдача и гидравлическое сопротивление при течи в изогнутых трубах витого теплообменника.....	98
12. Конструктивный расчет.....	99
12.1. РАСЧЕТ ПЕРЕОХЛАДИТЕЛЯ А3 .....	
12.2. Теплоотдача и гидравлическое сопротивление при течи в изогнутых трубах витого теплообменника.....	118
12. 3. Конструктивный расчет.....	19
12. 4. РАСЧЕТ ПЕРЕОХЛАДИТЕЛЯ А16 .....	30
13. Конструктивный расчет.....	0
13.1. Расчет опорных лап.....	149
13. 4. АВТОМАТИЗАЦИЯ И КОНТРОЛЬ ПРОИЗВОДСТВА	
13.5. МОНТАЖ.....	156
13.6. Расчет полиспаста .....	162
13.7 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ.....	166
13.9 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ .....	182
13.9 Техничко-экономические показатели проекта.....	193
14. Заключение .....	201
15. Список используемой литературы .....	202

## **Введение:**

Атмосферный воздух представляет смесь азота, кислорода, аргона и редких газов, не связанных между собой химически. Приблизённо воздух можно рассматривать как смесь только азота и кислорода, поскольку аргона редких газов в нём содержится менее 1 %; в этом случае округлённо принимают, что воздух содержит 79% азота и 21% кислорода по объёму.

Разделение воздуха является достаточно сложной технической задачей, особенно если он находится в газообразном состоянии. Этот процесс облегчается, если предварительно перевести воздух в жидкое состояние сжатием, расширением и охлаждением, а затем осуществить его разделение на составные части, используя разность температур кипения азота и кислорода. Под атмосферным давлением жидкий азот кипит при  $-195.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ , жидкий кислород при  $-182.97\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Если жидкий воздух постепенно испарят, то сначала будет испаряться преимущественно азот, обладающий более низкой температурой кипения; по мере улетучивания азота жидкость будет обогащаться кислородом. Таким образом, процесс ректификации позволяет достичь желаемой степени разделения воздуха на азот и кислород требуемой концентрации. Поскольку данный способ основан на охлаждении воздуха до очень низких температур, он называется способом глубокого охлаждения.

Установка разделения воздуха КА-0.2 работает по принципу глубокого охлаждения. Производительность установки по условному газу  $0.214\text{ м}^3/\text{с}$ . Цель дипломной работы установить возможность увеличения производительности на 10% в условиях имеющегося оборудования.

## 1 Технико-экономическое обоснование

### 1.1 Миссия предприятия:

- Быть лидирующей газовой компанией на рынке Узбекистана;
- Быть первым приоритетным поставщиком газовой продукции и услуг;
- Быть наиболее привлекательным местом работы.

### 1.2 Наименование и назначение продукции. Область применения.

#### Азот

Газообразный азот предназначается для создания инертной атмосферы при производстве, хранении и транспортировке легко окисляемых продуктов, при высокотемпературных процессах обработки металлов, не взаимодействующих с азотом, для консервации замкнутых металлических сосудов и трубопроводов. Азот используется:

- В горнодобывающей промышленности и металлургии:
  - при криообжиге и криозакаливании металлов;
  - для вакуумной дегазации расплавов;
  - в качестве инертной среды для непрерывной разливки стали;
  - для травления холодом;
  - как источник энергии в угольных шахтах;
  - как инертная среда для заполнения взрывоопасных шахт.
- В нефтедобыче:
  - как безопасный рабочий агент при газлифтном способе добычи нефти и при запуске скважин (заменитель сжатого воздуха) при авариях на нефтепроводах (замораживание порыва);

- для тушения пожаров на нефтяных и газовых скважинах;
- создание криоледяных платформ в открытом море или на слабых грунтах для ведения бурения.

- В машиностроении и строительстве:

упрочнение стальных деталей и инструментов методом низкотемпературной закалки;

- запрессовка и выпрессовка сопрягаемых деталей холодом;
- замораживании грунтов при строительстве метро, трубопроводов;
- вымораживание и снятие плиток;
- глубокое охлаждение минерального сырья для его последующего тонкого размола;
- при изготовлении туфового покрытия.

- В химической и нефтеперерабатывающей промышленности:

- инертная среда в химических процессах для криогенного разделения продуктов;

- химических реакций в криохимии для получения полимеров;
- высокого качества при производстве этилена, полиэтилена, пропилена, полиформальдегида и т.д. для очистки взрывчатых смесей;

регенеративных катализаторов для хранения и перевозки легковоспламеняющихся жидкостей.

- В научных исследованиях.
- В энергетике и электронной промышленности.
- В экологии.

- В пищевой промышленности для заморозки, транспортировки и хранения пищевых продуктов.

- В медицине:

- для сохранения крови и кровьсодержащих препаратов;

- для быстрого замораживания и хранения тканей, различных органов;

- в технологиях получения полноценных порошковых лекарственных препаратов.

### *Аргон*

Наибольшая часть получаемого аргона идет в металлургию, металлообработку и некоторые смежные с ними отрасли промышленности. В среде аргона ведут процессы, при которых нужно исключить контакт расплавленного металла с кислородом, азотом, углекислотой и влагой воздуха. Аргонная среда используется при горячей обработке титана, тантала, ниобия, бериллия, циркония, гафния, вольфрама, урана, тория, а также щелочных металлов. В атмосфере аргона обрабатывают плутоний, получают некоторые соединения хрома, титана, ванадия и других элементов (сильные восстановители).

### *Водород*

В зависимости от назначения технический водород выпускается в сжатом и несжатом виде двух марок:

А - используется в электронной, фармацевтической, химической промышленности, в порошковой металлургии: для осаждения тугоплавких соединений из окислов металлов; при спекании изделий из порошковых материалов, содержащих хром и нержавеющие стали;

Б - используется в энергетике, электронной, химической, цветной металлургии, фармацевтической промышленности.

## *Гелий*

Большие количества применяются в медицине. Используется как инертная среда для дуговой сварки, особенно магния и его сплавов, а также для охлаждения ядерных реакторов. Другие применения гелия - для газовой смазки подшипников, в счетчиках нейтронов, газовых термометрах, рентгеновской спектроскопии, для хранения пищи, в переключателях высокого напряжения.

## *Кислород*

Кислород используется для повышения производительности окислительных процессов.

- В нефтедобыче;
- В горнодобывающей промышленности и металлургии:
  - Прямое восстановление железа;
  - Огневое бурение в горных породах;
- В медицине;
- В экологии;
- В химической промышленности;
- В энергетике;
- В военной технике и т.п.

### 1.3 Отличительные особенности по сравнению с продукцией конкурентов

- Высокая доступность продукции;
- Надежные поставки;
- Высокий уровень гибкости производства;

- Более низкие затраты по сравнению с производством требуемой продукции на вашем собственном объекте;
- Индивидуальный подход к каждому клиенту;
- Высокое сервисное обслуживание;
- Гибкая система скидок;
- Бесплатная доставка по Узбекистану.

#### 1.4 Анализ среды предприятия

Внутренняя среда предприятия		Внешняя среда предприятия	
S (сила)	W (слабости)	O(возможности)	T (угрозы)
1	2	3	4
<p>1 Оптимальный состав сотрудников предприятия обеспечивающий взаимозаменяемость и непрерывность рабочего процесса.</p> <p>2 Зарботная плата сотрудников состоит из нескольких составляющих - основную часть которой составляет % от объема продаж продукции.</p> <p>3 Низкие затраты производства.</p> <p>4. Небольшой ассортиментный перечень продукции</p>	<p>1 Необходимость соблюдения техники безопасности на высоком уровне.</p> <p>2 Дороговизна оборудования.</p>	<p>1 Создание небольших пунктов реализации товара за пределами Томска и области. (экономия на транспортных затратах)</p> <p>2 Участие в государственных и муницип. торгах.</p> <p>3 Поиск клиентов в результате сотрудничества с постоянными покупателями</p>	<p>1 Снижение объемов продаж в условиях кризиса промышленных предприятий.</p> <p>2 Политический режим в стране.</p> <p>3 Высокотехнологичные предприятия.</p>

#### 1.4 Характеристика потребителя

- 1 Потребитель - промышленные предприятия.
- 2 Отрасль - химическая, пищевая, сфера услуг и строительство.
- 3 Текущее состояние отрасли - рост.
- 4 Размер - среднее.
- 5 Тип рынка на котором действует предприятие - розничный для населения и оптовый для предприятий.
- 6 Размер рынка сбыта - широкий.
- 7 Прогнозируемые темпы роста рынка — повышение качества продукта и качества его упаковки позволят расширить рынок сбыта в самое ближайшее время.

### Детальный анализ и оценка конкурентов

- 1 Конкурент «Шуртангаз»
- 2 Конкурент «УзГазОил»

Показатели конкурентоспособности	R <sub>нг</sub>	Балльная оценка			Конкурентоспособность		
		Бф	Б <sub>к1</sub>	Б <sub>к2</sub>	КС	КС <sub>к1</sub>	КС <sub>к2</sub>
1. Качество продукта	18	9	6	5	162	108	90
2. Надёжность	10	7	6	5	70	60	50
3. Экологичность	10	9	4	6	90	40	60
4. Технологичность	10	6	7	8	60	70	80
5. Доступность информации о товаре	7	6	4	7	42	28	49
6. Качество упаковки	14	8	6	8	112	84	112
7. Качество доставки	7	10	9	6	70	63	42
8. Уровень цен	14	10	8	8	140	112	112
9. Реклама	10	9	6	7	90	60	70
Всего	10				836	625	665

Для сравнительной оценки рассчитаем коэффициент конкурентоспособности:

$$1) K_{кс1} = 836/625 = 1.337$$

$$2) K_{кс2} = 836/633 = 1.257$$

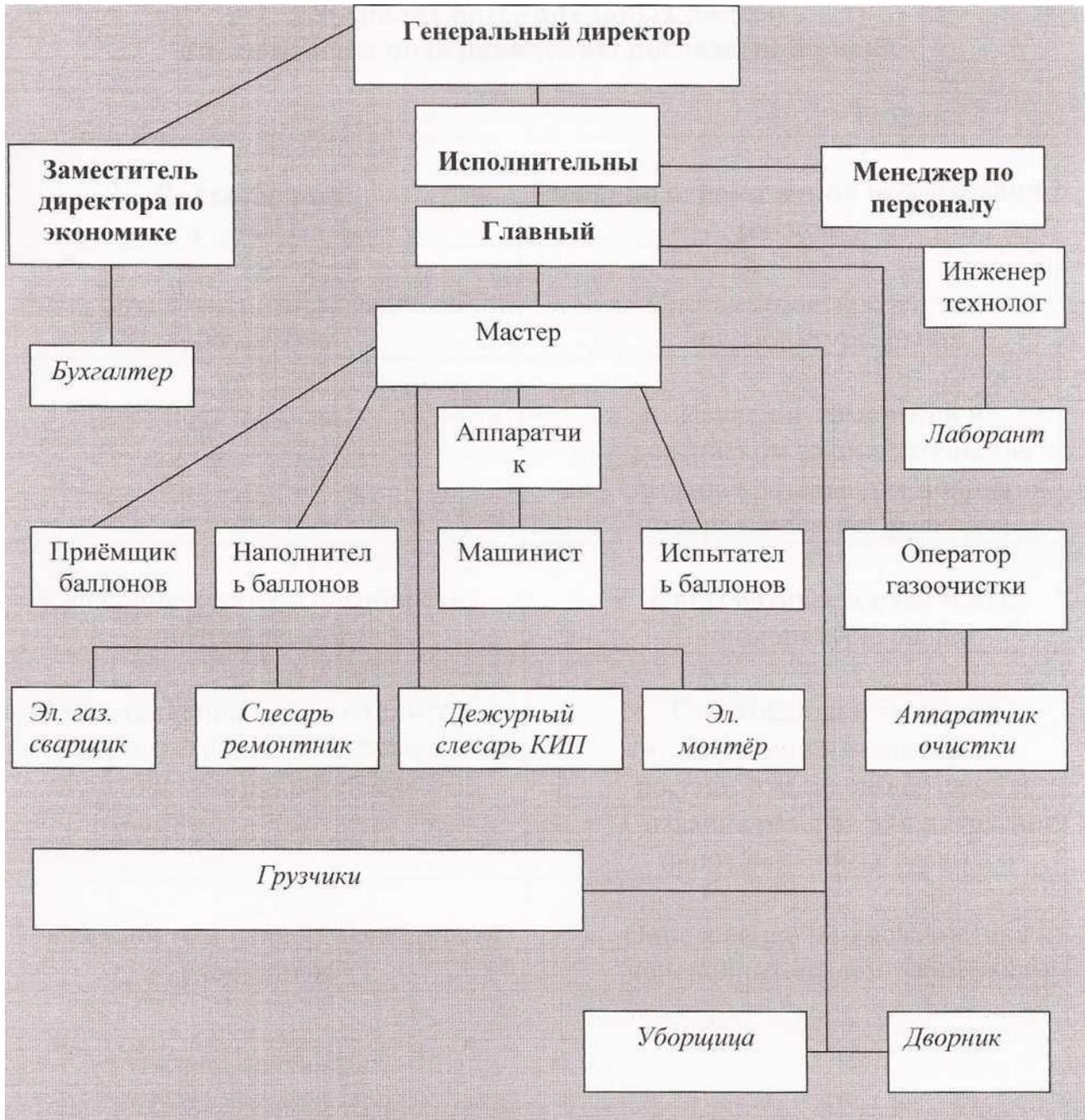
Т.к  $K_{кс1} > 1$  и  $K_{кс2} > 1$  – АО «Алмалыкский ГМК» является конкурентоспособной.

### 1.6 Конкурентная стратегия предприятия

- Предлагаем заказчикам не просто газовый продукт, но и создаем заметные преимущества, с помощью которых наш заказчик сможет получить прибыль;
- Разрабатываем проекты с учетом индивидуальных и уникальных потребностей каждого клиента;
- Экономический эффект масштаба производства за счет эксплуатации более крупных технологических установок, чем используемые отдельными потребителями для собственных нужд;
- Использование эффективной системы закупок для приобретения сырья, оборудования, катализаторов;
- Применение творческого подхода к решению финансовых задач;
- Объединение усилий персонала;
- Тесное сотрудничество с нашими клиентами - установление текущих и прогнозируя их будущие потребности;
- Сокращение затрат потребителей, позволяет им повышать производительность труда и конкурентоспособность своей продукции;
- Постоянное совершенствование Продукции, поддержание ее на самом современном уровне, на уровне ожиданий наших клиентов и требований

### 1.6 Организационный план Формирование организационной структуры

Структура организации производственной деятельности на предприятии АО «Алмалыкский ГМК» - линейная. Это наиболее простая и подходящая структура организации.



1.9 Анализ потенциальных рисков Риски и меры по ограничению последствий риска

Таблица 4

<b>Виды рисков</b>	<b>Меры по ограничению последствий рисков</b>
Риск, обусловленный поведением конкурентов	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Систематическое изучение конъюнктуры рынка</li> </ul>
Рост налогов	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Изучение изменений в российском законодательстве</li> <li>• Создание резерва для покрытия непредвиденных расходов</li> </ul>
Снижение платёжеспособности потребителей	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Систематическое изучение конъюнктуры рынка</li> </ul>
Непредвиденные обстоятельства (аварии, стихийные бедствия, политическая нестабильность)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Страхование имущества</li> <li>• Изучение изменений в российском законодательстве</li> <li>• Создание резерва для покрытия непредвиденных расходов</li> </ul>
Небрежность и недобросовестность работников	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Определение мер воздействия к неисполнительным работникам</li> </ul>

## 2 Схема и работа установки

### 2.1 Общие сведения об установке.

2.1.1 В установке используется цикл среднего давления с расширением воздуха в турбо детандере. Рекуперация холода осуществляется в витых трубчатых теплообменниках, разделение воздуха производится в колонне двукратной ректификации. Сушка воздуха и очистка его от углекислоты и углеводородов производится в цеолитовом блоке очистки. Предварительное охлаждение воздуха перед блоком очистки осуществляется в теплообменниках за счёт холода обратных потоков.

2.1.2 Ниже приводится описание работы установки во всех режимах. Обозначение аппаратов указаны в соответствии со схемой монтажно-технологической.

2.1.3 Режим I - получение газообразного кислорода I - ого сорта и газообразного азота особой чистоты.

Атмосферный воздух после очистки от пыли сжимается в компрессорах

1,2 до давлений 4,4...5,4 МПа (45...55 кгс/см<sup>2</sup>). Во влагоотделителе А12 из него удаляется нежелательная влага и далее 63% воздуха поступает в теплообменник А15, где охлаждается потоками кислорода и фракции с 313К (40°С) [при работе в тропиках с 323К (50°С)] до 281К (8°С). Остальной воздух охлаждается обратным потоком азота в теплообменнике А16 до той же температуры.

Пройдя теплообменники А15 и А16, воздух соединяется в один поток, проходит влаго отделитель А13 и теплообменник А17, с помощью которого поддерживается постоянная температура перед блоком очистки - 281К (8°С).

В теплообменнике А17 осуществляется теплообмен между потоками влажного (до блока очистки); сухого (после блока очистки) воздуха, хладона из холодильной

машины X и воды, циркулирующей в межтрубном пространстве теплообменника A17.

Постоянная циркуляция воды из бака A3 0 обеспечивается насосом НЗ. Температура воды поддерживается в интервале 277...280K (4...7°C) включением и отключением холодильной машины.

Наличие в схеме теплообменника A17 позволяет снимать так называемые «пиковые» тепловые нагрузки, возникающие в момент переключения абсорберов блока очистки, когда температура сухого воздуха временно поднимается до 305K (32°C).

Пройдя влагоотделитель A14, воздух направляется в блок очистки, где осушается и очищается от углекислоты и углеводородов.

При температуре 283K (10°C) воздух поступает в теплообменники блока разделения. В теплообменник A1 поступает 73% всего воздуха и охлаждается сжатым кислородом и фракцией до 139K (- 134°C). Остальной воздух охлаждается в теплообменнике A2 продукционным азотом до той же температуры.

Воздух из теплообменника A1 и часть воздуха из теплообменника A2 (всего 83% от общего количества воздуха) смешиваясь, расширяются в турбо детандере до давления 0,59 МПа (6 кгс/см<sup>2</sup>), при этом температура воздуха понижается до 102K (- 171°C).

Оставшаяся часть воздуха из теплообменника A2 дросселируется через вентиль ВР-1 до давления 0,6 МПа (6 кгс/см<sup>2</sup>) и температуры 102K (- 171°C).

Расширенный и охлаждённый воздух поступает на разделение в куб нижней колонны A7.

В нижней колонне воздух разделяется на обогащённую кислородом кубовую жидкость чистотой 23,5% O<sub>2</sub> и азотную флегму с содержанием кислорода 0,0001%.

Кубовая жидкость после переохладителя А5 дросселируется через вентиль ВР-2 и, пройдя переохладитель А3, поступает на 41-ую тарелку верхней колонны А8.

Азотная флегма из кармана нижней колонны проходит переохладитель А6, охлаждаясь от 98К (- 175°С) до 89К (- 184°С), дросселируется через вентиль ВР-3 до 0,039 МПа (0,4 кгс/см<sup>2</sup>) и после переохладителя А4 поступает на орошение в верхнюю колонну А8.

В верхней колонне происходит окончательное разделение воздуха на газообразный азот и (60%), отбираемый из верхней части колонны, жидкий кислород (17%), отбираемый из куба колонны и аргонную фракцию (33%), отбираемую с 48-ой тарелки, считая снизу. Отбор фракции позволяет получить азот и кислород высокой чистоты.

Жидкий кислород из конденсатора поступает в переохладитель А3, охлаждает рубашку насоса сжиженных газов Н1, а затем подаётся во всасывающую линию этого же насоса.

Отсюда жидкий кислород под давлением 19,6 МПа (200 кгс/см<sup>2</sup>) подаётся в теплообменник А1, затем в А15 и в газообразном виде подаётся потребителю.

Газообразный азот из верхней колонны проходит последовательно переохладитель А6, теплообменники А2, А16 и подаётся потребителю.

Фракция проходит переохладитель А5, теплообменники А1, А15, затем часть её идёт на регенерацию адсорберов блока очистки, остальная часть выбрасывается в атмосферу.

#### 2.1.4 Режим II

- получение газообразного кислорода повышенной чистоты и газообразного азота особой чистоты.

Повышение чистоты кислорода в этом режиме достигается уменьшением отбора его путём снижения производительности насоса Н1. Давление воздуха после компрессоров в этом режиме 4,4...5,4 МПа (45...55 кгс/см<sup>2</sup>).

#### 2.1.5 Режим III

- отличается от режима I тем, что переохлажденный кислород сливается из установки в ёмкость, при этом насос сжиженных газов отключается. Давление воздуха после компрессора в этом режиме 6,9 МПа (70 кгс/см<sup>2</sup>).

#### 2.1.6 Режим IV

- получение жидкого и газообразного азота особой чистоты. В этом режиме часть переохлажденной азотной флегмы подаётся потребителю. Насос Н1 отключен. Давление после компрессоров 5,9 МПа (60 кгс/см<sup>2</sup>). В этом режиме обеспечивается слив жидкого кислорода из конденсатора АЗ 1 В теплообменник А18. Это необходимо для своевременного удаления ацетилена и других углеводородов, накопление которых возможно в жидком кислороде, кипящем в конденсаторе. В теплообменнике А18 жидкий кислород с растворёнными в нём углеводородами испаряется за счёт теплообмена с проточной водой.

#### 2.1.7 Режим V

- получение кислорода I -ого сорта под давлением 2,45 МПа (25 кгс/см<sup>2</sup>) и газообразного азота особой чистоты. Жидкий кислород после переохладителя АЗ подаётся в насос Н1, а затем сливается в криогенный газификатор под давлением 2,45 МПа (25 кгс/см<sup>2</sup>). Давление воздуха после компрессоров 6,9 МПа (70 кгс/см<sup>2</sup>).

Описание технологической схемы блока очистки. Воздух с температурой 281К (8°С) и давлением 4,4...6,9 МПа (45...70 кгс/см<sup>2</sup>) поступает в нижнюю часть одного из адсорберов I или II и проходит его снизу вверх.

2.1.8 Адсорбером считается пара баллонов соединённых между собой трубопроводами и работающих параллельно. Баллоны заполнены адсорбентом — цеолитом марки NaX. Насыщение цеолитов влагой и углекислотой происходит до определённого предела. Адсорбционная способность цеолита восстанавливается прогревом адсорбента, регенерирующим газом - сухой фракцией.

При работе одного из адсорберов в режиме очистки воздуха во втором адсорбере проходят последовательно процессы десорбции и охлаждения адсорбента. Регенерирующий газ в количестве 200 м<sup>3</sup>/ч нагретый электроподогревателем А19 до температуры 673К (400°С) проходит адсорбер сверху вниз. При достижении температуры регенерирующего газа на выходе из адсорбера 473К (200°С) электроподогреватель отключается, и адсорбер охлаждается тем же регенерирующим газом но в количестве 420 м<sup>3</sup>/ч. Для плавного изменения давления в адсорбере служит клапан ВР-101, а для плавного сброса давления служат продувочные вентили ВР-102 и ВР-103. Циклограмма работы блока очистки приведена на рис. 40.

2.1.9 Питание пневмосхемы панелей управления и мембранно-исполнительных механизмов регулирующих клапанов производится специально подготовленным воздухом по проекту станции. Допускается 20 отбор 80 м сжатого воздуха после блока очистки через вентиль ВЗ-20, при этом производительность установки во всех режимах снижается на 5%. При отборе воздуха на цели КИПиА после блока очистки возможны следующие варианты питания системы КИПиА воздухом.

1 Воздух из вентиля ВЗ -20 поступает в ресивер высокого давления  $P_{раб} > 70$  кгс/см<sup>2</sup>, а затем через редуктор подаётся в систему КИПиА.

2 Воздух из вентиля ВЗ-20 поступает на редуктор затем в ресивер с давлением  $P_{раб} = 8$  кгс/см . Ресивер должен быть снабжён предохранительным клапаном на 8 кгс/см<sup>2</sup>. Затем через стабилизатор воздух подаётся в систему КИПиА. Ресивер и редукторы в комплект поставки не входят.

2.1.10 Для ускорения пуска установки желательно иметь сторонний источник азота или сухого воздуха, необходимого для очистки цеолита в первый момент после наполнения им баллонов. При наличии у заказчика такого источника подключение к нему необходимо произвести через вентиль ВЗ-27. Параметры воздуха (азота) из постороннего источника: давление - 0,25 кгс/см<sup>2</sup>; температура - 20°С, количество не менее 200 м<sup>3</sup>/ч.

## 2.2 Блок разделения

2.2.1 Блок разделения предназначен для охлаждения, сжижения и разделения сжатого атмосферного воздуха на кислород и азот.

2.2.2 В состав блока разделения входят верхняя и нижняя ректификационные колонны, конденсатор; четыре переохладителя, два теплообменника, турбодетандер, насос сжиженных газов, фильтры, арматура, контрольно-измерительные приборы.

2.2.3 Все аппараты размещены в кожухе. Нижняя часть кожуха представляет жесткий стальной каркас, обшитый рифлеными листами толщиной 2,5 мм. На кожухе имеются съёмные щиты, обеспечивающие доступ к аппаратам для их осмотра и мелкого ремонта.

Верхняя часть кожуха представляет собой цилиндрическую сварную царгу толщиной 4 мм, которая соединяется с нижней частью при помощи болтов. Внутри царги размещается верхняя колонна. Её верхняя часть крепится к царге при помощи хомута и четырёх талрепов, обеспечивающих её центровку.

2.2.4 На передней панели блока разделения расположена большая часть арматуры, за исключением сливных вентилях, расположенных на боковых стенках блока, находящихся вне здания.

В нижней части передней панели размещены продувочные и отогревные вентили. Выше продувочных вентилях в специальном коробе находятся

холодильные дроссельные клапаны с мембранно-пружинными исполнительными механизмами и запорные вентили.

Над коробом с клапанами расположены турбодетандер Тд, который крепится непосредственно к листу передней панели, и отсек с находящимся в нём детандерным воздушным фильтром А9, электромагнитным клапаном ПР

(см. руководство по эксплуатации турбодетандера) и обратным клапаном ОК1. Отсек закрывается съёмной крышкой, свободное пространство его заполнено теплоизоляционным материалом - из базальтового волокна. Над турбодетандерным отсеком находится панель с манометрами, а над ней вентили на импульсных линиях для замера концентрации, сопротивления, уровня, давления.

Выше расположены предохранительные клапаны, присоединенные к общему выходному коллектору.

2.2.5 Кожух блока разделения заполнен теплоизолирующим материалом - перлитовым песком. Засыпка перлита производится через люки Щ, высыпка - через люк Э, контролируют уровень засыпки перлита через люк Ю.

2.2.6 Насос сжиженных газов располагается в специальном кожухе, расположенном рядом с блоком разделения и соединённым с ним переходником. Кожух насоса и переходник имеют съёмные крышки, обеспечивающие свободный доступ к насосу и трубам, проходящим через переходник. В кожухе насоса располагаются: цилиндрическая группа насоса, фильтр жидкого кислорода А10, фильтр на линии утечки насоса А11 на обратный клапан ОК2. Всё свободное пространство в кожухе насоса и переходнике заполнено теплоизоляционным материалом - ватой минеральной марки 100.

## Расчет колонны

### Технологический расчет колонны

Производительность по исходной смеси:  $G_f := 1087 \frac{\text{М}^3}{\text{ч}}$

Состав исходной смеси:  $x_{fV} := 70$

Состав дистиллята:  $x_{pV} := 99.999$

Состав кубового остатка:  $x_{wV} := 0.01$

Рабочее давление в колонне:  $P := 0.7 \text{ МПа}$

Пробное давление в колонне:  $P_{pr} := 0.9 \text{ МПа}$

Плотность воздуха жидкого при -172 град (вход в колонну)

$$\rho_V := 763 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \quad T_0 := 273 \text{ К} \quad P_0 := 0.1 \text{ МПа}$$

### Решение

$$\text{Объемный расход: } G_p := \frac{G_f \cdot (x_{fV} - x_{wV})}{x_{pV} - x_{wV}} = 760.868 \frac{\text{М}^3}{\text{ч}}$$

$$G_w := G_f - G_p = 326.132 \frac{\text{М}^3}{\text{ч}}$$

Пересчет на мольные доли:  $M_{N_2} := 28 \quad M_{O_2} := 32$

$$x_f := \frac{\frac{x_{fV}}{M_{N_2}}}{\frac{x_{fV}}{M_{N_2}} + \frac{100 - x_{fV}}{M_{O_2}}} = 0.727$$

$$x_p := \frac{\frac{x_{pV}}{M_{N_2}}}{\frac{x_{pV}}{M_{N_2}} + \frac{100 - x_{pV}}{M_{O_2}}} = 1$$

$$x_W := \frac{\frac{x_{wv}}{M_{N2}}}{\frac{x_{wv}}{M_{N2}} + \frac{100 - x_{wv}}{M_{O2}}} = 1.143 \times 10^{-4}$$

Относительный мольный расход питания:  $F := \frac{x_p - x_w}{x_f - x_w} = 1.375$

Определяем минимальное число флегмы:  $y_f := 0.85'$

по t-x,y диаграмме мольная доля азота в паре, равновесном с жидкостью питания.

$$R_{\min} := \frac{x_p - y_f}{y_f - x_f} = 1.102$$

### Оптимальное флегмовое число.

Величину оптимального флегмового числа получаем построив график функции  $Nt^*(R+1)=f(R)$ . Минимум функции дает значение оптимального флегмового числа.

Значение R вычисляем из уравнения связи между минимальным и действительным флегмовым числом, принимая различные (2-6) значения коэффициента избытка флегмы  $\beta$ .

$$\beta := 2$$

$$R := \beta \cdot R_{\min} = 2.205$$

$$B := \frac{x_p}{R + 1} = 0.312$$

Рисунок 3.1 y-x

$$N := 40$$

B- отрезок, откладываемый на оси ординат.

$$N \cdot (R + 1) = 128.184$$

$$\beta := 3$$

$$R := \beta \cdot R_{\min} = 3.307 \quad B := \frac{x_p}{R+1} = 0.232$$

Рисунок 3.2 у-х

$$N := 34$$

$$N \cdot (R + 1) = 146.435$$

$$\beta := 4$$

$$R := \beta \cdot R_{\min} = 4.409 \quad B := \frac{x_p}{R+1} = 0.185$$

Рисунок 3.3 у-х

$$N := 31$$

$$N \cdot (R + 1) = 167.686$$

$$\beta := 1.5$$

$$R := \beta \cdot R_{\min} = 1.653 \quad B := \frac{x_p}{R+1} = 0.377$$

Рисунок 3.4 у-х

$$N := 48$$

$$N \cdot (R + 1) = 127.366$$

$$\beta := 1.8$$

$$R := \beta \cdot R_{\min} = 1.984 \quad B := \frac{x_p}{R+1} = 0.335$$

Рисунок 3.5 у-х

$$N := 42$$

$$N \cdot (R + 1) = 125.334$$

Из графика зависимости  $Nt^*(R+1)=f(R)$  оптимальное флегмовое число 1.8354

$$R := 1.835$$

При данном флегмовом числе:

$$\beta := \frac{R}{R_{\min}} = 1.665$$

$$B := \frac{x_p}{R + 1} = 0.353 \quad \text{Рисунок 3.6 y-x}$$

$$N := 45$$

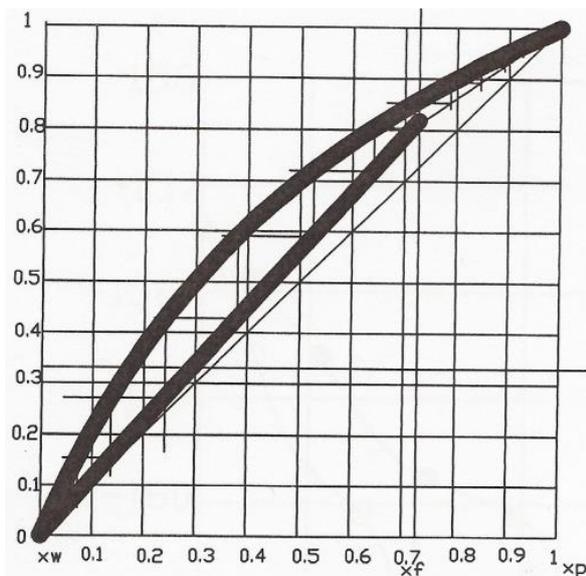
Уравнение рабочих линий: [с.241,1]

а) верхней, укрепляющей части колонны:

$$y = \left( \frac{R}{R + 1} \cdot x + \frac{x_p}{R + 1} \right) \quad \frac{R}{R + 1} = 0.647 \quad \frac{x_p}{R + 1} = 0.353$$

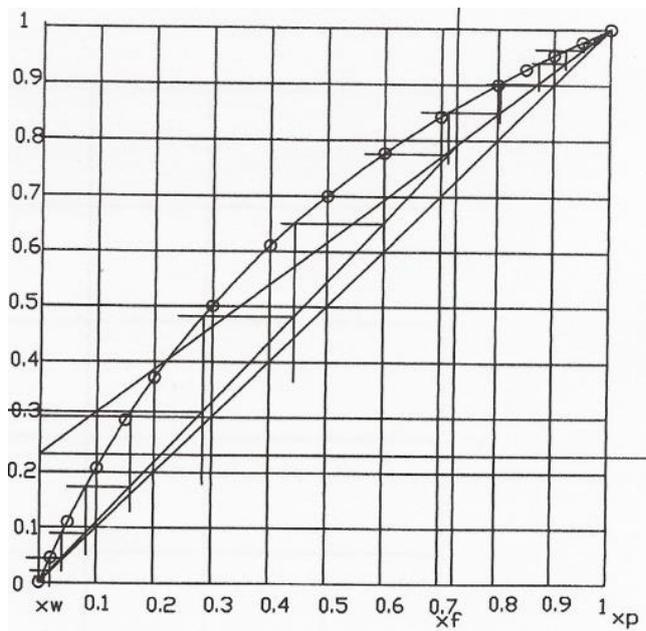
$$b=2$$

Рисунок 1. Определение оптимального флегмового числа. 40 тарелок



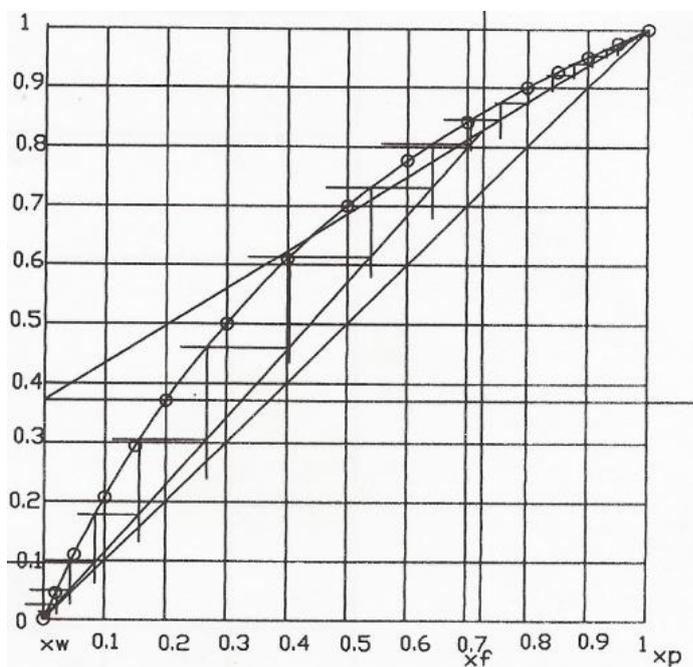
$$b=3$$

Рисунок 2. Определение оптимального флегмового числа. 34 тарелки



$b=4$

Рисунок 3. Определение оптимального флегмового числа. 31 тарелка



$b=1.5$

Рисунок 4. Определение оптимального флегмового числа. 48 тарелок

$b=1.8$

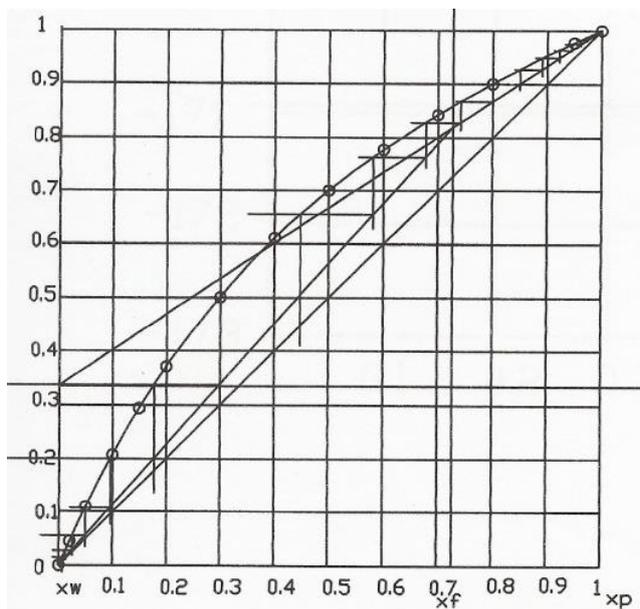
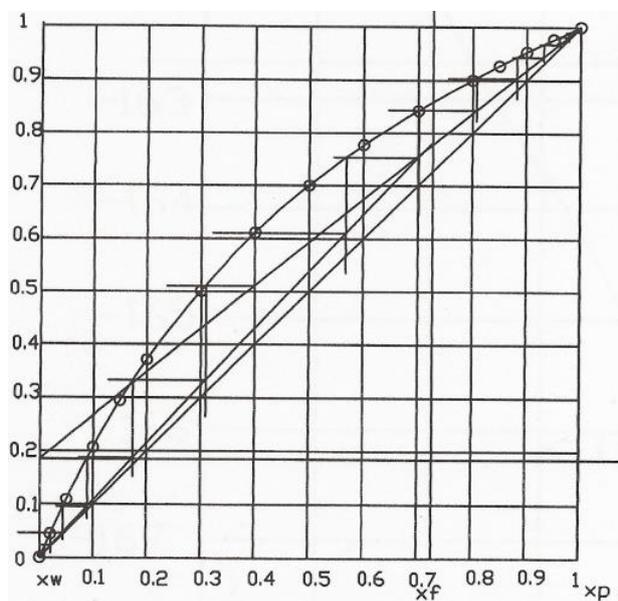


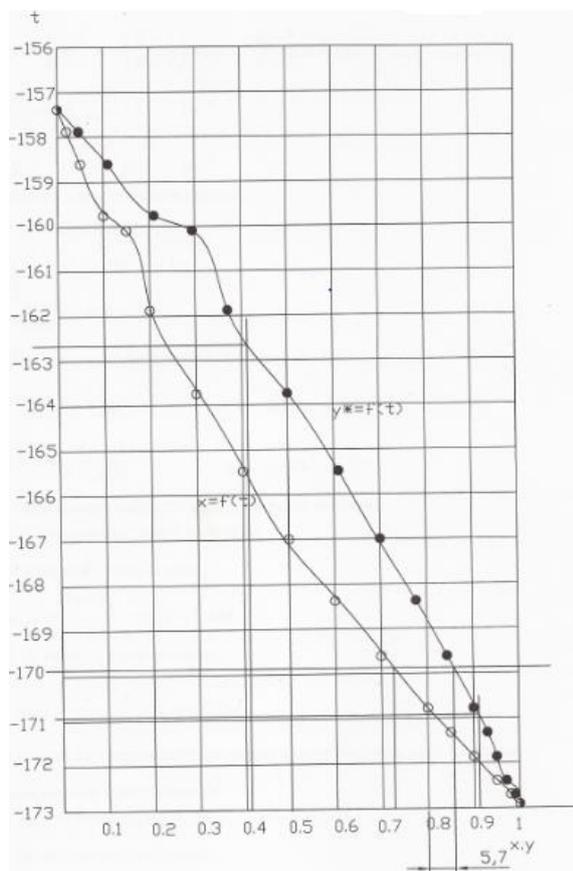
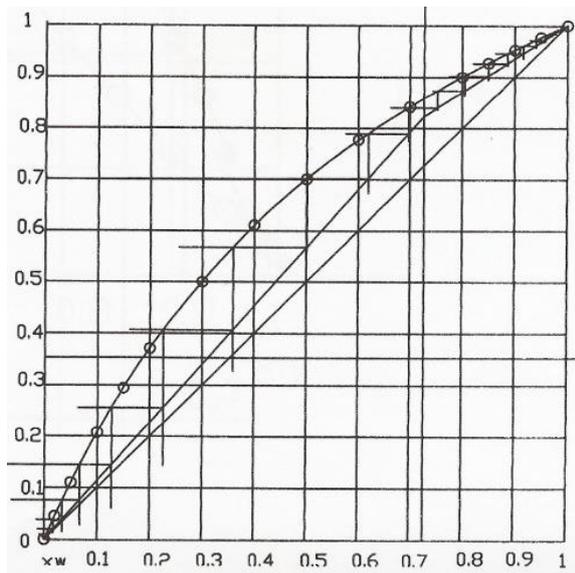
Рисунок 5. Определение оптимального флегмового числа. 42 тарелки



$b=1.665$

Рисунок 6. Определение оптимального флегмового числа. 45 тарелок

Рисунок 7. t-x,y диаграмма .



$$y = 0.647x + 0.35$$

б) нижней, исчерпывающей части колонны

$$y = \frac{R + F}{R + 1} \cdot x - \left( \frac{F - 1}{R + 1} \right) \cdot x_w \quad \frac{R + F}{R + 1} = 1.132 \quad \left( \frac{F - 1}{R + 1} \right) \cdot x_w = 1.512 \times 10^{-5}$$

$$y = 1.132x + 1.512 \times 10^{-5}$$

Расход пара по высоте колонны:

$$G_{\text{пар}} := G_p \cdot (R + 1) = 2.157 \times 10^3 \frac{\text{M}^3}{\text{ч}} \quad \frac{G}{3600} = 0.599 \frac{\text{M}^3}{\text{с}}$$

Потоки жидкости по верхней и нижней части колонны:

$$L_v := G_p \cdot \frac{R}{3600} = 0.388 \frac{\text{M}^3}{\text{с}} \quad L_n := G_p \cdot \frac{R + F}{3600} = 0.679 \frac{\text{M}^3}{\text{с}}$$

Определение скорости пара и диаметра колонны: [с.237,1]

Средние концентрации жидкости:

а) в верхней части колонны

$$x_{\text{cr1}} := \frac{x_f + x_p}{2} = 0.864$$

а) в нижней части колонны

$$x_{\text{cr2}} := \frac{x_f + x_w}{2} = 0.364$$

Средние концентрации пара находим по уравнениям рабочих линий:

а) в верхней части колонны

$$y_{\text{cr1}} := 0.647x_{\text{cr1}} + 0.353 = 0.912$$

б) в нижней части колонны

$$y_{\text{cr2}} := 1.132x_{\text{cr2}} + 1.512 \times 10^{-5} = 0.412$$

Средние температуры пара определяем по t-x,y диаграмме (рис.7)

а) при  $y_{cr1} = 0.912$

$$t_{cr1} := -170.9 \text{ } ^\circ\text{C} \quad T_{cr1} := T_0 + t_{cr1} = 102.07 \text{ K}$$

б) при  $y_{cr2} = 0.412$

$$t_{cr2} := -162.6 \text{ } ^\circ\text{C} \quad T_{cr2} := T_0 + t_{cr2} = 110.34 \text{ K}$$

Средние молярные массы и плотности пара:

$$\text{а) } M_{cr1} := y_{cr1} \cdot M_{N_2} + (1 - y_{cr1}) \cdot M_{O_2} = 28.353 \frac{\text{КГ}}{\text{КМОЛЬ}}$$

$$\rho_{cr1} := \frac{M_{cr1} \cdot T_0}{22.4 \cdot T_{cr1}} = 3.385 \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3}$$

$$\text{б) } M_{cr2} := y_{cr2} \cdot M_{N_2} + (1 - y_{cr2}) \cdot M_{O_2} = 30.353 \frac{\text{КГ}}{\text{КМОЛЬ}}$$

$$\rho_{cr2} := \frac{M_{cr2} \cdot T_0}{22.4 \cdot T_{cr2}} = 3.353 \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3}$$

Средняя плотность пара в колонне:

$$\rho_p := \frac{\rho_{cr1} + \rho_{cr2}}{2} = 3.369 \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3} \quad x_p = 1$$

Температура вверху колонны при  $y_p := 1$

$$t_p := -170.9 \text{ } ^\circ\text{C} \quad T_p := t_p + T_0 = 102.07 \text{ K}$$

в кубе испарителя при  $y_w := 1$

$$t_w := -162.6 \text{ } ^\circ\text{C} \quad T_w := t_w + T_0 = 110.34 \text{ K}$$

(по t-x,y диаграмме)

$$\text{Плотность жидкого азота при } t_{\text{пл}} := -170.9 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \rho_{\text{N}_2} := 717 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \quad [\text{с.277,2}]$$

$$\text{Плотность жидкого кислорода при } t_{\text{пл}} := -162.6 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \rho_{\text{O}_2} := 1116 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \quad [\text{с.143,3}]$$

Принимаем среднюю плотность жидкости в колонне

$$\rho_{\text{zh}} := \frac{\rho_{\text{N}_2} + \rho_{\text{O}_2}}{2} = 916.5 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Определяем скорость пара в колонне.

Зададим коэффициент C, зависящий от конструкции тарелок, расстояния между тарелками, рабочего давления в колонне, нагрузки колонны по жидкости:

Расстояние между тарелками принимаем 200 мм по рекомендациям: [с.141,4]

$$h := 0.2 \text{ м}$$

$$C := 0.003$$

$$w := C \cdot \sqrt{\frac{\rho_{\text{zh}} h}{\rho_{\text{p}}}} = 0.132 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Для нахождения объемного расхода, проходящего через колонну пара рассчитаем следующие параметры:

Средняя температура в колонне:

$$t_{\text{cr}} := \frac{t_{\text{cr1}} + t_{\text{cr2}}}{2} = -166.795 \quad T_{\text{cr}} := T_0 + t_{\text{cr}} = 106.205 \text{ К}$$

$$\text{Мольная масса дистиллята: } M_{\text{p}} := x_{\text{p}} \cdot M_{\text{N}_2} + (1 - x_{\text{p}}) \cdot M_{\text{O}_2} = 28 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$$

Тогда объемный расход проходящего через колонну пара при средней температуре

в колонне составит: 
$$\underline{V} := \frac{G_p \cdot (R + 1) \cdot 22.4 \cdot T_{cr} \cdot P_0}{M_p \cdot T_0 \cdot 3600 \cdot P} = 0.027 \frac{m^3}{c}$$

Диаметр колонны: 
$$D := \sqrt{\frac{V}{0.785w}} = 0.507 \text{ м}$$

Принимаем  $\underline{D} := 0.5 \text{ м}$

Тогда скорость пара в колонне: 
$$\underline{w} := \frac{V}{0.785D^2} = 0.136 \frac{m}{c}$$

Определение действительного числа тарелок:

По справочным данным при расчете ректификации воздуха как бинарной смеси, КПД принимается равным 0.5.

$$\eta := 0.5$$

Действительное число тарелок находим по формуле: 
$$N_d := \frac{N}{\eta} = 90$$

Из них 58 в укрепляющей части колонны и 32 в исчерпывающей.

$$\underline{N_d} := 92$$

Принимаем большее число тарелок с запасом:

Для укрепляющей части колонны - 59 тарелок

Для исчерпывающей части колонны - 33 тарелки.

Определение высоты колонны.

Высота тарельчатой части колонны:

$$H_t := h \cdot (N_d - 1) = 18.2$$

Высота кубовой части ректификационной колонны диаметром 400-800 мм по рекомендациям  $(1-3)D$  [с.220,5]

Принимаем  $H_k := 0.8$  м

Высота части ректификационной колонны, расположенной выше верхней тарелки принимается равной  $(0.5-1)D$  [с.220,5]

Принимаем  $H_s := 0.4$  м

Высоту колонны определяем по формуле:  $H := H_t + H_k + H_s = 19.4$  м

### Тепловой расчет

при  $t_p = -170.93$  °С

Удельные теплоты конденсации азота и кислорода при температуре в верху колонны.

$$r_{N2} := 17080 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \quad [\text{с.278,2}] \qquad r_{O2} := 20720 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \quad [\text{с.273,2}]$$

$$r_p := \frac{x_{pv}}{100} \cdot r_{N2} \cdot \left(1 - \frac{x_{pv}}{100}\right) \cdot r_{O2} = 3.539 \times 10^4 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$$

Расход теплоты, отдаваемой жидкому кислороду в конденсаторе-дефлегматоре находим по уравнению:

$$Q_p := G_p \cdot (1 + R) \cdot r_p = 7.635 \times 10^7 \text{ Вт}$$

### Конструктивный расчет колонны

По итогам технологического расчета определен внутренний диаметр колонны- 0.5 м. и высота колонны - 19.4 м. Учитывая небольшую высоту и малый диаметр колонны - тарелки используем неразборные. Колонну примем цельносварной.

Материал колонны 12Х18Н10Т, тарелки из алюминиевого сплава АмцС.

Принимаем ситчатые тарелки.

$$D = 0.5 \text{ м}$$

$$g := 9.8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$$

### Расчетное давление

Гидростатическое давление:  $P_g := \rho_{zh} \cdot g \cdot H \cdot 10^{-9} = 1.742 \times 10^{-4} \text{ МПа}$

Так как гидростатическое давление равно 5% от рабочего - им пренебрегаем

$$P \cdot 0.05 = 0.035 \text{ МПа}$$

Таким образом:  $P_r := P = 0.7 \text{ МПа}$

Пробное давление при гидроиспытаниях по регламенту:  $P_{pr} = 0.96 \text{ МПа}$

Расчетная температура:  $t_1 := 20^\circ\text{C}$

Допускаемое напряжение стали 12Х18Н10Т при расчетной температуре:

$$t_r := 20 \text{ }^\circ\text{C} \quad \sigma_d := 160 \text{ МПа}$$

Коэффициент сварного шва для автоматической дуговой электросварки:

$$\phi := 1 \quad [\text{с.25,6}]$$

$$\sigma := \sigma_d \cdot \phi = 160 \text{ МПа} \quad [\text{с.11,6}]$$

При гидравлических испытаниях:  $\sigma_{t20} := 240 \text{ МПа}$ - для стали 12Х18Н10Т при

температуре  $t_i := 20 \text{ }^\circ\text{C}$

$$\sigma_i := \frac{\sigma_{t20}}{1.1} = 218.182 \text{ МПа}$$

Прибавка к расчетной толщине стенки:

Скорость коррозии стали 12Х18Н10Т составляет  $\Pi := 0.00 \frac{\text{мм}}{\text{год}}$  [с.349,7]

Срок эксплуатации ориентировочно  $\tau := 20$  лет

Для компенсации коррозии  $c_k := \Pi \cdot \tau = 0.1$  мм

Для компенсации эрозии  $c_e := 0$   $c_1 := c_k + c_e = 0.1$  мм

$c_2 := 0$   $c_3 := 0$   $c_{\text{сум}} := c_1 + c_2 + c_3 = 0.1$  мм

Принимаем  $c_{\text{сум}} := 0.00$  м

Расчет толщины стенки цилиндрической обечайки

$$s_r := \max\left(\frac{P_r \cdot D}{2 \cdot \sigma \cdot \phi - P_r}, \frac{P_r \cdot D}{2 \cdot \sigma_i \cdot \phi - P_r}\right) = 1.096 \times 10^{-3} \text{ м}$$

$$s_{\text{сум}} := s_r + c = 2.096 \times 10^{-3} \text{ м}$$

Принимаем исполнительную толщину стенки:  $S_{\text{исп}} := 0.00$  м

Условие применимости формул для сталей :

$$Us1 := \begin{cases} \text{"Условие применимости формул выполняется"} & \text{if } \frac{S - c}{D} < 0.1 \\ \text{"Условия применимости формул НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Us1 = \text{"Условие применимости формул выполняется"}$$

$$\text{Допускаемое давление в рабочем состоянии: } p := \frac{2 \cdot \sigma \cdot \phi \cdot (S - c)}{D + S - c} = 1.275 \text{ МПа}$$

$$\text{Расчетное давление в рабочем состоянии: } P_r = 0.7 \text{ МПа} \quad P_r < p$$

$$\text{При испытаниях: } p_{pr} := \frac{2 \cdot \sigma_i \cdot \phi \cdot (S - c)}{D + S - c} = 1.739 \text{ МПа}$$

$$Us_1 := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } P_{pr} < p_{pr} \\ \text{"Условия прочности НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Us_1 = \text{"Условие прочности выполняется"}$$

**Вывод:** Таким образом, при полученной толщине стенки обеспечивается прочность цилиндрической обечайки корпуса как в рабочем состоянии, так и в условиях испытания.

### Расчет толщины стенки эллиптической крышки и днища

$$Ser := \max\left(\frac{P_r \cdot D}{2 \cdot \sigma \cdot \phi - 0.5 \cdot P_r}, \frac{P_{pr} \cdot D}{2 \cdot \sigma_i \cdot \phi - 0.5 \cdot P_{pr}}\right) = 1.101 \times 10^{-3} \text{ м}$$

$$Se := Ser + c = 2.101 \times 10^{-3} \text{ м}$$

Принимаем толщину стенки:  $Se := 0.001 \text{ м}$

$$Us_2 := \begin{cases} \text{"Условие применимости формул выполняется"} & \text{if } \frac{Se - c}{D} < 0.1 \\ \text{"Условия применимости формул НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Us_2 = \text{"Условие применимости формул выполняется"}$$

### Допускаемое напряжение в рабочем состоянии

$$p_{ww} := \frac{2 \cdot \sigma \cdot \phi \cdot (Se - c)}{D + 0.5 \cdot (Se - c)} = 1.277 \text{ МПа}$$

Расчетное давление  $P_r = 0.7 \text{ МПа}$

$$Us_3 := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } P < p \\ \text{"Условия прочности НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Us_3 = \text{"Условие прочности выполняется"}$$

$$\text{При испытаниях: } p_i := \frac{(2 \cdot \sigma_i \cdot \phi) \cdot (Se - c)}{[D + 0.5 \cdot (Se - c)]} = 1.742 \text{ МПа}$$

Расчетное пробное давление:  $P_{pr} = 0.96 \text{ МПа}$

$$Us_4 := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } P_{pr} < p_i \\ \text{"Условия прочности НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Us_4 = \text{"Условие прочности выполняется"}$$

**Вывод:** При исполнительной толщине эллиптической крышки 3 мм условия прочности выполняются.

$$\frac{3}{500} = 6 \times 10^{-3} \text{ следовательно аппарат тонкостенный.}$$

### Сливная и переливная перегородки.

Глубина погружения сливной трубы в жидкость на нижележащей тарелке должна быть меньше сливной на 10-30 мм если нет переливных перегородок, если есть, то переливная перегородка меньше сливной, чтобы обеспечить гидравлический затвор и закрыть доступ пара в сливную трубу.

Высота жидкости над прорезями колпачка - 5 мм.

Высота сливной перегородки  $h_s := 0.02 \text{ м}$

Высота переливной перегородки  $h_p := 0.01 \text{ м}$

### Расчет тарелок

Исходные данные:

Высота слоя жидкости, м  $\underline{h} := 0.02$

Плотность среды, кг,м<sup>3</sup>  $\rho_{zh} = 916.5$

Диаметр отверстий на тарелке, м  $d_0 := 0.002$

Шаг отверстий, м  $t := 0.012$

Плотность материала тарелки, кг/м <sup>3</sup>	$\rho_m := 2750$
Свободное сечение тарелки	8%
Прибавка к расчетной толщине стенки, м	$c = 1 \times 10^{-3}$
Ускорение свободного падения, м/с <sup>2</sup>	$g = 9.8$

### Решение

Диск тарелки бескаркасного типа можно рассматривать как тонкую, круглую пластину, опертую по контуру и нагруженную равномерной нагрузкой от собственного веса и веса жидкости.

Предел прочности материала АмцС при температуре 20 °С [8]

$$\sigma_v := 120 \text{ МПа}$$

Допускаемое напряжение материала АмцС при температуре 20 °С

$$\sigma_m := \frac{\sigma_v}{2.5} = 48 \text{ МПа}$$

Плотность материала АмцС [8]  $\rho_m = 2.75 \times 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$

Площадь поверхности тарелки:  $F := \pi \cdot \frac{(D)^2}{4} = 0.196 \text{ м}^2$

Площадь свободного сечения тарелки  $f := F \cdot 0.08 = 0.016 \text{ м}^2$

Площадь слива для колонн диаметром 500 мм[с.213,1]:  $f_s := 0.007 \text{ м}^2$

Масса жидкости на тарелке:  $m := (F - f_s - f) \cdot h \cdot \rho_{zh} = 3.183 \text{ кг}$

Нагрузка от веса жидкости:  $Q := m \cdot g = 31.192 \text{ Н}$

Примем расчетную толщину тарелки в первом приближении, равную:

$$s_1 := 0.002 \text{ м}$$

$$\text{Тогда масса тарелки будет: } m_t := (F - f_s - f) \cdot s_1 \cdot \rho_m = 0.955 \text{ кг}$$

$$\text{Нагрузка от веса тарелки: } Q_t := m_t \cdot g = 9.359 \text{ Н}$$

$$\text{Равномерная нагрузка будет: } \underline{P} := \frac{Q + Q_t}{0.785 D^2} = 206.63 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$$

$$\text{Проверка выбранной толщины стенки: } S_t := D \cdot \sqrt{\frac{5 \cdot P}{16 \cdot \sigma \cdot 10^6}} + c = 1.318 \times 10^{-3} \text{ м}$$

Выбранной толщины хватает для необходимой нагрузки.

$$\underline{S}_t := 0.002 \text{ м} \quad \text{при} \quad D = 0.5 \text{ м}$$

$$\mu := 0.3 \text{ Коэффициент Пуассона [8]}$$

$$\text{Модуль упругости: } E := 0.78 \cdot 10^5 \text{ МПа [8]}$$

$$\text{Цилиндрическая жесткость: } \underline{N} := \frac{E \cdot S_t^3}{12(1 - \mu^2)} = 5.714 \times 10^{-5} \text{ МН}$$

$$\text{Прогиб в центре пластины: } \underline{W} := 4.08 \cdot \frac{P \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^4}{64N} = 9.005 \times 10^{-4} \text{ м}$$

Максимальное напряжение для тарелки, которое будет действовать по ее контуру :

$$\sigma_{\max} := \frac{3 \cdot P \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2}{4 \cdot N^2} = 2.966 \times 10^3 \text{ Па}$$

$$Us_5 := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } \sigma_{\max} < \sigma_m \cdot 10^6 \\ \text{"Условия прочности НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$Us_5 = \text{"Условие прочности выполняется"}$

**Вывод:** выбранная толщина тарелки, равная 2 мм, полностью удовлетворяет все условия прочности и устойчивости.

### Определение диаметра патрубка для исходной смеси

Плотность жидкого азота при температуре на входе  $t_f := -172 \text{ } ^\circ\text{C}$

$$\rho_{fN2} := 689 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \quad [\text{с.277,2}]$$

Плотность жидкого кислорода при температуре на входе  $t_f := -172 \text{ } ^\circ\text{C}$

$$\rho_{fO2} := 1115 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \quad [\text{с.143,3}]$$

$$\text{Плотность исходной смеси: } \rho_f := \left( \frac{x_f}{\rho_{fN2}} + \frac{1-x_f}{\rho_{fO2}} \right)^{-1} = 1.11 \times 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Скорость потока жидкости в штуцерах находится в интервале 0.5-2 м/с, примем скорость потока исходной смеси:

$$w_f := 1.5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$\text{Диаметр патрубка: } d_f := \sqrt{\frac{\frac{G_f}{3600}}{0.785 \rho_f \cdot w_f}} = 0.015 \text{ м}$$

Принимаем трубу наружным диаметром 25 мм и толщиной стенки 2.5 мм. [9]

Наружный вылет патрубка-200 мм

Внутренний вылет патрубка- 50 мм

## Определение диаметра патрубка для отвода кубовой жидкости

Плотность жидкого азота при температуре внизу колонны

$$[c.277,2] \quad t_w = -162.66 \text{ }^\circ\text{C} \quad \rho_{wN2} := 685 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Плотность жидкого кислорода при температуре внизу колонны

$$[c.143,3] \quad t_f = -172 \text{ }^\circ\text{C} \quad \rho_{O2} = 1.116 \times 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$\text{Плотность исходной смеси: } \rho_w := \left( \frac{\frac{x_w}{100}}{\rho_{wN2}} + \frac{1 - \frac{x_w}{100}}{\rho_{O2}} \right)^{-1} = 1.116 \times 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$\text{Диаметр патрубка тогда: } d_w := \sqrt{\frac{\frac{G_w}{3600}}{0.785 \rho_w \cdot w_f}} = 8.303 \times 10^{-3} \text{ м}$$

Принимаем трубу наружным диаметром 20 мм и толщиной стенки 2.5 мм [9]

Наружный вылет патрубка - 200 мм

Внутренний вылет патрубка - 0 мм

## Определение диаметра патрубка для отвода пара-дистиллята

Средний мольный состав пара найдем по формуле:  $y_p := 0.657x_p + 0.343 = 1$

Скорость потока пара в штуцерах лежит в пределах 10-30 м/с:  $w_p := 15 \frac{\text{м}}{\text{с}}$

$$\text{Мольная масса пара: } M_p := M_{N2} \cdot y_p + M_{O2} \cdot (1 - y_p) = 28 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$$

$$\text{Плотность пара вычисляем по формуле } \rho_p := \frac{M_p \cdot T_0}{22.4 T_p} = 3.343 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Расчетный диаметр патрубка пара-дистиллята:  $d_p := \sqrt{\frac{\frac{G_p}{3600}}{0.785 \rho_p \cdot w_p}} = 0.073 \text{ м}$

Принимаем трубу наружным диаметром 76 мм и толщиной стенки 3 мм.[9]

Наружный вылет патрубка - 150 мм

Внутренний вылет патрубка - 50 мм

Примем патрубки по ГОСТу [9]

Для подвода флегмы принимаем патрубок, изготовленный из трубы наружным диаметром 25 мм и толщиной стенки 2.5 мм

$$d_{fl} := 0.02 \text{ м}$$

Для манометра принимаем патрубок, изготовленный из трубы наружным диаметром 12 мм и толщиной стенки 2 мм.

$$d_m := 0.008 \text{ м}$$

Для отбора жидкого азота на орошение верхней колонны принимаем патрубок, изготовленный из трубы наружным диаметром 25 мм и толщиной стенки 2.5 мм.

$$d_{otb} := 0.02 \text{ м}$$

Для уровнемера принимаем патрубок, изготовленный из трубы наружным диаметром 12 мм и толщиной стенки 2 мм.

$$d_y := 0.008 \text{ м}$$

Для предохранительного клапана принимаем патрубок, изготовленный из трубы наружным диаметром 12 мм и толщиной стенки 2 мм.

$$d_{prk} := 0.008 \text{ м}$$

Для преобразователя измерительного принимаем патрубок, изготовленный из трубы наружным диаметром 12 мм и толщиной стенки 2 мм.

$$d_i := 0.001 \text{ м}$$

Для слива лишней жидкости из куба в испаритель принимаем патрубок, изготовленный из трубы наружным диаметром 45 мм и толщиной стенки 2.5 мм.

$$d_{\text{sliv}} := 0.04 \text{ м}$$

### Укрепление отверстий [10]

$$D := 500 \text{ мм}$$

Расчетный диаметр цилиндрической обечайки:  $D_r := 500 \text{ мм}$

$$S := 1000S = 3 \text{ мм}$$

$$c := 1000c = 1 \text{ мм}$$

Расчетный диаметр эллиптической крышки и днища

Расстояние от центра укрепляемого отверстия до оси эллиптического днища:

$$r < 0.4D - 0.5(d \cdot 1000 + 2 \cdot S)$$

$$0.4D - 0.5(d_{\text{fl}} \cdot 1000 + 2 \cdot S) = 187 \text{ мм} \quad r_{\text{fl}} := 90 \text{ мм}$$

$$0.4D - 0.5(d_p \cdot 1000 + 2 \cdot S) = 160.364 \text{ мм} \quad r_{\text{pp}} := 0 \text{ мм}$$

$$0.4D - 0.5(d_{\text{otb}} \cdot 1000 + 2 \cdot S) = 187 \text{ мм} \quad r_{\text{otb}} := 175 \text{ мм}$$

$$0.4D - 0.5(d_{\text{sliv}} \cdot 1000 + 2 \cdot S) = 177 \text{ мм} \quad r_{\text{sliv}} := 0 \text{ мм}$$

$$r_y := 175 \text{ мм}$$

Рассчитывать штуцер для уровнемера далее не будем - т.к. его параметры полностью совпадают со штуцером отбора азота на орошение верхней колонны.

## Расчетный диаметр эллиптического днища

$$D_{re_{fl}} := 2D \cdot \sqrt{1 - 3 \cdot \left(\frac{r_{fl}}{D}\right)^2} = 950.158 \text{ мм}$$

$$D_{re_p} := 2D \cdot \sqrt{1 - 3 \cdot \left(\frac{r_p}{D}\right)^2} = 1 \times 10^3 \text{ мм}$$

$$D_{re_{otb}} := 2D \cdot \sqrt{1 - 3 \cdot \left(\frac{r_{otb}}{D}\right)^2} = 795.299 \text{ мм}$$

$$D_{re_{sliv}} := 2D \cdot \sqrt{1 - 3 \cdot \left(\frac{r_{sliv}}{D}\right)^2} = 1 \times 10^3 \text{ мм}$$

## Расчетные диаметры отверстий:

Штуцеры для отвода кубовой жидкости полностью совпадают со штуцером ввода флегмы, а штуцеры манометра, уровнемера, преобразователя измерительного также выводим из расчета, т.к. их параметры полностью совпадают со штуцером предохранительного клапана.

$$d_{fr} := d_f \cdot 1000 + 2c = 17.199 \text{ мм}$$

$$d_{pr} := d_p \cdot 1000 + 2c = 75.272 \text{ мм}$$

$$d_{wr} := d_w \cdot 1000 + 2c = 10.303 \text{ мм}$$

$$d_{flr} := d_{fl} \cdot 1000 + 2c = 22 \text{ мм}$$

$$d_{otbr} := d_{otb} \cdot 1000 + 2c = 22 \text{ мм}$$

$$d_{prkr} := d_{prk} \cdot 1000 + 2c = 10 \text{ мм}$$

$$d_{slivr} := d_{sliv} \cdot 1000 + 2c = 42 \text{ мм}$$

## Расчетные толщины стенки штуцера:

$$s_{ff} := \frac{P_r \cdot (d_f \cdot 1000 + 2c)}{2\phi \cdot \sigma - P_r} = 0.038 \text{ мм}$$

$$s_{pr} := \frac{P_r \cdot (d_p \cdot 1000 + 2c)}{2\phi \cdot \sigma - P_r} = 0.165 \text{ мм}$$

$$s_{wr} := \frac{P_r \cdot (d_w \cdot 1000 + 2c)}{2\phi \cdot \sigma - P_r} = 0.023 \text{ мм}$$

$$s_{flr} := \frac{P_r \cdot (d_{fl} \cdot 1000 + 2c)}{2\phi \cdot \sigma - P_r} = 0.048 \text{ мм}$$

$$s_{otbr} := \frac{P_r \cdot (d_{otb} \cdot 1000 + 2c)}{2\phi \cdot \sigma - P_r} = 0.048 \text{ мм}$$

$$s_{prkr} := \frac{P_r \cdot (d_{prk} \cdot 1000 + 2c)}{2\phi \cdot \sigma - P_r} = 0.022 \text{ мм}$$

$$s_{sliv} := \frac{P_r \cdot (d_{sliv} \cdot 1000 + 2c)}{2\phi \cdot \sigma - P_r} = 0.092 \text{ мм}$$

Расчетные длины внешних и внутренних частей штуцеров, участвующих в укреплении и учитываемые при расчете:

$$l_{1f} := 150 \text{ мм} \quad l_{1sliv} := 200 \text{ мм} \quad l_{1fl} := 90 \text{ мм} \quad l_{1otb} := 150 \text{ мм}$$

$$l_{3f} := 20 \text{ мм} \quad l_{3sliv} := 0 \text{ мм} \quad l_{3fl} := 90 \text{ мм} \quad l_{3otb} := 120 \text{ мм}$$

$$l_{1prk} := 60 \text{ мм} \quad l_{3prk} := 20 \text{ мм}$$

$c = 1 \text{ мм}$  Прибавка на коррозию и эрозию

$S = 3 \text{ мм}$  Толщина стенки цилиндрической обечайки

$$l_{f1} := \min \left[ l_{1f}, 1.25 \cdot \sqrt{(d_f \cdot 1000 + 2c) \cdot (S - c)} \right] = 7.331 \text{ мм}$$

$$lp_{r1} := \min \left[ 1l_f, 1.25 \cdot \sqrt{(d_p \cdot 1000 + 2c) \cdot (S - c)} \right] = 15.337 \text{ MM}$$

$$lw_{r1} := \min \left[ 1l_f, 1.25 \cdot \sqrt{(d_w \cdot 1000 + 2c) \cdot (S - c)} \right] = 5.674 \text{ MM}$$

$$lpr_{r1} := \min \left[ 1l_{prk}, 1.25 \cdot \sqrt{(d_{pr} + 2c) \cdot (S - c)} \right] = 15.539 \text{ MM}$$

$$lf_{f1} := \min \left[ 1l_{fl}, 1.25 \cdot \sqrt{(d_{fl} \cdot 1000 + 2c) \cdot (S - c)} \right] = 8.292 \text{ MM}$$

$$lotb_{f1} := \min \left[ 1l_{otb}, 1.25 \cdot \sqrt{(d_{otb} \cdot 1000 + 2c) \cdot (S - c)} \right] = 8.292 \text{ MM}$$

$$lsliv_{f1} := \min \left[ 1l_{sliv}, 1.25 \cdot \sqrt{(d_{sliv} \cdot 1000 + 2c) \cdot (S - c)} \right] = 11.456 \text{ MM}$$

$$lf_{r3} := \min \left[ 13_f, 1.25 \cdot \sqrt{(d_f + 2c) \cdot (S - c)} \right] = 2.509 \text{ MM}$$

$$lp_{r3} := \min \left[ 13_f, 1.25 \cdot \sqrt{(d_p \cdot 1000 + 2c) \cdot (S - c)} \right] = 15.337 \text{ MM}$$

$$flw_{r3} := \min \left[ 13_f, 1.25 \cdot \sqrt{(d_w \cdot 1000 + 2c) \cdot (S - c)} \right] = 5.674 \text{ MM}$$

$$lpr_{r3} := \min \left[ 13_{prk}, 1.25 \cdot \sqrt{(d_{pr} + 2c) \cdot (S - c)} \right] = 15.539 \text{ MM}$$

$$lsliv_{r3} := \min \left[ 1l_{sliv}, 1.25 \cdot \sqrt{(d_{sliv} \cdot 1000 + 2c) \cdot (S - c)} \right] = 11.456 \text{ MM}$$

$$lotb_{r3} := \min \left[ 13_{otb}, 1.25 \cdot \sqrt{(d_{otb} \cdot 1000 + 2c) \cdot (S - c)} \right] = 8.292 \text{ MM}$$

$$lf_{f3} := \min \left[ 13_{fl}, 1.25 \cdot \sqrt{(d_{fl} \cdot 1000 + 2c) \cdot (S - c)} \right] = 8.292 \text{ MM}$$

Ширина зоны укрепления в обечайке и днище

$$L0 := \sqrt{Dr \cdot (S - c)} = 31.623 \text{ MM}$$

$$L0e_p := \sqrt{Dre_p \cdot (S - c)} = 44.721 \text{ MM}$$

$$L0e_{sliv} := \sqrt{Dre_{sliv} \cdot (S - c)} = 44.721 \text{ MM}$$

$$L0e_{fl} := \sqrt{Dre_{fl} \cdot (S - c)} = 43.593 \text{ MM}$$

$$L0e_{otb} := \sqrt{Dre_{otb} \cdot (S - c)} = 39.882 \text{ мм}$$

Расчетный диаметр отверстия, не требующий укрепления при отсутствии избыточной толщины стенок сосуда, днища и крышки:

$$d_{0r} := 0.4 \cdot \sqrt{Dr \cdot (S - c)} = 12.649 \text{ мм}$$

$$d_{0re} := 0.4 \cdot \sqrt{Dr \cdot (Se \cdot 1000 - c)} = 12.649 \text{ мм}$$

Из данного выражения видно, что отверстия для штуцеров манометра, уровнемера, предохранительного клапана, преобразователя измерительного - укреплять не следует.

Примем начальную толщину укрепления  $s_{yr} := 0 \text{ мм}$

Расчетная длина образующей оболочки в зоне укрепления:

$$L0 := \sqrt{Dr \cdot (s_{yr} + S - c)} = 31.623 \text{ мм}$$

$$L0e_p := \sqrt{Dre_p \cdot (s_{yr} + S - c)} = 44.721 \text{ мм}$$

$$L0e_{sliv} := \sqrt{Dre_{sliv} \cdot (s_{yr} + S - c)} = 44.721 \text{ мм}$$

$$L0e_{fl} := \sqrt{Dre_{fl} \cdot (s_{yr} + S - c)} = 43.593 \text{ мм}$$

$$L0e_{otb} := \sqrt{Dre_{otb} \cdot (s_{yr} + S - c)} = 39.882 \text{ мм}$$

Расчетная толщина стенки штуцера из того же материала, что и колонна

12X18H10T  $\sigma_{sh} := \sigma = 160 \text{ МПа}$

$$sr_{shf} := \frac{P_r \cdot (d_f \cdot 1000 + 2c)}{2\sigma \cdot \phi - P_r} = 0.038 \text{ мм}$$

$$sr_{shp} := \frac{P_r \cdot (d_p \cdot 1000 + 2c)}{2\sigma \cdot \phi - P_r} = 0.165 \text{ мм}$$

$$sr_{shw} := \frac{P_r \cdot (d_w \cdot 1000 + 2c)}{2\sigma \cdot \phi - P_r} = 0.023 \text{ мм}$$

$$sr_{shfl} := \frac{P_r \cdot (d_{fl} \cdot 1000 + 2c)}{2\sigma \cdot \phi - P_r} = 0.048 \text{ мм}$$

$$sr_{shotb} := \frac{P_r \cdot (d_{otb} \cdot 1000 + 2c)}{2\sigma \cdot \phi - P_r} = 0.048 \text{ мм}$$

$$sr_{shsliv} := \frac{P_r \cdot (d_{sliv} \cdot 1000 + 2c)}{2\sigma \cdot \phi - P_r} = 0.092 \text{ мм}$$

$$k1 := \frac{\sigma}{\sigma_{sh}} = 1 \quad k2 := k1 = 1$$

$$sr := 1000 \cdot sr = 1.096 \text{ мм}$$

Используем комбинированное укрепление приварным кольцом снаружи

Стенки всех укрепляемых штуцеров выбраны  $S_{sh} := 2.5 \text{ мм}$

Кроме стенки штуцера вывода паров дистиллята, которая составляет:

$$S_{shp} := S$$

Условие укрепления отверстия комбинированным укреплением:

$$A := If_{f3} \cdot (S_{sh} - 2c) + \sqrt{Dr \cdot (syr + S - c) \cdot (k2 \cdot syr + S - sr - c)} = 29.837$$

$$Z := (If_{f1} + syr + S - sr - c) \cdot (0.8 \cdot S_{sh} - sr_{shf} - c) + A = 37.762$$

$$Z_z := 0.5 \cdot (d_{fr} - d_{or}) \cdot sr = 2.494$$

$$Us_k := \begin{cases} \text{"Условие укрепления отверстий выполняется. Приварное кольцо не требуется"} & \text{if } Z_z < Z \\ \text{"Условие укрепления отверстий НЕ выполняется. Требуется приварное кольцо"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Us_k = \text{"Условие укрепления отверстий выполняется. Приварное кольцо не требуется"}$$

$$\underline{A}_{f3} := l_{f3} \cdot (S_{sh} - 2c) + \sqrt{Dre_{fl} \cdot (syr + S - c)} \cdot (k2 \cdot syr + S - sr - c) = 43.547$$

$$\underline{Z}_{f1} := (l_{f1} + syr + S - sr - c) \cdot (0.8S_{sh} - sr_{shfl} - c) + A = 52.299$$

$$\underline{Z}_{za} := 0.5 \cdot (d_{flr} - d_{0r}) \cdot sr = 5.125$$

$$Us_{f7} := \begin{cases} \text{"Условие укрепления отверстий выполняется. Приварное кольцо не требуется"} & \text{if } Z_z < Z \\ \text{"Условие укрепления отверстий НЕ выполняется. Требуется приварное кольцо"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\underline{Us}_{f7} = \text{"Условие укрепления отверстий выполняется. Приварное кольцо не требуется"}$$

$$\underline{A}_{p3} := l_{p3} \cdot (S_{shp} - 2c) + \sqrt{Dre_p \cdot (syr + S - c)} \cdot (k2 \cdot syr + S - sr - c) = 55.759$$

$$\underline{p}_{r1} := (l_{p1} + syr + S - sr - c) \cdot (0.8S_{shp} - sr_{shp} - c) + A = 75.816$$

$$\underline{Z}_{za} := 0.5 \cdot (d_{pr} - d_{0r}) \cdot sr = 34.322$$

$$Us_{b8} := \begin{cases} \text{"Условие укрепления отверстий выполняется. Приварное кольцо не требуется"} & \text{if } Z_z < Z \\ \text{"Условие укрепления отверстий НЕ выполняется. Требуется приварное кольцо"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\underline{Us}_{b8} = \text{"Условие укрепления отверстий выполняется. Приварное кольцо не требуется"}$$

$$\underline{A}_{sliv3} := l_{sliv3} \cdot (S_{sh} - 2c) + \sqrt{Dre_{sliv} \cdot (syr + S - c)} \cdot (k2 \cdot syr + S - sr - c) = 46.15$$

$$\underline{Z}_{sliv1} := (l_{sliv1} + syr + S - sr - c) \cdot (0.8S_{sh} - sr_{shsliv} - c) + A = 57.372$$

$$\underline{Z}_{za} := 0.5 \cdot (d_{slivr} - d_{0r}) \cdot sr = 16.086$$

$$Us_{b9} := \begin{cases} \text{"Условие укрепления отверстий выполняется. Приварное кольцо не требуется"} & \text{if } Z_z < Z \\ \text{"Условие укрепления отверстий НЕ выполняется. Требуется приварное кольцо"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\underline{Us}_{b9} = \text{"Условие укрепления отверстий выполняется. Приварное кольцо не требуется"}$$

$$\underline{A}_{otb3} := l_{otb3} \cdot (S_{sh} - 2c) + \sqrt{Dre_{otb} \cdot (syr + S - c)} \cdot (k2 \cdot syr + S - sr - c) = 40.193$$

$$\underline{Z}_{otb1} := (l_{otb1} + syr + S - sr - c) \cdot (0.8S_{sh} - sr_{shotb} - c) + A = 48.945$$

$$Z_z := 0.5 \cdot (d_{otbr} - d_{0r}) \cdot sr = 5.125$$

$$Us_{10} := \begin{cases} \text{"Условие укрепления отверстий выполняется. Приварное кольцо не требуется"} & \text{if } Z_z < Z \\ \text{"Условие укрепления отверстий НЕ выполняется. Требуется приварное кольцо"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Us_{10} = \text{"Условие укрепления отверстий выполняется. Приварное кольцо не требуется"}$$

Принимаем  $sy := c$  то есть приварное кольцо не требуется.

Все отверстия укрепляются с помощью штуцера снаружи и изнутри.

Допускаемое внутреннее избыточное давление узла сопряжения штуцера и стенки аппарата

$k_1 = 1$  для обечаек

$$v := \min \left[ \frac{L_0 \cdot (k_2 \cdot syr + S - c) + \left[ (lf_{r1} + syr + S - sr - c) \cdot (0.8 \cdot S_{sh} - c) + lf_{r3} \cdot (S_{sh} - 2c) \right] \cdot k_1}{\left[ L_0 + 0.5 \cdot (d_{fr} - d_{0r}) + k_1 \cdot (lf_{r1} + syr + 1000s - sr - c) \cdot \frac{1000d_f + 2c}{Dr} \right] \cdot (S - c)}, 1 \right] = 1$$

$$P_{sh} := \left( 2 \cdot k_1 \cdot \phi \cdot \sigma \cdot \frac{S - c}{Dr + S - c} \right) \cdot v = 1.275 \text{ МПа}$$

$$Us_{11} := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } P_r < P_{sh} \\ \text{"Условие прочности НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Us_{11} = \text{"Условие прочности выполняется"}$$

$k_1 := 2$  для выпуклых днищ

$$v := \min \left[ \frac{L_0 \cdot \left[ (k_2 \cdot syr + S - c) + \left[ (lf_{r1} + syr + S - sr - c) \cdot (0.8 \cdot S_{sh} - c) + lf_{r3} \cdot (S_{sh} - 2c) \right] \right] \cdot k_1}{\left[ L_0 + 0.5 \cdot (d_{fl} - d_{0r}) + k_1 \cdot (lf_{r1} + syr + 1000s - sr - c) \cdot \frac{1000d_{fl} + 2c}{Dr} \right] \cdot (S - c)}, 1 \right] = 1$$

$$P_{sh} := \left( 2 \cdot k_1 \cdot \phi \cdot \sigma \cdot \frac{S - c}{Dre_{fl} + S - c} \right) \cdot v = 1.344$$

МПа

$$Ush_{12} := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } P_r < P_{sh} \\ \text{"Условие прочности НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\boxed{Ush_{12} = \text{"Условие прочности выполняется"}}$$

$$v_{sh} := \min \left[ \frac{L0 \cdot (k2 \cdot syr + S - c) + \left[ (lotb_{r1} + syr + S - sr - c) \cdot (0.8 S_{sh} - c) + lotb_{r3} \cdot (S_{sh} - 2c) \right] \cdot k1}{\left[ L0 + 0.5 \cdot (d_{otb} - d_{0r}) + k1 \cdot (lotb_{r1} + syr + 1000s - sr - c) \cdot \frac{1000d_{otb} + 2c}{Dr} \right] \cdot (S - c)}, 1 \right] = 1$$

$$P_{sh} := \left( 2 \cdot k1 \cdot \phi \cdot \sigma \cdot \frac{S - c}{Dre_{fl} + S - c} \right) \cdot v = 1.344 \text{ МПа}$$

$$Ush_{13} := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } P_r < P_{sh} \\ \text{"Условие прочности НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\boxed{Ush_{13} = \text{"Условие прочности выполняется"}}$$

$$v_{sh} := \min \left[ \frac{L0 \cdot (k2 \cdot syr + S - c) + \left[ (lsliv_{r1} + syr + S - sr - c) \cdot (0.8 S_{sh} - c) + lsliv_{r3} \cdot (S_{sh} - 2c) \right] \cdot k1}{\left[ L0 + 0.5 \cdot (d_{sliv} - d_{0r}) + k1 \cdot (lsliv_{r1} + syr + 1000s - sr - c) \cdot \frac{1000d_{sliv} + 2c}{Dr} \right] \cdot (S - c)}, 1 \right] = 1$$

$$P_{sh} := \left( 2 \cdot k1 \cdot \phi \cdot \sigma \cdot \frac{S - c}{Dre_{sliv} + S - c} \right) \cdot v = 1.277 \text{ МПа}$$

$$Ush_{14} := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } P_r < P_{sh} \\ \text{"Условие прочности НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\boxed{Ush_{14} = \text{"Условие прочности выполняется"}}$$

**Вывод:** Условие прочности показывает возможность использования комбинированного укрепления отверстия штуцером с внешней стороны.

### Расчет фланцевого соединения

В качестве примера произведем расчет фланца для патрубка выхода конденсата:

Диаметр штуцера:  $d_{sh} := 0.059 \text{ м}$

Допускаемое напряжение для материала болтов 12Х18Н10Т [с.14,6]:

$$\sigma_b := 110 \text{ МПа}$$

Диаметр болтов фланцевого соединения:  $d_b := 0.01 \text{ м}$  [с.548,11]

Модуль упругости фланца:  $E := 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$  [с.24,6]

Нормативный зазор между втулкой и гайкой в соответствии с рекомендациями:

$$u := 0.00 \text{ м} \quad [с.95,12]$$

### Решение:

Толщина втулки плоских приварных фланцев:  $c := 0.00 \text{ м}$

$$s_0 \geq s \quad \text{Примем} \quad s_0 := 0.00 \text{ м}$$

Высота втулки:  $h_b \geq 0.5 \cdot \sqrt{d_p \cdot (s_0 - c)}$

$$h_b := 0.5 \cdot \sqrt{d_p \cdot (s_0 - c)} = 6.652 \times 10^{-3}$$

Примем значение высоты втулки:  $h_{b, \text{min}} := 0.01 \text{ м}$

Диаметр болтовой окружности плоских приварных фланцев:

$$D_b \geq d_p + 2(2 \cdot s_0 + d_b + u)$$

$$D_b := d_p + 2(2 \cdot s_0 + d_b + u) = 0.109 \text{ м}$$

Примем:  $D_{b, \text{min}} := 0.12 \text{ м}$

Наружный диаметр фланца:

Конструктивную добавку для размещения шестигранных гаек (обычных) по диаметру фланца примем по табл.4[с.95,12]:

$$a := 0.03 \text{ м}$$

Диаметр отверстия под болт:  $d := 0.01 \text{ м}$

$$D_n \geq D_b + a \quad D_n := D_b + a = 0.152 \text{ м}$$

Примем  $D_n := 0.16 \text{ м}$

Наружный диаметр прокладки при нормативном параметре, зависящем от типа прокладки:

$e := 0.01 \text{ м}$ , так как выбираем плоскую прокладку по табл 1.41 [с.95,12]

$$D_{np} := D_b - e = 0.09 \text{ м}$$

Средний диаметр прокладки:

ширина прокладки плоской, неметаллической по табл.1.42 [с.95,12]

$$b := 0.01 \text{ м}$$

$$D_{sn} := D_{np} - b = 0.075 \text{ м}$$

Количество болтов, необходимое для обеспечения герметичности соединения:

Шаг расположения болтов

$$t_{sh} := 4 \cdot d_b = 0.048 \text{ м}$$

$$n_b := \frac{\pi \cdot D_b}{t_{sh}} = 7.854$$

Применяем  $n_b := 8 \text{ шт}$

Высота(толщина) фланца ориентировочно:

По рисунку 1.40 [с.97,12] определяем коэффициент:  $\lambda_f := 0.42$

Эквивалентная толщина втулки:  $\frac{d_p}{s_0} = 14.75$

$\beta_1 := 2.1$ ; по рисунку 1.39 [с.95,12]

$$s_{ek} := s_0 \cdot \left[ 1 + \frac{h_b \cdot (\beta_1 - 1)}{h_b + 0.25 \cdot (\beta_1 + 1) \cdot \sqrt{d_p \cdot s_0}} \right] = 6.546 \times 10^{-3} \text{ м}$$

$$h_f \geq \lambda_f \cdot \sqrt{d_p \cdot s_{ek}} \quad \lambda_f \cdot \sqrt{d_p \cdot s_{ek}} = 8.352 \times 10^{-3}$$

Примем  $h_f := 0.01$  м

Болтовая нагрузка, необходимая для обеспечения герметичности. Расчет сводится к определению нагрузок для двух различных состояний: при монтаже и в рабочих условиях.

Болтовая нагрузка в условиях монтажа.

Равнодействующая внутреннего давления

$$F_d := P_r \cdot \pi \cdot \frac{D_{sn}^2}{4} = 3.093 \times 10^{-3} \text{ МН}$$

Выберем прокладку из фторопласта толщиной 2 мм, для нее: [с.98,12]

$$k_{pr} := 2.5$$

Толщина прокладки:  $h_{pr} := 0.002$  м

Минимальное давление обжатия:  $p_{pr} := 10$  МПа

Допускаемое давление обжатия прокладки:  $p_{dpr} := 40$  МПа

Модуль упругости фторопласта:  $E_{pr} := 2000$  МПа

Эффективная ширина прокладки:  $b_0 := b = 0.015$  м

Реакция прокладки:  $R_p := \pi \cdot D_{sn} \cdot b_0 \cdot k_{pr} \cdot P_r = 6.185 \times 10^{-3}$  МН

Расчетная площадь поперечного сечения болта принимается:

$$f_b := 1.35 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

Линейная податливость прокладки, при:  $k_p := 1$

$$y_{pr} := \frac{k_p \cdot h_{pr}}{E_{pr} \cdot \pi \cdot D_{sn} \cdot b} = 2.829 \times 10^{-4} \frac{\text{м}}{\text{МН}}$$

Угловая податливость фланца:

безразмерные параметры  $\lambda_{f,ek} := \frac{h_f}{\sqrt{d_p \cdot s_{ek}}} = 0.509$

$$\psi_1 := 1.28 \cdot \log\left(\frac{D_n}{d_p}\right) = 0.555 \quad \psi_2 := \frac{D_n + d_p}{D_n - d_p} = 2.168$$

Приведенный изгибающий момент:

$$M_0 := \max\left[0.5 \cdot (D_b - D_{sn}) \cdot F_{b1}, 0.5 \cdot \left[(D_b - D_{sn}) \cdot F_{b2} + (D_{sn} - d_p - s_{ek}) \cdot F_d\right]\right] = 1.358 \times 10^{-3}$$

МН·м

$$\sigma_1 := T_f \cdot M_0 \cdot \frac{v}{d_p \cdot (S - c)^2} = 1.596 \times 10^{-3}$$

МПа

Максимальное напряжение в сечении, ограниченном размером S0:

$$\sigma_0 := f_f \cdot \sigma_1 = 1.596 \times 10^{-3}$$

МПа

Тангенциальное и меридиональное напряжения во втулке фланца от внутреннего давления:

$$\sigma_t := \frac{p_{pr} \cdot d_p}{2 \cdot (s_0 - c)} = 98.333$$

МПа

$$\sigma_m := \frac{p_{pr} \cdot d_p}{4 \cdot (s_0 - c)} = 49.167$$

МПа

Допускаемое напряжение для фланца в сечении  $S_0$ , принимаемое при количестве нагружений соединения (сборка-разборка) при  $P_p < 4$  МПа:

МПа

$$\sigma_{d0} := 0.003 E = 600$$

Тогда условие прочности втулки фланца:

$$Usl_{18} := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } \sqrt{(\sigma_0 + \sigma_m)^2 + \sigma_t^2} - (\sigma_0 + \sigma_m) \cdot \sigma_t < \phi \cdot \sigma_{d0} \\ \text{"Условия прочности НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\sqrt{(\sigma_0 + \sigma_m)^2 + \sigma_t^2} - (\sigma_0 + \sigma_m) \cdot \sigma_t = 85.159$$

МПа

$$Usl_{18} = \text{"Условие прочности выполняется"}$$

$$\phi \cdot \sigma_{d0} = 600$$

МПа

$$\nu := \frac{1}{1 + 0.9 \lambda_f \cdot \left( 1 + \psi_1 \cdot \frac{h_f^2}{s_{ek}^2} \right)} = 0.488 \quad \chi_f := \frac{[1 - \nu \cdot (1 + 0.9 \lambda_f)] \cdot \psi_2}{h_f^3 \cdot E} = 3.133 \frac{\text{М}}{\text{МН}}$$

Расстояние между опорными поверхностями головки болта и гайки:

примем конструктивно  $l_{ob} := 0.04 \text{ м}$

Расчетная длина болта:  $l_b := l_{ob} + 0.28 \cdot d = 0.046 \text{ м}$

Линейная податливость болтов:  $y_b := \frac{l_b}{E \cdot f_b \cdot n_b} = 2.126 \times 10^{-4} \frac{\text{м}}{\text{МН}}$

Коэффициент жесткости фланцевого соединения:

$$k_{zh} := \frac{y_b + 0.5 \cdot y_f \cdot (D_b - d_p - s_{ek}) \cdot (D_b - D_{sn})}{y_p + y_b + 0.5 \cdot y_f \cdot (D_b - D_{sn})^2} = 1.105$$

Болтовая нагрузка в условиях монтажа: [с.93,12]

$$\sigma_{b20} := 130 \text{ МПа}$$

Осевое растягивающее усилие:  $F_1 := 0.25 \cdot \pi \cdot (d_p + 2 \cdot s \cdot 10^{-6}) \cdot P_r = 0.032 \text{ МН}$

$$F_{b1} := \max \left[ \begin{array}{l} k_{zh} \cdot (F_d - F_1) + R_p \\ 0.5 \cdot \pi \cdot D_{sn} \cdot b_0 \cdot p_{pr} \\ 0.4 \cdot \sigma_{b20} \cdot n_b \cdot f_b \end{array} \right] = 0.056 \text{ МН}$$

Болтовая нагрузка в рабочих условиях

Коэффициент линейного расширения материала болтов и фланцев 12Х18Н10Т:

$$\alpha := 16.6 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{С}^0} \quad [\text{с.21,6}]$$

$$t_{kv} := 80 \text{ } ^\circ\text{С}$$

Усилие, возникающее от температурных деформаций:

$$F_t := \frac{y_b n_b \cdot f_b \cdot E \cdot (\alpha \cdot t_r - \alpha \cdot 0.97 \cdot t_r)}{y_p + y_b + 0.5 \cdot y_f \cdot (D_b - D_{sn})^2} = 4.988 \times 10^{-4} \text{ МН}$$

$$F_{b2} := F_{b1} + (1 - k_{zh}) \cdot (F_d - F_1) + F_t = 0.06 \text{ МН}$$

Условия прочности болтов  $\frac{F_{b1}}{n_b \cdot f_b} = 52 \text{ МПа}$

$$Us1_{15} := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } \frac{F_{b1}}{n_b \cdot f_b} \leq \sigma_{b20} \\ \text{"Условия прочности НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\sigma_{b20} = 130 \text{ МПа}$$

$$Us1_{15} = \text{"Условие прочности выполняется"}$$

$$Us1_{16} := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } \frac{F_{b2}}{n_b \cdot f_b} \leq \sigma_b \\ \text{"Условия прочности НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\frac{F_{b2}}{n_b \cdot f_b} = 55.303 \text{ МПа}$$

$$\sigma_b = 110 \text{ МПа}$$

$$Us1_{16} = \text{"Условие прочности выполняется"}$$

Условие прочности неметаллических прокладок:

$$\frac{F_{b1}}{\pi \cdot D_{sn} \cdot b} = 15.89 \text{ МПа}$$

$$U_{s17} := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } \frac{F_{b1}}{\pi \cdot D_{sn} \cdot b} \leq p_{dpr} \\ \text{"Условия прочности НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$p_{dpr} = 40 \text{ МПа}$$

$$U_{s17} = \text{"Условие прочности выполняется"}$$

Условие прочности втулки фланца для сечения, ограниченного размером S0:

безразмерный параметр

$$T_f := \frac{D_n^2 \cdot \left( 1 + 8.55 \cdot \log \left( \frac{D_n}{d_p} \right) \right) - d_p^2}{\left( 1.05 \cdot d_p^2 + 1.945 \cdot D_n^2 \right) \cdot \left( \frac{D_n}{d_p} - 1 \right)} = 1.278$$

Безразмерный параметр по рисунку 1.42 [с.101,12]

$$\chi_1 := \frac{h_b}{\sqrt{d_p \cdot s_0}} = 0.976 \quad f_f := 1$$

Приведенный изгибающий момент:

$$M_0 := \max \left[ 0.5 \cdot (D_b - D_{sn}) \cdot F_{b1}, 0.5 \cdot \left[ (D_b - D_{sn}) \cdot F_{b2} + (D_{sn} - d_p - s_{ek}) \cdot F_d \right] \right] = 1.358 \times 10^{-3}$$

МН·м

$$\sigma_1 := T_f \cdot M_0 \cdot \frac{v}{d_p \cdot (S - c)^2} = 1.596 \times 10^{-3} \text{ МПа}$$

Максимальное напряжение в сечении, ограниченном размером S0:

$$\sigma_0 := f_f \cdot \sigma_1 = 1.596 \times 10^{-3} \text{ МПа}$$

Тангенциальное и меридиональное напряжения во втулке фланца от внутреннего давления:

$$\sigma_t := \frac{p_{pr} \cdot d_p}{2 \cdot (s_0 - c)} = 98.333 \text{ МПа} \quad \sigma_m := \frac{p_{pr} \cdot d_p}{4 \cdot (s_0 - c)} = 49.167 \text{ МПа}$$

Допускаемое напряжение для фланца в сечении S0, принимаемое при количестве нагружений соединения (сборка-разборка) при  $P_p < 4 \text{ МПа}$ :

$$\sigma_{d0} := 0.003 E = 600 \text{ МПа}$$

Тогда условие прочности втулки фланца:

$$Us1_{18} := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } \sqrt{(\sigma_0 + \sigma_m)^2 + \sigma_t^2} - (\sigma_0 + \sigma_m) \cdot \sigma_t < \phi \cdot \sigma_{d0} \\ \text{"Условия прочности НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\sqrt{(\sigma_0 + \sigma_m)^2 + \sigma_t^2} - (\sigma_0 + \sigma_m) \cdot \sigma_t = 85.159 \text{ МПа}$$

$$Us1_{18} = \text{"Условие прочности выполняется"} \quad \phi \cdot \sigma_{d0} = 600 \text{ МПа}$$

Условие герметичности фланцевого соединения определяется углом поворота фланца. Максимальное напряжение в кольце аппарата:

$$\sigma_k := M_0 \cdot \left[ 1 - \nu \cdot (1 + 0.9 \lambda_f) \right] \cdot \frac{\psi^2}{d_p \cdot h_f^2} = 144.289 \text{ МПа}$$

Допускаемый угол поворота фланца для плоских приварных:

$$\Theta_d := 0.01 \text{ рад}$$

$$\Theta := \left( \frac{\sigma_k}{E} \right) \cdot \left( \frac{d_p}{h_f} \right) = 4.257 \times 10^{-3} \text{ рад}$$

$$Us1_{19} := \begin{cases} \text{"Условие герметичности выполняется"} & \text{if } \Theta < \Theta_d \\ \text{"Условия герметичности НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$U_{sl19} = \text{"Условие герметичности выполняется"}$

Таким образом, подобранный фланец отвечает всем требованиям прочности. Подобным образом рассчитываются все фланцы. Результаты расчетов приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Фланцы и штуцеры:

Наименование штуцера	$D_w, \text{мм}$	$d_n, \text{мм}$	$D_f, \text{мм}$	$D_b, \text{мм}$	$D_1, \text{мм}$	$d_b, \text{мм}$	$z$	$h, \text{мм}$
Штуцер для ввода исходной смеси	20	25	90	65	50	M10	4	12
Штуцер для ввода флегмы	20	25	90	65	50	M10	4	12
Штуцер для отвода кубового остатка	20	25	90	65	50	M10	4	12
Штуцер для ввода паров дистиллята	59	65	160	130	110	M12	8	13
Штуцер для отбора жидкого азота на орошение верхней колонны	20	25	90	65	50	M10	4	12
Штуцер для манометра	8	12	75	50	35	M10	4	8
Штуцер для дифманометра-уровнемера	8	12	75	50	35	M10	4	8
Штуцер к пусковому клапану	8	12	75	50	35	M10	4	8
Штуцер для преобразователя измерительного	8	12	75	50	35	M10	4	8
Штуцер для слива в испаритель	40	45	130	100	80	M12	4	10

## Нормы и методы расчета на прочность [с.312,13]

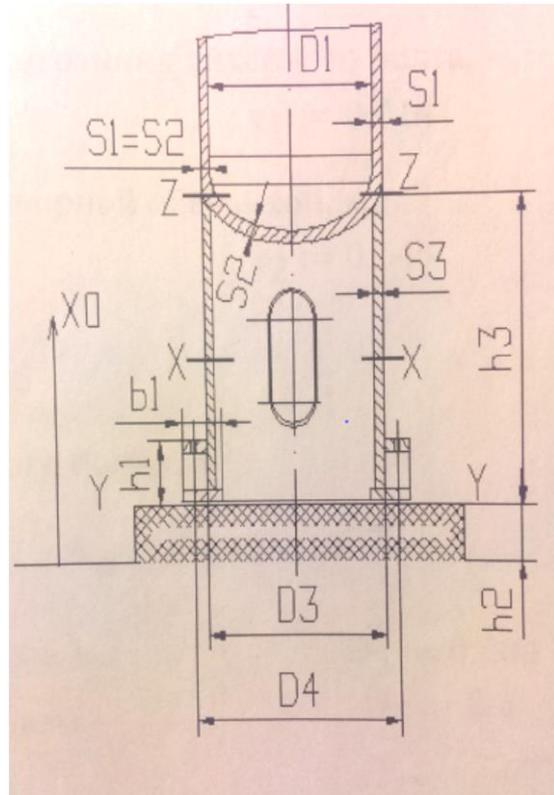
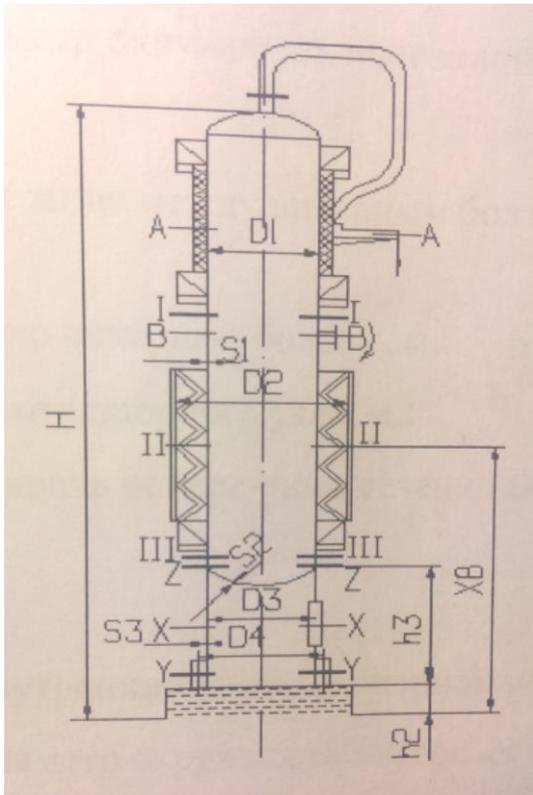
### Расчетные сечения

При расчете колонного аппарата устанавливаются следующие основные расчетные сечения:

- поперечное сечение в месте присоединения опорной обечайки к корпусу колонны;
- поперечное сечение опорной обечайки в местах расположения отверстий;
- поперечное сечение в месте присоединения опорного кольца.

Рисунок 8. Расчетные сечения колонного аппарата

Рисунок 9. Цилиндрические опорные обечайки



Исходные данные:

$$\sigma_{\text{дв}} := \sigma \cdot 10^6 = 1.6 \times 10^8 \text{ Па}$$

Допускаемое напряжение для опорной обечайки, выполненной из стали ВСтЗ, Па[с.13,6]:  $\sigma_{\text{д0}} := 140 \cdot 10^6$

Допускаемое напряжение в анкерных болтах, Па:  $\sigma_{\text{дВ}} := 126 \cdot 10^6$

Допускаемое напряжение бетона на сжатие, Па:  $\sigma_{\text{дбет}} := 30 \cdot 10^6$

Толщина сварного шва приведена на черт.4, м:  $a_1 := 0.001$

Исполнительная толщина стенки опорной обечайки, м:  $s_3 := 0.001$

Сумма всех прибавок к расчетным толщинам, м:  $c_{\text{дв}} := 0.001$

Начальный внутренний диаметр анкерных болтов, м:  $d_2 := 0.02$

Ширина верхнего опорного элемента, м:  $b_5 := 0.12$

Минимальное расстояние между двумя смежными ребрами, м:  $b_6 := 0.2$

Максимальное расстояние между двумя смежными ребрами, м:  $b_7 := 0.52$

Диаметр окружности, вписанной в шестигранник анкерного болта, м:  $e_1 := 0.014$

Расстояние между анкерным болтом и обечайкой, м:  $e_2 := 0.04$

Число анкерных болтов, м:  $n := 8$

Высота опорного узла, м:  $h_1 := 0.25$

Площадь поперечного сечения анкерного болта, м<sup>2</sup>:  $A_{\sigma} := 3.142 \cdot 10^{-4}$

Внутренний диаметр опорной обечайки, м:  $D_3 := 0.50$

Диаметр окружности анкерных болтов, м:  $D_4 := 0.6$

Модуль продольной упругости, Па:  $E := 2 \cdot 10^{11}$

Коэффициент сварного шва:  $\phi_s := 0.6$

Коэффициент сварного шва нижнего опорного узла:  $\phi_0 := 1$

Количество расчетных сечений, шт:  $6 \quad i := 0..5$

Толщина стенки в соответствующем расчетном сечении, м:  $s_1 := 0.002$

$$x_0 := \begin{pmatrix} 3.7 \\ 3.5 \\ 2.9 \\ 2.3 \\ 1.7 \\ 0.5 \end{pmatrix}$$

Наружный диаметр колонны в соответствующем расчетном сечении, м:

$$D := \begin{pmatrix} 0.506 \\ 0.506 \\ 0.506 \\ 0.506 \\ 0.506 \\ 0.506 \end{pmatrix} \quad x_0 = \begin{pmatrix} 3.7 \\ 3.5 \\ 2.9 \\ 2.3 \\ 1.7 \\ 0.5 \end{pmatrix}$$

Внутренний диаметр колонны в соответствующем расчетном сечении, м:

$$D_1 := D - 2s_1 = \begin{pmatrix} 0.5 \\ 0.5 \\ 0.5 \\ 0.5 \\ 0.5 \\ 0.5 \end{pmatrix} \quad x_0 = \begin{pmatrix} 3.7 \\ 3.5 \\ 2.9 \\ 2.3 \\ 1.7 \\ 0.5 \end{pmatrix}$$

Осевое сжимающее усилие, Н:

-в рабочих условиях  $G_{p.max} := 2.549 \cdot 10^3$

-в условиях испытания  $G_{Г.max} := 8.145 \cdot 10^3$

-в условиях монтажа  $G_{М.max} := 1.163 \cdot 10^3$

Изгибающий момент от действия эксцентрических весовых нагрузок в расчетном сечении на высоте  $X_0$  Н\*м:

-в рабочих условиях  $M_{G1} := 0$

-в условиях испытания  $M_{G2} := 0$

-в условиях монтажа  $M_{G3} := 0$

Изгибающий момент в расчетном сечении  $X_0$  от действия ветровой нагрузки, с учетом того, что аппарат находится в здании Н\*м:

В рабочих условиях      В условиях испытания      В условиях монтажа

$$M_{v1} := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad M_{v2} := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad M_{v3} := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad x_0 = \begin{pmatrix} 3.7 \\ 3.5 \\ 2.9 \\ 2.3 \\ 1.7 \\ 0.5 \end{pmatrix}$$

### Сочетание нагрузок

Рабочие условия:

-Давление, МПа:  $p_1 := P_r = 0.7$

-осевое сжимающее усилие, Н:  $F_1 := G_{p.max} = 2.549 \times 10^3$

-расчетный изгибающий момент, Н\*м:  $M_1 := \max(M_{G1} + M_{v1}, M_{G1}) = 0$

Условия испытания:

-Давление, МПа:  $p_2 := P_{pr} = 0.96$

-осевое сжимающее усилие, Н:  $F_2 := G_{r.max} = 8.145 \times 10^3$

-расчетный изгибающий момент, Н\*м:  $M_2 := M_{G2} \cdot 0.6 \cdot M_{v2} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$

Условия монтажа:

-Давление, МПа:  $p_3 := 0$

-осевое сжимающее усилие, Н:  $F_3 := G_{m.max} = 1.163 \times 10^3$

-расчетный изгибающий момент, Н\*м:  $M_3 := \max(M_{G3} + 0.8M_{V3}, M_{G3}) = 0$

### Корпус колонного аппарата

Стенка колонного аппарата должна быть рассчитана на прочность и устойчивость.

Расчет напряжения для рабочих условий:

Продольные напряжения для расчетных сечений, Па:

$$\sigma_{x1} := \frac{p_1 \cdot (D_1 + s_1)}{4 \cdot (s_1 - c)} - \frac{F_1}{\pi \cdot D_1 \cdot (s_1 - c)} + \frac{4M_1}{\pi \cdot D_1^2 \cdot (s_1 - c)} = \begin{pmatrix} -8.113 \times 10^5 \\ -8.113 \times 10^5 \end{pmatrix} \quad x_0 = \begin{pmatrix} 3.7 \\ 3.5 \\ 2.9 \\ 2.3 \\ 1.7 \\ 0.5 \end{pmatrix}$$

Кольевые напряжения для расчетных сечений, Па:

$$\sigma_y := \frac{p_1 \cdot (D_1 - s_1)}{2 \cdot (s_1 - c)} = \begin{pmatrix} 86.975 \\ 86.975 \\ 86.975 \\ 86.975 \\ 86.975 \\ 86.975 \\ 86.975 \end{pmatrix} \quad x_0 = \begin{pmatrix} 3.7 \\ 3.5 \\ 2.9 \\ 2.3 \\ 1.7 \\ 0.5 \end{pmatrix}$$

Эквивалентные напряжения для расчетных сечений, Па:

Коэффициент прочности кольцевого сварного шва:  $\phi_T := 1$

Коэффициент прочности продольного сварного шва:  $\phi_p := 1$

$$\sigma_{E1} := \sqrt{\sigma_{x1}^2 - \sigma_{x1} \cdot \sigma_y \cdot \frac{\phi_T}{\phi_p} + \left(\sigma_y \cdot \frac{\phi_T}{\phi_p}\right)^2} = \begin{pmatrix} 8.116 \times 10^5 \\ 8.116 \times 10^5 \end{pmatrix} \quad x_0 = \begin{pmatrix} 3.7 \\ 3.5 \\ 2.9 \\ 2.3 \\ 1.7 \\ 0.5 \end{pmatrix}$$

Проверка условий прочности для расчетных сечений:

$$\max(\sigma_{x1}, \sigma_{E1}) = 8.116 \times 10^5 \quad \sigma \cdot \phi_T = 1.6 \times 10^8$$

$$Usl_{20} := \begin{cases} \text{"Условие прочности в рабочих условиях выполняется"} & \text{if } \max(\sigma_{x1}, \sigma_{E1}) < \sigma \cdot \phi_T \\ \text{"Условия прочности в рабочих условиях НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_{20} = \text{"Условие прочности в рабочих условиях выполняется"}$$

Расчет напряжений для условий монтажа:

Продольные напряжения для расчетных сечений, Па:

$$\sigma_{x1} := \frac{p_3 \cdot (D_1 + s_1)}{4 \cdot (s_1 - c)} - \frac{F_3}{\pi \cdot D_1 \cdot (s_1 - c)} + \frac{4M_3}{\pi \cdot D_1^2 \cdot (s_1 - c)} = \begin{pmatrix} -3.702 \times 10^5 \\ -3.702 \times 10^5 \end{pmatrix} \quad x_0 = \begin{pmatrix} 3.7 \\ 3.5 \\ 2.9 \\ 2.3 \\ 1.7 \\ 0.5 \end{pmatrix}$$

Кольевые напряжения для расчетных сечений, Па:

$$\sigma_y := \frac{p_2 \cdot (D_1 - s_1)}{2 \cdot (s_1 - c)} = \begin{pmatrix} 119.28 \\ 119.28 \\ 119.28 \\ 119.28 \\ 119.28 \\ 119.28 \\ 119.28 \end{pmatrix} \quad x_0 = \begin{pmatrix} 3.7 \\ 3.5 \\ 2.9 \\ 2.3 \\ 1.7 \\ 0.5 \end{pmatrix}$$

Эквивалентные напряжения для расчетных сечений, Па:

Коэффициент прочности кольцевого сварного шва:  $\phi_T := 1$

Коэффициент прочности продольного сварного шва:

$$\phi_p := 1$$

$$\sigma_{E1} := \sqrt{\sigma_{x1}^2 - \sigma_{x1} \cdot \sigma_y \cdot \frac{\phi_T}{\phi_p} + \left(\sigma_y \cdot \frac{\phi_T}{\phi_p}\right)^2} = \begin{pmatrix} 3.706 \times 10^5 \\ 3.706 \times 10^5 \end{pmatrix} \quad x_0 = \begin{pmatrix} 3.7 \\ 3.5 \\ 2.9 \\ 2.3 \\ 1.7 \\ 0.5 \end{pmatrix}$$

Проверка условий прочности для расчетных сечений:

$$\max(\sigma_{x1}, \sigma_{E1}) = 3.706 \times 10^5 \quad \sigma \cdot \phi_T = 1.6 \times 10^8$$

$$Usl_{21} := \begin{cases} \text{"Условие прочности в условиях монтажа выполняется"} & \text{if } \max(\sigma_{x1}, \sigma_{E1}) < \sigma \cdot \phi_T \\ \text{"Условия прочности в условиях монтажа НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_{21} = \text{"Условие прочности в условиях монтажа выполняется"}$$

### Проверка устойчивости

Проверку устойчивости следует проводить для рабочих условий, условий испытания и монтажа.

Колонны, работающие под внутренним избыточным давлением, и колонны, работающие без давления.

Если толщина стенки s3 опорной обечайки меньше либо равна толщине стенки самой нижней обечайки колонны и механические свойства материала опорной обечайки не выше соответствующих свойств материала обечайки колонны, то расчет колонного аппарата не производят.

## Расчет опорной обечайки. [с.99,14]

Расчет опорной обечайки следует проводить для рабочих условий и для условий испытания. Расчетные нагрузки в сечениях Z-Z( $F_Z=G_Z;M_Z$ ) и Y-Y( $F_Y=G_Y;M_Y$ ) следует принимать в соответствии с таблицей. Для сечение X-X используют расчетные нагрузки верку прочности сварного шва, соединяющего корпус колонны с опорной обечайкой (сечение Z-Z) для рабочих условий следует проводить по формуле:

$$\sigma_X := \frac{1}{\pi \cdot D_3 \cdot a_1} \cdot \left( \frac{4 \cdot M_1}{D_3} + F_1 \right) = 5.345 \times 10^5 \text{ Па}$$

$$\phi_S \cdot \min(\sigma_{д0}, \sigma) = 8.4 \times 10^7 \text{ Па}$$

$$Usl_{22} := \begin{cases} \text{"Условие прочности сварного шва для рабочих условий выполняется"} & \text{if } \sigma_X \leq \phi_S \cdot \min(\sigma_{д0}, \sigma) \\ \text{"Условия прочности сварного шва для рабочих условий НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_{22} = \text{"Условие прочности сварного шва для рабочих условий выполняется"}$$

Проверку прочности сварного шва , соединяющего крпус колонны с опорной обечайкой (сечение Z-Z) для условий испытания следует проводить по формуле:

$$\sigma_{Xv} := \frac{1}{\pi \cdot D_3 \cdot a_1} \cdot \left( \frac{4 \cdot M_{2_3}}{D_3} + F_2 \right) = 1.708 \times 10^6 \text{ Па}$$

$$\phi_S \cdot \min(\sigma_{д0}, \sigma) = 8.4 \times 10^7 \text{ Па}$$

$$Usl_{23} := \begin{cases} \text{"Условие прочности сварного шва для условий испытания выполняется"} & \text{if } \sigma_{Xv} \leq \phi_S \cdot \min(\sigma_{д0}, \sigma) \\ \text{"Условия прочности сварного шва для условия испытания НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_{23} = \text{"Условие прочности сварного шва для условий испытания выполняется"}$$

( $\psi_1, \psi_2, \psi_3$ ) – коэффициенты

$$\psi_1 := 1 \quad \psi_2 := 0.9 \quad \psi_3 := 0.2$$

Если в сечении X-X несколько отверстий, то расчет следует проводить для наибольшего из отверстий по формуле при условии, что для остальных отверстий коэффициенты  $\psi_1$  и  $\psi_2$  более 0.95.

Проверку устойчивости опорной обечайки в зоне отверстия (сечение X-X) следует проводить по формуле:

$$\frac{F_Y}{\psi_1 \cdot F_d} + \frac{M_Y + F_Y \cdot \psi_3 \cdot D_3}{\psi_2 \cdot M_d} \leq 0.1$$

$$\frac{0.012 - c}{s_3 - c} = 5.5 \quad \frac{0.15}{D_3} = 0.296 \quad \frac{0.5}{D_3} = 0.988$$

Обечайки, нагруженные осевым сжимающим усилием

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия прочности:

$$F_{дП} := \pi \cdot (D_3 + s_3 - c) \cdot (s_3 - c) \cdot \sigma_{д0} = 4.469 \times 10^5 \text{ Па}$$

Осевое сжимающее усилие, определяемое из условия местной устойчивости в пределах упругости по формуле:

$$n_y := 2.4 \quad [c.7,6]$$

$$F_{дE1} := \frac{310 \cdot 10^{-6} \cdot E}{n_y} \cdot D_3^2 \cdot \left[ \frac{100 \cdot (s_3 - c)}{D_3} \right]^{2.5} = 6.497 \times 10^5 \text{ Па}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие в пределах упругости из условий устойчивости следует рассчитывать по формуле:

$$F_{дE} := \begin{cases} F_{дE1} & \text{if } \frac{1}{D_1} < 10 \\ \min(F_{дE1}, F_{дE1}) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$F_{дE} = 6.497 \times 10^5 \text{ Па}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие для рабочих условий следует рассчитывать по формуле:

$$F_{д1} := \frac{F_{дП}}{\sqrt{1 + \left(\frac{F_{дП}}{F_{дЕ}}\right)^2}} = 3.682 \times 10^5 \text{ Па}$$

Для условий испытания

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия прочности:

$$F_{дП} := \pi \cdot (D_3 + s_3 - c) \cdot (s_3 - c) \cdot \sigma_{д0} = 4.469 \times 10^5 \text{ Па}$$

Осевое сжимающее усилие, определяемое из условия местной устойчивости в пределах упругости по формуле:  $n_{у} := 1.1$

для условий испытаний [с.7,6]

$$F_{дЕ1} := \frac{310 \cdot 10^{-6} \cdot E}{n_y} \cdot D_3^2 \cdot \left[ \frac{100 \cdot (s_3 - c)}{D_3} \right]^{2.5} = 1.417 \times 10^6 \text{ Па}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие в пределах упругости из условий устойчивости следует рассчитывать по формуле:

$$F_{дЕ} := \begin{cases} F_{дЕ1} & \text{if } \frac{1}{D_1} < 10 \\ \min(F_{дЕ1}, F_{дЕ1}) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$F_{дЕ} = 1.417 \times 10^6 \text{ Па}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие для рабочих условий следует рассчитывать по формуле:

$$F_{д2} := \frac{F_{дП}}{\sqrt{1 + \left(\frac{F_{дП}}{F_{дЕ}}\right)^2}} = 4.262 \times 10^5 \text{ Па}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности рассчитывают по формуле:

$$M_{дП} := \frac{\pi}{4} \cdot D_3 \cdot (D_3 + s_3 - c) \cdot (s_3 - c) \cdot \sigma_{д0} = 5.653 \times 10^4 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости:

$n_y = 1.1$  для условий испытания [с.7,6]

$$M_{дЕ} := \frac{D_3}{3.5} \cdot \left[ \frac{310 \cdot 10^{-6} \cdot E}{n_y} \cdot D_3^2 \cdot \left[ \frac{100 \cdot (s_3 - c)}{D_3} \right]^{2.5} \right] = 2.049 \times 10^5 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

Допускаемый изгибающий момент:

$$M_{д2} := \frac{M_{дП}}{\sqrt{1 + \left(\frac{M_{дП}}{M_{дЕ}}\right)^2}} = 5.449 \times 10^4 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

Для рабочих условий допускаемый изгибающий момент:

$$n_{yx} := 2.4 \quad \phi_3 := 0.88 \quad [\text{с.7,6}]$$

$$M_{д1} := \frac{\pi}{4} \cdot D_3 \cdot (D_3 + s_3 - c) \cdot (s_3 - c) \cdot \sigma_{д0} \cdot \phi_3 = 4.974 \times 10^4 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

$$\frac{D_3}{s_3 - c} = 253 \quad \frac{\sigma_{д0} \cdot 10^3}{E} = 0.7$$

1) Условие устойчивости опорной обечайки в зоне отверстия для рабочих

условий (сечение X-X): 
$$\Phi := \frac{F_1}{\psi_1 \cdot F_{д1}} + \frac{M_1 + F_1 \cdot \psi_3 \cdot D_3}{\psi_2 \cdot M_{д1}} = 0.014$$

$$Usl_{24} := \begin{cases} \text{"Условие устойчивости выполняется"} & \text{if } \Phi \leq 1 \\ \text{"Условия устойчивости НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_{24} = \text{"Условие устойчивости выполняется"}$$

2) Условие устойчивости опорной обечайки в зоне отверстия для условий

испытания (сечение X-X):  $\Phi := \frac{F_2}{\psi_1 \cdot F_{д2}} + \frac{M_{2_5} + F_2 \cdot \psi_3 \cdot D_3}{\psi_2 \cdot M_{д2}} = 0.04$

$$Usl_{25} := \begin{cases} \text{"Условие устойчивости выполняется"} & \text{if } \Phi \leq 1 \\ \text{"Условия устойчивости НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_{25} = \text{"Условие устойчивости выполняется"}$$

Если в опорной обечайке есть кольцевой шов, то проверку следует проводить по формуле:

$$\frac{1}{\pi \cdot D_3 \cdot (s_3 - c)} \cdot \left[ \frac{4 \cdot (M_Y + F_Y \cdot \psi_3 \cdot D_3)}{\psi_2 \cdot D_3} - \frac{F_Y}{\psi_1} \right] \leq \phi \cdot T \cdot \sigma_{д0}$$

Если кольцевой шов находится в зоне отверстий, то коэффициенты:

$$\psi_1 := 1 \quad \psi_2 := 1 \quad \psi_3 := 0$$

в рабочих условиях

$$\sigma_{Xx} := \frac{1}{\pi \cdot D_3 \cdot (s_3 - c)} \cdot \left[ \frac{4 \cdot (M_1 + F_1 \cdot \psi_3 \cdot D_3)}{\psi_2 \cdot D_3} - \frac{F_1}{\psi_1} \right] = -8.018 \times 10^5 \text{ Па}$$

$$\phi \cdot T \cdot \sigma_{д0} = 1.4 \times 10^8 \text{ Па}$$

$$Usl_{26} := \begin{cases} \text{"Условие выполняется"} & \text{if } \sigma_X \leq \phi \cdot T \cdot \sigma_{д0} \\ \text{"Условия НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_{26} = \text{"Условие выполняется"}$$

в условиях испытания

$$\sigma_{\text{хх}} := \frac{1}{\pi \cdot D_3 \cdot (s_3 - c)} \cdot \left[ \frac{4 \cdot (M_{2_5} + F_2 \cdot \psi_3 \cdot D_3)}{\psi_2 \cdot D_3} - \frac{F_2}{\psi_1} \right] = -2.562 \times 10^6 \text{ Па}$$

$$\phi \cdot T \cdot \sigma_{\text{д0}} = 1.4 \times 10^8 \text{ Па}$$

$$\text{Usl}_{27} := \begin{cases} \text{"Условие выполняется"} & \text{if } \sigma_{\text{х}} \leq \phi \cdot T \cdot \sigma_{\text{д0}} \\ \text{"Условия НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Usl}_{27} = \text{"Условие выполняется"}$$

### Расчет нижнего опорного узла[15]

Расчет нижнего опорного узла следует проводить для рабочих условий и для условий испытания. Расчетные нагрузки  $F_Y$  и  $M_Y$  принимают в соответствии с разделом 3.

Расчет нижнего опорного узла для рабочих условий.

Выбираем тип опорного кольца исполнения С.

Ширина нижнего опорного кольца  $b_1$  устанавливается конструктивно, при этом необходимо соблюдать условие формулы

### Исполнение опорного узла

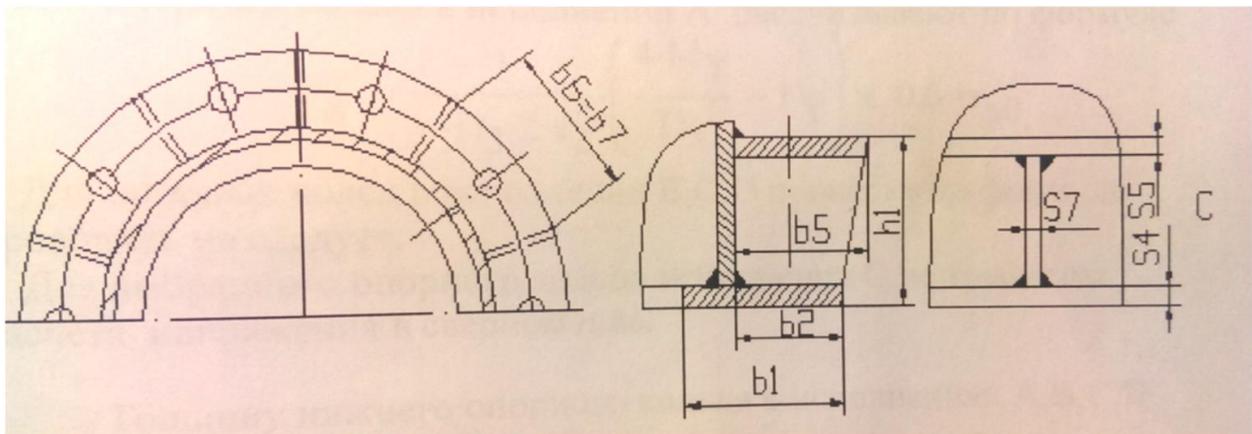


Рисунок 10. Опорный узел

$$b_{1R} := \frac{1}{\pi \cdot D_4 \cdot \sigma_{\text{дбет}}} \cdot \left[ \frac{(4 \cdot M_1)}{D_4} + F_1 \right] = 4.508 \times 10^{-5} \text{ м}$$

Ширину нижнего опорного кольца  $b_1$  принимаем  $b_1 := 0.15 \text{ м}$

Ширина нижнего опорного кольца  $b_1$  больше расчетной  $b_{1R}$ . Выступающая ширина нижнего опорного кольца  $b_2$  должна удовлетворять условию:

$$2d_2 + 0.03 \leq b_2 \leq \frac{2}{3} \cdot b_1$$

выбираем  $b_2$  в пределах от  $2 \cdot d_2 + 0.03 = 0.07$  до  $\frac{2}{3} \cdot b_1 = 0.1$

$$b_2 := 0.09 \text{ м}$$

Выступающая ширина нижнего опорного кольца  $b_2$  удовлетворяет условию.

Напряжение сжатия в бетоне следует рассчитывать по формуле:

$$\sigma_{\text{бет}} := \sigma_{\text{дбет}} \cdot \frac{b_{1R}}{b_1} = 9.015 \times 10^3 \text{ Па}$$

Напряжение в сварном шве нижнего опорного кольца.

Для опорного кольца в исполнении А рассчитывают по формуле:

$$\frac{1}{\pi \cdot D_3 \cdot 2 \cdot a_2} \cdot \left( \frac{4 \cdot M_Y}{D_3} - F_Y \right) \leq 0.6 \sigma_{\text{д0}}$$

Для опорных колец в исполнении В,С,Д проверку по формуле проводить не следует.

Для выбранного опорного кольца исполнения С не требуется расчета напряжения в сварном шве.

Толщину нижнего опорного кольца в исполнениях А,В,С,Д следует рассчитывать по формуле:

$$s_4 \leq \max \left( \chi_1 \cdot b_2 \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot \sigma_{\text{бет}}}{\sigma_{\text{д0}}}} + c, 1.8s_3 \right)$$

$\chi_1 := 1$  для опорного кольца исполнения А

Для исполнения В,С,Д:

$$\chi_1 := \frac{\left[ 1 + 1.81 \cdot \left( \frac{b_2}{b_7} \right)^3 \right]^2}{\left[ 1 + 2.97 \cdot \left( \frac{b_2}{b_7} \right)^3 \right]} = 0.988$$

$$\max \left( \chi_1 \cdot b_2 \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot \sigma_{\text{бет}}}{\sigma_{\text{д0}}}} + c, 1.5s_3 \right) = 4.5 \times 10^{-3} \text{ м}$$

Выбираем толщину нижнего опорного кольца:

$$s_4 := 0.02 \text{ м, что удовлетворяет условию.}$$

Для опорного кольца исполнения А s4 дополнительно следует проверить по формуле:

$$s_4 \geq \sqrt{\left( \frac{4M_Y}{D_3} - F_Y \right) \cdot \frac{4 \cdot l_2}{\pi \cdot \sigma_{\text{д0}} \cdot D_3}} + c$$

Если по формулам будет получена величина  $s_4 > 2 \cdot s_3$  следует применять конструкции нижнего опорного узла исполнений С и D.

Толщину верхнего опорного элемента-кольца следует определять по формуле:

Коэффициент:

$$\chi_2 := \frac{\sqrt{\frac{b_5}{3 \cdot \frac{b_5}{b_6}}}}{\sqrt{1 + \frac{\left( \frac{b_5}{b_6} \right)^2}{1 - \frac{e_1}{b_6}}}} = 1.139$$

$$s_5 \geq \max \left( \chi_2 \cdot \sqrt{\frac{A_{\sigma} \cdot \sigma_{\text{дВ}}}{\sigma_{\text{д0}}}} + c, 1.5s_3 \right)$$

$$\max \left( \chi_2 \cdot \sqrt{\frac{A_{\sigma} \cdot \sigma_{\text{дВ}}}{\sigma_{\text{д0}}}} + c, 1.5s_3 \right) = 0.02 \text{ м}$$

Принимаем  $s_5 := 0.01$  м, что соответствует условию.

Толщина ребра  $\chi_3 := 1$

для исполнения опорного узла С.

Для конструкции ребер с соотношением  $b_2/b_7 < 20$ , ребра необходимо дополнительно проверять на устойчивость.

$$s_7 := \max\left(\frac{A_\sigma \cdot \sigma_{дВ}}{\chi_3 \cdot b_2 \cdot \sigma_{д0}} + c, 0.4s_4\right) = 8 \times 10^{-3} \text{ м}$$

$\frac{b_2}{s_7} = 11.25$  так как отношение меньше 20, то ребра дополнительно на устойчивость

проверять не надо.

Нагрузки стенки опорной обечайки от верхнего-опорного элемента-кольца.

Местное напряжение изгиба следует рассчитывать по формуле:

$$\chi_4 := 0.0106 \text{ коэффициент } \sigma_{1x} := \frac{6 \cdot \chi_4 \cdot A_\sigma \cdot \sigma_{дВ} \cdot e_2}{(s_3 - c)^2 \cdot h_1} = 1.133 \times 10^8 \text{ Па}$$

Для опорного узла исполнения С вместо  $b_4$  принимается  $b_5$ , а для исполнения D- ( $b_6+b_7$ ).

$K_{21} := 1$  коэффициент для условий монтажа

$K_{20} := 1.4$

$n_T := 1.4$  при условиях испытания

Определим предельное напряжение изгиба:

$$v := \frac{K_{21}}{n_T} \cdot \frac{1}{\sigma_{д0} \cdot \phi_0} \cdot \frac{1}{3.14 \cdot D_3 \cdot (s_3 - c)} \cdot \left[ \left( \frac{4 \cdot M_{25}}{D_3} \right) - F_1 \right] = -3.82 \times 10^{-3}$$

$$\sigma_{дП} := \frac{K_{20} \cdot \sigma_{д0} \cdot n_T}{K_{21}} = 3.15 \times 10^8 \text{ Па}$$

$$Usl_{28} := \begin{cases} \text{"Условие выполняется"} & \text{if } \sigma_{1x} \leq \sigma_{дП} \\ \text{"Условия НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Usl<sub>28</sub> = "Условие выполняется"

Местное напряжение изгиба не превышает допустимое.

Для опорного узла исполнения С вместо b<sub>4</sub> принимается b<sub>5</sub>, а для исполнения D -- (b<sub>6</sub>+b<sub>7</sub>). Проверку следует проводить по формуле  $\sigma_{1x} < \sigma_{дП}$ , где  $\sigma_{дП}$  - предельное напряжение изгиба принимается по действующей нормативно-технической документации.

Высота нижнего опорного узла исполнений С и D.

Высоту h<sub>1</sub> опорного узла при выполнении условия следует определять по формуле:

$$b_2 := b_5 = 0.12 \text{ м}$$

$$h_1 > \frac{D_4 \cdot e_2 \cdot b_1}{2 \cdot (s_5 - c) \cdot b_5} \cdot \frac{\sigma_{бет}}{\sigma_{д0}} \left( \frac{1}{\chi_5} + \frac{6.58}{n^2 \cdot \chi_6} \cdot \frac{D_4}{b_5} \right)$$

$$\chi_7 := \frac{1.56 + \sqrt{D_3 \cdot (s_3 - c)}}{b_5} \cdot \frac{s_3 - c}{s_5 - c} = 0.915$$

$$\chi_6 := 1 + 2 \cdot \chi_7 \cdot \left( 1 + \frac{s_3 - c}{b_5} - \frac{\chi_7}{2} \right) = 2.023$$

$$\chi_5 := 1 + \chi_7 = 1.915$$

$$\frac{D_4 \cdot e_2 \cdot b_1}{2 \cdot (s_5 - c) \cdot b_5} \cdot \frac{\sigma_{бет}}{\sigma_{д0}} \left( \frac{1}{\chi_5} + \frac{6.58}{n^2 \cdot \chi_6} \cdot \frac{D_4}{b_5} \right) = 2.909 \times 10^{-5}$$

h<sub>1</sub> = 0.25 м, что удовлетворяет условию

Коэффициент  $\chi_4$  определяем по номограмме:

$$\frac{b_5}{D_3} = 0.237 \quad \frac{D_{15}}{s_3 - c} = 250$$

Расчет нижнего опорного узла для условий испытания.

Выбираем тип опорного кольца С.

ширина нижнего опорного кольца  $b_1$  определяется конструктивно, при этом необходимо соблюдать условие формулы:

$$b_{1R} := \frac{1}{\pi \cdot D_4 \cdot \sigma_{\text{бет}}} \cdot \left[ \frac{(4 \cdot M_1)}{D_4} + F_1 \right] = 4.508 \times 10^{-5} \text{ м}$$

Ширину нижнего опорного кольца  $b_1$  принимаем  $b_1 := 0.15 \text{ м}$

Ширина нижнего опорного кольца  $b_1$  больше расчетной  $b_{1R}$ . Выступающая ширина нижнего опорного кольца  $b_2$  должна удовлетворять условию:

$$2d_2 + 0.03 \leq b_2 \leq \frac{2}{3} \cdot b_1$$

выбираем  $b_2$  в пределах от  $2 \cdot d_2 + 0.03 = 0.07$  до  $\frac{2}{3} \cdot b_1 = 0.1$

$$b_2 := 0.09 \text{ м}$$

Выступающая ширина нижнего опорного кольца  $b_2$  удовлетворяет условию.

напряжение сжатия в бетоне следует рассчитывать по формуле:

$$\sigma_{\text{бет}} := \sigma_{\text{бет}} \cdot \frac{b_{1R}}{b_1} = 9.015 \times 10^3 \text{ Па}$$

Напряжение в сварном шве нижнего опорного кольца.

Для опорного кольца в исполнении А рассчитывают по формуле:

$$\frac{1}{\pi \cdot D_3 \cdot 2 \cdot a_2} \cdot \left( \frac{4 \cdot M_Y}{D_3} - F_Y \right) \leq 0.6 \cdot \sigma_{\text{д0}}$$

Для опорных колец в исполнении В,С,Д(черт.8) проверку по формуле проводить не следует.

Для выбранного опорного кольца исполнения С не требуется расчета напряжения в сварном шве.

Толщину нижнего опорного кольца в исполнениях А,В,С,Д следует рассчитывать по формуле:

$$s_4 \leq \max \left( \chi_1 \cdot b_2 \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot \sigma_{\text{бет}}}{\sigma_{\text{д0}}}} + c, 1.5s_3 \right)$$

$\chi_1 := 1$  для опорного кольца исполнения А

Для исполнения В,С,Д:

$$\chi_1 := \frac{\left[ 1 + 1.81 \cdot \left( \frac{b_2}{b_7} \right)^3 \right]^2}{\left[ 1 + 2.97 \cdot \left( \frac{b_2}{b_7} \right)^3 \right]} = 0.988$$

$$\max \left( \chi_1 \cdot b_2 \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot \sigma_{\text{бет}}}{\sigma_{\text{д0}}}} + c, 1.5s_3 \right) = 4.5 \times 10^{-3} \text{ м}$$

Выбираем толщину нижнего опорного кольца

$s_4 := 0.02$  м, что удовлетворяет условию.

Для опорного кольца исполнения А  $s_4$  дополнительно следует проверить по формуле:

$$s_4 \geq \sqrt{\left( \frac{4M_Y}{D_3} - F_Y \right) \cdot \frac{4 \cdot l_2}{\pi \cdot \sigma_{\text{д0}} \cdot D_3}} + c$$

Если по формулам будет получена величина  $s_4 > 2 \cdot s_3$  следует применять конструкции нижнего опорного узла исполнений С и Д.

Толщину верхнего опорного элемента-кольца следует определять по формуле:

Коэффициент:

$$\chi_2 := \frac{3 \cdot \frac{b_5}{b_6}}{1 + \frac{\left( \frac{b_5}{b_6} \right)^2}{1 - \frac{e_1}{b_6}}} = 1.298$$

$$s_5 \geq \max \left( \chi_2 \cdot \sqrt{\frac{A_\sigma \cdot \sigma_{дВ}}{\sigma_{д0}}} + c, 1.5s_3 \right)$$

$$\max \left( \chi_2 \cdot \sqrt{\frac{A_\sigma \cdot \sigma_{дВ}}{\sigma_{д0}}} + c, 1.5s_3 \right) = 0.023 \text{ м}$$

Принимаем  $s_5 := 0.023 \text{ м}$ , что соответствует условию.

Толщина ребра  $\chi_3 := 1$

для исполнения опорного узла С.

Для конструкции ребер с соотношением  $b_2/b_7 < 20$ , ребра необходимо дополнительно проверять на устойчивость.

$$s_7 := \max \left( \frac{A_\sigma \cdot \sigma_{дВ}}{\chi_3 \cdot b_2 \cdot \sigma_{д0}} + c, 0.4s_4 \right) = 8 \times 10^{-3} \text{ м}$$

$\frac{b_2}{s_7} = 11.25$  так как отношение меньше 20, то ребра дополнительно на устойчивость

проверять не надо.

Нагрузки стенки опорной обечайки от верхнего-опорного элемента-кольца.

Местное напряжение изгиба следует рассчитывать по формуле:

$\chi_4 := 0.0106$  коэффициент

$$\sigma_{изг} := \frac{6 \cdot \chi_4 \cdot A_\sigma \cdot \sigma_{дВ} \cdot e_2}{(s_3 - c)^2 \cdot h_1} = 1.133 \times 10^8 \text{ Па}$$

Для опорного узла исполнения С вместо  $b_4$  принимается  $b_5$ , а для исполнения D--- ( $b_6 + b_7$ ).

$K_{21} := 1$  коэффициент для условий монтажа

$K_{20} := 1.1$

$n_T := 1.1$  при условиях испытания

Определим предельное напряжение изгиба:

$$v_{\text{max}} := \frac{K_{21}}{n_T} \cdot \frac{1}{\sigma_{d0} \cdot \phi_0} \cdot \frac{1}{3.14 \cdot D_3 \cdot (s_3 - c)} \cdot \left[ \left( \frac{4 \cdot M_{25}}{D_3} \right) - F_2 \right] = -0.017$$

$$\sigma_{\text{дП}} := \frac{K_{20} \cdot \sigma_{d0} \cdot n_T}{K_{21}} = 2.31 \times 10^8 \text{ Па}$$

$$Usl_{29} := \begin{cases} \text{"Условие выполняется"} & \text{if } \sigma_{1x} \leq \sigma_{\text{дП}} \\ \text{"Условия НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_{29} = \text{"Условие выполняется"}$$

Местное напряжение изгиба не превышает допустимое.

Для опорного узла исполнения С вместо b4 принимается b5, а для исполнения D -- (b6+b7). Проверку следует проводить по формуле  $\sigma_{1x} < \sigma_{\text{дП}}$ , где  $\sigma_{\text{дП}}$  - предельное напряжение изгиба принимается по действующей нормативно-технической документации.

Высота нижнего опорного узла исполнений С и D.

Высоту h1 опорного узла при выполнении условия следует определять по формуле:

$$b_2 := b_5 = 0.12 \text{ м}$$

$$h_1 > \frac{D_4 \cdot e_2 \cdot b_1}{2 \cdot (s_5 - c) \cdot b_5} \cdot \frac{\sigma_{\text{бет}}}{\sigma_{d0}} \left( \frac{1}{\chi_5} + \frac{6.58}{n^2 \cdot \chi_6} \cdot \frac{D_4}{b_5} \right)$$

$$\chi_7 := \frac{1.56 + \sqrt{D_3 \cdot (s_3 - c)}}{b_5} \cdot \frac{s_3 - c}{s_5 - c} = 0.915$$

$$\chi_6 := 1 + 2 \cdot \chi_7 \cdot \left( 1 + \frac{s_3 - c}{b_5} - \frac{\chi_7}{2} \right) = 2.023$$

$$\chi_5 := 1 + \chi_7 = 1.915$$

$$\frac{D_4 \cdot e_2 \cdot b_1}{2 \cdot (s_5 - c) \cdot b_5} \cdot \frac{\sigma_{\text{бет}}}{\sigma_{d0}} \left( \frac{1}{\chi_5} + \frac{6.58}{n^2 \cdot \chi_6} \cdot \frac{D_4}{b_5} \right) = 2.909 \times 10^{-5}$$

$h_1 = 0.25$  м, что удовлетворяет условию

### Расчет анкерных болтов [с.9,15]

Расчет прочности анкерных болтов следует производить для рабочих условий и условий монтажа.

Число анкерных болтов  $n$  устанавливается конструктивно, при этом  $n=4,6,8,10,12,16$ ...далее кратно 4.

Внутренний диаметр резьбы анкерных болтов для рабочих условий колонн, устанавливаемых на бетонных фундаментах, следует определять по формуле:

$$d_2 \geq \chi_8 \cdot \sqrt{\frac{M_Y + 0.44 \cdot F_Y \cdot D_4}{n \cdot \sigma_{dB} \cdot D_4}} + c \quad \text{где } \chi_8 := 2.2 \text{ коэффициент.}$$

$$\chi_8 \cdot \sqrt{\frac{M_1 + 0.44 \cdot F_1 \cdot D_4}{n \cdot \sigma_{dB} \cdot D_4}} + c = 3.373 \times 10^{-3} \quad d_2 = 0.02 \text{ м}$$

Принимаем 8 болтов М20.

### Гидравлический расчет [с.209,1]

Гидравлическое сопротивление для верхней части колонны:

Коэффициент сопротивления сухих тарелок принимается для колпачковых тарелок от 4 до 5.

Примем  $\xi := 4.5$

Площадь паровых патрубков, найдена ранее  $f_{\text{пар}} := 0.03 \text{ м}^2$

$$\text{Скорость пара } w = 0.136 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$\text{Плотность паров вверху колонны } \rho_{\text{сr1}} = 3.385 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$\text{Плотность жидкости вверху колонны } \rho_{\text{N2}} = 717 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Высота слоя жидкости на тарелке по уровню сливной перегородки:

$$h_s = 0.02$$

Сопротивление сухой тарелки в верхней части колонны:

$$\Delta P_{sy} := \frac{\xi \cdot w^2 \cdot \rho_{cr1}}{2 \cdot f^2} = 114.613 \text{ Па}$$

Сопротивление слоя жидкости на тарелке:

$$\Delta P_{zhy} := \rho_{N2} \cdot g \cdot h_s = 140.532 \text{ Па}$$

Сопротивление за счет поверхностного натяжения колпачковых тарелок мало и им пренебрегают.

Общее гидравлическое сопротивление для верха колонны:

$$\Delta P_y := \Delta P_{sy} + \Delta P_{zhy} = 255.145 \text{ Па}$$

Гидравлическое сопротивление нижней части колонны:

$$\text{Плотность пара внизу колонны } \rho_{cr2} = 3.353 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$\text{Плотность жидкости внизу колонны } \rho_{O2} = 1.116 \times 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$\text{Сопротивление сухой тарелки в нижней части колонны: } \Delta P_{si} := \frac{\xi \cdot w^2 \cdot \rho_{cr2}}{2 \cdot f^2} = 113.502$$

Па

Сопротивление слоя жидкости на тарелке:

$$\Delta P_{zhi} := \rho_{O2} \cdot g \cdot h_s = 218.736 \text{ Па}$$

Сопротивление за счет поверхностного натяжения колпачковых тарелок мало и им пренебрегают.

Общее гидравлическое сопротивление для верха колонны:

$$\Delta P_i := \Delta P_{si} + \Delta P_{zhi} = 332.238 \text{ Па}$$

Гидравлическое сопротивление всей колонны будет равно гидравлическому сопротивлению верха колонны, т.к. истощающейся части в ней нет.

$$\Delta P := \Delta P_y = 255.145 \text{ Па}$$

Проверим, соблюдается ли при выбранном ранее расстоянии между тарелками 45 мм необходимое для нормальной работы тарелок условие:

$$h := 0.045 \text{ м}$$

$$Usl_{30} := \begin{cases} \text{"Условие выполняется"} & \text{if } h \leq 1.8 \cdot \frac{\Delta P}{\rho \cdot z \cdot g} \\ \text{"Условия НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_{30} = \text{"Условие выполняется"}$$

Условие нормальной работы выполняется.

### Расчет тепловой изоляции [с.177,1]

$$D := 0.5 \text{ м}$$

$$S := 0.005 \text{ м}$$

$$H := 3.315 \text{ м}$$

В качестве теплоизоляции служит вспученный перлитовый песок. Плотность вспученного перлитового песка: [с.534, 16]

$$\rho_{iz} := 150 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$\text{Коэффициент теплопроводности материала: } \lambda_{iz} := 0.03 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$$

$$\text{Поверхность теплоотдачи: } F_{iz} := \pi \cdot (D + 2S)H + \frac{[\pi \cdot (D + 2S)^2]}{2} = 5.672 \text{ м}^2$$

$$\text{Температура внутреннего слоя изоляции: } t_{wiz} := -180^\circ\text{C}$$

Требуемую температуру наружного слоя изоляции принимаем

$$t_{niz} := 5^\circ\text{C}$$

$$\text{Температура окружающей среды: } t_{окр} := 20^\circ\text{C}$$

Суммарный коэффициент теплоотдачи определяем по формуле

$$\alpha_{\text{ww}} := 9.47 + 0.07 \cdot (t_{\text{низ}} - t_{\text{окр}}) = 8.42 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$$

## Расчет переохладителя А2

Теплообменник предназначен для охлаждения поступающего в блок разделения воздуха азотом. В трубах-воздух, в корпусе газообразный азот.

$$T_0 := 273\text{K}$$

Рабочее давление:

в трубном пространстве:  $P_t := 7\text{МПа}$

в межтрубном пространстве:  $P_k := 0.07\text{МПа}$

Пробное давление:

в трубном пространстве:  $P_{\text{prt}} := 8.8\text{МПа}$

в межтрубном пространстве:  $P_{\text{prk}} := 0.2\text{МПа}$

Материал обечайки и днища сталь 12Х18Н10Т

Тепловой баланс переохладителя:

$$\text{Расход воздуха } G_1 := 1540 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}$$

$$\text{Расход азота газообразного } G_2 := 630 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}$$

$$\text{Начальная температура воздуха: } t_{n_B} := 10^\circ\text{C} \quad T_{n_B} := t_{n_B} + T_0 = 283 \text{ K}$$

$$\text{Конечная температура воздуха: } t_{k_B} := -110^\circ\text{C} \quad T_{k_B} := t_{k_B} + T_0 = 163 \text{ K}$$

$$\text{Конечная температура азота: } t_{k_a} := 7^\circ\text{C} \quad T_{k_a} := t_{k_a} + T_0 = 280 \text{ K}$$

$$\text{Теплоемкость газообразного азота: } c_{pa} := 0.49 \frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \quad [\text{с.275,2}]$$

Теплоемкость воздуха:  $c_{pB} := 0.56 \frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$  [с.264,2]

$$G_2 \cdot c_{pa} \cdot (T_{ka} - T_{na}) = G_1 \cdot c_{pB} \cdot (T_{nB} - T_{kB})$$

$$T_{na} := \frac{G_1 \cdot c_{pB} \cdot (T_{nB} - T_{kB}) - G_2 \cdot c_{pa} \cdot T_{ka}}{G_2 \cdot c_{pa}} = 55.238 \text{ К}$$

При конструировании витых теплообменников задаются наружным и внутренним диаметром труб:

$$d_n := 8 \text{ мм}$$

$$d_v := 6 \text{ мм}$$

Диаметр сердечника:  $D_c = (10-20)d_n$

Принимаем  $D_c := 20d_n = 160 \text{ мм}$

Поперечный шаг труб:  $s_1 := 11 \text{ мм}$

Продольный шаг труб:  $s_2 := 11 \text{ мм}$

То есть толщина дистанционной прокладки  $\delta := 3 \text{ мм}$

Навивка труб на сердечник - разряженная

Скорость воздуха в трубном пространстве:  $w_1 := 6 \frac{\text{м}}{\text{с}}$

Скорость азота в межтрубном пространстве:  $w_2 := 3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$

Расчетная температура по регламенту:  $t_r := 20$   $T := t_r + T_0 = 293 \text{ К}$

Плотность воздуха при средней температуре:  $\rho_B := 123 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$  [с.264,2]

Тогда объемный расход, поступающий в переоохладитель

$$V_1 := \frac{G_1}{\rho_B \cdot 3600} = 3.478 \times 10^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

Количество труб в переохладителе:

$$n_{vv} := \frac{V_1}{w_1 \cdot \frac{\pi (d_v \cdot 10^{-3})^2}{4}} = 20.501$$

Принимаем количество труб с запасом  $n_{vv} := 23$

Геометрические характеристики межтрубного пространства рассчитываются по средней площади сечения  $S_2$  свободного объема наливки.

Плотность азота при средней температуре  $\rho_{N_2} := 9 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$  [с.275,2]

$$V_2 := \frac{G_2}{\rho_{N_2} \cdot 3600} = 0.019 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

$$S_2 := \frac{V_2}{w_2} = 6.481 \times 10^{-3} \text{ м}^2$$

Удельная площадь свободного сечения намотки (отношение площади среднего сечения свободного объема к площади фронтального сечения намотки),  $\text{м}^2/\text{м}^2$

$$S_{yd} := 1 - \frac{\frac{\pi (d_n \cdot 10^{-3})^2}{4}}{s_1 \cdot 10^{-3} \cdot s_2 \cdot 10^{-3}} = 0.585 \frac{\text{м}^2}{\text{м}^2}$$

Площадь поперечного сечения аппарата:

$$S_A := \frac{\pi \cdot (D_c \cdot 10^{-3})^2}{4} + \frac{S_2}{S_{yd}} = 0.031 \text{ м}^2$$

Внутренний диаметр обечайки:  $D_{vn} := \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot S_A} = 0.199 \text{ м}$

Число слоев намотки:  $n_c := \frac{D_{vn} - D_c \cdot 10^{-3}}{2s_1 \cdot 10^{-3}} = 1.786$

Принимаем число слоев намотки  $n_c := 10$

Уточненный внутренний диаметр обечайки:

$$D_{\text{вн}} := D_c \cdot 10^{-3} + 2n_c \cdot s_1 \cdot 10^{-3} + 11 \cdot \delta \cdot 10^{-3} = 0.413 \text{ м}$$

Площадь наружной поверхности гладкой трубы длиной 1 м.:

$$F_{\text{нд}} := \pi \cdot d_n \cdot 10^{-3} = 0.025 \text{ м}^2$$

Площадь наружной теплопередающей поверхности аппарата сводится к определению коэффициента теплопередачи: к

Теплоемкость азота при средней температуре в переохладителе 80 К.

$$c_{\text{рв}} := 2.12 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \quad [\text{с.275,2}]$$

$$\text{Количество тепла } Q_1 := \frac{G_1}{3600} \cdot c_{\text{рв}} \cdot (T_{\text{нв}} - T_{\text{кв}}) = 1.088 \times 10^5 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3}$$

$$\text{Вязкость: } \mu_{\text{в}} := 16 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}^2} \quad [\text{с.264,2}]$$

$$\text{Критерий Рейнольдса внутри труб: } Re_t := \frac{w_1 \cdot d_v \cdot 10^{-3} \cdot \rho_{\text{в}}}{\mu_{\text{в}} \cdot g} = 2.824 \times 10^4$$

Режим турбулентный.

$$\text{Коэффициент теплопроводности: } \lambda_{\text{в}} := 27 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$$

При турбулентном режиме Критерий Прандтля:

$$Pr := \frac{\mu_{\text{в}} \cdot g \cdot c_{\text{рв}}}{\lambda_{\text{в}}} = 12.312$$

Критерий Нуссельта

$$Nu_t := 0.023 \cdot Re_t^{0.8} \cdot Pr^{0.4} = 228.32$$

Коэффициент теплоотдачи внутри труб:

$$\alpha_v := Nu_t \cdot \frac{\lambda_B}{d_v \cdot 10^{-3}} = 1.027 \times 10^3 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Плотность азота в межтрубном пространстве:

$$\rho_{N_2} = 9 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \quad [\text{с.275,2}]$$

Вязкость азота в межтрубном пространстве:

$$\mu_{N_2g} := 5 \cdot 10^{-6} \text{ Н} \cdot \frac{\text{с}}{\text{м}^2} \quad [\text{с.275,2}]$$

Критерий Рейнольдса в межтрубном пространстве:

$$Re_m := \frac{w_2 \cdot D_{vn} \cdot \rho_{N_2}}{\mu_{N_2g}} = 2.276 \times 10^5$$

Коэффициент теплопроводности газообразного азота:

$$\lambda_g := 7.5 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}} \quad [\text{с.275,2}]$$

Коэффициент теплоотдачи в межтрубном пространстве: [с.159,17]

$$C := 0.0418 \quad n_k := 0.85$$

$$Nu_m := C \cdot Re_m^{n_k} = 1.495 \times 10^3$$

$$\alpha_n := Nu_m \cdot \frac{\lambda_g}{D_{vn}} = 27.154 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Для витых гладкотрубных теплообменников коэффициент теплопередачи:

$$K := \frac{1}{\frac{1}{\alpha_v} \cdot \frac{d_n}{d_v} + \frac{1}{\alpha_n}} = 26.23 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Площадь наружной теплопередающей поверхности аппарата:

$$F_n := \frac{Q_1}{K \cdot (T_{n_B} - T_{k_B})} = 34.575 \text{ м}^2$$

Тогда средняя длина трубы в намотке:

$$l := \frac{F_n}{n \cdot F_{n_{yd}}} = 59.812 \text{ м}$$

Тангенс угла наклона труб к диаметральной плоскости, определяется из условия

$$\frac{2n \cdot s_2 \cdot 10^{-3}}{n_c \cdot \pi (D_{vn} + D_c \cdot 10^{-3})} = 0.028$$

Угол наклона труб к диаметральной плоскости

$$\alpha := 1.75 \cdot \text{deg} = 0.031$$

$$\tan(\alpha) = 0.031$$

Высота намотки:

$$H := \frac{2n \cdot l \cdot s_2 \cdot 10^{-3}}{n_c \cdot \pi \cdot (D_{vn} + D_c \cdot 10^{-3}) \cdot \cos(\alpha)} = 1.682 \text{ м}$$

Средний диаметр каждого слоя намотки и число заходов:  $n = 23$

1 слой:  $z := 1$

$$D_{c11} := D_c \cdot 10^{-3} + s_1 \cdot 10^{-3} \cdot (2z - 1) = 0.171 \text{ м}$$

$$n_{zax1} := \frac{2n \cdot D_{c11}}{n_c \cdot (D_{vn} + D_c \cdot 10^{-3})} = 1.373$$

Принимаем  $n_{zax1} := 2$

2 слой:  $z := 2$

$$D_{c12} := D_c \cdot 10^{-3} + s_1 \cdot 10^{-3} \cdot (2z - 1) = 0.193 \text{ м}$$

$$n_{\text{zax2}} := \frac{2n \cdot D_{\text{c12}}}{n_{\text{c}} \cdot (D_{\text{vn}} + D_{\text{c}} \cdot 10^{-3})} = 1.549$$

Принимаем  $n_{\text{zax2}} := 2$

3 слой:  $z := 3$

$$D_{\text{c13}} := D_{\text{c}} \cdot 10^{-3} + s_1 \cdot 10^{-3} \cdot (2z - 1) = 0.215 \text{ м}$$

$$n_{\text{zax3}} := \frac{2n \cdot D_{\text{c13}}}{n_{\text{c}} \cdot (D_{\text{vn}} + D_{\text{c}} \cdot 10^{-3})} = 1.726$$

Принимаем  $n_{\text{zax3}} := 2$

4 слой:  $z := 4$

$$D_{\text{c14}} := D_{\text{c}} \cdot 10^{-3} + s_1 \cdot 10^{-3} \cdot (2z - 1) = 0.237 \text{ м}$$

$$n_{\text{zax4}} := \frac{2n \cdot D_{\text{c14}}}{n_{\text{c}} \cdot (D_{\text{vn}} + D_{\text{c}} \cdot 10^{-3})} = 1.903$$

Принимаем  $n_{\text{zax4}} := 2$

5 слой:  $z := 5$

$$D_{\text{c15}} := D_{\text{c}} \cdot 10^{-3} + s_1 \cdot 10^{-3} \cdot (2z - 1) = 0.259 \text{ м}$$

$$n_{\text{zax5}} := \frac{2n \cdot D_{\text{c15}}}{n_{\text{c}} \cdot (D_{\text{vn}} + D_{\text{c}} \cdot 10^{-3})} = 2.079$$

Принимаем  $n_{\text{zax5}} := 2$

6 слой:  $z := 6$

$$D_{\text{c16}} := D_{\text{c}} \cdot 10^{-3} + s_1 \cdot 10^{-3} \cdot (2z - 1) = 0.281 \text{ м}$$

$$n_{\text{zax6}} := \frac{2n \cdot D_{\text{c16}}}{n_{\text{c}} \cdot (D_{\text{vn}} + D_{\text{c}} \cdot 10^{-3})} = 2.256$$

Принимаем  $n_{zax6} := 2$

7 слой:  $z := 7$

$$D_{c17} := D_c \cdot 10^{-3} + s_1 \cdot 10^{-3} \cdot (2z - 1) = 0.303 \text{ м}$$

$$n_{zax7} := \frac{2n \cdot D_{c17}}{n_c \cdot (D_{vn} + D_c \cdot 10^{-3})} = 2.432$$

Принимаем  $n_{zax7} := 2$

8 слой:  $z := 8$

$$D_{c18} := D_c \cdot 10^{-3} + s_1 \cdot 10^{-3} \cdot (2z - 1) = 0.325 \text{ м}$$

$$n_{zax8} := \frac{2n \cdot D_{c18}}{n_c \cdot (D_{vn} + D_c \cdot 10^{-3})} = 2.609$$

Принимаем  $n_{zax8} := 3$

9 слой:  $z := 9$

$$D_{c19} := D_c \cdot 10^{-3} + s_1 \cdot 10^{-3} \cdot (2z - 1) = 0.347 \text{ м}$$

$$n_{zax9} := \frac{2n \cdot D_{c19}}{n_c \cdot (D_{vn} + D_c \cdot 10^{-3})} = 2.786$$

Принимаем  $n_{zax9} := 3$

10 слой:  $z := 10$

$$D_{c110} := D_c \cdot 10^{-3} + s_1 \cdot 10^{-3} \cdot (2z - 1) = 0.369 \text{ м}$$

$$n_{zax10} := \frac{2n \cdot D_{c110}}{n_c \cdot (D_{vn} + D_c \cdot 10^{-3})} = 2.962$$

Принимаем  $n_{zax10} := 3$

На заключительном этапе конструкторского расчета аппарата проверяется действительная длина труб в каждом слое намотки, которая сравнивается со средним значением.

$$l = 59.812 \text{ м}$$

$$l_1 := \frac{\pi \cdot D_{c11} \cdot H \cdot \cos(\alpha)}{s_2 \cdot 10^{-3} \cdot n_{zax1}} = 41.054 \text{ м}$$

$$l_2 := \frac{\pi \cdot D_{c12} \cdot H \cdot \cos(\alpha)}{s_2 \cdot 10^{-3} \cdot n_{zax2}} = 46.336 \text{ м}$$

$$l_3 := \frac{\pi \cdot D_{c13} \cdot H \cdot \cos(\alpha)}{s_2 \cdot 10^{-3} \cdot n_{zax3}} = 51.618 \text{ м}$$

$$l_4 := \frac{\pi \cdot D_{c14} \cdot H \cdot \cos(\alpha)}{s_2 \cdot 10^{-3} \cdot n_{zax4}} = 56.9 \text{ м}$$

$$l_5 := \frac{\pi \cdot D_{c15} \cdot H \cdot \cos(\alpha)}{s_2 \cdot 10^{-3} \cdot n_{zax5}} = 62.182 \text{ м}$$

$$l_6 := \frac{\pi \cdot D_{c16} \cdot H \cdot \cos(\alpha)}{s_2 \cdot 10^{-3} \cdot n_{zax6}} = 67.463 \text{ м}$$

$$l_7 := \frac{\pi \cdot D_{c17} \cdot H \cdot \cos(\alpha)}{s_2 \cdot 10^{-3} \cdot n_{zax7}} = 72.745 \text{ м}$$

$$l_8 := \frac{\pi \cdot D_{c18} \cdot H \cdot \cos(\alpha)}{s_2 \cdot 10^{-3} \cdot n_{zax8}} = 52.018 \text{ м}$$

$$l_9 := \frac{\pi \cdot D_{c19} \cdot H \cdot \cos(\alpha)}{s_2 \cdot 10^{-3} \cdot n_{zax9}} = 55.539 \text{ м}$$

## Теплоотдача и гидравлическое сопротивление при течении в изогнутых трубах витого теплообменника

Для искривленного потока жидкости характерно появление центробежных сил, значения которых по сечению канала не одинаковы. В центре трубы, где скорость максимальна, эти силы имеют наибольшее значение. В направлении к стенкам трубы скорость среды уменьшается и влияние центробежного эффекта становится меньше. Такое распределение сил по сечению изогнутого канала приводит к возникновению поперечной вторичной циркуляции, обуславливающей сложное движение рабочей среды по двум "сплюснутым" спиральям с разным направлением вращения.

Критическое число Рейнольдса, соответствующее переходу от ламинарного режима к турбулентному используется эмпирическая формула:

$$Re_{kr} := 18500 \left( \frac{D_{vn}}{d_v \cdot 10^{-3}} \right)^{-0.28} = 5.657 \times 10^3$$

Рассчитанный ранее критерий Рейнольдса:  $Re_t = 2.824 \times 10^4$

Течение - турбулентное.

Если  $Re > Re_{kr}$ , то средний коэффициент теплоотдачи рассчитывается по формуле Михеева:

$$R_{cr} := \frac{D_{vn} + D_c \cdot 10^{-3}}{4} = 0.143 \text{ м}$$

$\lambda_{st} := 95$  теплопроводность стенки из материала 12X18H10T [18]

$c_{pst} := 232$  теплоемкость стенки из материала 12X18H10T [18]

$$Pr_{st} := \frac{c_{pst}}{\lambda_{st}} = 2.343 \quad \text{критерий Прандтля стенки}$$

$$Nu := \left( 1 + 1.77 \cdot \frac{d_v \cdot 10^{-3}}{R_{cr}} \right) \cdot 0.021 \cdot Re_t^{0.8} \cdot Pr^{0.43} \cdot \left( \frac{Pr}{Pr_{st}} \right)^{0.25} = 365.528$$

$$\alpha_{\text{ww}} := \frac{Nu \cdot \lambda_B}{d_v \cdot 10^{-3}} = 1.645 \times 10^3 \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$$

Для коэффициента сопротивления трения в области турбулентного течения рекомендуется формула

$$\xi_R := 1 + 0.075 \operatorname{Re}_t^{0.25} \cdot \left( \frac{d_v \cdot 10^{-3}}{D_{vn}} \right)^{0.5} = 1.117 \quad D_{vn} = 0.413$$

### Конструктивный расчет переохладителя

По итогам технологического расчета определен внутренний диаметр - 0.413 м. Материал аппарата 12X18Н10Т. Соединения паяные.

Высоту аппарата примем  $\underline{H} := 2500$  мм

$\underline{D} := 188$  мм

Расчетное давление

Гидростатическое давление:  $\underline{P}_g := \rho_{N_2} \cdot g \cdot H \cdot 10^{-9} = 2.205 \times 10^{-4}$  МПа

Так как гидростатическое давление меньше 5% от рабочего - им пренебрегаем

$P_k \cdot 0.05 = 3.5 \times 10^{-3}$  МПа

Таким образом:

$P_{rk} := P_k = 0.07$  МПа

$P_{rt} := P_t = 7$  МПа

Допускаемое напряжение:

в рабочем состоянии:

Допускаемое напряжение стали 12x18Н10Т при расчетной температуре:

$t_r = 20$  °С

$\sigma_d = 160$  МПа [с.11,6]

Коэффициент сварного шва для автоматической дуговой электросварки [с.25,6]

$\phi = 1$

$$\sigma_{\text{д}} := \phi \cdot \sigma_{\text{д}} = 160 \text{ МПа}$$

При гидравлических испытаниях [с.11,6]

$$\sigma_{\text{т20}} = 240 \text{ МПа} - \text{ для стали 12X18H10T при температуре } t_i := 20^\circ\text{C}$$

$$\sigma_{\text{д}} := \frac{\sigma_{\text{т20}}}{1.1} = 218.182 \text{ МПа}$$

### Прибавка к расчетной толщине стенки:

Скорость коррозии материала 12X18H10T составляет  $\Pi = 5 \times 10^{-3} \frac{\text{мм}}{\text{год}}$

Срок эксплуатации ориентировочно  $\tau = 20$  лет

$$c_{\text{к}} := \Pi \cdot \tau = 0.1 \text{ мм для компенсации коррозии}$$

$$c_{\text{е}} = 0 \text{ мм для компенсации эрозии}$$

$$c_{\text{1}} := c_{\text{к}} + c_{\text{е}} = 0.1 \text{ мм}$$

$$c_2 = 0$$

$$c_3 = 0$$

$$c := c_1 + c_2 + c_3 = 0.1 \text{ мм Принимаем } c := 1 \text{ мм}$$

Расчет толщины стенки цилиндрической обечайки

$$s_{\text{r}} := \max\left(\frac{P_{\text{rk}} \cdot D}{2\sigma - P_{\text{rk}}}, \frac{P_{\text{prk}} \cdot D}{2\sigma_i - P_{\text{prk}}}\right) = 0.086 \text{ мм}$$

$$s := s_{\text{r}} + c = 1.086 \text{ мм}$$

Принимаем исполнительную толщину стенки:  $S := 2 \text{ мм}$

$$Usl_{31} := \begin{cases} \text{"Условие применимости формул выполняется"} & \text{if } \frac{S - c}{D} \leq 0.1 \\ \text{"Условия НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_{31} = \text{"Условие применимости формул выполняется"}$$

Допускаемое давление в рабочем состоянии:

$$p := \frac{2\sigma \cdot (S - c)}{D + S - c} = 1.693 \text{ МПа}$$

Расчетное давление  $P_{rk} = 0.07 \text{ МПа}$

$$Usl_{32} := \begin{cases} \text{"Условие выполняется"} & \text{if } P_{rk} < p \\ \text{"Условия НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_{32} = \text{"Условие выполняется"}$$

При испытаниях

$$p_{pr} := \frac{2\sigma_i \cdot (S - c)}{D + S - c} = 2.309 \text{ МПа} \quad P_{prk} = 0.2 \text{ МПа}$$

$$Usl_{33} := \begin{cases} \text{"Условие выполняется"} & \text{if } P_{prk} < p_{pr} \\ \text{"Условия НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_{33} = \text{"Условие выполняется"}$$

Условия прочности выполняются.

**Вывод:** Таким образом, при полученной толщине стенки обеспечивается прочность цилиндрической обечайки корпуса как в рабочем состоянии, так и в условиях испытания.

Расчет толщины стенки эллиптической крышки и днища

$$Se_r := \max\left(\frac{P_{rk} \cdot D}{2\sigma - 0.5P_{rk}}, \frac{P_{prk} \cdot D}{2\sigma_i - 0.5P_{prk}}\right) = 0.086 \text{ мм}$$

$$Se := Se_r + c = 1.086 \text{ мм}$$

Толщину стенки принимаем  $Se := 2 \text{ мм}$

$$Usl_{34} := \begin{cases} \text{"Условие применимости формул выполняется"} & \text{if } \frac{Se - c}{D} < 0.1 \\ \text{"Условия НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_{34} = \text{"Условие применимости формул выполняется"}$$

Допускаемое давление в рабочем состоянии

$$p := \frac{2\sigma \cdot (Se - c)}{D + 0.5 \cdot (Se - c)} = 1.698 \text{ МПа}$$

Расчетное давление  $P_{rk} = 0.07 \text{ МПа}$

$$Usl_{35} := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } P_{rk} < p \\ \text{"Условия НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$Usl_{35} = \text{"Условие прочности выполняется"}$

При испытаниях

$$p_i := \frac{2\sigma_i \cdot (Se - c)}{D + 0.5 \cdot (Se - c)} = 2.315 \text{ МПа}$$

Расчетное пробное давление  $P_{prk} = 0.2 \text{ МПа}$

$$Usl_{36} := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } P_{prk} < p_i \\ \text{"Условия НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$Usl_{36} = \text{"Условие прочности выполняется"}$

**Вывод:** При исполнительской толщине стенки эллиптической крышки 2 мм условия прочности выполняются.

$\frac{2}{292} = 6.849 \times 10^{-3}$  следовательно, аппарата тонокостенный

### Определение диаметров патрубков

Вход воздуха:

$$d_1 := \sqrt{V_1 \cdot \frac{4}{\pi \cdot W_1}} = 0.027 \text{ м}$$

Принимаем трубу наружным диаметром 32 мм и толщиной стенки 2 мм. [19]

$$d_1 := 32 \text{ мм}$$

Выход воздуха принимаем тем же диаметром

Вход азота:

$$d_2 := \sqrt{V_2 \cdot \frac{4}{\pi \cdot W_2}} = 0.091 \text{ м}$$

Принимаем диаметр патрубка ввода азота при толщине стенки 3 мм.[19]

$$d_2 := 98 \text{ мм}$$

### Укрепление отверстий [10]

Расчетный диаметр цилиндрической обечайки

$$D_r := D = 188 \text{ мм}$$

Расчетный диаметр эллиптического днища и крышки:

Расстояние от центра укрепляемого отверстия до оси эллиптического днища:

$$r < 0.4D - 0.5 \cdot (d + 2S)$$

$$0.4D - 0.5 \cdot (d_1 + 2S) = 57.2 \text{ мм} \quad r_1 := 55 \text{ мм}$$

$$0.4D - 0.5 \cdot (d_2 + 2S) = 24.2 \text{ мм} \quad r_2 := 0 \text{ мм}$$

Расчетный диаметр эллиптического днища

$$D_{re1} := 2D \cdot \sqrt{1 - 3 \cdot \left(\frac{r_1}{D}\right)^2} = 324.154 \text{ мм}$$

$$D_{re2} := 2D \cdot \sqrt{1 - 3 \cdot \left(\frac{r_2}{D}\right)^2} = 376 \text{ мм}$$

Расчетные диаметры отверстий:

$$d_{1r} := d_1 + 2c = 34 \text{ мм}$$

$$d_{2r} := d_2 + 2c = 100 \text{ мм}$$

Расчетные толщины стенки штуцера:

$$s_{1r} := \frac{P_{rt} \cdot (d_1 + 2c)}{2\sigma - P_{rt}} = 0.76 \text{ мм} \quad s_{2r} := \frac{P_{rk} \cdot (d_2 + 2c)}{2\sigma - P_{rk}} = 0.022 \text{ мм}$$

Расчетные длины внешних и внутренних частей патрубков, участвующих в укреплении и учитываемые при расчете:

$$l_{11} := 8 \text{ мм} \quad l_{12} := 8 \text{ мм} \quad l_{13} := 15 \text{ мм} \quad l_{14} := 20 \text{ мм} \quad c = 1$$

$$l_{r1} := \min \left[ l_{11}, 1.25 \cdot \sqrt{(d_1 + 2c) \cdot (S - c)} \right] = 7.289 \text{ мм}$$

$$l_{r2} := \min \left[ l_{12}, 1.25 \cdot \sqrt{(d_2 + 2c) \cdot (S - c)} \right] = 12.5 \text{ мм}$$

$$l_{r3} := \min \left[ l_{13}, 1.25 \cdot \sqrt{(d_1 + 2c) \cdot (S - 2c)} \right] = 0 \text{ мм}$$

$$l_{r4} := \min \left[ l_{14}, 1.25 \cdot \sqrt{(d_2 + 2c) \cdot (S - 2c)} \right] = 0 \text{ мм}$$

Ширина зоны укрепления в обечайке и днище

$$L_{e2} := \sqrt{D_{re2} \cdot (S - c)} = 19.391 \text{ мм}$$

$$L_{e1} := \sqrt{D_{re1} \cdot (S - c)} = 18.004 \text{ мм}$$

Расчетный диаметр отверстия, не требующий укрепления при отсутствии избыточной толщины стенок сосуда, днища и крышки:

$$d_{or} := 0.4 \cdot \sqrt{D_r \cdot (S - c)} = 5.485 \text{ мм}$$

$$d_{ore} := 0.4 \cdot \sqrt{D_r \cdot (S_e - c)} = 5.485 \text{ мм}$$

Из данного выражения видно, что все отверстия для патрубков следует укреплять.

Примем начальную толщину укрепления  $s_{yr} = 0 \text{ мм}$

Расчетная длина образующей оболочки в зоне укрепления:

$$L_{e2} := \sqrt{D_{re2} \cdot (s_{yr} + S - c)} = 19.391 \text{ мм}$$

$$L_{e1} := \sqrt{D_{re1} \cdot (s_{yr} + S - c)} = 18.004 \text{ мм}$$

Расчетная толщина стенки штуцера 2 из того же материала, что и теплообменник

$$\sigma_{sh} := \sigma = 160 \text{ МПа}$$

Штуцер номер 1 изготовлен из латуни марки Л63  $\sigma_{sh1} := 140 \text{ МПа}$

$$s_{rsh1} := \frac{P_{rt} \cdot (d_1 + 2c)}{2 \cdot \sigma_{sh1} - P_{rt}} = 0.872 \text{ мм}$$

$$sr_{sh2} := \frac{P_{rk} \cdot (d_2 + 2c)}{2 \cdot \sigma - P_{rk}} = 0.022 \text{ мм}$$

Коэффициенты  $k_1$  для внешней части патрубка,  $k_2$  - для накладного кольца  $k_3$  для внутренней части патрубка равны:

$$k_{11} := \frac{\sigma_{sh1}}{\sigma} = 0.875 \quad k_{12} := \frac{\sigma_{sh}}{\sigma} = 1$$

$$k_{21} := k_{11} = 0.875 \quad k_{22} := k_{12} = 1$$

$$k_{31} := 1$$

Используем комбинированное укрепление приварным кольцом снаружи. Стенки всех укрепляемых патрубков выбраны.

$$S_{sh1} := 2 \text{ мм} \quad S_{sh2} := 3 \text{ мм}$$

Условие укрепления отверстия комбинированным укреплением

$$A := \sqrt{D_r \cdot (s_{yr} + S - c)} \cdot (k_{21} \cdot s_{yr} + S - s_r - c) = 12.529$$

$$U := (l_{r1} + s_{yr} + S - s_r - c) \cdot (S_{sh1} - s_{rsh1} - c) + l_{r3} \cdot (S_{sh1} - 2c) \cdot k_{11} + A = 13.581$$

$$U_u := 0.5 \cdot (d_{1r} - d_{0r}) \cdot s_r = 1.229$$

$$U_{l37} := \begin{cases} \text{"Условие укрепления выполняется"} & \text{if } U > U_u \\ \text{"Условие НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$U_{l37} = \text{"Условие укрепления выполняется"}$$

Следовательно, приварное кольцо не требуется.

$$A := \sqrt{D_r \cdot (s_{yr} + S - c)} \cdot (k_{22} \cdot s_{yr} + S - s_r - c) = 12.529$$

$$U := (l_{r1} + s_{yr} + S - s_r - c) \cdot (S_{sh2} - s_{rsh2} - c) + l_{r3} \cdot (S_{sh2} - 2c) \cdot k_{21} + A = 39.063$$

$$U_u := 0.5 \cdot (d_{2r} - d_{0r}) \cdot s_r = 4.074$$

$$Usl_{38} := \begin{cases} \text{"Условие укрепления выполняется"} & \text{if } U > U_u \\ \text{"Условие НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_{38} = \text{"Условие укрепления выполняется"}$$

Следовательно, приварное кольцо не требуется.

Принимаем  $sy = 0$  то есть приварное кольцо не требуется.

Все отверстия укрепляются с помощью штуцера снаружи и 1 изнутри. Допускаемое внутреннее избыточное давление узла сопряжения штуцера и стенки аппарата

$$k1 := 1$$

$$v := \min \left[ \frac{L0_{e1} \cdot (k2_1 \cdot syr + S - c) + (l_{r1} + syr + S - sr - c) \cdot (S_{sh1} - c) + l_{r3} \cdot (S_{sh2} - c) \cdot k1}{\left[ L0_{e1} + 0.5 \cdot (d_{1r} - d_{0r}) + k1 \cdot (l_{r1} + syr + s - sr - c) \cdot \frac{d_1 + 2c}{Dre_1} \right] \cdot (S - c)}, 1 \right] = 0.794$$

$$P_{sh1} := \left( 2k1 \cdot \sigma \cdot \frac{S - c}{Dre_1 + S - c} \right) \cdot v = 0.781$$

МПа

$$Usl_{39} := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } P_{sh1} > P_{rk} \\ \text{"Условие НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$k1 := 2$$

$$v := \min \left[ \frac{L0_{e2} \cdot (k2_2 \cdot syr + S - c) + (l_{r1} + syr + S - sr - c) \cdot (S_{sh2} - 2c) + l_{r3} \cdot (S_{sh2} - c) \cdot k1}{\left[ L0_{e2} + 0.5 \cdot (d_{2r} - d_{0r}) + k1 \cdot (l_{r1} + syr + s - sr - c) \cdot \frac{d_2 + 2c}{Dre_2} \right] \cdot (S - c)}, 1 \right] = 0.448$$

$$v = 0.448$$

$$P_{sh2} := \left( 2k1 \cdot \sigma \cdot \frac{S - c}{Dre_2 + S - c} \right) \cdot v = 0.76 \text{ МПа}$$

$$Usl_{40} := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } P_{sh1} > P_{rk} \\ \text{"Условие НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_{40} = \text{"Условие прочности выполняется"}$$

**Вывод:** Таким образом, условия прочности доказывают, что патрубки с внешней стороны, а в случае 1 и с внутренней, укрепляют отверстия в необходимом количестве и приварных колец не требуется.

### Расчет опорных лап

Область применения расчетных формул

Опорные лапы присоединены к цилиндрической обечайке. Направление действия усилия принимают параллельно оси обечайки. Расчетные формулы применяют, когда

$$Usl_{41} := \begin{cases} \text{"Условие применения формул выполняется"} & \text{if } \frac{s - c}{D} \leq 0.05 \\ \text{"Условие НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_{41} = \text{"Условие применения формул выполняется"}$$

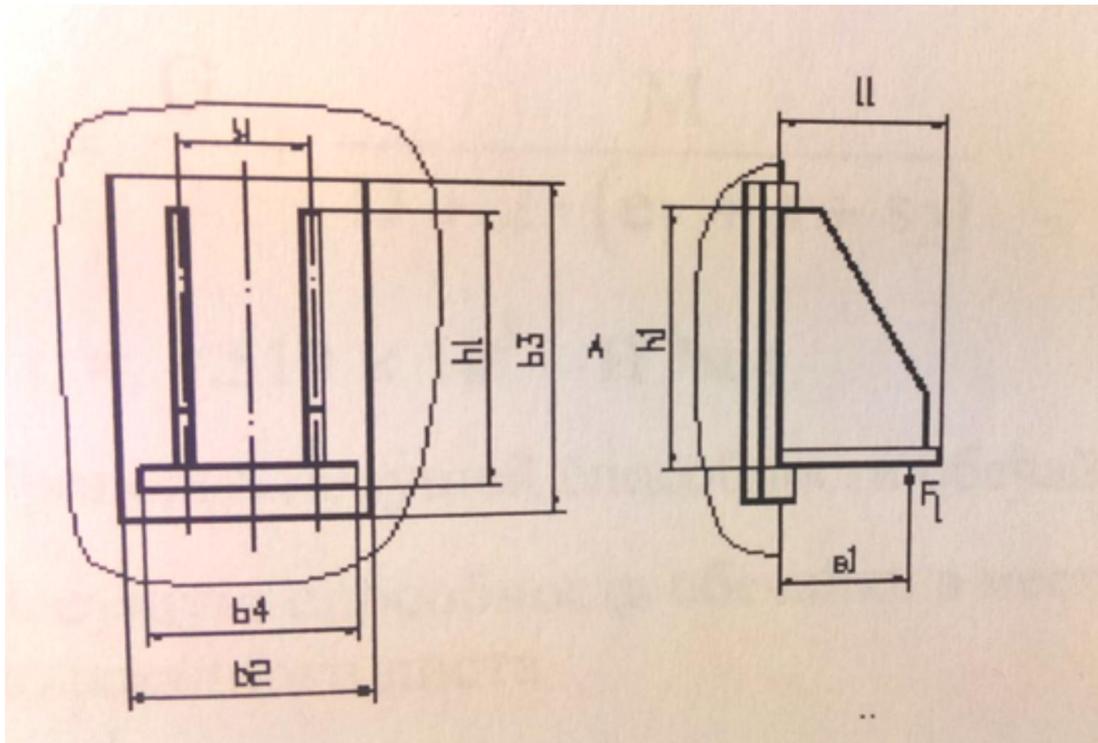


Рисунок 11. Расчетная схема опорных лап

$$l_1 := 80 \text{ мм}$$

Высоту опорной лапы принимаем:  $h_{1\text{mm}} := 100\text{ мм}$

Расстояние между точкой приложения усилия и обечайкой

$$e_{1\text{mm}} := \frac{5}{6} \cdot l_1 = 666.667 \text{ мм}$$

Остальные размеры:

$$b_4 := 460 \text{ мм}$$

$$b_{1\text{mm}} := 380 \text{ мм}$$

Изгибающий момент, действующий на обечайку в сечении, где расположены опорные узлы, в условиях эксплуатации или испытания (монтажа), Н\*мм;

$$M := 0$$

Усилие, действующее на опорную лапу для  $p=2$

$$F_{1\text{mm}} := \frac{G}{2} + \frac{M}{D + 2 \cdot (e_1 + s + s_2)} = 1.079 \times 10^3 \text{ Н} \cdot \text{мм}$$

Проверка несущей способности обечайки

Несущая способность обечайки в месте приварки опорной лапы без подкладного листа

Условие прочности для лапы  $F_1 \leq F_{d1}$

Для расчета несущей способности проведем предварительный расчет коэффициента  $K_7$  и предельного коэффициента изгиба  $\sigma_{td}$ :

Коэффициент:

$$x := \ln \left[ \frac{Dr}{2 \cdot (S - c)} \right] = 4.543 \quad y := \ln \left( \frac{h_1}{Dr} \right) = 1.671$$

$$z_{\text{mm}} := -5.984 + 11.395x - 18.984y - 2.413x^2 - 7.286x \cdot y = -91.074$$

$$K_7 := \exp(z \cdot 10^{-7}) = 1$$

Предельное напряжение изгиба:

Общее окружное мембранное напряжение в цилиндрической и конической обечайках следует определять по формуле

$$\sigma_{my} := \frac{P_{rk} \cdot Dr}{2 \cdot (S - c)} = 6.58 \text{ МПа} \quad \sigma_m := \sigma_{my} = 6.58 \text{ МПа}$$

$n_T := 1.5$  запас прочности по пределу текучести

$K_2 := 1.2$  для рабочих условий

$$\theta_1 := 0.1 \quad \theta_2 := \frac{K_2 \cdot \sigma_m}{n_T \cdot \sigma} = 0.033$$

$$K_1 := \frac{1 + 3 \cdot \theta_1 \cdot \theta_2}{3 \cdot \theta_1^2} \cdot \sqrt{\frac{9 \cdot \theta_1^2 \cdot (1 - \theta_2^2)}{(1 + 3 \cdot \theta_1 \cdot \theta_2)^2}} + 1 - 1 = 4.064$$

Тогда предельное напряжение изгиба

$$\sigma_{td} := K_1 \cdot \sigma \cdot \frac{n_T}{K_2} = 812.736 \text{ МПа}$$

Несущая способность обечайки в месте приварки опорной лапы без подкладного листа

$$F_{д1} := \frac{\sigma_{td} \cdot h_1 \cdot (S - c)^2}{K_7 \cdot e_1} = 1.219 \times 10^3$$

При  $\frac{g}{h_1} < 0.4$  значение  $F_{д1}$ , полученное по формуле, необходимо

умножить на  $(0.5 + \frac{g}{h_1})$

$\frac{g}{h_1} = 9.8 \times 10^{-3}$  Следовательно, домножаем несущую способность обечайки на

$$0.5 + \frac{g}{h_1} = 0.51 \quad 0.51 \cdot 4876 = 2.487 \times 10^3 \text{ а } F_1 = 1.079 \times 10^3$$

$$Usl_{42} := \begin{cases} \text{"Условие выполняется"} & \text{if } F_1 \leq F_{д1} \\ \text{"Условие НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_{42} = \text{"Условие выполняется"}$$

### Расчет тепловой изоляции[с.177,1]

$$D_{vn} = 0.413 \text{ м} \quad S := 0.002 \text{ м} \quad H := 0.85 \text{ м} \quad D := D_{vn} = 0.413 \text{ м}$$

В качестве теплоизоляции служит вспученный перлитовый песок. Его плотность

$$\text{составляет: } \rho_{iz} = 150 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Коэффициент теплопроводности материала: Вт/м\*град  $\lambda_{iz} = 0.039$

$$\text{Поверхность теплоотдачи: } F_{iz} := \pi \cdot (D + 2S) \cdot H + \frac{[\pi \cdot (D + 2S)^2]}{2} = 1.387 \text{ м}^2$$

Температура внутреннего слоя изоляции  $t_{viz} := -196 \text{ }^\circ\text{C}$

Требуемую температуру наружного слоя изоляции принимаем  $t_{niz} = 5 \text{ }^\circ\text{C}$

Температура окружающей среды:  $t_{okr} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

Суммарный коэффициент теплоотдачи определяем по формуле:

$$\alpha := 9.47 + 0.07 \cdot (t_{niz} - t_{okr}) = 8.42 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$$

Величина тепловых потерь по уравнению теплоотдачи

$$Q_{piz} := \alpha \cdot F_{iz} \cdot (t_{niz} - t_{okr}) = -175.138 \text{ Дж}$$

$$\text{Толщина тепловой изоляции: } \delta_{iz} := \frac{\lambda_{iz} \cdot F_{iz} \cdot (t_{viz} - t_{niz})}{Q_{piz}} = 0.062 \text{ м}$$

Диаметр аппарата с тепловой изоляцией:

$$D_{niz} := D + 2S + 2 \cdot \delta_{iz} = 0.541 \text{ м}$$

## Расчет переохладителя А3

Теплообменник предназначен для переохлаждения потока кислорода из верхней колонны потоком кубовой жидкости из нижней.

В трубах-кислород, в корпусе кубовая жидкость нижней колонны.

$$T_{O_2} := 273 \text{ K}$$

Рабочее давление:

$$\text{в трубном пространстве: } P_{t} := 0.0 \text{ МПа}$$

$$\text{в межтрубном пространстве: } P_{j} := 0.2 \text{ МПа}$$

Пробное давление:

$$\text{в трубном пространстве: } P_{prt} := 0.2 \text{ МПа}$$

$$\text{в межтрубном пространстве: } P_{prk} := 0.3 \text{ МПа}$$

Материал обечайки и днища медь М3

**Тепловой баланс переохладителя:**

$$\text{Расход кислорода } G_1 := 13 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}$$

Плотность жидкости при температуре внизу колонны:

$$t_{ww} := -172 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\rho_{ww, N_2} := 985 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \quad [\text{с.275,2}]$$

Плотность жидкого кислорода при температуре на входе

$$t_f := -172 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\rho_{O_2} = 1.116 \times 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \quad [\text{с.273,2}]$$

$$x_{ww} := 0.72$$

Плотность исходной смеси:

$$\rho_{\text{см}} := \left( \frac{\frac{x_{\text{W}}}{100}}{\rho_{\text{WN}_2}} + \frac{1 - \frac{x_{\text{W}}}{100}}{\rho_{\text{O}_2}} \right)^{-1} = 1.115 \times 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Расход жидкости:  $V_2 := 250 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}}$

$$G_2 := V_2 \cdot \rho_{\text{W}} = 2.787 \times 10^5 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}$$

Начальная температура кислорода  $tn_{\text{k}} := -174 \text{ } ^\circ\text{C}$   $Tn_{\text{k}} := tn_{\text{k}} + T_0 = 99 \text{ K}$

Конечная температура кислорода  $tk_{\text{k}} := -183 \text{ } ^\circ\text{C}$   $Tk_{\text{k}} := tk_{\text{k}} + T_0 = 90 \text{ K}$

Конечная температура жидкости  $tk_{\text{ж}} := -167 \text{ } ^\circ\text{C}$   $Tk_{\text{ж}} := tk_{\text{ж}} + T_0 = 106 \text{ K}$

Теплоемкость жидкости:  $c_p := 0.49 \frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$

Теплоемкость кислорода  $c_{pk} := 0.56 \frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$  [с.273,2]

$$G_2 \cdot c_p \cdot (Tk_{\text{a}} - Tn_{\text{a}}) = G_1 \cdot c_{pk} \cdot (Tn_{\text{в}} - Tk_{\text{в}})$$

$$Tn_{\text{ж}} := \frac{G_1 \cdot c_{pk} \cdot (Tn_{\text{k}} - Tk_{\text{k}}) - G_2 \cdot c_p \cdot Tk_{\text{ж}}}{G_2 \cdot c_p} = -105.995 \text{ K}$$

При конструировании витых теплообменников задаются наружным и внутренним диаметром труб:

$$d_{\text{n}} := 1 \text{ мм}$$

$$d_{\text{в}} := 8 \text{ мм}$$

Диаметр сердечника:  $D_{\text{с}} = (10-20)d_{\text{n}}$

Принимаем

$$D_{\text{с}} := 20d_{\text{n}} = 200 \text{ мм}$$

поперечный шаг труб:  $s_1 := 14 \text{ мм}$

Продольный шаг труб:  $s_2 := 15 \text{ мм}$

То есть толщина дистанционной прокладки  $\delta := 4 \text{ мм}$

Навивка труб на сердечник - разряженная

Скорость жидкости в трубном пространстве:  $w_1 := 1.4 \frac{\text{м}}{\text{с}}$

Скорость кислорода в межтрубном пространстве:  $w_2 := 4.4 \frac{\text{м}}{\text{с}}$

Расчетная температура по регламенту:  $t_r := 20 \text{ } T := t_r + T_0 = 293 \text{ К}$

Плотность воздуха при средней температуре:  $\rho_{\text{в}} := 1.23 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \quad [\text{с.264,2}]$

Тогда объемный расход, поступающий в переохладитель

$$V_1 := \frac{G_1}{\rho_{\text{в}} \cdot 3600} = 2.936 \times 10^{-4} \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

$$\text{Количество труб в переохладителе: } n := \frac{V_1}{w_1 \cdot \frac{\pi (d_v \cdot 10^{-3})^2}{4}} = 3.894$$

Принимаем количество труб с запасом  $n := 6$

Геометрические характеристики межтрубного пространства рассчитываются по средней площади сечения  $S_2$  свободного объема наливки.

Плотность жидкости при средней температуре  $\rho_{\text{ж2}} := 1296 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \quad [\text{с.277,2}]$

$$V_2 := \frac{G_2}{\rho_{\text{ж2}} \cdot 3600} = 0.06 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

$$S_2 := \frac{V_2}{w_2} = 0.013 \text{ м}^2$$

Удельная площадь свободного сечения катушки (отношение площади среднего сечения свободного объема к площади фронтального сечения катушки), м<sup>2</sup>/м<sup>2</sup>

$$S_{yd} := 1 - \frac{\pi (d_n \cdot 10^{-3})^2}{4 s_1 \cdot 10^{-3} \cdot s_2 \cdot 10^{-3}} = 0.626 \frac{M^2}{M^2}$$

Площадь поперечного сечения аппарата:

$$S_A := \frac{\pi \cdot (D_c \cdot 10^{-3})^2}{4} + \frac{S_2}{S_{yd}} = 0.053 \text{ м}^2$$

Внутренний диаметр обечайки:  $D_{vn} := \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot S_A} = 0.259 \text{ м}$

Число слоев катушки:  $n_c := \frac{D_{vn} - D_c \cdot 10^{-3}}{2s_1 \cdot 10^{-3}} = 2.102$

Принимаем число слоев катушки  $n_c := 2$

Уточненный внутренний диаметр обечайки:

$$D_{vn} := D_c \cdot 10^{-3} + 2n_c \cdot s_1 \cdot 10^{-3} + 11 \cdot \delta \cdot 10^{-3} = 0.3 \text{ м}$$

Площадь наружной поверхности гладкой трубы длиной 1 м.:

$$F_{n,d} := \pi \cdot d_n \cdot 10^{-3} = 0.031 \text{ м}^2$$

Площадь наружной теплопередающей поверхности аппарата сводится к определению коэффициента теплопередачи: к

Теплоемкость азота при средней температуре в переохладителе 80 К.

$$c_{pв} := 2.12 \cdot 10^3 \frac{Дж}{кг \cdot К} \quad [с.275,2]$$

Количество тепла  $Q_1 := \frac{G_1}{3600} \cdot c_{pв} \cdot (T_{nк} - T_{kк}) = 689 \frac{Дж}{M^3}$

Вязкость:  $\mu_{\text{В}}$  :=  $16 \cdot 10^{-6} \text{ Н} \cdot \frac{\text{с}}{\text{м}^2}$  [с.275,2]

$$g = 9.8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$$

Критерий Рейнольдса внутри труб:

$$\text{Re}_t := \frac{w_1 \cdot d_V \cdot 10^{-3} \cdot \rho_{\text{В}}}{\mu_{\text{В}} \cdot g} = 9.413 \times 10^3$$

Режим турбулентный.

Коэффициент теплопроводности:  $\lambda_{\text{В}}$  :=  $27 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$

При турбулентном режиме Критерий Прандтля:

$$\text{Pr} := \frac{\mu_{\text{В}} \cdot g \cdot c_{p\text{В}}}{\lambda_{\text{В}}} = 12.312$$

Критерий Нуссельта

$$\text{Nu}_t := 0.023 \text{Re}_t^{0.8} \cdot \text{Pr}^{0.4} = 94.809$$

Коэффициент теплоотдачи внутри труб:

$$\alpha_{\text{В}} := \text{Nu}_t \cdot \frac{\lambda_{\text{В}}}{d_V \cdot 10^{-3}} = 319.979 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Плотность жидкости в межтрубном пространстве:

$$\rho_{\text{Ж}} := 1196 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \quad [20]$$

Вязкость жидкости в межтрубном пространстве:

$$\mu_{\text{Жг}} := 5 \cdot 10^{-6} \text{ Н} \cdot \frac{\text{с}}{\text{м}^2} \quad [\text{с.275,2}]$$

Критерий Рейнольдса в межтрубном пространстве:

$$Re_m := \frac{w_2 \cdot D_{vn} \cdot \rho_{ж}}{\mu_{жg} \cdot g} = 3.295 \times 10^7$$

Коэффициент теплопроводности жидкости:  $\lambda_{жg} := 7.5 \cdot 10^{-3} \frac{Вт}{м \cdot К}$

Коэффициент теплоотдачи в межтрубном пространстве: [с.159,17]

$$C := 0.041 \quad n_k := 0.8$$

$$Nu_m := C \cdot Re_m^{n_k} = 1.027 \times 10^5$$

$$\alpha_n := Nu_m \cdot \frac{\lambda_{жg}}{D_{vn}} = 2.566 \times 10^3 \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$$

Для витых гладкотрубных теплообменников коэффициент теплопередачи:

$$K := \frac{1}{\frac{1}{\alpha_v} \cdot \frac{d_n}{d_v} + \frac{1}{\alpha_n}} = 232.765 \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$$

Площадь наружной теплопередающей поверхности аппарата:

$$F_n := \frac{Q_1}{K \cdot (T_{nk} - T_{kk})} = 0.329 \text{ м}^2$$

Тогда средняя длина трубы в намотке:  $l := \frac{F_n}{n \cdot F_{nyd}} = 1.745 \text{ м}$

Тангенс угла наклона труб к диаметральной плоскости, определяется из условия

$$\frac{2n \cdot s_2 \cdot 10^{-3}}{n_c \cdot \pi (D_{vn} + D_c \cdot 10^{-3})} = 0.057$$

Угол наклона труб к диаметральной плоскости

$$\alpha := 3.25 \cdot \text{deg} = 0.057$$

$$\tan(\alpha) = 0.057$$

Высота намотки:

$$H := \frac{2n \cdot l \cdot s_2 \cdot 10^{-3}}{n_c \cdot \pi \cdot (D_{vn} + D_c \cdot 10^{-3}) \cdot \cos(\alpha)} = 0.1 \text{ м}$$

Средний диаметр каждого слоя намотки и число заходов:  $n = 6$

1 слой:  $z := 1$

$$D_{c11} := D_c \cdot 10^{-3} + s_1 \cdot 10^{-3} \cdot (2z - 1) = 0.214 \text{ м}$$

$$n_{zax1} := \frac{2n \cdot D_{c11}}{n_c \cdot (D_{vn} + D_c \cdot 10^{-3})} = 2.568$$

Принимаем  $n_{zax1} := 2$

2 слой:  $z := 2$

$$D_{c12} := D_c \cdot 10^{-3} + s_1 \cdot 10^{-3} \cdot (2z - 1) = 0.242 \text{ м}$$

$$n_{zax2} := \frac{2n \cdot D_{c12}}{n_c \cdot (D_{vn} + D_c \cdot 10^{-3})} = 2.904$$

Принимаем  $n_{zax2} := 2$

На заключительном этапе конструкторского расчета аппарата проверяется действительная длина труб в каждом слое намотки, которая сравнивается со средним значением.

$$l = 1.745 \text{ м}$$

$$l_1 := \frac{\pi \cdot D_{c11} \cdot H \cdot \cos(\alpha)}{s_2 \cdot 10^{-3} \cdot n_{zax1}} = 2.24 \text{ м}$$

$$l_2 := \frac{\pi \cdot D_{c12} \cdot H \cdot \cos(\alpha)}{s_2 \cdot 10^{-3} \cdot n_{zax2}} = 2.534 \text{ м}$$

## Теплоотдача и гидравлическое сопротивление при течении в изогнутых трубах витого теплообменника

Для искривленного потока жидкости характерно появление центробежных сил, значения которых по сечению канала не одинаковы. В центре трубы, где скорость максимальна, эти силы имеют наибольшее значение. В направлении к стенкам трубы скорость среды уменьшается и влияние центробежного эффекта становится меньше. Такое распределение сил по сечению изогнутого канала приводит к возникновению поперечной вторичной циркуляции, обуславливающей сложное движение рабочей среды по двум "сплюснутым" спиральям с разным направлением вращения.

Критическое число Рейнольдса, соответствующее переходу от ламинарного режима к турбулентному используется эмпирическая формула:

$$Re_{kr} := 18500 \left( \frac{D_{vn}}{d_v \cdot 10^{-3}} \right)^{-0.28} = 6.706 \times 10^3$$

Рассчитанный ранее критерий Рейнольдса:  $Re_t = 9.413 \times 10^3$

Течение - турбулентное.

Если  $Re > Re_{kr}$ , то средний коэффициент теплоотдачи рассчитывается по формуле Михеева:

$$R_{cr} := \frac{D_{vn} + D_c \cdot 10^{-3}}{4} = 0.125 \text{ м}$$

$$\lambda_{st} := 99 \text{ теплопроводность стенки из материала 12X18H10T} \quad [18]$$

$$c_{pst} := 232 \text{ теплоемкость стенки из материала 12X18H10T} \quad [18]$$

$$Pr_{st} := \frac{c_{pst}}{\lambda_{st}} = 2.343 \text{ критерий Прандтля стенки}$$

$$Nu := \left( 1 + 1.77 \cdot \frac{d_v \cdot 10^{-3}}{R_{cr}} \right) \cdot 0.021 \cdot Re_t^{0.8} \cdot Pr^{0.43} \cdot \left( \frac{Pr}{Pr_{st}} \right)^{0.25} = 157.315$$

$$\alpha_{\text{ww}} := \frac{\text{Nu} \cdot \lambda_{\text{B}}}{d_{\text{V}} \cdot 10^{-3}} = 530.937$$

Для коэффициента сопротивления трения в области турбулентного течения рекомендуется формула

$$\xi_{\text{R}} := 1 + 0.075 \text{Re}_t^{0.25} \cdot \left( \frac{d_{\text{V}} \cdot 10^{-3}}{D_{\text{Vn}}} \right)^{0.5} = 1.121$$

### Конструктивный расчет переохладителя

По итогам технологического расчета определен внутренний диаметр - 0.3 м.  
Материал аппарата сплав меди МЗ. Соединения паяные.

Высоту аппарата примем  $H_{\text{ww}} := 600$  мм

$D_{\text{ww}} := 300$  мм

Расчетное давление

Гидростатическое давление:  $P_{\text{гг}} := \rho_{\text{ж}} \cdot g \cdot H \cdot 10^{-9} = 7.032 \times 10^{-3}$  МПа

Так как гидростатическое давление меньше 5% от рабочего - им пренебрегаем  
 $P_{\text{к}} \cdot 0.05 = 0.01$  МПа

Таким образом:  $P_{\text{ткк}} := P_{\text{к}} = 0.2$  МПа

$P_{\text{тт}} := P_{\text{т}} = 0.07$  МПа

Допускаемое напряжение:

в рабочем состоянии:

Допускаемое напряжение материала при расчетной температуре:  $t_{\text{r}} = 20$  °С

$\sigma_{\text{p}} := 230$  МПа [с.11,6]

Допускаемое напряжение:  $\sigma_{\text{ww}} := \frac{\sigma_{\text{p}}}{2.5} = 92$  МПа

При гидравлических испытаниях [с.11,6]

$\sigma_{t20} := 89$  МПа - для стали 12X18H10T при температуре  $t_i := 20$  °C

$$\sigma_i := \frac{\sigma_{t20}}{1.1} = 80.909 \text{ МПа}$$

### Прибавка к расчетной толщине стенки:

Скорость коррозии материала МЗ составляет  $\Pi := 0.005 \frac{\text{мм}}{\text{год}}$  [с.349,7]

Срок эксплуатации ориентировочно  $\tau = 20$  лет

$c_k := \Pi \cdot \tau = 0.1$  мм для компенсации коррозии

$c_e = 0$  мм для компенсации эрозии

$$c_1 := c_k + c_e = 0.1 \text{ мм}$$

$$c_2 = 0$$

$$c_3 = 0$$

$c := c_1 + c_2 + c_3 = 0.1$  мм Принимаем  $c := 1$  мм

Расчет толщины стенки цилиндрической обечайки

$$s_r := \max \left( \frac{P_{rk} \cdot D}{2\sigma - P_{rk}}, \frac{P_{prk} \cdot D}{2\sigma_i - P_{prk}} \right) = 0.557 \text{ мм}$$

$$s := s_r + c = 1.557 \text{ мм}$$

Принимаем исполнительную толщину стенки:  $S := 2$  мм

$$Usl_{43} := \left( \begin{array}{l} \text{"Условие применимости формул выполняется"} \text{ if } \frac{S - c}{D} \leq 0.1 \\ \text{"Условия НЕ выполняются"} \text{ otherwise} \end{array} \right)$$

$$Usl_{43} = \text{"Условие применимости формул выполняется"}$$

Допускаемое давление в рабочем состоянии:

$$p := \frac{2\sigma \cdot (S - c)}{D + S - c} = 0.611 \text{ МПа}$$

Расчетное давление  $P_{rk} = 0.2 \text{ МПа}$

$$Usl_{44} := \begin{cases} \text{"Условие выполняется"} & \text{if } P_{rk} < p \\ \text{"Условия НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_{44} = \text{"Условие выполняется"}$$

При испытаниях

$$p_{pr} := \frac{2\sigma_i \cdot (S - c)}{D + S - c} = 0.538 \text{ МПа} \quad P_{prk} = 0.3 \text{ МПа}$$

$$Usl_{45} := \begin{cases} \text{"Условие выполняется"} & \text{if } P_{prk} < p_{pr} \\ \text{"Условия НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_{45} = \text{"Условие выполняется"}$$

Условия прочности выполняются.

**Вывод:** Таким образом, при полученной толщине стенки обеспечивается прочность цилиндрической обечайки корпуса как в рабочем состоянии, так и в условиях испытания.

### Расчет толщины стенки эллиптической крышки и днища[20]

$$Ser := \max\left(\frac{P_{rk} \cdot D}{2\sigma - 0.5P_{rk}}, \frac{P_{prk} \cdot D}{2\sigma_i - 0.5P_{prk}}\right) = 0.557 \text{ мм}$$

$$Se := Ser + c = 1.557 \text{ мм}$$

Толщину стенки принимаем  $Se := 2 \text{ мм}$

$$Usl_{46} := \begin{cases} \text{"Условие применимости формул выполняется"} & \text{if } \frac{Se - c}{D} < 0.1 \\ \text{"Условия НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_{46} = \text{"Условие применимости формул выполняется"}$$

## Допускаемое давление в рабочем состоянии

$$p := \frac{2\sigma \cdot (Se - c)}{D + 0.5 \cdot (Se - c)} = 0.612 \text{ МПа}$$

Расчетное давление  $P_{rk} = 0.2 \text{ МПа}$

$$Usl_{47} := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } P_{rk} < p \\ \text{"Условия НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$Usl_{47} = \text{"Условие прочности выполняется"}$

## При испытаниях

$$p_i := \frac{2\sigma_i \cdot (Se - c)}{D + 0.5 \cdot (Se - c)} = 0.538 \text{ МПа}$$

Расчетное пробное давление  $P_{prk} = 0.3 \text{ МПа}$

$$Usl_{48} := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } P_{prk} < p_i \\ \text{"Условия НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$Usl_{48} = \text{"Условие прочности выполняется"}$

**Вывод:** При исполнительской толщине стенки эллиптической крышки 2 мм условия прочности выполняются.

$$\frac{2}{292} = 6.849 \times 10^{-3} \text{ следовательно, аппарата тонокостенный}$$

## Определение диаметров патрубков

$$\text{Вход жидкого кислорода } d_{1\text{жж}} := \sqrt{V_1 \cdot \frac{4}{\pi \cdot W_1}} = 0.016 \text{ м}$$

Принимаем трубу наружным диаметром 18 мм и толщиной стенки 1 мм. [19]

$$d_{1\text{жж}} := 18 \text{ мм}$$

Выход воздуха принимаем тем же диаметром

$$\text{Вход жидкости } d_{2\text{жж}} := \sqrt{V_2 \cdot \frac{4}{\pi \cdot W_2}} = 0.13 \text{ м}$$

Принимаем диаметр патрубка ввода азота при толщине стенки 3 мм. [19]

$$d_2 := 28 \text{ мм}$$

## Укрепление отверстий[10]

Расчетный диаметр цилиндрической обечайки

$$D_r := D = 300 \text{ мм}$$

Расчетный диаметр эллиптического днища и крышки:

Расстояние от центра укрепляемого отверстия до оси эллиптического днища:

$$r < 0.4D - 0.5 \cdot (d + 2S)$$

$$0.4D - 0.5 \cdot (d_1 + 2S) = 109 \text{ мм} \quad r_{1r} := 40 \text{ мм}$$

$$0.4D - 0.5 \cdot (d_2 + 2S) = 104 \text{ мм} \quad r_{2r} := 40 \text{ мм}$$

Расчетный диаметр эллиптического днища

$$D_{re1} := 2D \cdot \sqrt{1 - 3 \cdot \left(\frac{r_1}{D}\right)^2} = 583.781 \text{ мм}$$

$$D_{re2} := 2D \cdot \sqrt{1 - 3 \cdot \left(\frac{r_2}{D}\right)^2} = 583.781 \text{ мм}$$

Расчетные диаметры отверстий:

$$d_{1r} := d_1 + 2c = 20 \text{ мм}$$

$$d_{2r} := d_2 + 2c = 30 \text{ мм}$$

Расчетные толщины стенки штуцера:

$$s_{1r} := \frac{P_{rt} \cdot (d_1 + 2c)}{2\sigma - P_{rt}} = 7.612 \times 10^{-3} \text{ мм} \quad s_{2r} := \frac{P_{rk} \cdot (d_2 + 2c)}{2\sigma - P_{rk}} = 0.033 \text{ мм}$$

Расчетные длины внешних и внутренних частей патрубков, участвующих в укреплении и учитываемые при расчете:

$$l_{1r} := 60 \text{ мм} \quad l_{2r} := 60 \text{ мм} \quad l_{3r} := 20 \text{ мм} \quad l_{3r} := 150 \text{ мм} \quad c = 1$$

$$l_{r1} := \min \left[ l_{1, 1.25 \cdot \sqrt{(d_1 + 2c) \cdot (S - c)}} \right] = 5.59 \text{ мм}$$

$$l_{r2} := \min \left[ l_{2, 1.25 \cdot \sqrt{(d_2 + 2c) \cdot (S - c)}} \right] = 6.847 \text{ мм}$$

$$l_{r3} := \min \left[ l_{3, 1.25 \cdot \sqrt{(d_1 + 2c) \cdot (S - 2c)}} \right] = 0 \text{ мм}$$

$$l_{r3} := \min \left[ l_{3, 1.25 \cdot \sqrt{(d_2 + 2c) \cdot (S - 2c)}} \right] = 0 \text{ мм}$$

Ширина зоны укрепления в обечайке и днище

$$l_{0e2} := \sqrt{Dre_2 \cdot (S - c)} = 24.162 \text{ мм}$$

$$l_{0e1} := \sqrt{Dre_1 \cdot (S - c)} = 24.162 \text{ мм}$$

Расчетный диаметр отверстия, не требующий укрепления при отсутствии избыточной толщины стенок сосуда, днища и крышки:

$$d_{0r} := 0.4 \cdot \sqrt{Dr \cdot (S - c)} = 6.928 \text{ мм}$$

$$d_{0re} := 0.4 \cdot \sqrt{Dr \cdot (Se - c)} = 6.928 \text{ мм}$$

Из данного выражения видно, что все отверстия для патрубков следует укреплять.

Примем начальную толщину укрепления  $s_{yr} = 0 \text{ мм}$

Расчетная длина образующей оболочки в зоне укрепления:

$$l_{0e2} := \sqrt{Dre_2 \cdot (s_{yr} + S - c)} = 24.162 \text{ мм}$$

$$l_{0e1} := \sqrt{Dre_1 \cdot (s_{yr} + S - c)} = 24.162 \text{ мм}$$

Расчетная толщина стенки штуцера 2 из того жк материала, что и теплообменник

$$\sigma_{sh} := \sigma = 92 \text{ МПа}$$

Штуцер номер 1 изготовлен из латуни марки Л63 [с.13,6]

$$\sigma_{sh1} := 140 \text{ МПа}$$

$$s_{rsh1} := \frac{P_{rt} \cdot (d_1 + 2c)}{2 \cdot \sigma_{sh1} - P_{rt}} = 5.001 \times 10^{-3} \text{ мм}$$

$$s_{rsh2} := \frac{P_{rk} \cdot (d_2 + 2c)}{2 \cdot \sigma - P_{rk}} = 0.033 \text{ мм}$$

Коэффициенты  $k_1$  для внешней части патрубка,  $k_2$  - для накладного кольца  $k_3$  для внутренней части патрубка равны:

$$k_{11} := \frac{\sigma_{sh1}}{\sigma} = 1.522 \quad k_{12} := \frac{\sigma_{sh}}{\sigma} = 1$$

$$k_{21} := k_{11} = 1.522 \quad k_{22} := k_{12} = 1$$

$$k_{31} := 1$$

Используем комбинированное укрепление приварным кольцом снаружи. Стенки всех укрепляемых патрубков выбраны.

$$S_{sh1} := 3 \text{ мм} \quad S_{sh2} := 1 \text{ мм}$$

Условие укрепления отверстия комбинированным укреплением

$$A := k_{11} + \sqrt{D_r \cdot (s_{yr} + S - c)} \cdot (k_{21} \cdot s_{yr} + S - s_r - c) = 9.191$$

$$U := (l_{r1} + s_{yr} + S - s_r - c) \cdot (S_{sh1} - s_{rsh1} - c) + l_{r3} \cdot (S_{sh1} - 2c) \cdot A = 12.036$$

$$U_u := 0.5 \cdot (d_{1r} - d_{0r}) \cdot s_r = 3.642$$

$$Usl_{49} := \begin{cases} \text{"Условие укрепления выполняется"} & \text{if } U > U_u \\ \text{"Условие НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_{49} = \text{"Условие укрепления выполняется"}$$

Следовательно, приварное кольцо не требуется.

$$A := \sqrt{D_{re2} \cdot (s_{yr} + S - c)} \cdot (k_{22} \cdot s_{yr} + S - s_r - c) = 10.698$$

$$U := (l_{r1} + s_{yr} + S - s_r - c) \cdot (S_{sh2} - s_{rsh2} - c) + l_{r3} \cdot (S_{sh2} - 2c) \cdot k_{21} + A = 10.46$$

$$U_u := 0.5 \cdot (d_{2r} - d_{0r}) \cdot s_r = 6.428$$

$$Usl_{50} := \begin{cases} \text{"Условие укрепления выполняется"} & \text{if } U > U_u \\ \text{"Условие НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_{50} = \text{"Условие укрепления выполняется"}$$

Следовательно, приварное кольцо не требуется.

Принимаем  $sy = 0$  то есть приварное кольцо не требуется.

Все отверстия укрепляются с помощью штуцера снаружи и 1 изнутри. Допускаемое внутреннее избыточное давление узла сопряжения штуцера и стенки аппарата

$k_{11} := 2$  для выпуклых днищ

$$v := \min \left[ \frac{L0_{e1} \cdot (k2_1 \cdot syr + S - c) + (l_{r1} + syr + S - sr - c) \cdot (S_{sh1} - c) + l_{r3} \cdot (S_{sh2} - c) \cdot k1}{\left[ L0_{e1} + 0.5 \cdot (d_{1r} - d_{0r}) + k1 \cdot (l_{r1} + syr + s - sr - c) \cdot \frac{d_1 + 2c}{Dre_1} \right] \cdot (S - c)}, 1 \right] = 1$$

$$P_{sh1} := \left( 2k1 \cdot \sigma \cdot \frac{S - c}{Dre_1 + S - c} \right) \cdot v = 0.629 \text{ МПа}$$

$$Usl_{51} := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } P_{sh1} > P_{rk} \\ \text{"Условие НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_{51} = \text{"Условие прочности выполняется"}$$

$k_{11} := 2$  для выпуклых днищ

$$v := \min \left[ \frac{L0_{e2} \cdot (k2_2 \cdot syr + S - c) + (l_{r1} + syr + S - sr - c) \cdot (S_{sh2} - 2c) + l_{r3} \cdot (S_{sh2} - c) \cdot k1}{\left[ L0_{e2} + 0.5 \cdot (d_{2r} - d_{0r}) + k1 \cdot (l_{r1} + syr + s - sr - c) \cdot \frac{d_2 + 2c}{Dre_2} \right] \cdot (S - c)}, 1 \right] = 0.464$$

$$v = 0.464$$

$$P_{sh2} := \left( 2k1 \cdot \sigma \cdot \frac{S - c}{Dre_2 + S - c} \right) \cdot v = 0.292 \text{ МПа}$$

$$Usl_{52} := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } P_{sh1} > P_{rk} \\ \text{"Условие НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_{52} = \text{"Условие прочности выполняется"}$$

Вывод: Таким образом, условия прочности доказывают, что патрубки с внешней стороны, а в случае 1 и 3 с внутренней, укрепляют отверстия в необходимом количестве и приварных колец не требуется.

### Расчет опорных лап

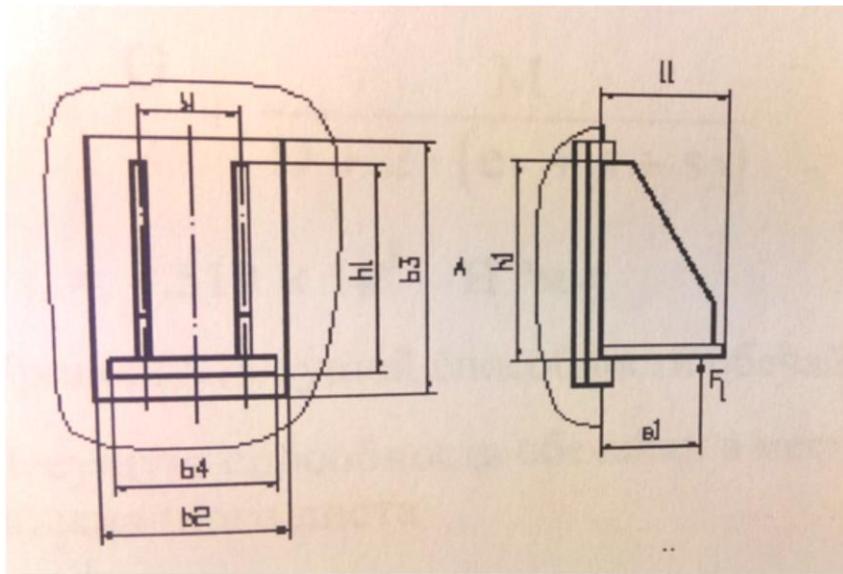
Область применения расчетных формул

Опорные лапы присоединены к цилиндрической обечайке. Направление действия усилия принимают параллельно оси обечайки. Расчетные формулы применяют, когда

$$Us1_{53} := \begin{cases} \text{"Условие применения формул выполняется"} & \text{if } \frac{s - c}{D} \leq 0.05 \\ \text{"Условие НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Us1_{53} = \text{"Условие применения формул выполняется"}$$

Рисунок 12. Расчетная схема опорных лап.



$$l_1 := 6 \text{ мм} \quad G := 215. \text{€}$$

Высоту опорной лапы принимаем:  $h_1 := 85 \text{ мм}$

Расстояние между точкой приложения усилия и обечайкой

$$e_1 := \frac{5}{6} \cdot l_1 = 50 \text{ мм}$$

Остальные размеры:

$$b_4 := 60 \text{ мм}$$

$$b_1 := 50 \text{ мм}$$

Изгибающий момент, действующий на обечайку в сечении, где расположены опорные узлы, в условиях эксплуатации или испытания (монтажа),  $M^*$  мм;

$$M := 0$$

Усилие, действующее на опорную лапу для  $n=2$

$$F_1 := \frac{G}{2} + \frac{M}{D + 2 \cdot (e_1 + s + s_2)} = 107.8 \text{ Н} \cdot \text{мм}$$

Проверка несущей способности обечайки

Несущая способность обечайки в месте приварки опорной лапы без подкладного листа

Условие прочности для лапы  $F_1 \leq F_{д1}$

Для расчета несущей способности проведем предварительный расчет коэффициента  $K_7$  и предельного коэффициента изгиба  $\sigma_{д}$ :

Коэффициент:

$$x := \ln \left[ \frac{Dr}{2 \cdot (S - c)} \right] = 5.011 \quad y := \ln \left( \frac{h_1}{Dr} \right) = -1.261$$

$$z := -5.984 + 11.395x - 18.984y - 2.413x^2 - 7.286x \cdot y = 60.512$$

$$K_7 := \exp(z \cdot 10^{-7}) = 1$$

Предельное напряжение изгиба:

Общее окружное мембранное напряжение в цилиндрической и конической обечайках следует определять по формуле

$$\sigma_{my} := \frac{P_{rk} \cdot Dr}{2 \cdot (S - c)} = 30 \text{ МПа} \quad \sigma_m := \sigma_{my} = 30 \text{ МПа}$$

$n_T := 1.5$  запас прочности по пределу текучести

$K_2 := 1.2$  для рабочих условий [с.677,11]

$$\theta_1 := 0.1 \quad \theta_2 := \frac{K_2 \cdot \sigma_m}{n_T \cdot \sigma} = 0.261$$

$$K_1 := \frac{1 + 3 \cdot \theta_1 \cdot \theta_2}{3 \cdot \theta_1^2} \cdot \sqrt{\frac{9 \cdot \theta_1^2 \cdot (1 - \theta_2^2)}{(1 + 3 \cdot \theta_1 \cdot \theta_2)^2}} + 1 - 1 = 4.592$$

Тогда предельное напряжение изгиба

$$\sigma_{td} := K_1 \cdot \sigma \cdot \frac{n_T}{K_2} = 528.073 \text{ МПа}$$

Несущая способность обечайки в месте приварки опорной лапы без подкладного листа

$$F_{d1} := \frac{\sigma_{td} \cdot h_1 \cdot (S - c)^2}{K_7 \cdot e_1} = 897.718$$

При  $\frac{g}{h_1} < 0.5$  значение  $F_{d1}$ , полученное по формуле, необходимо умножить на  $(0.5 +$

$$\frac{g}{h_1})$$

$\frac{g}{h_1} = 0.115$  Следовательно, домножаем несущую способность обечайки на

$$0.5 + \frac{g}{h_1} = 0.615 \quad F_{d1} := F_{d1} \cdot 0.552 = 495.54 \text{ Н} \cdot \text{мм}$$

$$Us154 := \begin{cases} \text{"Условие выполняется"} & \text{if } F_1 \leq F_{d1} \\ \text{"Условие НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Us154 = \text{"Условие выполняется"}$$

### Расчет тепловой изоляции [с.177,1]

$$D_{vn} = 0.3 \text{ м} \quad S := 0.002 \text{ м} \quad H := 0.85 \text{ м} \quad D := D_{vn} = 0.3 \text{ м}$$

В качестве теплоизоляции служит вспученный перлитовый песок. Его плотность составляет:

$$\rho_{iz} = 150 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Коэффициент теплопроводности материала: Вт/м\*град  $\lambda_{iz} = 0.039$

Поверхность теплоотдачи:  $F_{iz} := \pi \cdot (D + 2S) \cdot H + \frac{[\pi \cdot (D + 2S)^2]}{2} = 0.957 \text{ м}^2$

Температура внутреннего слоя изоляции  $t_{viz} := -19\text{°C}$

Требуемую температуру наружного слоя изоляции принимаем  $t_{niz} = 5 \text{ °C}$

Температура окружающей среды:  $t_{окр} = 20 \text{ °C}$

Суммарный коэффициент теплоотдачи определяем по формуле:

$$\alpha := 9.47 + 0.07 \cdot (t_{niz} - t_{окр}) = 8.42 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$$

Величина тепловых потерь по уравнению теплоотдачи

$$Q_{piz} := \alpha \cdot F_{iz} \cdot (t_{niz} - t_{окр}) = -120.863 \text{ Дж}$$

Толщина тепловой изоляции:  $\delta_{iz} := \frac{\lambda_{iz} \cdot F_{iz} \cdot (t_{viz} - t_{niz})}{Q_{piz}} = 0.062 \text{ м}$

Диаметр аппарата с тепловой изоляцией:  $D_{niz} := D + 2S + 2 \cdot \delta_{iz} = 0.428 \text{ м}$

## Расчет переохладителя А16

Теплообменник предназначен для предварительного охлаждения воздуха перед блоком очистки потоком отходящего азота. В трубах - воздух, в корпусе газообразный азот.

$$T_0 := 273 \text{ K}$$

Рабочее давление:

$$\text{в трубном пространстве: } P_{tv} := 7 \text{ МПа}$$

$$\text{в межтрубном пространстве: } P_{kv} := 0.0 \text{ МПа}$$

Пробное давление:

$$\text{в трубном пространстве: } P_{prt} := 8.5 \text{ МПа}$$

$$\text{в межтрубном пространстве: } P_{prk} := 0.2 \text{ МПа}$$

Материал обечайки и днища медь М3

Сердечник сталь 20

### Тепловой баланс переохладителя:

$$\text{Начальная температура воздуха } tn_{fn} := 27 \text{ }^\circ\text{C} \quad Tn_{fn} := tn_{fn} + T_0 = 300 \text{ K}$$

$$\text{Конечная температура воздуха } tk_{fn} := 9 \text{ }^\circ\text{C} \quad Tk_{fn} := tk_{fn} + T_0 = 282 \text{ K}$$

$$\text{Конечная температура жидкости } tk_{jk} := -167 \text{ }^\circ\text{C} \quad Tk_{jk} := tk_{jk} + T_0 = 106 \text{ K}$$

При конструировании витых теплообменников задаются наружным и внутренним диаметром труб:

$$d_n := 8 \text{ мм} \quad d_v := 6 \text{ мм}$$

$$\text{Диаметр сердечника: } D_c = (10-20)d_n$$

$$\text{Принимаем } D_c := 20d_n = 160 \text{ мм}$$

$$\text{поперечный шаг труб: } s_1 := 11 \text{ мм}$$

Продольный шаг труб:  $s_2 := 12 \text{ мм}$

То есть толщина дистанционной прокладки  $\delta := 3 \text{ мм}$

Навивка труб на сердечник - разряженная

Скорость жидкости в трубном пространстве:  $w_1 := 1 \frac{\text{м}}{\text{с}}$

Скорость кислорода в межтрубном пространстве:  $w_2 := 4 \frac{\text{м}}{\text{с}}$

Расчетная температура по регламенту:  $t_r := 40$   $T := t_r + T_0 = 313 \text{ К}$

Тогда объемный расход, поступающий в переохладитель

$$V_1 := 0.40 \cdot \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

$$\text{Количество труб в переохладителе: } n := \frac{V_1 \cdot 10^{-3}}{w_1 \cdot \frac{\pi (d_v \cdot 10^{-3})^2}{4}} = 14.253$$

Принимаем количество труб с запасом  $n := 25$

Геометрические характеристики межтрубного пространства рассчитываются по средней площади сечения  $S_2$  свободного объема наливки.

$$V_2 := \frac{760}{3600} = 0.211 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

$$S_2 := \frac{V_2}{w_2} = 0.053 \text{ м}^2$$

Удельная площадь свободного сечения намотки (отношение площади среднего сечения свободного объема к площади фронтального сечения намотки),  $\text{м}^2/\text{м}^2$

$$S_{уд} := 1 - \frac{\pi (d_n \cdot 10^{-3})^2}{4 \cdot s_1 \cdot 10^{-3} \cdot s_2 \cdot 10^{-3}} = 0.619 \frac{\text{м}^2}{\text{м}^2}$$

Площадь поперечного сечения аппарата:

$$S_{A_{\text{вн}}} := \frac{\pi \cdot (D_c \cdot 10^{-3})^2}{4} + \frac{S_2}{S_{yd}} = 0.105 \text{ м}^2$$

Внутренний диаметр обечайки:

$$D_{\text{вн}} := \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot S_A} = 0.366 \text{ м}$$

Число слоев намотки:

$$n_c := \frac{D_{\text{вн}} - D_c \cdot 10^{-3}}{2s_1 \cdot 10^{-3}} = 9.374$$

Принимаем число слоев намотки  $n_c := 10$

Уточненный внутренний диаметр обечайки:

$$D_{\text{вн}} := D_c \cdot 10^{-3} + 2n_c \cdot s_1 \cdot 10^{-3} = 0.38 \text{ м}$$

Площадь наружной поверхности гладкой трубы длиной 1 м.:

$$F_{n_{yd}} := \pi \cdot d_n \cdot 10^{-3} = 0.025 \text{ м}^2$$

Площадь наружной теплопередающей поверхности аппарата сводится к определению коэффициента теплопередачи: к

Теплоемкость азота при средней температуре в переохладителе 80 К.

$$c_p := 1.115 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \quad [\text{с.275,2}]$$

$$\text{Массовый расход: } \rho := 1.29 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \quad [\text{с.275,2}]$$

$$G_1 := V_1 \cdot \rho = 0.521 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}$$

$$\text{Количество тепла } Q_1 := \frac{G_1}{3600} \cdot c_p \cdot (T_{n_{fn}} - T_{k_{fn}}) = 2.905 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3}$$

Вязкость:  $\mu_{N_2} := 19 \cdot 10^{-6} \text{ Н} \cdot \frac{\text{с}}{\text{м}^2}$  [с.275,2]

$$g = 9.8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$$

Критерий Рейнольдса внутри труб:  $Re_t := \frac{w_1 \cdot d_v \cdot 10^{-3} \cdot \rho}{\mu_{N_2} \cdot g} = 41.665$

Коэффициент теплопроводности:  $\lambda_{N_2} := 130 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$

При турбулентном режиме Критерий Прандтля:  $Pr := \frac{\mu_{N_2} \cdot g \cdot c_p}{\lambda_{N_2}} = 1.597$

Критерий Нуссельта  $Nu_t := 0.023 \cdot Re_t^{0.8} \cdot Pr^{0.4} = 0.548$

Коэффициент теплоотдачи внутри труб:  $\alpha_{wv} := Nu_t \cdot \frac{\lambda_{N_2}}{d_v \cdot 10^{-3}} = 11.876 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$

Плотность жидкости в межтрубном пространстве:  $\rho_{N_2g} := 1.6 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$  [с.275,2]

Вязкость азота в межтрубном пространстве:  $\mu_{N_2g} := 5 \cdot 10^{-6} \text{ Н} \cdot \frac{\text{с}}{\text{м}^2}$  [с.275,2]

Критерий Рейнольдса в межтрубном пространстве:

$$Re_m := \frac{w_2 \cdot D_{vn} \cdot \rho_{N_2}}{\mu_{N_2g} \cdot g} = 2.792 \times 10^5$$

Коэффициент теплопроводности жидкости:

$$\lambda_g := 7.5 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$$

Коэффициент теплоотдачи в межтрубном пространстве: [с.159,17]

$$C := 0.0418 \quad n_k := 0.8$$

$$\underline{Nu}_m := C \cdot Re_m^{\eta_k} = 1.779 \times 10^3$$

$$\underline{\alpha}_n := Nu_m \cdot \frac{\lambda_g}{D_{vn}} = 35.112 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Для витых гладкотрубных теплообменников коэффициент теплопередачи:

$$\underline{K} := \frac{1}{\frac{1}{\alpha_v} \cdot \frac{d_n}{d_v} + \frac{1}{\alpha_n}} = 7.105 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Площадь наружной теплопередающей поверхности аппарата:

$$\underline{F}_n := \frac{Q_1}{K \cdot (T_{nfn} - T_{kfn})} = 0.023 \text{ м}^2$$

Тогда средняя длина трубы в намотке:

$$\underline{l} := \frac{F_n}{n \cdot F_{nyd}} = 0.036 \text{ м}$$

Тангенс угла наклона труб к диаметральной плоскости, определяется из условия

$$\frac{2n \cdot s_2 \cdot 10^{-3}}{n_c \cdot \pi (D_{vn} + D_c \cdot 10^{-3})} = 0.035$$

Угол наклона труб к диаметральной плоскости

$$\underline{\alpha} := 3.75 \cdot \text{deg} = 0.065$$

$$\tan(\alpha) = 0.066$$

Высота намотки:

$$\underline{H} := \frac{2n \cdot l \cdot s_2 \cdot 10^{-3}}{n_c \cdot \pi \cdot (D_{vn} + D_c \cdot 10^{-3}) \cdot \cos(\alpha)} = 1.281 \times 10^{-3} \text{ м}$$

Средний диаметр каждого слоя намотки и число заходов:  $n = 25$

$$1 \text{ слой: } \underline{z} := 1$$

$$D_{c11} := D_c \cdot 10^{-3} + s_1 \cdot 10^{-3} \cdot (2Z - 1) = 0.171 \text{ м}$$

$$n_{zax1} := \frac{2n \cdot D_{c11}}{n_c \cdot (D_{vn} + D_c \cdot 10^{-3})} = 1.583$$

Принимаем  $n_{zax1} := 1$

2 слой:  $z := 2$

$$D_{c12} := D_c \cdot 10^{-3} + s_1 \cdot 10^{-3} \cdot (2Z - 1) = 0.193 \text{ м}$$

$$n_{zax2} := \frac{2n \cdot D_{c12}}{n_c \cdot (D_{vn} + D_c \cdot 10^{-3})} = 1.787$$

Принимаем  $n_{zax2} := 1$

3 слой:  $z := 3$

$$D_{c13} := D_c \cdot 10^{-3} + s_1 \cdot 10^{-3} \cdot (2Z - 1) = 0.215 \text{ м}$$

$$n_{zax3} := \frac{2n \cdot D_{c13}}{n_c \cdot (D_{vn} + D_c \cdot 10^{-3})} = 1.991$$

Принимаем  $n_{zax3} := 2$

4 слой:  $z := 4$

$$D_{c14} := D_c \cdot 10^{-3} + s_1 \cdot 10^{-3} \cdot (2Z - 1) = 0.237 \text{ м}$$

$$n_{zax4} := \frac{2n \cdot D_{c14}}{n_c \cdot (D_{vn} + D_c \cdot 10^{-3})} = 2.194$$

Принимаем  $n_{zax4} := 3$

5 слой:  $z := 5$

$$D_{c15} := D_c \cdot 10^{-3} + s_1 \cdot 10^{-3} \cdot (2Z - 1) = 0.259 \text{ м}$$

$$n_{zax5} := \frac{2n \cdot D_{c15}}{n_c \cdot (D_{vn} + D_c \cdot 10^{-3})} = 2.398$$

Принимаем  $n_{zax5} := 3$

6 слой:  $z := 6$

$$D_{c16} := D_c \cdot 10^{-3} + s_1 \cdot 10^{-3} \cdot (2Z - 1) = 0.281 \text{ м}$$

$$n_{zax6} := \frac{2n \cdot D_{c16}}{n_c \cdot (D_{vn} + D_c \cdot 10^{-3})} = 2.602$$

Принимаем  $n_{zax6} := 3$

7 слой:  $z := 7$

$$D_{c17} := D_c \cdot 10^{-3} + s_1 \cdot 10^{-3} \cdot (2Z - 1) = 0.303 \text{ м}$$

$$n_{zax7} := \frac{2n \cdot D_{c17}}{n_c \cdot (D_{vn} + D_c \cdot 10^{-3})} = 2.806$$

Принимаем  $n_{zax7} := 3$

8 слой:  $z := 8$

$$D_{c18} := D_c \cdot 10^{-3} + s_1 \cdot 10^{-3} \cdot (2Z - 1) = 0.325 \text{ м}$$

$$n_{zax8} := \frac{2n \cdot D_{c18}}{n_c \cdot (D_{vn} + D_c \cdot 10^{-3})} = 3.009$$

Принимаем  $n_{zax8} := 3$

9 слой:  $z := 9$

$$D_{c19} := D_c \cdot 10^{-3} + s_1 \cdot 10^{-3} \cdot (2Z - 1) = 0.347 \text{ м}$$

$$n_{zax9} := \frac{2n \cdot D_{c19}}{n_c \cdot (D_{vn} + D_c \cdot 10^{-3})} = 3.213$$

Принимаем  $n_{zax9} := 3$

10 слой:  $z := 10$

$$D_{c110} := D_c \cdot 10^{-3} + s_1 \cdot 10^{-3} \cdot (2Z - 1) = 0.369 \text{ м}$$

$$n_{zax10} := \frac{2n \cdot D_{c110}}{n_c \cdot (D_{vn} + D_c \cdot 10^{-3})} = 3.417$$

Принимаем  $n_{zax10} := 3$

На заключительном этапе конструкторского расчета аппарата проверяется действительная длина труб в каждом слое намотки, которая сравнивается со средним значением.

$$l_1 := \frac{\pi \cdot D_{c11} \cdot H \cdot \cos(\alpha)}{s_2 \cdot 10^{-3} \cdot n_{zax1}} = 0.057 \text{ м} \quad l = 0.036 \text{ м}$$

$$l_2 := \frac{\pi \cdot D_{c12} \cdot H \cdot \cos(\alpha)}{s_2 \cdot 10^{-3} \cdot n_{zax2}} = 0.065 \text{ м}$$

$$l_3 := \frac{\pi \cdot D_{c13} \cdot H \cdot \cos(\alpha)}{s_2 \cdot 10^{-3} \cdot n_{zax3}} = 0.036 \text{ м}$$

$$l_4 := \frac{\pi \cdot D_{c14} \cdot H \cdot \cos(\alpha)}{s_2 \cdot 10^{-3} \cdot n_{zax4}} = 0.026 \text{ м}$$

$$l_5 := \frac{\pi \cdot D_{c15} \cdot H \cdot \cos(\alpha)}{s_2 \cdot 10^{-3} \cdot n_{zax5}} = 0.029 \text{ м}$$

$$l_6 := \frac{\pi \cdot D_{c16} \cdot H \cdot \cos(\alpha)}{s_2 \cdot 10^{-3} \cdot n_{zax6}} = 0.031 \text{ м}$$

$$l_7 := \frac{\pi \cdot D_{c17} \cdot H \cdot \cos(\alpha)}{s_2 \cdot 10^{-3} \cdot n_{zax7}} = 0.034 \text{ м}$$

$$l_8 := \frac{\pi \cdot D_{c18} \cdot H \cdot \cos(\alpha)}{s_2 \cdot 10^{-3} \cdot n_{zax8}} = 0.036 \text{ м}$$

$$l_9 := \frac{\pi \cdot D_{c19} \cdot H \cdot \cos(\alpha)}{s_2 \cdot 10^{-3} \cdot n_{zax9}} = 0.039 \text{ м}$$

$$l_{10} := \frac{\pi \cdot D_{c110} \cdot H \cdot \cos(\alpha)}{s_2 \cdot 10^{-3} \cdot n_{zax10}} = 0.041 \text{ м}$$

### Теплоотдача и гидравлическое сопротивление при течении в изогнутых трубах витого теплообменника

Для искривленного потока жидкости характерно появление центробежных сил, значения которых по сечению канала не одинаковы. В центре трубы, где скорость максимальна, эти силы имеют наибольшее значение. В направлении к стенкам трубы скорость среды уменьшается и влияние центробежного эффекта становится меньше. Такое распределение сил по сечению изогнутого канала приводит к возникновению поперечной вторичной циркуляции, обуславливающей сложное движение рабочей среды по двум "сплюснутым" спиральям с разным направлением вращения.

Критическое число Рейнольдса, соответствующее переходу от ламинарного режима к турбулентному используется эмпирическая формула:

$$Re_{kr} := 18500 \left( \frac{D_{vn}}{d_v \cdot 10^{-3}} \right)^{-0.28} = 5.79 \times 10^3$$

Рассчитанный ранее критерий Рейнольдса:  $Re_t = 41.665$

Если  $Re > Re_{kr}$ , то средний коэффициент теплоотдачи рассчитывается по формуле Михеева:

$$R_{cr} := \frac{D_{vn} + D_c \cdot 10^{-3}}{4} = 0.135 \text{ м}$$

$\lambda_{st} := 396$  теплопроводность стенки из материала меди МЗ

$c_{pst} := 232$  теплоемкость стенки из материала меди МЗ

$$Pr_{st} := \frac{c_{pst}}{\lambda_{st}} = 0.586 \text{ критерий Прандтля стенки}$$

$$\text{Nu} := \left( 1 + 1.77 \cdot \frac{d_v \cdot 10^{-3}}{R_{cr}} \right) \cdot 0.021 \cdot \text{Re}_t^{0.8} \cdot \text{Pr}^{0.43} \cdot \left( \frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_{st}} \right)^{0.25} = 0.703$$

$$\alpha := \frac{\text{Nu} \cdot \lambda_{N2}}{d_v \cdot 10^{-3}} = 15.241$$

Для коэффициента сопротивления трения в области турбулентного течения рекомендуется формула

$$\xi_R := 1 + 0.075 \cdot \text{Re}_t^{0.25} \cdot \left( \frac{d_v \cdot 10^{-3}}{D_{vn}} \right)^{0.5} = 1.024$$

### Тепловой баланс переохладителя

$$G_2 := 0.84 \cdot \frac{\text{кг}}{\text{ч}} \quad G_1 = 0.521 \cdot \frac{\text{кг}}{\text{ч}}$$

$$\text{Теплоемкость жидкости: } c_{pv} := 0.4 \cdot \frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \quad [\text{с.264,2}]$$

$$\text{Теплоемкость кислорода } c_{pg} := 0.2 \cdot \frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \quad [\text{с.273,2}]$$

$$T_n := 102.0 \text{ K}$$

$$G_2 \cdot c_p \cdot (T_{ka} - T_{na}) = G_1 \cdot c_{pk} \cdot (T_{nb} - T_{kb})$$

$$T_k := \frac{G_1 \cdot c_p \cdot (T_{fn} - T_{kn}) + G_2 \cdot c_{pg} \cdot T_n}{G_2 \cdot c_{pg}} = 123.852 \text{ K}$$

### Конструктивный расчет переохладителя

По итогам технологического расчета определен внутренний диаметр - 0.38 м.  
Материал аппарата сплав меди МЗ. Соединения паяные.

$$\text{Высоту аппарата примем } H := 100 \text{ мм}$$

$$D := 380 \text{ мм} \quad g = 9.8$$

Расчетное давление

Гидростатическое давление:  $P_g := \rho_{N_2} \cdot g \cdot H \cdot 10^{-9} = 8.82 \times 10^{-5}$  МПа

Так как гидростатическое давление меньше 5% от рабочего - им пренебрегаем

$$P_k \cdot 0.05 = 3.5 \times 10^{-3} \text{ МПа}$$

Таким образом:

$$P_{fk} := P_k = 0.07 \text{ МПа}$$

$$P_{rt} := P_t = 7 \text{ МПа}$$

Допускаемое напряжение:

в рабочем состоянии:

Допускаемое напряжение меди МЗ при расчетной температуре:  $t_r = 40$  °С

$$\sigma_p := 380 \text{ МПа} \quad [\text{с.13,6}]$$

$$\text{Допускаемое напряжение: } \sigma_{ww} := \frac{\sigma_p}{2.5} = 152 \text{ МПа}$$

При гидравлических испытаниях

$$\sigma_{t20} := 89 \text{ МПа} - \text{ для материала при температуре } t_i := 20^\circ\text{C} \quad [\text{с.13,6}]$$

$$\sigma_i := \frac{\sigma_{t20}}{1.1} = 80.909 \text{ МПа}$$

### Прибавка к расчетной толщине стенки:

$$\text{Скорость коррозии материала МЗ составляет } \Pi := 0.005 \frac{\text{мм}}{\text{год}} \quad [\text{с.349,7}]$$

Срок эксплуатации ориентировочно  $\tau = 20$  лет

$$c_k := \Pi \cdot \tau = 0.1 \text{ мм} \quad \text{для компенсации коррозии}$$

$$c_e = 0 \text{ мм} \quad \text{для компенсации эрозии}$$

$$c_1 := c_k + c_e = 0.1 \text{ мм}$$

$$c_2 = 0$$

$$c_3 = 0$$

$$c := c_1 + c_2 + c_3 = 0.1 \text{ мм} \quad \text{Принимаем } c := 1 \text{ мм}$$

### Расчет толщины стенки цилиндрической обечайки[20]

$$s_r := \max\left(\frac{P_{rk} \cdot D}{2\sigma - P_{rk}}, \frac{P_{prk} \cdot D}{2\sigma_i - P_{prk}}\right) = 0.47 \text{ мм}$$

$$s := s_r + c = 1.47 \text{ мм}$$

Принимаем исполнительную толщину стенки:

$$S := 2 \text{ мм}$$

$$Usl_{55} := \left( \begin{array}{l} \text{"Условие применимости формул выполняется"} \quad \text{if } \frac{S - c}{D} \leq 0.1 \\ \text{"Условия НЕ выполняются"} \quad \text{otherwise} \end{array} \right)$$

$$Usl_{55} = \text{"Условие применимости формул выполняется"}$$

Допускаемое давление в рабочем состоянии:

$$p := \frac{2\sigma \cdot (S - c)}{D + S - c} = 0.798 \text{ МПа}$$

Расчетное давление  $P_{rk} = 0.07 \text{ МПа}$

$$Usl_{56} := \left( \begin{array}{l} \text{"Условие выполняется"} \quad \text{if } P_{rk} < p \\ \text{"Условия НЕ выполняются"} \quad \text{otherwise} \end{array} \right)$$

$$Usl_{56} = \text{"Условие выполняется"}$$

При испытаниях

$$p_{pr} := \frac{2\sigma_i \cdot (S - c)}{D + S - c} = 0.425 \text{ МПа} \quad P_{prk} = 0.2 \text{ МПа}$$

$$Us157 := \begin{cases} \text{"Условие выполняется"} & \text{if } P_{prk} < p_{pr} \\ \text{"Условия НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Us157 = \text{"Условие выполняется"}$$

Условия прочности выполняются.

**Вывод:** Таким образом, при полученной толщине стенки обеспечивается прочность цилиндрической обечайки корпуса как в рабочем состоянии, так и в условиях испытания.

### Расчет толщины стенки эллиптической крышки и днища[20]

$$Se_r := \max\left(\frac{P_{rk} \cdot D}{2\sigma - 0.5P_{rk}}, \frac{P_{prk} \cdot D}{2\sigma_i - 0.5P_{prk}}\right) = 0.47 \text{ мм}$$

$$Se := Se_r + c = 1.47 \text{ мм}$$

Толщину стенки принимаем  $Se := 2 \text{ мм}$

$$Us158 := \begin{cases} \text{"Условие применимости формул выполняется"} & \text{if } \frac{Se - c}{D} < 0.1 \\ \text{"Условия НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Us158 = \text{"Условие применимости формул выполняется"}$$

Допускаемое давление в рабочем состоянии

$$p_w := \frac{2\sigma \cdot (Se - c)}{D + 0.5 \cdot (Se - c)} = 0.799$$

МПа

Расчетное давление

$$P_{rk} = 0.07$$

МПа

$$Us159 := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } P_{rk} < p \\ \text{"Условия НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Usl<sub>59</sub> = "Условие прочности выполняется"

При испытаниях

$$p_i := \frac{2\sigma_i \cdot (Se - c)}{D + 0.5 \cdot (Se - c)} = 0.425 \text{ МПа}$$

Расчетное пробное давление  $P_{prk} = 0.2 \text{ МПа}$

$$Usl_{60} := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } P_{prk} < p_i \\ \text{"Условия НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Usl<sub>60</sub> = "Условие прочности выполняется"

**Вывод:** При исполнительской толщине стенки эллиптической крышки 2 мм условия прочности выполняются.

$\frac{2}{292} = 6.849 \times 10^{-3}$  следовательно, аппарата тонокостенный

### Определение диаметров патрубков

Вход жидкого кислорода

$$d_1 := \sqrt{V_1 \cdot \frac{4}{\pi \cdot w_1}} = 0.716 \text{ м}$$

Принимаем трубу наружным диаметром 72 мм и толщиной стенки 2 мм. [19]

$$d_1 := 72 \text{ мм}$$

Выход воздуха принимаем тем же диаметром

Вход жидкости

$$d_2 := \sqrt{V_2 \cdot \frac{4}{\pi \cdot w_2}} = 0.259 \text{ м}$$

Принимаем диаметр патрубка ввода азота при толщине стенки 2 мм. [19]

$$d_2 := 26 \text{ мм}$$

Все остальные патрубки  $d_3 := 12$  мм      толщина стенки 2 мм

### Укрепление отверстий [10]

Расчетный диаметр цилиндрической обечайки

$$D_r := D = 380 \text{ мм}$$

Расчетный диаметр эллиптического днища и крышки:

Расстояние от центра укрепляемого отверстия до оси эллиптического днища:

$$r < 0.4D - 0.5 \cdot (d + 2S)$$

$$0.4D - 0.5 \cdot (d_1 + 2S) = 114 \text{ мм} \quad r_{1r} := 80 \text{ мм}$$

$$0.4D - 0.5 \cdot (d_2 + 2S) = 137 \text{ мм} \quad r_{2r} := 0 \text{ мм}$$

Расчетный диаметр эллиптического днища

$$D_{re1} := 2D \cdot \sqrt{1 - 3 \cdot \left(\frac{r_1}{D}\right)^2} = 707.672 \text{ мм}$$

$$D_{re2} := 2D \cdot \sqrt{1 - 3 \cdot \left(\frac{r_2}{D}\right)^2} = 760 \text{ мм}$$

Расчетные диаметры отверстий:

$$d_{1r} := d_1 + 2c = 74 \text{ мм}$$

$$d_{2r} := d_2 + 2c = 28 \text{ мм}$$

$$d_{3r} := d_3 + 2c = 14 \text{ мм}$$

Расчетные толщины стенки штуцера:

$$s_{1r} := \frac{P_{rt} \cdot (d_1 + 2c)}{2\sigma - P_{rt}} = 1.744 \text{ мм} \quad s_{2r} := \frac{P_{rk} \cdot (d_2 + 2c)}{2\sigma - P_{rk}} = 6.449 \times 10^{-3} \text{ мм}$$

$$s_{3r} := \frac{P_{rk} \cdot (d_3 + 2c)}{2\sigma - P_{rk}} = 3.224 \times 10^{-3} \text{ мм}$$

Расчетные длины внешних и внутренних частей патрубков, участвующих в укреплении и учитываемые при расчете:

$$l_{11} := 115 \text{ мм} \quad l_{12} := 100 \text{ мм} \quad l_{13} := 60 \text{ мм}$$

$$l_{31} := 115 \text{ мм} \quad l_{32} := 0 \text{ мм} \quad l_{33} := 20 \text{ мм}$$

$$c = 1$$

$$l_{r1} := \min \left[ l_{11}, 1.25 \cdot \sqrt{(d_1 + 2c) \cdot (S - c)} \right] = 10.753 \text{ мм}$$

$$l_{r2} := \min \left[ l_{12}, 1.25 \cdot \sqrt{(d_2 + 2c) \cdot (S - c)} \right] = 6.614 \text{ мм}$$

$$l_{r3} := \min \left[ l_{13}, 1.25 \cdot \sqrt{(d_3 + 2c) \cdot (S - c)} \right] = 4.677 \text{ мм}$$

$$l_{i3} := \min \left[ l_{31}, 1.25 \cdot \sqrt{(d_1 + 2c) \cdot (S - 2c)} \right] = 0 \text{ мм}$$

$$l_{i2} := \min \left[ l_{32}, 1.25 \cdot \sqrt{(d_2 + 2c) \cdot (S - 2c)} \right] = 0 \text{ мм}$$

$$l_{i3} := \min \left[ l_{33}, 1.25 \cdot \sqrt{(d_3 + 2c) \cdot (S - 2c)} \right] = 0 \text{ мм}$$

Ширина зоны укрепления в обечайке и днище

$$l_{0e3} := \sqrt{D_r \cdot (S - c)} = 19.494 \text{ мм}$$

$$l_{0e2} := \sqrt{D_{re2} \cdot (S - c)} = 27.568 \text{ мм}$$

$$l_{0e1} := \sqrt{D_{re1} \cdot (S - c)} = 26.602 \text{ мм}$$

Расчетный диаметр отверстия, не требующий укрепления при отсутствии избыточной толщины стенок сосуда, днища и крышки:

$$d_{0r} := 0.4 \cdot \sqrt{D_r \cdot (S - c)} = 7.797 \text{ мм}$$

$$d_{0re} := 0.4 \cdot \sqrt{D_r \cdot (S_e - c)} = 7.797 \text{ мм}$$

Из данного выражения видно, что все отверстия для патрубков следует укреплять.

Примем начальную толщину укрепления

$$s_{yг} = 0 \text{ мм}$$

Расчетная длина образующей оболочки в зоне укрепления:

$$L0_{e3} := \sqrt{Dr \cdot (syr + S - c)} = 19.494 \text{ мм}$$

$$L0_{e2} := \sqrt{Dre_2 \cdot (syr + S - c)} = 27.568 \text{ мм}$$

$$L0_{e1} := \sqrt{Dre_1 \cdot (syr + S - c)} = 26.602 \text{ мм}$$

Расчетная толщина стенки штуцера 2 из того жк материала, что и теплообменник

$$\sigma_{sh} := \sigma = 152 \text{ МПа}$$

Штуцер номер 1 изготовлен из латуни марки Л63 [с.13,6]  $\sigma_{sh1} := 204 \text{ МПа}$

$$sr_{sh1} := \frac{P_{rt} \cdot (d_1 + 2c)}{2 \cdot \sigma_{sh1} - P_{rt}} = 1.292 \text{ мм}$$

$$sr_{sh2} := \frac{P_{rk} \cdot (d_2 + 2c)}{2 \cdot \sigma - P_{rk}} = 6.449 \times 10^{-3} \text{ мм}$$

$$sr_{sh3} := \frac{P_{rk} \cdot (d_3 + 2c)}{2 \cdot \sigma - P_{rk}} = 3.224 \times 10^{-3} \text{ мм}$$

Коэффициенты  $k_1$  для внешней части патрубка,  $k_2$  - для накладного кольца  $k_3$  для внутренней части патрубка равны:

$$k1_1 := \frac{\sigma_{sh1}}{\sigma} = 1.342 \quad k1_2 := \frac{\sigma_{sh}}{\sigma} = 1 \quad k1_3 := \frac{\sigma_{sh}}{\sigma} = 1$$

$$k2_1 := k1_1 = 1.342 \quad k2_2 := k1_2 = 1 \quad k2_3 := k1_3 = 1$$

$$k3_3 := 1 \quad k3_1 := 1$$

Используем комбинированное укрепление приварным кольцом снаружи. Стенки всех укрепляемых патрубков выбраны.

$$S_{sh1} := 3 \text{ мм} \quad S_{sh2} := 2 \text{ мм} \quad S_{sh3} := 2 \text{ мм}$$

Условие укрепления отверстия комбинированным укреплением

$$A := ll_{r3} \cdot (S_{sh1} - 2c) \cdot k1_1 + \sqrt{Dr \cdot (syr + S - c)} \cdot (k2_1 \cdot syr + S - sr - c) = 10.327$$

$$U := (ll_{r1} + syr + S - sr - c) \cdot (S_{sh1} - sr_{sh1} - c) + A = 18.318$$

$$U_{u1} := 0.5(d_{1r} - d_{0r}) \cdot sr = 15.566$$

$$Usl_{61} := \begin{cases} \text{"Условие укрепления выполняется"} & \text{if } U > U_u \\ \text{"Условие НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_{61} = \text{"Условие укрепления выполняется"}$$

Следовательно, приварное кольцо не требуется.

$$A := l_{r3} \cdot (S_{sh2} - 2c) \cdot k1_1 + \sqrt{Dre_2 \cdot (syr + S - c)} \cdot (k2_2 \cdot syr + S - sr - c) = 14.604$$

$$U := (l_{r1} + syr + S - sr - c) \cdot (S_{sh2} - sr_{sh2} - c) + l_{r3} \cdot (S_{sh2} - 2c) \cdot k2_1 + A = 21.702$$

$$U_{u2} := 0.5(d_{2r} - d_{0r}) \cdot sr = 4.75$$

$$Usl_{62} := \begin{cases} \text{"Условие укрепления выполняется"} & \text{if } U > U_u \\ \text{"Условие НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_{62} = \text{"Условие укрепления выполняется"}$$

Следовательно, приварное кольцо не требуется.

$$A := l_{r3} \cdot (S_{sh3} - 2c) \cdot k1_1 + \sqrt{Dr \cdot (syr + S - c)} \cdot (k2_3 \cdot syr + S - sr - c) = 10.327$$

$$U := (l_{r1} + syr + S - sr - c) \cdot (S_{sh3} - sr_{sh3} - c) + l_{r3} \cdot (S_{sh2} - 2c) \cdot k2_1 + A = 15.517$$

$$U_{u3} := 0.5(d_{3r} - d_{0r}) \cdot sr = 1.458$$

$$Usl_{63} := \begin{cases} \text{"Условие укрепления выполняется"} & \text{if } U > U_u \\ \text{"Условие НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_{63} = \text{"Условие укрепления выполняется"}$$

Следовательно, приварное кольцо не требуется.

Принимаем  $sy = 0$  то есть приварное кольцо не требуется.

Все отверстия укрепляются с помощью штуцера и 2 и 3 изнутри. Допускаемое внутреннее избыточное давление узла сопряжения штуцера и стенки аппарата

$$k1 := 2 \text{ для выпуклых днищ}$$

$$v := \min \left[ \frac{L0_{e1} \cdot (k2_1 \cdot syr + S - c) + (l1_{r1} + syr + S - sr - c) \cdot (S_{sh1} - c) + l1_{r3} \cdot (S_{sh2} - c) \cdot k1}{\left[ L0_{e1} + 0.5 \cdot (d1r - d0r) + k1 \cdot (l1_{r1} + syr + s - sr - c) \cdot \frac{d1 + 2c}{Dre1} \right] \cdot (S - c)}, 1 \right] = 0.794$$

$$P_{sh1} := \left( 2k1 \cdot \sigma \cdot \frac{S - c}{Dre1 + S - c} \right) \cdot v = 0.681 \text{ МПа}$$

$$Us1_{64} := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } P_{sh1} > P_{rk} \\ \text{"Условие НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Us1_{64} = \text{"Условие прочности выполняется"}$$

$k1 := 2$  для выпуклых днищ

$$v := \min \left[ \frac{L0_{e2} \cdot (k2_2 \cdot syr + S - c) + (l2_{r1} + syr + S - sr - c) \cdot (S_{sh2} - 2c) + l2_{r3} \cdot (S_{sh2} - c) \cdot k1}{\left[ L0_{e2} + 0.5 \cdot (d2r - d0r) + k1 \cdot (l2_{r1} + syr + s - sr - c) \cdot \frac{d2 + 2c}{Dre2} \right] \cdot (S - c)}, 1 \right] = 0.722$$

$$v = 0.722$$

$$P_{sh2} := \left( 2k1 \cdot \sigma \cdot \frac{S - c}{Dre2 + S - c} \right) \cdot v = 0.577 \text{ МПа}$$

$$Us1_{65} := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } P_{sh1} > P_{rk} \\ \text{"Условие НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Us1_{65} = \text{"Условие прочности выполняется"}$$

**Вывод:** Таким образом, условия прочности доказывают, что патрубки с внешней стороны, а в случае 1 и 3 с внутренней, укрепляют отверстия в необходимом количестве и приварных колец не требуется.

### Расчет опорных лап [с.677,11]

Область применения расчетных формул

Опорные лапы присоединены к цилиндрической обечайке. Направление действия усилия принимают параллельно оси обечайки. Расчетные формулы применяют, когда

$$Us1_{66} := \begin{cases} \text{"Условие применения формул выполняется"} & \text{if } \frac{s - c}{D} \leq 0.05 \\ \text{"Условие НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Us1_{66} = \text{"Условие применения формул выполняется"}$$

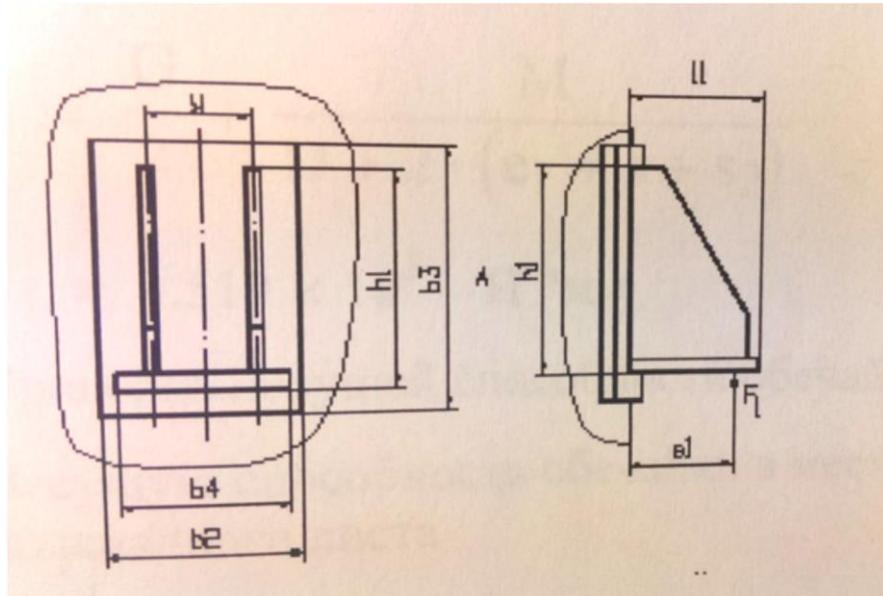


Рисунок 13. Расчетная схема опорных лап.

Вес теплообменника 240 кг

$$l_1 := 60 \text{ мм} \quad G := 240 \cdot 9.8 = 2.352 \times 10^3 \text{ Н}$$

Высоту опорной лапы принимаем:  $h_1 := 80 \text{ мм}$

Расстояние между точкой приложения усилия и обечайкой

$$e_1 := \frac{5}{6} \cdot l_1 = 50 \text{ мм}$$

Остальные размеры:

$$b_4 := 60 \text{ мм}$$

$$b_1 := 50 \text{ мм}$$

Изгибающий момент, действующий на обечайку в сечении, где расположены опорные узлы, в условиях эксплуатации или испытания (монтажа), Н\*мм;

$$M := 0$$

Усилие, действующее на опорную лапу для  $p=2$

$$F_1 := \frac{G}{2} + \frac{M}{D + 2 \cdot (e_1 + s + s_2)} = 1.176 \times 10^3 \text{ Н} \cdot \text{мм}$$

Проверка несущей способности обечайки

Несущая способность обечайки в месте приварки опорной лапы без подкладного листа

Условие прочности для лапы  $F_1 \leq F_{d1}$

Для расчета несущей способности проведем предварительный расчет коэффициента  $K_7$  и предельного коэффициента изгиба  $\sigma_{Td}$ :

Коэффициент:

$$x := \ln \left[ \frac{Dr}{2 \cdot (S - c)} \right] = 5.247 \quad y := \ln \left( \frac{h_1}{Dr} \right) = -1.498$$

$$z := -5.984 + 11.395x - 18.984y - 2.413x^2 - 7.286x \cdot y = 73.052$$

$$K_7 := \exp(z \cdot 10^{-7}) = 1$$

Предельное напряжение изгиба:

Общее окружное мембранное напряжение в цилиндрической и конической обечайках следует определять по формуле

$$\sigma_{my} := \frac{P_{rk} \cdot Dr}{2 \cdot (S - c)} = 13.3 \text{ МПа} \quad \sigma_m := \sigma_{my} = 13.3 \text{ МПа}$$

$n_T := 1.5$  запас прочности по пределу текучести

$K_2 := 1.2$  для рабочих условий

$$\theta_1 := 0.1 \quad \theta_2 := \frac{K_2 \cdot \sigma_m}{n_T \cdot \sigma} = 0.07$$

$$K_1 := \frac{1 + 3 \cdot \theta_1 \cdot \theta_2}{3 \cdot \theta_1^2} \cdot \sqrt{\frac{9 \cdot \theta_1^2 \cdot (1 - \theta_2^2)}{(1 + 3 \cdot \theta_1 \cdot \theta_2)^2}} + 1 - 1 = 4.153$$

Тогда предельное напряжение изгиба

$$\sigma_{td} := K_1 \cdot \sigma \cdot \frac{n_T}{K_2} = 789.135 \text{ МПа}$$

Несущая способность обечайки в месте приварки опорной лапы без подкладного листа

$$F_{d1} := \frac{\sigma_{td} \cdot h_1 \cdot (S - c)^2}{K_7 \cdot e_1} = 1.342 \times 10^3$$

При  $\frac{g}{h_1} < 0$ : значение  $F_{d1}$ , полученное по формуле, необходимо умножить на  $(0.5 + \frac{g}{h_1})$

$\frac{g}{h_1} = 0.115$  Следовательно, домножаем несущую способность обечайки на

$$0.5 + \frac{g}{h_1} = 0.615 \quad F_{d2} := F_{d1} \cdot 0.552 = 740.519 \text{ Н} \cdot \text{мм}$$

$$Usl_{67} := \begin{cases} \text{"Условие выполняется"} & \text{if } F_1 \leq F_{d1} \\ \text{"Условие НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_{67} = \text{"Условие выполняется"}$$

### Расчет тепловой изоляции [с.177,1]

$$D_{vn} = 0.38 \text{ м} \quad S := 0.002 \text{ м} \quad H := 1.539 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad D := D_{vn} = 0.38 \text{ м}$$

В качестве теплоизоляции служит вспученный перлитовый песок. Его плотность составляет:

$$\rho_{iz} = 150 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Коэффициент теплопроводности материала: Вт/м\*град  $\lambda_{iz} = 0.039$

$$\text{Поверхность теплоотдачи: } F_{iz} := \pi \cdot (D + 2S) \cdot H + \frac{[\pi \cdot (D + 2S)^2]}{2} = 0.233 \text{ м}^2$$

Температура внутреннего слоя изоляции  $t_{viz} := -18^\circ \text{C}$

Требуемую температуру наружного слоя изоляции принимаем  $t_{niz} = 5^\circ \text{C}$

Температура окружающей среды:  $t_{окр} = 20^\circ \text{C}$

Суммарный коэффициент теплоотдачи определяем по формуле:

$$\alpha_{из} := 9.47 + 0.07 \cdot (t_{niz} - t_{окр}) = 8.42 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$$

Величина тепловых потерь по уравнению теплоотдачи

$$Q_{piz} := \alpha \cdot F_{iz} \cdot (t_{niz} - t_{окр}) = -29.489 \text{ Дж}$$

$$\text{Толщина тепловой изоляции: } \delta_{из} := \frac{\lambda_{из} \cdot F_{из} \cdot (t_{viz} - t_{niz})}{Q_{piz}} = 0.059 \text{ м}$$

Диаметр аппарата с тепловой изоляцией:  $D_{niz} := D + 2S + 2 \cdot \delta_{из} = 0.501 \text{ м}$

## **11. АВТОМАТИЗАЦИЯ И КОНТРОЛЬ ПРОИЗВОДСТВА**

### **МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ И МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВА**

#### *Описание методов контроля*

Контроль технологического процесса производства серной кислоты ведется с помощью контрольно-измерительных приборов с периодической или непрерывной регистрацией параметров, а также с помощью периодического отбора проб с последующим химическим анализом.

Контролируются следующие параметры: температура кислот и газа, объёмные и массовые доли основных компонентов в газах и кислотах, отходящих газах и стоках, манометрический режим, степень абсорбции и контактирования, перечень приборов автоматического контроля, частота отбора проб и методы химического анализа приведены в таблице №

Для проверки качества товарной кислоты отбираются пробы один раз в смену. При отгрузке кислоты на сторону выполняется полный анализ кислоты в соответствии с требованиями ГОСТ 2184-77.

Количество отгружаемой кислоты в цистернах определяется согласно градуировочным таблицам на каждый тип цистерн и показаниям измерительной рейки.

Количество отгружаемой кислоты по кислотопроводу на ОАО «Аммофос» определяется по градуировочным таблицам ёмкостей склада кислоты, а также по показаниям уровнемеров и расходомеров, установленных на кислотопроводе.

#### *Перечень систем автоматического регулирования, сигнализации и блокировок*

1 Автоматическое регулирование уровня в сборниках (поз.209, 2П, 213) промывной кислоты.

2 Автоматическое регулирование уровня в сборниках (поз.262, 256, 272) сушильно-абсорбционного отделения.

3 Автоматическое регулирование массовой доли моногидрата в циклах орошения абсорбционной и сушильной башен.

4 Дистанционное регулирование температуры газа перед слоями контактного аппарата.

5 Автоматическое регулирование уровня в промежуточной ёмкости (поз.454) склада кислоты.

.6 Сигнализация максимального уровня в сборниках сушильно-абсорбционного отделения и промывного отделения.

7 Сигнализация наличия жидкости (перелив) в напорных баках промывного и сушильно-абсорбционного отделений.

8 Сигнализация снижения рН оборотной воды после теплообменников.

.9 Сигнализация повышения температуры подшипников нагнетателя.

.10 Сигнализация понижения давления масла в системе смазки нагнетателя.

.11 Сигнализация верхнего уровня в хранилищах и промежуточных ёмкостях склада кислоты.

12 Дистанционное управление задвижками и заслонками контактного узла.

## **Монтаж**

### **Классификация оборудования по монтажным признакам**

В состав современного входят многочисленные установки различного технологического назначения. Поэтому имеется большое разнообразие оборудования этих установок.

Вместе с тем, при дальнейшем описании особенностей монтажа тех или иных аппаратов целесообразно их подразделить на классификационные группы, которые основывались бы на общности главных монтажных приемов. Классификация оборудования только по технологическому назначению не полностью характеризует особенности оборудования с точки зрения его монтажа. При монтажных работах некоторые особенности технологического назначения аппарата часто не являются определяющими, а основываются на тех или иных частных требованиях, предъявляемых к монтажу аппарата.

Часто основные монтажные приемы, применяемые к аппаратам различного технологического назначения, идентичны, в то время как для других аппаратов одинакового технологического назначения они могут быть совершенно различными.

Монтируемое оборудование классифицируется по следующим основным признакам:

- пространственному положению оборудования;
- массовым и габаритным характеристикам оборудования;
- расположению оборудования на территории технологической установки;
- рабочим условиям;
- конструктивным и технологическим особенностям оборудования.

### **Пространственное положение оборудования**

В зависимости от положения оборудования в пространстве основные аппараты и машины можно подразделить на горизонтальные, вертикальные, наклонные и пространственные конструкции.

К горизонтальному оборудованию относятся электродегидраторы, всевозможные емкости, отстойники, подогреватели с паровым пространством, теплообменники, насосы, компрессоры, кристаллизаторы, контакторы алкилирования, барабанные вакуум-фильтры и др.

Большая часть оборудования этой группы является габаритной для перевозки по железным дорогам и поэтому прибывает на монтажную площадку в полностью собранном виде. При монтаже оборудования данной группы выполняют работы по ревизии, установке в проектное положение и испытанию.

Установку на фундаменты оборудования этой группы производят главным образом с применением самоходных стреловых или тракторных кранов и редко с помощью мачт или других грузоподъемных средств.

К вертикальному оборудованию относятся емкости, колонны тарельчатые и насадочные различного технологического назначения, реакторы и регенераторы различных каталитических процессов, некоторые типы теплообменников, контакторов алкилирования, компрессоров, дымовые трубы и др.

Многие аппараты данной группы (ректификационные колонны, реакторы, регенераторы) негабаритны для перевозок по железным дорогам и их приходится доставлять на монтажную площадку в виде отдельных узлов и деталей. В связи с этим на монтажной площадке выполняют большой объем работ по сборке и сварке аппаратов.

Установку таких аппаратов осуществляют главным образом с применением мачт, порталов, гидравлических подъемников или стационарных монтажных кранов. В некоторых случаях применяют также самоходные стреловые краны при достаточной длине стрелы и грузоподъемности. Аппараты этой группы целесообразно устанавливать в проектное положение полностью собранными и испытанными на земле или несколькими крупными блоками (при большой массе или крупных габаритах).

К наклонному оборудованию относятся различные транспортные устройства, вращающиеся цилиндрические печи (реакторы), некоторые конструкции сушилок и др.

Аппараты этой группы могут быть как габаритными, так и негабаритными для железнодорожных перевозок. При монтаже такого оборудования большой объем

работ приходится выполнять по укрупнительной сборке и выверке смонтированных блоков.

Такое оборудование устанавливают с применением самоходных стреловых и башенных кранов, порталов и т. д.

К пространственному оборудованию относятся резервуары, газгольдеры, трубчатые печи, конденсаторы-холодильники погружного типа, конденсаторы воздушного охлаждения, различные металлоконструкции. Оборудование этой группы поставляют на строительную площадку в виде более или менее крупных узлов, которые затем собирают на площадке в монтажные блоки. Это оборудование целесообразно устанавливать самоходными стреловыми кранами. В некоторых случаях можно применять мачты, стрелы или другое грузоподъемное оборудование.

### **Массовые характеристики оборудования**

Масса аппарата является важной монтажной характеристикой, которая в значительной степени обуславливает выбор метода монтажа данного аппарата и рациональные пределы укрупнительной сборки при монтаже. С увеличением массы аппарата при прочих равных условиях возрастает трудоемкость монтажа.

Среди монтируемых аппаратов основную массу составляют вертикальные аппараты.

Основное число (более 70%) составляют аппараты массой до 50 т. Однако их суммарная масса занимает лишь 35 % общей массы всех аппаратов. Число тяжеловесных аппаратов массой более 100 т относительно невелико всего около 13%, а их суммарная масса составляет около 43 % общей массы всех рассмотренных аппаратов.

К наиболее тяжелым аппаратам относятся ректификационные колонны, реакторы, регенераторы, абсорберы и другие аппараты установок и цехов большой производительности, комплектуемых агрегатами большой единичной мощности.

В настоящее время имеются грузоподъемные средства, позволяющие монтировать аппараты в полностью собранном виде массой до 1000 т. Разрабатываются

грузоподъемные средства для монтажа аппаратов массой 2000 т, включая специальные краны, транспортные средства и др.

С точки зрения возможности установки в проектное положение кортикальные аппараты можно разделить по массе на следующие основные группы: до 30, 30—200, 200—400 и свыше 400 т.

Вертикальные аппараты массой до 30 т в проектное положение можно устанавливать, применяя мощные самоходные стреловые краны, например СКГ–50.

Аппараты массой 30—200 т монтируют, применяя спаренные самоходные стреловые краны, например СКГ—100, трубчатые и решетчатые мачты, порталы, гидравлические подъемники и др.

Монтаж аппаратов массой 200—400 т осуществляют с помощью мачтовых подъемников, гидравлических подъемников с использованием централизованной системы контроля и управления подъемом.

Подъем аппаратов массой более 400 т производят с помощью специальных мачтовых подъемников. Монтаж таких аппаратов наиболее эффективно осуществляется, когда имеется комплекс механизмов, транспортных и грузоподъемных средств, обеспечивающих все этапы монтажных и транспортных работ.

### **Габаритные характеристики оборудования**

Габаритные размеры оборудования, т. е. длина, ширина и высота или диаметр и высота, оказывают существенное влияние на состояние его поставки и на выбор метода монтажа.

Оборудование можно разделить на следующие группы:

1) габаритное, принимаемое к перевозке по железной дороге без ограничений, и определенной степени негабаритности,

принимаемое к перевозке в собранном виде с ограничениями;

2) негабаритное для железнодорожных перевозок, т. е. принимаемое к перевозке по железной дороге отдельными блоками и деталями, но габаритное для транспортировки в собранном виде по шоссейным или водным путям;

3) абсолютно негабаритное, для перевозки в полностью собранном виде любым видом транспорта.

В группу оборудования, габаритного для железнодорожных перевозок, входят многие горизонтальные и вертикальные аппараты, насосы, компрессоры, фильтры и др. Эта группа наиболее многочисленна и включает основное монтируемое оборудование. Такое оборудование поставляют на монтажную площадку в полностью собранном виде. На монтажной площадке выполняют работы по установке оборудования в проектное положение и его испытанию. В отдельных случаях выполняют ревизию оборудования.

Оборудование, негабаритное для железнодорожных перевозок, включает различные ректификационные колонны, реакторы, регенераторы, дымовые трубы, трубчатые печи, конденсаторы-холодильники и др. Аппараты этой группы доставляют на монтажную площадку в виде крупных блоков или полностью разобранными. В связи с этим на монтажной площадке приходится выполнять большой объем работ по сборке и сварке.

В некоторых случаях негабаритные для железнодорожных перевозок аппараты целесообразно перевозить по шоссейным дорогам или водным путем. Эти возможности необходимо всегда оценивать, прежде чем решать вопрос о степени готовности аппарата при поставке с машиностроительного завода.

Абсолютно негабаритные аппараты (реакторы и регенераторы каталитического крекинга в кипящем слое, вакуумные колонны установок АВТ большой мощности, камеры коксования, пространственные металлоконструкции, резервуары и др.) доставляют на монтажную площадку в виде отдельных блоков и деталей. Таким образом, для аппаратов этой группы приходится выполнять значительный объем сборочных и сварочных работ, связанных с дополнительным изготовлением аппаратов непосредственно на монтажной площадке.

Степень укрупнительной сборки аппарата на машиностроительном заводе определяется также географическим положением места строительства, наличием соответствующих грузоподъемных и транспортных средств, состоянием шоссейных дорог и водных путей и т. п.

## Описание способа монтажа и расчет монтажного оборудования

Монтаж колонны производится в полностью собранном виде. Доставка аппарата производится на автотранспорте.

В дипломном проекте необходимо осуществить монтаж ректификационной колонны массой 360 кг, высотой 8890 мм, на фундамент 100 мм, так как нижняя часть колонны находится в помещении, а верхняя часть - на открытой площадке, монтаж осуществляется через монтажный проем в крыше здания с помощью автомобильного крана.

### Расчет стропа

Вес аппарата:  $G_0 := 360 \text{ кг}$

Монтаж производим за монтажные уши. Ускорение свободного падения:

$$g := 10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$$

Усилие приложенное к стропу:  $P := G_0 \cdot g = 3.6 \times 10^3 \text{ Н}$

$$P := 3.6 \text{ кН}$$

Зададим угол между стропом и усилием P:  $\alpha := 30 \text{ deg}$

Количество ветвей стропа:  $m := 2$

Тогда натяжение в одном канатном витке стропа равно:

$$S := \frac{P}{m \cdot \cos(\alpha)} = 2.078 \text{ кН}$$

Коэффициент запаса прочности:  $K_3 := 5$

Разрывное усилие:  $R_k := S \cdot K_3 = 10.392 \text{ кН}$

Подбираем канат: гибкий типа ЛК-РО конструкции 6\*36(1+7+7/7+14)+1 о.с.

(ГОСТ 7668-80)

С характеристиками:

-временное сопротивление разрыву 1764 МПа

-разрывное усилие 101.5 кН

-диаметр каната 13.5 мм

-масса 1000 м каната 697 кг

### Расчет полиспаста

Усилие, действующее на крюке подвижного блока:

$$P_p := 10G_0 = 3.6 \times 10^3 \text{ Н} \quad \text{или} \quad P_{p\text{н}} := 3.6 \text{ кН}$$

Усилие, действующее на неподвижный блок полиспаста:

$$P_H := 1.1 P_p = 3.96 \text{ кН}$$

Выбираем монтажные блоки типа БМ-1.25 с характеристиками:

-грузоподъемность 1.25 т.;

-количество роликов 1;

-диаметр роликов 120 мм;

-диаметр каната (максимальный) 9 мм;

-масса блока 6 кг;

$$d_p := 120 \text{ мм}$$

Общее количество роликов в полиспасте без учета в отводных:

$$m_n := 2$$

Задаемся количеством отводных блоков равным 2:

$$\eta := 0.92$$

Усилие в сгибающей ветви полиспаста:

$$S_p := \frac{P_p}{m_n \cdot \eta} = 1.954 \text{ кН}$$

Разрывное усилие в сбегающей ветви полиспаста:

Коэффициент запаса прочности:  $K_3 := 4$

$$R_K := S_p \cdot K_3 = 7.818 \text{ кН}$$

Выбираем канат для полиспаста гибкий типа ЛК-РО конструкции 6\*36 (1+7+7/7+14)+1 о.с. (ГОСТ 7668-80), с характеристиками:

-временное сопротивление разрыву 1960 МПа;

-разрывное усилие 109 кН;

-диаметр каната 13.5 мм;

-масса 1000 м каната 697 кг;

$$d := 13.5 \text{ мм}$$

$$g_k := 0.69 \text{ т}$$

Высота подъема аппарата:  $h := 1500 \text{ мм}$

Зададим длину сбегающей ветви полиспаста от ролика до барабана лебедки:

$$l_1 := 50 \text{ м}$$

$$l_2 := 19 \text{ м}$$

Длина каната для оснастки:

$$L := m_n \cdot (h \cdot 10^{-3} + 3.14 \cdot d_p \cdot 10^{-3}) + l_1 + l_2 = 99.754 \text{ м}$$

Суммарная масса полиспастов:

Масса каната:

$$G_k := \frac{L \cdot g_k}{1000} = 0.07 \text{ т}$$

Масса блоков:  $G_b := 2 \cdot 0.006 = 0.012 \text{ т}$

$$G_p := G_k + G_b = 0.082 \text{ т}$$

Усилие, действующее на канат, закрепляющий неподвижный блок полиспаста:  
 $P_b := 10G_0 \cdot 10^{-3} + 10G_p + S_p = 6.37 \text{ кН}$

Подбираем канат для крепления верхнего блока полиспаста из 2 ветвей.

Коэффициент запаса:

$$K_3 := 6 \quad R_{k3} := \frac{6P_b}{m} = 19.109 \quad m = 2$$

Канат гибкий типа ЛК-РО конструкции 6\*36 (1+7+7/7+14)+1о.с. (ГОСТ 7668-80), с характеристиками:

-временное сопротивление разрыву 1960 МПа;

-диаметр каната 13.5 мм;

-разрывное усилие 109 кН;

масса 1000 м каната 697 кг;

$$d = 13.5 \text{ мм}$$

$$g_k = 0.697 \text{ т}$$

По усилию сбегающей ветви полиспаста  $S_p = 1.954 \text{ кН}$

Выбираем лебедку типа Л-1001 с характеристиками:

-тяговое усилие 10 кН;

-канатоемкость 75 м;

-диаметр каната 11 мм;

-скорость навивки каната 23 м/мин;

-число слоев навивки 3;

-диаметр барабана 168 мм;

длина барабана 475 мм;

мощность электродвигателя 4.5 кВт;

масса с канатом 0.3 т.

Монтаж колонны (масса 360 кг, высота 8.9 м, диаметр 0.506 м ) будем производить строповкой за монтажные уши, расположенные на крышке колонны.

Выбираем кран марки МКА-10М с характеристиками:

-грузоподъемность на опорах 10 т.

-грузовой момент 400 кН\*м

-высота подъема 18 м.

-вылет крюка 16 м.

-длина стрелы 18 м.

-скорость подъема 3.7-6.5 м/мин.

-масса 14.8 т.

## **Введение**

В данной дипломной работе производится расчет основного оборудования по разделению воздуха.

Атмосферный воздух представляет смесь азота, кислорода, аргона и редких газов, не связанных между собой химически. Приблизённо воздух можно рассматривать как смесь только азота и кислорода, поскольку аргона редких газов в нём содержится менее 1 %; в этом случае округлённо принимают, что воздух содержит 79% азота и 21% кислорода по объёму.

Установка разделения воздуха КА-0.2 работает по принципу глубокого охлаждения. Производительность установки по условному газу 0.214 м<sup>3</sup>/с. Цель дипломной работы установить возможность увеличения производительности на 10% в условиях имеющегося оборудования.

## 1. Производственная безопасность

Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Опасные и вредные факторы при разделении воздуха по ГОСТ 12.0.003-74

Источник фактора, наименование видов работ	Факторы (по ГОСТ 12.0.003-74)		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
1. Работа с криогенными жидкостями 2. Работа с кислородом 3. Обезжиривание Оборудования 4. Хранение и обращение с растворителями 5. Обращение с водными моющими растворами	1.Токсичность паров всех хлорированных углеводородов 2. Наличие шума в рабочих помещениях	1. опасность низких температур 2. Опасность взрыва и пожара 3. Опасность термических ожогов	1.ГОСТ 21957-76 – Техника криогенная 2.Гост 5583-78 – Кислород технический 3.ОСТ 26-04-312-83 Методы обезжиривания оборудования. Общие требования к технологическим процессам 4.Хранение Растворителей по ГОСТ 9980.5-86 5.Параметры шума в рабочих помещениях устанавливаются СН 2.2.4/2.1.8.562–96 6.ГОСТ 22567.5-93 Средства моющие синтетические и вещества поверхностно-активные.

### Опасность воздействия низких температур

Возникает при работе с криогенными жидкостями.

Все наиболее важные процессы протекают в аппаратах воздухоразделительных установок при температуре от -183 до - 173°С (90 - 100К). В этом же интервале находится температура жидких криогенных продуктов, выводимых из установок. Опасность столь низких температур проявляется в случае соприкосновения незащищенного тела с криогенными жидкостями, металлическими охлаждёнными деталями и газами при криогенных температурах.

Поражение тела очень напоминает ожог, степень которого зависит от

времени контакта с охлаждёнными предметами или криогенными жидкостями и ряда других факторов. Недостаточно защищенные части тела при соприкосновении с неизолированными поверхностями, охлаждёнными до криогенных температур, могут быстро к ним примёрзнуть, а при отдёргивании возможно значительное повреждение кожного покрова.

Опасной является работа с криогенными продуктами во влажной одежде или перчатках, так как это может привести к отмораживанию.

Особую чувствительность к низким температурам имеют слизистые оболочки глаз, носа, полости рта и гортани. Поэтому очень опасным является вдыхание холодного воздуха.

Первым признаком отмораживания является потеря чувствительности, сопровождающаяся обычно изменением цвета отмороженных участков тела до восковидного и бледно-желтого. После оттаивания отмороженное место становится очень болезненным, на коже появляются пузыри, весьма подверженные инфекции.

При работе с криогенными жидкостями необходимо защищать глаза лицевым щитком или защитными очками, имеющими боковые щитки. Верхняя одежда должна быть наглухо закрыта, а брюки должны закрывать обувь. Опасно прикосновение руками к предметам и стенкам сосудов, охлаждённых криогенными жидкостями. В связи с этим операции по заливанию, переливанию и переноске криогенных жидкостей следует производить в асбестовых, кожаных или брезентовых перчатках, которые должны надеваться на руку свободно, чтобы при необходимости их можно было легко сбросить. При попадании криогенных жидкостей на незащищённый участок тела его следует немедленно обмыть водой.

[8]

### **Опасность взрыва и пожара**

Возникает при работе с кислородом. Возможность загорания материалов в контакте с кислородом резко возрастает при повышении давления и температуры, причем загорание одних материалов может инициировать загорание других. Наиболее

опасным является загорание материалов в том случае, если при этом имеются условия для самоподдерживающегося горения, которое продолжается до тех пор, пока не выгорит весь материал или не изменятся в определённой степени условия горения (снизится давление, уменьшится концентрация кислорода).

Наибольшая опасность для персонала при работе с кислородом возникает при попадании кислорода в помещение, где работают люди. В результате происходит пропитывание одежды кислородом, и ткани долго остаются легко воспламеняемыми. Загорание одежды может произойти от искры папиросы, от разряда статического электричества, возникающего при трении одежды из синтетических материалов, шерсти и шёлка.

Опасность воспламенения одежды значительно возрастает в тех случаях, когда огневые работы проводят в местах, где возможно повышенное содержание кислорода. Воспламенения пропитанной кислородом одежды от искр, возникающих от ударов и трения металлических предметов, подкованных сапог, а также немало несчастных случаев произошло при курении и зажигании спичек в недозволенных местах.

Пострадавшего для тушения на нём одежды следует немедленно окунуть в воду или сорвать одежду. Необходимые для этого ванны или душевые устройства должны быть согласно нормативам во всех помещениях, где возможно повышение концентрации кислорода в воздухе. Нельзя для прекращения горения закутывать пострадавшего, так как доступ кислорода к горячей одежде при этом не прекратится.

Учитывая изложенное, обслуживающему персоналу, включая и лаборантов, которому даже временно приходится находиться в атмосфере, обогащенной кислородом, следует носить хлопчатобумажную одежду и бельё.

После пребывания в атмосфере, обогащенной кислородом, запрещается в течение 20 - 30 минут подходить к открытому огню, электроплиткам, курить и зажигать спички. [9]

### **Опасность термических ожогов**

Учитывая достаточно высокую температуру применяемых водных моющих растворов, при работе с ними следует принимать необходимые меры, исключая ожоги. Погружать детали в ванны надо медленно, не допуская выплёскивания моющего раствора. Все работы, связанные с загрузкой и выгрузкой деталей из ванн, следует проводить в защитной спецодежде и очках. При случайном попадании моющего раствора на кожу, обожженное место следует промыть большим количеством воды. Особое внимание должно быть обращено на приготовление моющих растворов, в состав которых входит каустическая сода.

При растворении и разведении каустической соды выделяется значительное количество тепла, при приготовлении раствора сначала в ёмкость заливают необходимое количество воды, а потом добавляют щелочь. Выделяющееся при этом тепло распределяется в значительном количестве воды. Если к щелочи добавлять воду, то первые порции воды могут нагреться до кипения, что приведёт к разбрызгиванию раствора. Не рекомендуется растворять щелочь в горячей воде.

Работа с каустической содой и её водными растворами, используемыми на некоторых установках при очистке воздуха от двуокси углерода. Особо опасным является попадание едкой щелочи в глаза и на кожные покровы. Поэтому персонал, работающий на аппаратах для химической очистки воздуха от диоксида углерода и занимающийся приготовлением растворов едкой щелочи и отбором проб для анализов, должен знать и безусловно выполнять правила безопасности.

Допускается работа только на исправных аппаратах и насосах, напайных всеми необходимыми контрольно-измерительными приборами. Все разъёмные соединения аппаратов и трубопроводов должны быть плотными, сальники

щёлочных насосов и анализные вентили не должны -попускать раствор. Все операции по уходу за щелочным оборудованием (в том числе пуск и остановку насосов) следует производить в резиновых перчатках и защитных очках. Приготовление щелочного раствора и отбор проб на анализ необходимо производить в резиновых сапогах, фартуках, защитных очках, перчатках и шлеме. Концы рукавов спецодежды должны плотно прилегать к телу, а брюки должны быть выпущены из сапог. [10]

### **Токсичность паров всех хлорированных углеводородов**

Пары всех хлорированных углеводородов, применяемых при обезжиривании, ядовиты и относятся к сильнодействующим веществам. При вдыхании воздуха с большой их концентрацией даже в течение короткого времени или с малой концентрацией в течение длительного времени наступает отравление.

Последствия отравления могут быть временными и исчезать после пребывания в течение нескольких часов на свежем воздухе. В тоже время при длительном и систематическом пребывании в атмосфере, загрязнённой хлорированными углеводородами, могут быть серьёзные поражения печени и почек.

Предельно допустимые концентрации некоторых хлорированных углеводородов и других растворителей в воздухе рабочих помещений при восьмичасовом рабочем дне, установленные санитарными нормами проектирования промышленных предприятий (СН 245 - 71), характеризуются следующими величинами, мг/м<sup>3</sup>:

Трихлорэтилен 10

Тетразлорэтилен 10

Хладон - 113 3000

Бензин Б-70 1001

Отравление растворителями возможно не только при вдыхании из паров, но и при длительном соприкосновении жидких растворителей с кожным покровом. Чрезвычайно опасно также попадание хлорированных углеводородов в организм человека.

Обезжиривание надо проводить по утвержденной руководством предприятия специальной инструкции по обезжириванию оборудования и технике безопасности, составленной на основании инструкции завода-изготовителя с учетом местных производственных условий.

Рабочие помещения, где проводят работы с растворителями, следует оборудовать приточно-вытяжной вентиляцией, которая обеспечит максимальное удаление паров растворителей, с тем, чтобы их содержание в воздухе не превышало приведённых выше санитарных норм. На сдувах растворителей в атмосферу должны быть установлены специальные уловители.

Кроме этого, в помещении необходимо оборудовать аварийный шкаф с противогазами. Рабочие, непосредственно проводящие обезжиривание и работающие с растворителями, должны быть обеспечены спецодеждой: брезентовыми фартуками, брезентовыми рукавицами и кожаной обувью, которые должны храниться в специальном проветриваемом помещении отдельно от другой спецодежды.

Хлорированные углеводороды при соприкосновении с открытым пламенем или накаливаемыми предметами разлагаются с выделением фосгена, являющегося отравляющим веществом. Поэтому в помещениях, где проводят работы с растворителями, категорически запрещаются работы с огнём и курение.

При обезжиривании бензином и другими огнеопасными растворителями особое внимание должно уделяться вопросам пожарной безопасности.

При работе с легколетучими растворителями, например фреоном -113, возможно состояние удушья от недостатка кислорода при высоком содержании паров растворителя в воздухе. Поэтому количество фреона - 113, заливаемого в обезжириваемые системы или во вспомогательное оборудование, не должно превышать 0,3 кг на 1 м<sup>3</sup> помещения. [10]

### **Повышенный уровень шума на производстве**

Санитарными нормами проектирования промышленных предприятий по ГОСТ 12.1.003-88 определены допустимые уровни параметров шума и вибрации. Норма составляет 80 дБ.[3]

Наиболее шумным из помещений, где расположено оборудование по разделению воздуха, является помещение, где работают поршневые воздушные установки, где уровень звукового давления во всех частотах превышает допустимые уровни для производственных помещений с постоянным пребыванием людей. Для этого отделения, где нет постоянного рабочего места и пребывание человека в смену не превышает один час, применяются индивидуальные средства защиты антифоны, беруши или наушники.[4]

## **2 ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ**

### **Сточные воды**

Сточные воды азотно-кислородной станции представляют собой воду, отводимую от охлаждения компрессоров, конечных холодильников и испарителей, относятся к условно-чистым стокам и включены в оборотную систему завода.

Данные о сточных водах приведены в таблице 2

### **Выбросы в атмосферу**

Выбросы в атмосферу от азотно-кислородной станции состоят из:

- кислородной фракции разделения воздуха;

- азотной фракции из блока разделения воздуха;
  - влажного воздуха после регенерации цеолита в блоке очистки воздуха.
- Данные о выбросах приведены в таблице 3.

Твёрдые и жидкие отходы

Твёрдые отходы азотно-кислородной станции представляют собой отработанный цеолит Naх.

Жидкие отходы представляют собой отработанное масло после компрессоров, детандера и влагоотделителей.

Из маслоотстойника жидкие отходы сдаются в виде отработки на нефтебазу.

Отработанный цеолит направляется в отвал.

Характеристика отходов приводится в таблице 4.

## Выбросы в атмосферу

Таблица 2

Наименование выброса, аппарат, диаметр, высота сброса	Кол-во источников	Суммарный объём отходящего газа, м <sup>3</sup> *час	Периодичность	Температура, °С	Состав выброса, мг/ м <sup>3</sup> , г/м <sup>3</sup> , или % об.	Допустимо е кол-во вред. компонент ов сбрас. в атмосфер. кг/ч
---	-------------------	--	---------------	-----------------	---	---

Кислородная фракция из блока разделения воздуха А-15, Н-5 м, Д-100 мм	1	0.22	постоянно 0	13-38	Кислород д 25 - 20%	Вредные вещества отсутствуют
---	---	------	----------------	-------	---------------------------	------------------------------

Азотная фракция из блока разделения воздуха А-16, Н-5 м, Д-100 мм	1	0.68	постоянно	13-38	Кислород 25- 0.001%	Вредные вещества отсутствуют
		0.2	3 р. в сут.	200- 220	СО <sub>2</sub> 20 м <sup>3</sup> /м 3	Вредные вещества отсутствуют

## Сточные воды

Таблица 3

Наименование стока, аппарата	Куда сбрасываются	Кол-во стоков, м <sup>3</sup> /сутки	Периодичность сброса	Состав сброса, мг/л (по компонентам)	Доп. КОЛ-ВО сбрас-ых вредн. вещ-в кг/сут
Условно - чистый сток	Водооборотная система предприятия	1080	Постоянно	рН	6.5-8.5
				7.8	3.28
				<b>хПК</b>	0.05
				7.4	1.09
				Метанол	0.22
				0.2	2.19
				Формальдегид	0.11
0.002					

## Твёрдые и жидкие отходы

Таблица 4

Наименование отхода, аппарат	Куда складир-ся, транспорт, тара	Кол-во отходов в сутки	Периодичность образования	Примечание
Отработанное масло из компрессоров	Ёмкость маслоотстойника		24 раза в сутки	
	Мусорный контейнер	1.37	1 раз в год	Замена цеолита производится при содержании <b>CO<sub>2</sub></b>

В качестве технических мероприятий по снижению пагубного воздействия на экологию, нужно выделить в первую очередь совершенствование техпроцесса. Это обеспечит снижение затрат на очистку выбросов и увеличения качества продукции или эффективность используемого процесса. В качестве этого можно использовать повышение скорости расплава благодаря более сильному излучению и более высокой эффективности использования энергии обогащенного кислородом сгорания, а также возможность уменьшить количество выбросов с помощью кислородных форсунок.

Вторым мероприятием может быть и снижение потребления энергии без увеличения количества выбросов. К этому можно отнести добавление потока кислорода в отверстие для отходящих газов в роторной печи с фиксированной осью значительно сокращает количество вредных компонентов в отходящем газе.

Следующим мероприятием для снижения воздействия данного аспекта - это установка дополнительных систем очисток либо замена существующих или их усовершенствование.[12]

### **3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

Одной из наиболее важных специфических особенностей воздухоразделительных установок является возможность накопления в них взрывоопасных примесей, содержащихся в перерабатываемом воздухе. В тех случаях, когда процесс происходит в аппаратах, где имеется жидкий кислород или жидкость, обогащенная кислородом, создаются предпосылки для возникновения взрыва. Он также может произойти, если в установке или вне её имеет место контакт жидкого кислорода или жидкости, обогащенной кислородом, с различными органическими веществами.

Пожарная безопасность зданий и сооружений в организациях, связанных с разделением воздуха, должна соответствовать проекту, установленным требованиям пожарной безопасности и настоящим Правилам.

Взрывобезопасность технологических процессов, в которых присутствуют вещества способные образовывать взрывоопасную среду, должна обеспечиваться мерами взрывопредупреждения и взрывозащиты, осуществлением специальных организационных и организационно технических мероприятий в объеме требований, установленных действующими нормами взрывобезопасности.

При возгорании кислородного оборудования необходимо прекратить поступление кислорода в помещение и вывести обслуживающий персонал в безопасную зону.

Для тушения загоревшихся технических устройств и коммуникаций следует пользоваться системами и средствами пожаротушения предусмотренными проектом.

Помещения, в которых расположены кислородные компрессоры и газификаторы, наполнительные и примыкающие к ним склады кислородных баллонов, кислородные разрядные коллекторы, реципиенты, кислородно-регулирующие пункты, узлы регулирования кислорода, гаражи для транспортных сосудов жидких ПРВ, оснащаются средствами связи в соответствии с нормами проектирования.

Средства связи (телефонные аппараты и др.) необходимо устанавливать вблизи мест размещения и обслуживания указанных технических устройств.

В цехах разделения воздуха, в отделениях получения и очистки редких газов, в компрессорном отделении, в газгольдерном помещении, в отделениях хранения, газификации и наполнения кислорода, а также в местах, где проходят кислородные трубопроводы и производятся работы с кислородом, курение и применение открытого огня не допускается, о чем на наружной стороне дверей и в местах, где проводятся работы с кислородом и проходят кислородопроводы, должны быть установлены соответствующие знаки безопасности.

В помещениях производства - места расположения кислородных компрессоров, насосов и газификаторов жидкого кислорода, блоков разделения воздуха, резервуаров с жидким кислородом, наполнительных и разрядных коллекторов кислородных баллонов, кислородно-распределительных пунктов, у выхода из помещений кислородных тканевых газгольдеров, а также около эвакуационных выходов, необходимо устанавливать ванны, заполненные водой. Допускается устройство противопожарных душевых кабин с автоматической подачей воды при входе человека в кабину.

При установке в цехе кислородных центробежных компрессоров или компрессоров другого назначения при единичной вместимости маслобака, превышающей 5 м<sup>3</sup>, аварийный слив масла из маслобаков компрессоров осуществляется в бак

аварийного слива, вместимость которого должна быть не меньше вместимости наибольшего маслобака компрессора, установленного в цехе. [1]

#### **4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**

Газоопасность, взрыво- и пожароопасность, опасность термических и химических ожогов, токсичность в производстве разделения воздуха определяется в нем наличием криогенных жидкостей.[8]

Для работников, занятых на работах с вредными или опасными условиями труда, законодатель установил сокращенную продолжительность рабочего времени - не более 36 часов в неделю (ст. 92 ТК РФ, п. 1 Постановления Правительства РФ от 20.11.2008 N 870 (далее - Постановление N 870)). При этом максимально допустимая продолжительность ежедневной работы (смены) не может превышать (ст. 94 ТК РФ):

- при 36-часовой рабочей неделе - 8 часов;
- при 30-часовой рабочей неделе и менее - 6 часов.

Коллективным договором может быть предусмотрено увеличение смены при условии соблюдения предельной еженедельной продолжительности рабочего времени и гигиенических нормативов условий труда.

Также сотрудникам, занятым на работах с вредными или опасными условиями труда, положено предоставлять ежегодный дополнительный оплачиваемый отпуск продолжительностью не менее 7 календарных дней (ст. 117 ТК РФ, п. 1 Постановления N 870).[7]

## Литература

1. ГОСТ 12.4.011–89 ССБТ. Средства защиты работающих. Общие требования и классификация.
2. ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования.
3. СН 2.2.4/2.1.8.562–96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки.
4. СП 51.13330.2011. Защита от шума.
5. ГОСТ Р 53010 – 2008 «Прессы гидравлические. Требования общие».
6. Федеральный закон от 22.07.2013 г. №123 – ФЗ. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности.
7. ТК РФ. Трудовой кодекс РФ.
8. ГОСТ 21957-76 –Техника криогенная
9. Гост 5583-78 –Кислород технический
10. ОСТ 26-04-312-83 Методы обезжиривания оборудования. Общие требования к технологическим процессам
- 11.ГОСТ 17.1.3.13–86. Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к охране поверхностных вод от загрязнений.
- 12.А.Г. Ветошкин Защита литосферы от отходов. Учебное пособие.- Пенза: Изд-во Пенз. Гос. Ун-та,2005г.

## Финансовый менеджмент. Ресурсоэффективность и ресурсосбережение.

### 1. Организационно-экономический раздел

#### 1.1 Расчёт производственной мощности оборудования цеха

Для расчёта производственной мощности предварительно устанавливаем:

а) режим работы отделения характеризуется непрерывной рабочей неделей, цех работает в 2 смены, продолжительность смены 12 часов;

б) эффективный фонд времени оборудования  $T_{\text{кал}}$  равен 360 дням или 8 640 часам.

Номинальный фонд времени работы оборудования  $T_{\text{ном}}$  при работе по непрерывной неделе составляет:

$$T_{\text{ном}} = T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}},$$

где  $T_{\text{вых}} = 104$  дн. — количество выходных дней в году;

$T_{\text{пр}} = 12$  дн. - количество праздничных дней в году;

В нашем случае оборудование работает и в выходные и праздничные дни, соответственно, при расчете номинального фонда рабочего времени их в учет не принимаем, т.е.

$$T_{\text{ном}} = T_{\text{кал}} = 360 \text{ дней} = 8\,640 \text{ часов};$$

Эффективный фонд рабочего времени оборудования равен номинальному времени за вычетом остановок на ремонты  $T_{\text{рем}}$ , производимые в рабочее время в соответствии с установленной системой планово-предупредительного ремонта (ППР) и определяется по формуле:

$$T_{\text{эф}} = T_{\text{ном}} - T_{\text{рем}},$$

Продолжительность простоя оборудования в ремонтах  $T_{\text{рем}}$  определяем по формуле:

$$T_{\text{рем}} = 2\% \cdot T_{\text{ном}};$$

$$T_{\text{рем}} = 0,02 \cdot 8\,640 = 172,8 \text{ часов.}$$

Эффективный фонд времени оборудования составляет по формуле:

$$T_{\text{эф}} = 8\,640 - 172,8 = 8467,2 \text{ часов.}$$

На основе расчетов составляем баланс времени работы оборудования

Таблица 1 — Баланс рабочего времени оборудования.

Показатели	Количество дней
Календарный фонд времени	360 (8 640)
Номинальный фонд рабочего времени	360 (8 640)
Простой оборудования в ремонтах	7.2 (172,8)
Эффективное время работы оборудования за год	352,8 (8467,2)

$$M = P_{\text{час}} \cdot T_{\text{эф}} \cdot K_{\text{об}},$$

где  $P_{\text{час}}$  - часовая производительность оборудования в натуральных единицах;

$T_{\text{эф}}$  - эффективный фонд времени работы оборудования;

$K_{\text{об}}$  - количество однотипного оборудования.

Текущая мощность составляет:  $M = 18897 \cdot 8467,2 \cdot 1 = 160\,000\,000 \text{ кг / год.}$

$$M = 160\,000 \text{ т/год}$$

Для анализа использования оборудования рассчитаем экстенсивный и интенсивный коэффициенты.

Коэффициент экстенсивного использования оборудования равен

$$K_{\text{экс}} = T_{\text{эф}} / T_{\text{ном}};$$

$$K_{\text{экс}} = 8\,467,2 / 8\,640 = 0,98.$$

Коэффициент интенсивного использования оборудования равен

$$K_{\text{инт}} = Q_{\text{пп}} / Q_{\text{мах}};$$

$Q_{\text{пп}}$  - производительность единицы оборудования в ед. времени;

$Q_{\text{мах}}$  – максимальная производительность в ед. времени;

$$K_{\text{инт}} = 14\,761 / 16\,530 = 0,893.$$

Интегральный коэффициент использования мощности:

$$K_{\text{им}} = K_{\text{экс}} \cdot K_{\text{инт}};$$

$$K_{\text{им}} = 0,98 \cdot 0,893 = 0,875.$$

Для определения фактического выпуска продукции рассчитывается производственная программа ( $N_{\text{год}}$ ):

$$N_{\text{год}} = K_{\text{им}} \cdot M = 0,875 \cdot 160\,000 = 140\,000 \text{ т/год.}$$

Вывод: максимально возможный годовой выпуск – 160 000 т/год;  
действительный выпуск продукции – 140 000 т/год. Установка работает на неполную мощность, степень загрузки равна 87,5%.

## 1.2. Расчет себестоимости готовой продукции по действующему производству

### 1.2.1. Расчет годового фонда заработной платы цехового персонала

Таблица 2 – Расчет численности персонала

Наименование должности	Категория	Тарифный разряд	Число штатных единиц	Количество смен в сутках
Главный технолог	ИТР	Высшее	1	1
Механик установки	ИТР	Высшее	1	1
Энергетик установки	ИТР	Высшее	1	1
Инженер КИП и АСУ	ИТР	Высшее	1	1
<b>Итого:</b>			<b>4</b>	
Старший оператор	Производственный рабочий	6 разр.	4	2
Оператор установки	Производственный рабочий	5 разр.	9	2
Помощник оператора	Вспомогательный персонал	4 разр.	4	2
<b>Итого:</b>			<b>17</b>	
Дежурный слесарь по ремонту оборудования	Ремонтный персонал	4 разр.	4	2
Дежурный слесарь-электрик	Ремонтный персонал	4 разр.	4	2
Дежурный слесарь КИП	Ремонтный персонал	4 разр.	4	2
<b>Итого:</b>			<b>12</b>	
<b>Итого:</b>			<b>33</b>	

### 1.2.2. Расчет баланса эффективного годового времени одного среднесписочного рабочего

Для определения численности рабочих, необходимо установить годовой фонд работы одного среднесписочного рабочего. Он зависит от принятого режима работы цеха и продолжительности рабочего дня.

Примерный баланс рабочего времени одного среднесписочного рабочего приведен в таблице 3

Таблица 3 - Примерный баланс рабочего времени одного среднесписочного рабочего.

Наименование затрат рабочего времени	Дни	Часы
Календарное время	360	
Номинальный фонд рабочего времени	360	
Планируемые невыходы на работу:		
- очередные и дополнительные отпуска	36	
- невыходы по болезни	3	
- декретные отпуска		
- отпуск в связи с учебой без отрыва от производства	-	
Годовой фонд рабочего времени	318	
Годовой фонд рабочего времени		7632

**1.2.3. Количество выходных дней в году, ночных смен определяется из графика сменности (пример графика сменности представлен в табл. 4)**

Номер смены	Часы работы	Дни месяца															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	0 - 12	А	А	А	А	Б	Б	Б	Б	В	В	В	В	Г	Г	Г	Г
2	12 - 24	В	В	В	Г	Г	Г	Г	А	А	А	А	Б	Б	Б	Б	В
Отдых		БГ	БГ	БГ	БВ	АВ	АВ	АВ	ВГ	БГ	БГ	БГ	АГ	АВ	АВ	АВ	АВ

Таблица 4 – График сменности

#### 1.2.4. Расчет годового фонда заработной платы основного производственного персонала и ИТР

Расчет годового фонда зарплаты ИТР, служащих и МОП производится на основании их окладов согласно штатному расписанию.

Фонд заработной платы рассчитываем исходя из действующих тарифных условий, запроектированной численности основных и вспомогательных рабочих и их фонда рабочего времени.

Общий фонд заработной платы рабочих за год:

$$З_{\text{год}} = З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}},$$

где  $З_{\text{осн}}$  - основной фонд заработной платы рабочих, тыс. руб.;

$З_{\text{доп}}$  - дополнительный фонд заработной платы рабочих, тыс. руб.

Основной фонд заработной платы для рабочих повременников:

$$З_{\text{осн}} = З_{\text{тар}} + \text{Пр} + Д_{\text{н.вр}} + Д_{\text{пр.дни}} + Д_{\text{бриг}},$$

где  $З_{\text{тар}}$  — тарифный фонд заработной платы, тыс. руб.;

Пр — оплата премий, тыс. руб.;

$Д_{\text{н.вр}}$  - доплата за работу в ночное время, тыс. руб.;

$Д_{\text{пр.дни}}$  - доплата за работу в праздничные дни, тыс. руб.;

$Д_{\text{бриг}}$  — доплата не освобожденным бригадирам, тыс.руб.

Тарифный фонд заработной платы:

$$З_{\text{тар}} = \sum Ч_{\text{сп}} \cdot Т_{\text{ст}} \cdot Т_{\text{эф.раб}},$$

где  $Ч_{\text{сп}}$  — списочная численность рабочих данного разряда, человек;

$Т_{\text{сп}}$  - дневная тарифная ставка данного разряда, руб.

Размер премий принимаем равным 10 % от тарифного фонда заработной платы.

Дополнительная заработная плата:

$$З_{\text{доп}} = (Д_{\text{н}} \cdot З_{\text{осн}}) / Т_{\text{эфф}}.$$

Фонд дополнительной заработной платы принимаем равным 10 % от фонда основной заработной платы. Здесь также учитываем доплату по районному коэффициенту  $K = 1,3$ .

По отношению к тарифному фонду заработной платы доплата за ночные составит 40%.

Таблица 6 — Сводная таблица заработной платы основного персонала

Наименование профессий	Списочная численность	Тарифный разряд	Тарифная ставка за день, руб.	Номин. фонд рабочего времени всех рабочих в год, ч	Основной фонд заработной платы, тыс. руб.					Дополнительный фонд з/п, тыс.руб.	Общий годовой фонд з/п, тыс. руб.	Общий фонд з/п с учетом районного коэф-та, тыс.руб.
					Тарифн. фонд	Премия	Доплата за ночное время	Доплата за работу в праздники	Итого			
	$Ч_{сп}$		$T_{ст}$	$H_{ф}=360 \cdot Ч_{сп}$	$Z_{тар} = Ч_{сп} \cdot T_{ст}$	$Пр = Z_{тар} \cdot 10\%$	$D_{н.вр.} = Z_{тар} \cdot 10\%$	$D_{пр.дн.} = Z_{тар} \cdot 0,3$	$Z_{осн} = Z_{тар} + Пр + D_{нвр.} + D_{прдн.}$	$Z_{доп} = Z_{осн} \cdot 10\%$	$Z_{общ.} = Z_{доп} + Z_{осн}$	$Z_{общ} \cdot K;$
ИТР	4	6	3123	1440	3972,4	397,24	1588,96	1191,72	7150,32	715,032	7865,352	10224,96
Старший оператор	4	5	2578	1440	3279,2	327,92	1311,68	983,76	5902,56	590,256	6492,816	8440,661
Оператор установки	9	4	1987	3240	5686,8	568,68	2274,72	1706,04	10236,24	1023,624	11259,86	14637,82
Вспомогательный персонал	4	4	1547	1440	1967,7	196,77	787,08	590,31	3541,86	354,186	3896,046	5064,86

Ремонтный персонал	12	4	1269	4320	4842,5	484,25	1937	1452,75	8716,5	871,65	9588,15	12464,6
Итого:	33	-	-	-	19748,6	7899,44	5924,58	1974,86	35547,48	3554,748	39102,23	50832,9

### 1.3. Расчет затрат на производство продукции

#### 1.3.1. Расчет годовой потребности в сырье и материалах

Определение затрат на сырье и материалы производим исходя из принятого объема производства, удельных норм расхода сырья и материалов и планово-заготовительных цен.

Таблица 7 — Расчет годовой потребности в материалах

Наименование сырья	Ед.изм	Цена, тыс.руб	Расход, т		Сумма затрат, тыс.руб.	
			На единицу готовой продукции	На весь объем производства	На единицу готовой продукции	На весь объем производства
азот	т	30	0,507	70980	15,21	2129400

#### 1.3.2. Расчет амортизационных отчислений

Таблица 8 - Расчет амортизационных отчислений

Наименование основных средств	Стоимость, тыс.руб.	Норма амортизации, %	Годовые амортизационные отчисления, тыс.руб
1. Здания			
1.1. Цех по производству	5000	5	250
1.2. Операторная	6000	5	300
<b>Итого:</b>			<b>550</b>
2. Оборудование			
2.1. Реактор	200000	10	20000
2.2. Теплообменник	70000	10	7000
2.3.	20000	10	2000

Турбовоздуходувка			
2.4. Испаритель	1000	10	100
2.5. Насос	200	10	20
<b>Итого:</b>	<b>206450</b>		<b>29120</b>
<b>Итого общее:</b>	<b>211700</b>		<b>29670</b>

**1.3.3. Калькуляция себестоимости на производство и реализацию продукции при заданном объеме производства (140000т/год)**

Таблица 9 – Калькуляция себестоимости на производство и реализацию продукции при заданном объеме производства Q=140000 т

Наименование статьи расходов	Единицы измерения	Затраты тыс.руб.	
		На 1 т.	На N год
1. Сырье	тыс.руб.	15,21	2129400
<b>2. Энергия на технологические нужды</b>	тыс.руб.	48,5	6790000
<b>3. З/П основных произв. рабочих</b>	Тыс.руб.	0,164846	23078,48
<b>4. Отчисления на СН (30%)</b>	Тыс.руб.	0,04945	6923,54
<b>Итого условно-переменных издержек</b>	тыс.руб.	69,0143	9662002,02
<b>5. Общепроизводственные накладные расходы</b>	тыс.руб.		
<b>5.1. РСЭО:</b>	тыс.руб.		
- Амортизация оборудования	тыс.руб.	0,208	29120
- Ремонт оборудования	тыс.руб.	0,052	7280
- Заработная плата ремонтного персонала	тыс.руб.	0,089	12464,6

- Отчисление на соц. нужды ремонтного персонала (30%)	тыс.руб.	0,0267	3739,38
<b>5.2. Заработная плата ИТР</b>	тыс.руб.	0,073	10224,96
- Отчисление на соц. нужды ИТР (30%)	тыс.руб.	0,0219	3067,488
<b>5.3. Заработная плата вспомогательного персонала</b>	тыс.руб.	0,0362	5064,86
- Отчисление на соц. нужды вспомогательного персонала (30%)	тыс.руб.	0,0108	1519,46
<b>Итого условно-постоянных издержек</b>	тыс.руб.	0,5177	72480,748
<b>Цеховая (производственная) себестоимость (1+2+3+4+5)</b>	тыс.руб.	63,924	9734482,768
<b>6. Управленческие расходы (5% от цеховой себестоимости)</b>	тыс.руб.	3,1962	486724,138
<b>Заводская себестоимость (цеховая себестоимость + стр.6)</b>	тыс.руб.	67,12	10221206,91
<b>7. Коммерческие расходы (1% от заводской себестоимости)</b>	тыс.руб.	0,67	102212,07
<b>Полная себестоимость (заводская себестоимость +стр.7)</b>	тыс.руб.	<b>68,43</b>	<b>9580200</b>
<b>Условно-переменные издержки</b>	тыс.руб.	<b>63,71</b>	<b>8918783.044</b>
<b>Условно-постоянные издержки</b>	тыс.руб.	<b>4,72</b>	<b>661416,956</b>

## 1.4. Определение цены готовой продукции

Цена готовой продукции определяется по формуле:

$$Ц_{пр.} = C_{себ} * (1 + P/100), \text{руб.}$$

$C_{себ}$  - себестоимость 1 тонны продукции;

$P$  - рентабельность продукции (25 %);

Итак, цена 1 тонны формалина при  $Q=140$  тыс. т\ год:

$$Ц = 69,0143 \cdot 1,25 = 86,26 \text{ тыс. руб. \т.}$$

### 1.4.1. Анализ безубыточности по действующему производству

Цель анализа – определение точки безубыточности, т.е. минимального объема продаж, начиная с которого предприятие не несет убытков.

Определение точки безубыточности аналитическим способом:

$$Q_{кр} = \frac{Изд_{пост}}{Ц_{1тн} - Изд_{пер}}$$

$$Q_{кр} = 661416,956 / (86,26 - 69,0143) = 38343 \text{ т.}$$

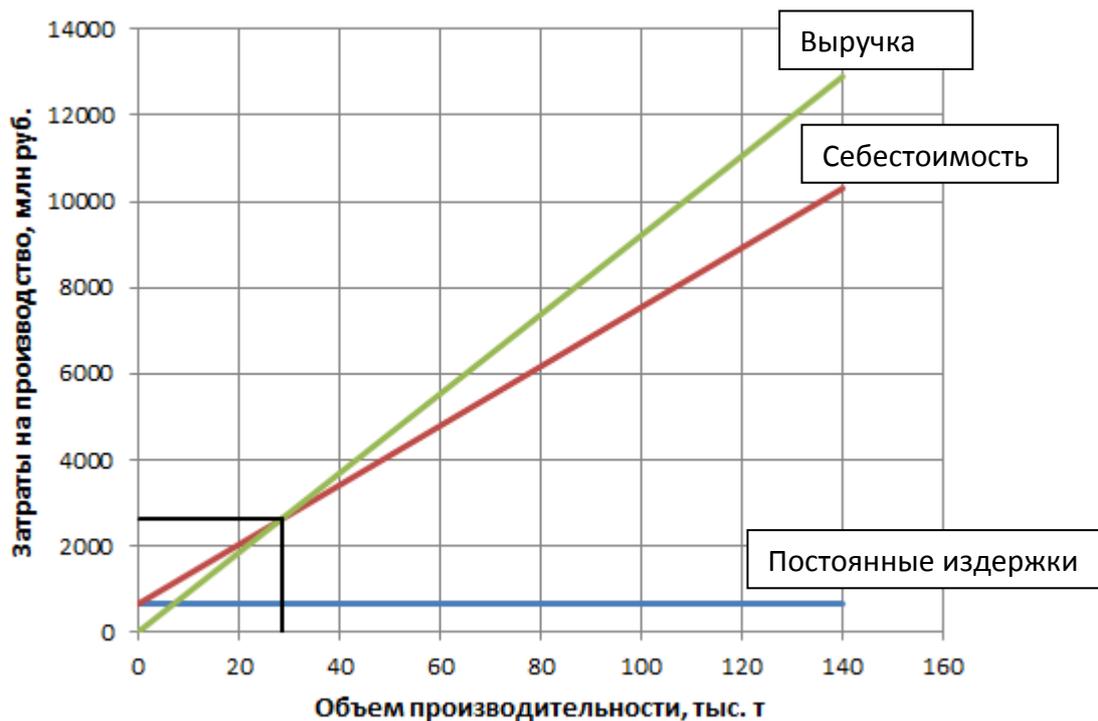


Рисунок 1 – График безубыточности

**1.5. Расчет производственной мощности на плановый период при увеличении объема производства на 10%**

Поскольку установка работает лишь на 87,5% от максимальной нагрузки, произведем расчет при увеличении годового производства на 10%.

Таблица 10 – Расчет годовой потребности в сырье и материалах

Наименование сырья	Ед.изм.	Цена, тыс.руб.	Расход, т		Сумма затрат, тыс.руб.	
			На единицу готовой продукции	На весь объем производства	На единицу готовой продукции	На весь объем производства
азот	т	30	0,507	78078	15,21	2342340

**1.5.1. Расчет себестоимости готового продукта в проектном году**

Таблица 11 – Калькуляция себестоимости на производство и реализацию продукции при заданном объеме производства Q=154000 т

Наименование статьи расходов	Единицы измерения	Затраты тыс.руб.	
		На 1 т.	На N год
1. Сырье	тыс.руб.	15,21	2342340
<b>2. Энергия на технологические нужды</b>	тыс.руб.	48,5	7469000
<b>3. З/П основных произв. рабочих</b>	тыс.руб.	0,14986	23078,48
<b>4. Отчисления на СН (30%)</b>	тыс.руб.	0,04496	6923,54
<b>Итого условно-переменных издержек</b>	тыс.руб.	68,9748	10622122,02
<b>5. Общепроизводственные</b>	тыс.руб.		

<b>накладные расходы</b>			
<b>5.1. РСЭО:</b>	тыс.руб.		
- Амортизация оборудования	тыс.руб.	0,1891	29120
- Ремонт оборудования	тыс.руб.	0,04727	7280
- Зарботная плата ремонтного персонала	тыс.руб.	0,08094	12464,6
- Отчисление на соц. нужды ремонтного персонала (30%)	тыс.руб.	0,02428	3739,38
<b>5.2. Зарботная плата ИТР</b>	тыс.руб.	0,0664	10224,96
- Отчисление на соц. нужды ИТР (30%)	тыс.руб.	0,01992	3067,488
<b>5.3. Зарботная плата вспомогательного персонала</b>	тыс.руб.	0,03289	5064,86
- Отчисление на соц.нужды вспомогательного персонала (30%)	тыс.руб.	0,009867	1519,46
<b>Итого условно-постоянных издержек</b>	тыс.руб.	0,47066	72480,748
<b>Цеховая (производственная) себестоимость (1+2+3+4+5)</b>	тыс.руб.	63,904	9731437,13
<b>6. Управленческие расходы (5% от цеховой себестоимости)</b>	тыс.руб.	3,188	492067,1
<b>Заводская себестоимость (цеховая себестоимость + стр.6)</b>	тыс.руб.	67,092	10333409,12
<b>7. Коммерческие расходы (1% от заводской себестоимости)</b>	тыс.руб.	0,67092	103334,0912

<b>Полная себестоимость (заводская себестоимость +стр.7)</b>	тыс.руб.	<b>68</b>	<b>10472000</b>
<b>Условно-переменные издержки</b>	тыс.руб.	<b>63,71</b>	<b>9811340</b>
<b>Условно-постоянные издержки</b>	тыс.руб.	<b>4,29</b>	<b>660660</b>

### 1.5.2. Определение цены готовой продукции

Цену продукта определяем по формуле:

$$Ц = C \cdot (1 + P/100);$$

$$Ц = 68,9748 \cdot 1,25 = 86,2185;$$

C – полная себестоимость единицы готовой продукции;

P – рентабельность продукции (25%);

Поскольку цена за 1 тонну продукции уменьшилась незначительно, примем ее равной 92,1734 тыс. руб./т. – цена при текущем годовом производстве.

### 1.5.3. Анализ безубыточности при увеличении производительности на 10%

Определение точки безубыточности аналитическим способом:

$$Q_{кр} = \frac{Изд_{пост}}{Ц_{1тн} - Изд_{пер}}$$

$$Q_{кр} = 661416,956 / (86,2185 - 68,9748) = 38365 \text{ т.}$$

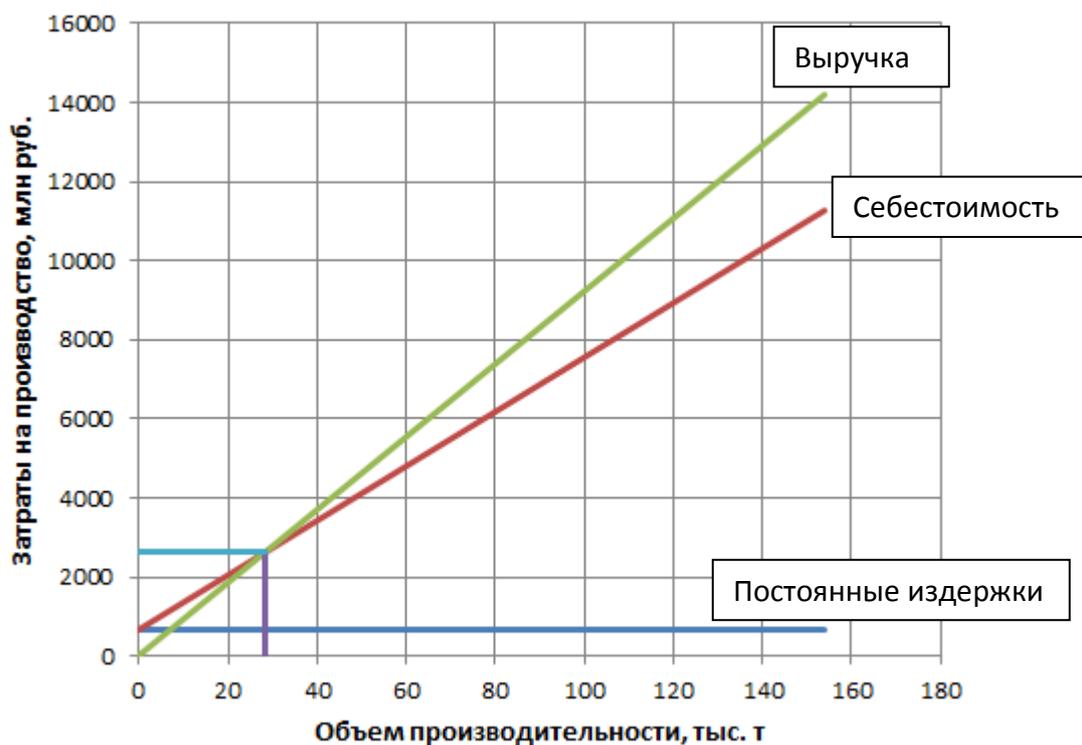


Рисунок 2 – График безубыточности производства при повышении загрузки на 10%

Таблица 12 – Техничко-экономические показатели

Наименование показателя	Ед.изм.	Отчетный год	Плановый год
1. Объем производства	т	140000	154000
2. Объем продаж	т	140000	154000
3. Цена 1 тонны	тыс.руб.	86,2185	86,2185
4. Выручка от продажи (2*3)	тыс.руб.	12070590	13277649
5. Суммарные издержки	тыс.руб.	10323418,98	10429400,8
5.1. Издержки переменные	тыс.руб.	9662002,02	10622122,02
5.2. Издержки постоянные	тыс.руб.	661416,956	661416,956
6. Операционная прибыль (4-5)	тыс.руб.	1747174,1	11457165,7
7. Налог на прибыль (6*20%)	тыс.руб.	349434,82	2291433,14
8. Чистая прибыль (6-7)	тыс.руб.	1397739,28	9165732,56
9. Себестоимость 1 тонны	тыс.руб.	69,0143	68,9748
10. Стоимость основных средств	тыс.руб.	211700	211700
11. Численность основных рабочих	чел.	33	33
12. Фондовооруженность (10/11)	тыс.руб./чел	6415,15	6415,15
13. Фондоотдача (4/10)	руб./руб.	57,01	62,719
14. Фондоёмкость (10/4)	руб./руб.	0,01753	0,0159
15. Производительность труда	тыс.руб./чел	365775,45	402353

(4/11)			
16. Рентабельность производства (8*100%/5)	%	13,53	87,88
17. Рентабельность продаж (8*100%/4)	%	11,579	69,03
18. Критический объем продаж(Qкр)	тыс.т.	38,365	38,365
19.Критический объем продаж(Qкр)	тыс.руб.	38365	38365

Вывод:

В результате увеличения загрузки производственной мощности на 10% и, соответственно, использования «эффект масштаба», мы получили следующий экономический эффект:

1. Снижение себестоимости на 1 тонну с 73,74 тыс. руб. по 73,27 тыс. руб. (на 0,64%);
2. Увеличение выручки от продажи с 12904273,73 тыс. руб. по 14194701,1 тыс. руб. (на 10%);
3. Увеличение чистой прибыли с 2064683,796 тыс. руб. по 2328929,696 тыс. руб. (на 12,8%);
4. Увеличение выплат по налогам с 516170,95 тыс. руб. по 582232,42 тыс. руб. (на 12,8%);
5. Увеличение показателя фондоотдачи с 60,96 руб./руб. по 67,05 руб./руб. (на 10%);
6. Увеличение производительности труда с 391038,60 тыс. руб./чел. по 430142,4575 тыс. руб./чел. (на 10%);
7. Увеличение рентабельности производства с 20% по 20,6401%;
8. Увеличение рентабельности продаж с 16% по 16,4070%;
9. Точка безубыточности снизилась с 28559,7 тонн до 28511,07 тонн.

## 14. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проделанной работы были проведены технологический расчет, целью которого явилось определение поверхности теплообмена, а также подбор штуцеров. Конструктивно-механический расчет, где мы рассчитали на прочность цилиндрическую обечайку и эллиптические днища, был произведен расчет укрепления отверстий, выяснили, что укрепление отверстий не требуется. была проведена проверка фланцевых соединений на прочность и герметичность и подобраны опоры.

Выбрана и рассчитана изоляция теплообменника. Произведен гидравлический расчет данного теплообменника.

В разделе социальная ответственность были рассмотрены производственная безопасность, экологическая безопасность, безопасность в чрезвычайных ситуациях и правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.

В разделе финансовый менеджмент, ресурсо эффективность и ресурсосбережение мы провели расчет с учетом производительности на 10%.

## Список литературы.

1. Дытнерский Ю.И. Основные процессы и аппараты химической технологии: Пособие по проектированию - 5-е изд., стереотипное. - М.: ООО ИД «Альянс», 2010. 496 с.
2. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники/1967 год.
3. Теплотехнический справочник в двух томах под общ. ред. В.Н.Юренева и П.Д.Лебедева/Том 1/Москва/1975 год.
4. Генкин А.Э. и Ю.И. Макаров/Технологическое оборудование нефтеперерабатывающих и химических заводов,2-еизд. перераб. и доп.- е/Москва1976 год.
5. И.В. Доманский/Машины и аппараты химических производств/Примеры и задачи/Ленинград,1992 год.
6. ГОСТ Р 52857.1-2007 Общие требования.
7. Коррозионная стойкость оборудования химических производств/ Нефтеперерабатывающая промышленность, справочное руководство под ред. А.М.Сухотина/ Ленинград, 1990 год.
8. [http://www.splav-kharkov.com/mat\\_start.php?name\\_id=1411](http://www.splav-kharkov.com/mat_start.php?name_id=1411)
9. ГОСТ 11068-81. Трубы электросварные из коррозионостойкой стали. Технические условия.
10. ГОСТ Р 52857.3-2007. Нормы и методы расчета на прочность. Укрепление отверстий в днищах и обечайках при внутреннем и внешнем давлениях. Расчет на прочность обечаек и днищ при внешних статических нагрузках на штуцер.
11. Лазинский А.А., Толчинский А.Р. Основы конструирования и расчета химической аппаратуры. М.: ООО ИД«Альянс», 2008. 752 с.
12. Расчет и конструирование машин и аппаратов химических производств/ Примеры и задачи под общей редакцией д.т.н. проф. М.Ф.Михалева.
13. В.Н.Стабников. Ректификационные колонны. Расчет и конструирование.Москва/1965 год.
14. О.К.Семакина. Машины и аппараты химических производств. Учебное пособие/часть1/ Томск2003.

15. ГОСТ Р 57274-99. Сосуды и аппараты. Аппараты колонного типа/ Нормы и методы расчета на прочность.
16. Разделение воздуха методом шлубокого охлаждения - 2-е изд./под ред. Е.И.Епифановой, Л.С. Аксельдора, т.2- М.: Металлургия, 1973.-568 с.
17. Павлов К.Ф, Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии: Учебное пособие для вузов 14-еизд., стереотипное. - М.: ООО ИД«Альянс», 2007. 576 с.
18. <http://www.nerjstal.ru/markistali/66-otechestvennye/247-12x18h10t/>
19. ГОСТ 8732-78. Трубы стальные бесшовные горячедеформированные. Сортамент.
20. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Жидкий\\_кислород](https://ru.wikipedia.org/wiki/Жидкий_кислород)