

Школа Инженерная школа новых производственных технологий  
 Направление подготовки 18.03.01 химическая технология  
 Отделение школы (НОЦ) Научно-образовательный центр Н.М.Кижнера

### БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы <b>Разработка основного массообменного оборудования установки получения кислорода</b>
--

УДК 66.023.23:665.637.048

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4Г8Б	Кузьмин Михаил Русланович		

Руководитель ВКР

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

### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Кашук И.В	к.т.н доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Черемискина М.С			

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Ревва И.Б	к.т.н доцент		

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

**Инженерная школа новых производственных технологий**  
 Отделение школы (НОЦ) **Научно-образовательный центр Н. М. Кижнера**  
 Направление подготовки **18.03.01 Химическая технология**  
 Профиль **Машины и аппараты химических производств**

УТВЕРЖДАЮ:  
 Руководитель ООП  
 \_\_\_\_\_ Ревва И.Б.  
 (Подпись)    (Дата)    (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Бакалаврской работы
---------------------

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

Студенту:

Группа	ФИО
4Г8Б	Кузьмин Михаил Русланович

Тема работы:

Разработка основного массообменного оборудования установки получения кислорода	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	11.04.2022, №101-21/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:

--

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<p><b>Исходные данные к работе</b></p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или 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><i>Действующая установка получения жидкого кислорода АО «СДС Азот» производительностью по исходной смеси 0.347 м<sup>3</sup>/с</i></p> <p><i>Рабочее давление 0.7 МПа</i></p> <p><i>Выполнить подбор конструкции и провести технологический, тепловой и механический расчеты ректификационной колонны</i></p>
---	--

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b></p> <p><i>(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).</i></p>	<p>Реферат</p> <p>Введение</p> <p>1. Описание технологической схемы</p> <p>2. Технологический расчет ректификационной колонны</p> <p>3. Механический расчет</p> <p>4. Тепловой расчет</p> <p>5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p> <p>6. Социальная ответственность</p> <p>Заключение</p> <p>Список литературы</p>
<p><b>Перечень графического материала</b></p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>Лист 1 – Технологическая схема (А1).</p> <p>Лист 2– Общий вид ректификационной колонны (А0).</p>

**Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы**

*(с указанием разделов)*

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Кашук Ирина Вадимовна
Социальная ответственность	Черемискина Мария Сергеевна

**Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:**

--

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
--	--

**Задание выдал руководитель / консультант (при наличии):**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Балмашнов Михаил Александрович			

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4Г8Б	Кузьмин Михаил Русланович		

Планируемые результаты обучения по ООП 18.03.01 «Химическая технология»  
выпуска 2022 г.

Код компетенции	Наименование компетенции
<b>Универсальные компетенции</b>	
УК(У)-1	Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач
УК(У)-2	Способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений
УК(У)-3	Способен осуществлять социальное взаимодействие и реализовывать свою роль в команде
УК(У)-4	Способен осуществлять деловую коммуникацию в устной и письменной формах на государственном языке Российской Федерации и иностранном(-ых) языке(-ах)
УК(У)-5	Способен воспринимать межкультурное разнообразие общества в социально-историческом, этическом и философском контекстах
УК(У)-6	Способен управлять своим временем, выстраивать и реализовывать траекторию саморазвития на основе принципов образования в течение всей жизни
УК(У)-7	Способен поддерживать должный уровень физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности
УК(У)-8	Способен создавать и поддерживать безопасные условия жизнедеятельности, в том числе при возникновении чрезвычайных ситуаций
УК(У)-9	Способен проявлять предприимчивость в профессиональной деятельности, в т.ч. в рамках разработки коммерчески перспективного продукта на основе научно-технической идеи
<b>Общепрофессиональные компетенции</b>	
ОПК(У)-1	Способен и готов использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности
ОПК(У)-2	Готов использовать знания о современной физической картине мира, пространственно-временных закономерностях, строении вещества для понимания окружающего мира и явлений природы
ОПК(У)-3	Готов использовать знания о строении вещества, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире

ОПК(У)-4	Владеет пониманием сущности и значения информации в развитии современного информационного общества, осознанием опасности и угрозы, возникающих в этом процессе, способностью соблюдать основные требования информационной безопасности, в том числе защиты государственной тайны
ОПК(У)-5	Владеет основными методами, способами и средствами получения, хранения, переработки информации, навыками работы с компьютером как средством управления информацией
ОПК(У)-6	Владеет основными методами защиты производственного персонала и населения от возможных последствий аварий, катастроф, стихийных бедствий
<b>Профессиональные компетенции</b>	
<i>производственно-технологическая деятельность</i>	
ПК(У)-1	Способен и готов осуществлять технологический процесс в соответствии с регламентом и использовать технические средства для измерения основных параметров технологического процесса, свойств сырья и продукции
ПК(У)-2	Готов применять аналитические и численные методы решения поставленных задач, использовать современные информационные технологии, проводить обработку информации с использованием прикладных программных средств сферы профессиональной деятельности, использовать сетевые компьютерные технологии и базы данных в своей профессиональной области, пакеты прикладных программ для расчета технологических параметров оборудования
ПК(У)-3	Готов использовать нормативные документы по качеству, стандартизации и сертификации продуктов и изделий, элементы экономического анализа в практической деятельности
ПК(У)-4	Способен принимать конкретные технические решения при разработке технологических процессов, выбирать технические средства и технологии с учетом экологических последствий их применения
ПК(У)-5	Способен использовать правила техники безопасности, производственной санитарии, пожарной безопасности и нормы охраны труда, измерять и оценивать параметры производственного микроклимата, уровня запыленности и загазованности, шума, и вибрации, освещенности рабочих мест
ПК(У)-6	Способен налаживать, настраивать и осуществлять проверку оборудования и программных средств

ПК(У)-7	Способен проверять техническое состояние, организовывать профилактические осмотры и текущий ремонт оборудования, готовить оборудование к ремонту и принимать оборудование из ремонта
ПК(У)-8	Готов к освоению и эксплуатации вновь вводимого оборудования
ПК(У)-9	Способен анализировать техническую документацию, подбирать оборудование, готовить заявки на приобретение и ремонт оборудования
ПК(У)-10	Способен проводить анализ сырья, материалов и готовой продукции, осуществлять оценку результатов анализа
ПК(У)-11	Способен выявлять и устранять отклонения от режимов работы технологического оборудования и параметров технологического процесса
<b><i>проектная деятельность</i></b>	
ПК(У)-21	Готов разрабатывать проекты в составе авторского коллектива
ПК(У)-22	Готов использовать информационные технологии при разработке проектов
ПК(У)-23	Способен проектировать технологические процессы с использованием автоматизированных систем технологической подготовки производства в составе авторского коллектива

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И  
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
4Г8Б	Кузьмин Михаил Русланович

<b>Школа</b>	<b>Инженерная школа новых производственных технологий</b>	<b>Отделение школы (НОЦ)</b>	<b>Химическая технология</b>
<b>Уровень образования</b>	<b>Бакалавр</b>	<b>Направление/специальность</b>	<b>Машины и аппараты химических производств</b>

**Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:**

1. Стоимость ресурсов проекта: материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	<i>Работа с информацией, представленной в российских и иностранных научных публикациях, аналитических материалах, статических бюллетенях и изданиях, нормативно-правовых документах; анкетирование; опрос.</i>
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала проекта	<i>Проведение предпроектного анализа. Определение целевого рынка и проведение его сегментирования. Выполнение SWOT-анализа проекта</i>
2. Разработка устава научно-технического проекта	<i>Определение целей и ожиданий, требований проекта. Определение заинтересованных сторон и их ожиданий.</i>
3. Планирование процесса управления проектом: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок	<i>Определение производственной мощности. Расчет сырья, материалов, оборудования, фонда оплаты труда. Расчет себестоимости готового продукта. Расчет точки безубыточности.</i>

**Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):**

1. Расчет точки безубыточности графическим и математическим методами.
2. Расчет технико-экономических показателей

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	
---	--

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент	Кашук Ирина Владимировна	Кандидат технических наук наук		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
4Г8Б	Кузьмин Михаил Русланович		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

<b>Группа</b>		<b>ФИО (полностью)</b>	
4Г8Б		Кузьмин Михаил Русланович	
<b>Школа</b>	<b>ИШНПТ</b>	<b>Отделение (НОЦ)</b>	<b>НОЦ Н.М. Кижнера</b>
<b>Уровень образования</b>	<b>Бакалавриат</b>	<b>Направление/специальность</b>	<b>18.03.01 Химическая технология</b>

Тема ВКР:

<b>Разработка основного массообменного оборудования установки получения кислорода</b>	
<b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>	
<b>Введение</b> <b>Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика) и области его применения.</b> <b>Описание рабочей зоны (рабочего места) при эксплуатации</b>	<p>Объект исследования: ректификационная колонна установки получения кислорода.</p> <p>Область применения: химическая промышленность</p> <p>Рабочая зона: производственное помещение, КООАО «Азот», г. Кемерово</p> <p>Размеры помещения: 125 × 90 м.</p> <p>Количество и наименование оборудования рабочей зоны:</p> <p>Реактор -1 шт, теплообменник – 1 шт, турбовоздуходувка – 1 шт, испаритель – 1 шт, насос – 1 шт.</p> <p>Рабочие процессы, связанные с объектом исследования, осуществляющиеся в рабочей зоне: ведение технологического процесса на установке, монтаж и ремонт оборудования.</p>
<b>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</b>	
<b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности при эксплуатации: специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</b>	<p>"Трудовой кодекс Российской Федерации" от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 25.02.2022) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.03.2022)</p> <p>ГОСТ 12.2.049-80 ССБТ. Оборудование производственное. Общие эргономические требования.</p> <p>ГОСТ Р ИСО 14738-2007. Безопасность машин. Антропометрические требования при проектировании рабочих мест машин</p>
<b>2. Производственная безопасность при эксплуатации: Анализ выявленных вредных и опасных производственных факторов</b>	<p>Вредные производственные факторы в рабочей зоне при эксплуатации оборудования:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Повышенный уровень шума;</li> <li>- Токсические химические вещества.</li> </ul> <p>Опасные производственные факторы в рабочей зоне при эксплуатации оборудования:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Электробезопасность (вероятность поражения электрическим током, токоотводящие части электрооборудования).</li> </ul>

	<p>Требуемые средства коллективной и индивидуальной защиты от выявленных факторов:</p> <p>Средства индивидуальной защиты, спец. одежда(наушники, беруши, защитные очки)</p> <p>Протяжно-вытяжная вентиляция</p> <p>На сдувах в атмосферу спец. уловители</p> <p>Аварийные шкафы с противогАЗами</p>
<p><b>3. Экологическая безопасность при эксплуатации</b></p>	<p>Воздействие на селитебную зону: нет(производство располагается вне селитебной зоны).</p> <p>Воздействие на литосферу: твёрдые отходы - отработанный цеолит Naх; жидкие отходы - отработанное масло после компрессоров, детандера и влагоотделителей.</p> <p>Воздействие на гидросферу: вода, отводимая от охлаждения компрессоров, конечных холодильников и испарителей.</p> <p>Воздействие на атмосферу: Выбросы из кислородной фракции разделения воздуха; влажного воздуха после регенерации цеолита в блоке очистки воздуха.</p>
<p><b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях при эксплуатации</b></p>	<p>Возможные ЧС: пожар на рабочей площадке, взрыв газа в установке из-за накопления в перерабатываемом воздухе взрывоопасных примесей.</p> <p>Наиболее типичная ЧС: накопление взрывоопасных примесей, содержащихся в перерабатываемом воздухе.</p>
<p>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</p>	

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ООД	Черемискина М.С.			15.05.2022

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4Г8Б	Кузьмин Михаил Русланович		15.05.2022

## РЕФЕРАТ

Работа посвящена разработке основного массообменного оборудования установки разделения воздуха на производстве АО «СДС Азот».

В дипломной работе произведены технологический, тепловой и механический расчеты проектируемой ректификационной колонны.

В разделе «Социальная ответственность» рассмотрены вредные и опасные факторы работы в цеху, техника безопасности работы на установке.

Раздел «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» включает в себя SWOT анализ, расчет себестоимости получаемого продукта и рентабельности производства, а также конкурентный анализ.

Ключевые слова: ректификационная колонна, кислород, тарелки, ректификация.

## ABSTRACT

The work is devoted to the development of the main mass-exchange equipment of the air separation unit at the production of JSC "SDS Azot".

In the thesis technological, thermal and mechanical calculations of the projected rectification column were made.

In the section "Social Responsibility" considered harmful and dangerous factors of work in the shop, the safety of work on the installation.

Section "Financial management, resource efficiency and resource-saving" includes SWOT analysis, calculation of prime cost and profitability of production, as well as competitive analysis.

Key words: rectification column, oxygen, plates, rectification.

## Оглавление

Введение.....	13
1 Описание технологической схемы .....	14
2 Технологический расчет колонны.....	21
2.1 Определение оптимального флегмового числа .....	22
2.2 Определение действительного числа тарелок .....	31
2.3 Определение высоты колонны .....	31
3 Тепловой расчет .....	33
4 Механический расчет колонны .....	34
4.1 Расчетное давление .....	34
4.2 Расчет толщины эллиптической крышки и днища.....	36
4.3 Сливные и переливные перегородки.....	37
4.4 Расчет тарелок.....	38
4.5 Определение диаметра патрубка для исходной смеси .....	40
4.6 Определение диаметра патрубка для отвода кубовой жидкости.....	40
4.7 Определение диаметра патрубка для отвода пара-дистиллята .....	41
4.8 Укрепление отверстий .....	42
4.9 Расчет фланцевого соединения .....	50
4.10 Корпус колонного аппарата.....	62
5 Расчет опорной обечайки.....	65
5.1 Расчет анкерных болтов .....	78
6 Гидравлический расчет .....	79
7 Расчет тепловой изоляции .....	81
8 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение .....	82
9 Социальная ответственность .....	100

Заключение.....	111
Список использованной литературы .....	112

## Введение

Ректификация – разделение жидких однородных смесей на составляющие вещества или группы составляющих веществ в результате взаимодействия паровой смеси и жидкой смеси. Это массообменный процесс, который осуществляется в большинстве случаев в противоточных колонных аппаратах с контактными элементами (насадки, тарелки, колпачки).

Возможность разделения жидкой смеси на составляющие её компоненты ректификацией обусловлена тем, что состав пара, образующегося над жидкой смесью, отличается от состава жидкой смеси в условиях равновесного состояния пара и жидкости.

В данной работе процесс ректификации касается атмосферного воздуха.

Атмосферный воздух представляет собой смесь из азота, кислорода, аргона и прочих газов, не связанных между собой химически. Можно приближенно сказать, что это смесь только азота и кислорода, так как остальные составляющие в сумме дают  $<1\%$ .

Разделение воздуха является достаточно сложной технической задачей, особенно если он находится в газообразном состоянии. Этот процесс становится проще при предварительном переводе воздуха в жидкое состояние сжатием, расширением и охлаждением, а затем уже осуществляется 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 испарять, то сначала будет испаряться преимущественно азот, обладающий более низкой температурой кипения. По мере улетучивания азота жидкость будет обогащаться кислородом. Этот способ называется глубокой конденсацией, так как он основан на охлаждении воздуха до очень низких температур.

## 1 Описание технологической схемы

Общие сведения об установке.

На установке используется цикл среднего давления с расширением воздуха в турбодетандере. Холодная рекуперация осуществляется в витых трубчатых теплообменниках, разделение воздуха осуществляется в колонне двойной ректификации. Сушка и очистка воздуха от углекислого газа и углеводородов осуществляется в блоке очистки цеолитов. Предварительное охлаждение воздуха перед блоком очистки осуществляется в теплообменниках за счет холода обратных потоков.

Ниже приведено описание работы установки во всех режимах. Обозначение аппаратов указывается в соответствии с монтажно-технологической схемой.

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>). В влагоотделителе A12 из него удаляется нежелательная влага и далее 63% воздуха поступает в теплообменник A15, где охлаждается кислородом и фракция поступает от 313К (40°C) [при работе в тропиках от 323К ( 50°C)] до 281К (8°C). Остальной воздух охлаждается обратным потоком азота в теплообменнике A16 до той же температуры.

Пройдя теплообменники A15 и A16, воздух соединяется в один поток, проходит влагоотделитель A13 и теплообменник A17 с помощью которого поддерживается постоянная температура перед блоком очистки - 281К (8°C).

В теплообменнике A17 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...280К (4...7°C) включением и отключением холодильной машины.

Наличие в схеме теплообменника A17 позволяет фиксировать пиковые тепловые нагрузки, возникающие в момент переключения абсорберов блока очистки, когда происходит временное поднятие температуры сухого воздуха до 305К (32°C).

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

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

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

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

В нижней колонне воздух разделяется на обогащённую кислородом кубовую жидкость чистотой 23,5%  $O_2$  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 через переохладитель А6, охлаждается с 98К (-175°C) до 89К (-184°C), дросселируется через клапан 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 финальное 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, после чего подаётся потребителю.

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

## 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>).

## Режим III

- главное отличие от режима I то, что переохлажденный кислород сливается из установки в ёмкость, при этом насос сжиженных газов выключается. Давление воздуха после компрессора в этом режиме 6,9 МПа (70 кгс/см).

## Режим IV

- получение жидкого и газообразного азота особой чистоты. В этом режиме часть переохлаждённой азотной флегмы подаётся потребителю.

Насос Н1 отключен. Давление после компрессоров 5,9 МПа (60 кгс/см<sup>-</sup>). В этом режиме обеспечивается слив жидкого кислорода из конденсатора АЗ 1 В теплообменник А18. Это необходимо для своевременного удаления ацетилен 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.

## Режим V

- получение кислорода I -ого сорта под давлением 2,45 МПа (25 кгс/см<sup>-</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 ). Давление воздуха после компрессоров 6,9 МПа (70 кгс/см ). Описание технологической схемы блока

очистки. Воздух с температурой 281К (8°C) 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.

Адсорбер представляет собой пару цилиндров, соединенных между собой трубопроводами и работающих параллельно. Цилиндры заполнены адсорбентом - цеолитом NaX. Насыщение цеолитов влагой и углекислым газом происходит до определенного предела. Адсорбционная способность цеолита восстанавливается при нагревании адсорбента, регенерирующий газ - сухая фракция.

При работе одного из адсорберов в режиме очистки воздуха процессы десорбции и охлаждения адсорбента проходят последовательно во втором адсорбере. Регенерирующий газ в количестве 200 м<sup>3</sup>/ч, нагретый электронагревателем А19 до температуры 673К (400°C), проходит через адсорбер сверху вниз. При достижении температуры регенерирующего газа на выходе из адсорбера 473К (200°C) электронагреватель отключается и адсорбер охлаждается тем же регенерирующим газом, но в количестве 420 м<sup>3</sup>/ч. Клапан ВР-101 служит для плавного изменения давления в адсорбере, а продувочные клапаны ВР-102 и ВР-103 — для плавного сброса давления. Циклическая схема блока очистки представлена на рис. 40.

Пневмоконтур пультов управления и мембранные приводы регулирующей арматуры питаются специально подготовленным воздухом согласно конструкции станции. Допускается отбор 80 м<sup>3</sup> сжатого воздуха после блока очистки через вентиль ВЗ-20, при этом производительность установки на всех режимах снижается на 5 %. При заборе воздуха для целей КИПиА после блока очистки возможны следующие варианты снабжения КИПиА воздухом.

1. Воздух из вентиля ВЗ -20 поступает в ресивер высокого давления Рраб > 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  $P_{раб} = 8 \text{ кгс/см}^2$ . Ресивер должен быть снабжён предохранительным клапаном на  $8 \text{ кгс/см}^2$ . Затем через стабилизатор воздух подаётся в систему КИПиА. Ресивер и редукторы в комплект поставки не входят.

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 -  $0,25 \text{ кгс/см}^2$ ; температура -  $20^\circ\text{C}$ , количество не менее  $200 \text{ м}^3/\text{ч}$ . 20

#### Блок разделения

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

Блок разделения включает верхнюю и нижнюю ректификационные колонны, конденсатор; четыре переохладителя, два теплообменника, турбодетандер, насос сжиженного газа, фильтры, арматура, КИПиА.

Все устройства размещены в кожухе. Нижняя часть корпуса представляет собой жесткий стальной каркас, обшитый гофрированными листами толщиной  $2,5 \text{ мм}$ . На кожухе имеются съемные щитки, обеспечивающие доступ к приборам для их осмотра и мелкого ремонта. Верхняя часть корпуса представляет собой цилиндрический сварной ящик толщиной  $4 \text{ мм}$ , соединенный с нижней частью болтами. Внутри царги находится верхняя колонна. Её верхняя часть крепится к царге с помощью хомута и четырех талрепов, обеспечивающих её центрирование.

Большая часть арматуры расположена на передней панели блока сепарации, за исключением сливных вентилях, расположенных на боковых

стенках блока, расположенных снаружи здания. Продувочный и нагревательный клапаны расположены в нижней части передней панели. Над клапанами продувки, в специальном коробе, расположены дроссельные клапаны хладагента с подпружиненными мембранными приводами и запорная арматура. Над коробкой с клапанами расположен турбодетандер Тд, крепящийся непосредственно к листу лицевой панели, и расположен отсек с детандерным воздушным фильтром А9, электромагнитным клапаном ПР (см. руководство по эксплуатации турбодетандера) и обратным клапаном ОКИ. в этом. Отсек закрыт съемной крышкой, его свободное пространство заполнено теплоизоляционным материалом - из базальтового волокна. Над отсеком турбодетандера находится панель с манометрами, а над ней - вентили на импульсных линиях для измерения концентрации, сопротивления, уровня, давления. Сверху расположены предохранительные клапаны, соединенные с общим выпускным коллектором.

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.

Насос сжиженного газа находится в специальном кожухе, расположенном рядом с блоком сепарации и подсоединенным к нему адаптером. Корпус насоса и переходник имеют съемные крышки, обеспечивающие свободный доступ к насосу и трубам, проходящим через переходник. В корпусе насоса расположены: насосно-цилиндровая группа, фильтр жидкого кислорода А10, фильтр на линии утечки. Все насосы к обратному клапану ОК2. Все свободное пространство в корпусе насоса и адаптере заполнено теплоизоляционным материалом - минеральной ватой 100 марки.

## 2 Технологический расчет колонны

Производительность по исходной смеси, м<sup>3</sup>/с  $G_f := \frac{1250}{3600} = 0.347$

Состав исходной смеси, %  $x_{fv} := 70$

Состав дистиллята, %  $x_{pv} := 99.999$

Состав кубового остатка, %  $x_{wv} := 0.01$

Рабочее давление в колонне, МПа  $P := 0.7$

Пробное давление в колонне, МПа  $P_{пр} := 0.96$

Плотность воздуха(ж) при -172 С (вход в колонну), кг/м<sup>3</sup>  $\rho_v := 763$

$T_0 := 273$  К

$P_0 := 0.1$  МПа

### Решение

Объемный расход

$$G_p := \frac{G_f \cdot (x_{fv} - x_{wv})}{x_{pv} - x_{wv}} = 0.243 \quad \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

$$G_w := G_f - G_p = 0.104 \quad \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

Пересчет на мольные доли

$$M_{N_2} := 28 \quad M_{O_2} := 32$$

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

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

$$x_w := \frac{\frac{x_{wv}}{M_{N_2}}}{\frac{x_{wv}}{M_{N_2}} + \frac{100 - x_{wv}}{M_{O_2}}} = 1.143 \times 10^{-4}$$

Относительный мольный расход питания

$$F := \frac{x_p - x_w}{x_f - x_w} = 1.375$$

Определяем минимальное число флегмы

$y_f := 0.857$  по  $t$ - $x$ , $y$  диаграмме мольная доля азота в паре, равновесном с жидкостью питания.

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

## 2.1 Определение оптимального флегмового числа

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  $\beta$ .

На оси ординат откладываем отрезок  $B$ .

Рисунок 1

$$\beta := 2 \quad R := \beta \cdot R_{\min} = 2.204$$

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

$$N := 40$$

$$N \cdot (R + 1) = 128.18$$

## Рисунок 2

$$\beta := 3 \quad R := \beta \cdot R_{\min} = 3.307$$

$$B := \frac{x_p}{R + 1} = 0.232$$

$$N := 34$$

$$N \cdot (R + 1) = 146.429$$

## Рисунок 3

$$\beta := 4 \quad R := \beta \cdot R_{\min} = 4.409$$

$$B := \frac{x_p}{R + 1} = 0.185$$

$$N := 31$$

$$N \cdot (R + 1) = 167.678$$

## Рисунок 4

$$\beta := 1.5 \quad R := \beta \cdot R_{\min} = 1.653$$

$$B := \frac{x_p}{R + 1} = 0.377$$

$$N := 48$$

$$N \cdot (R + 1) = 127.362$$

## Рисунок 5

$$\beta := 1.8 \quad R := \beta \cdot R_{\min} = 1.984$$

$$B := \frac{x_p}{R + 1} = 0.335$$

$$N := 42$$

$$N \cdot (R + 1) = 125.33$$

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

При данном флегмовом числе

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

$$B := \frac{x_p}{R + 1} = 0.353$$

$$N := 45$$

Рисунок 6 у-х

Уравнение рабочих линий:

а) верхней, укрепляющей части колонны:

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

$$\frac{R}{R + 1} = 0.647$$

$$\frac{x_p}{R + 1} = 0.353$$

b=2

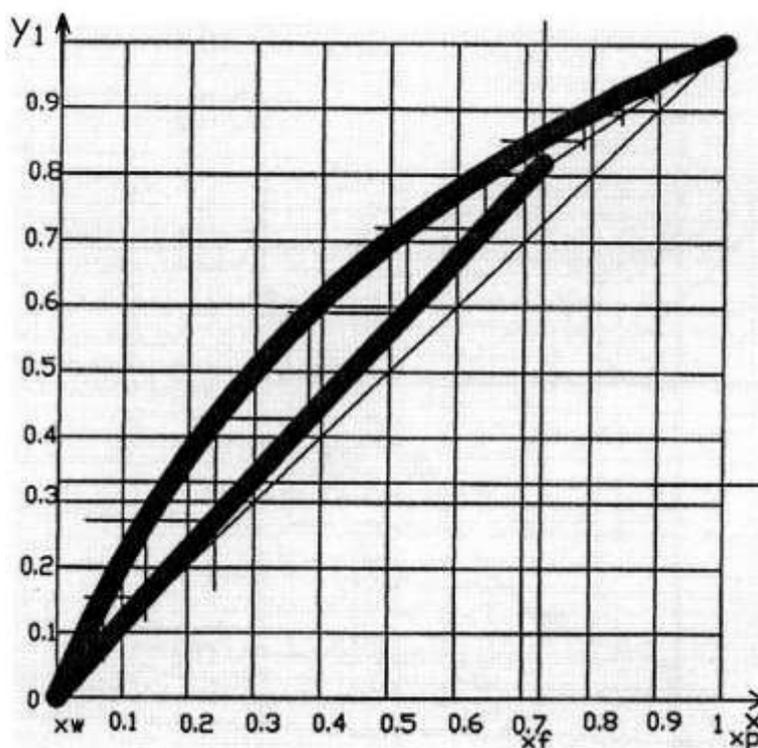


Рисунок 1. Оптимальное флегмовое число. 40 тарелок

b=3

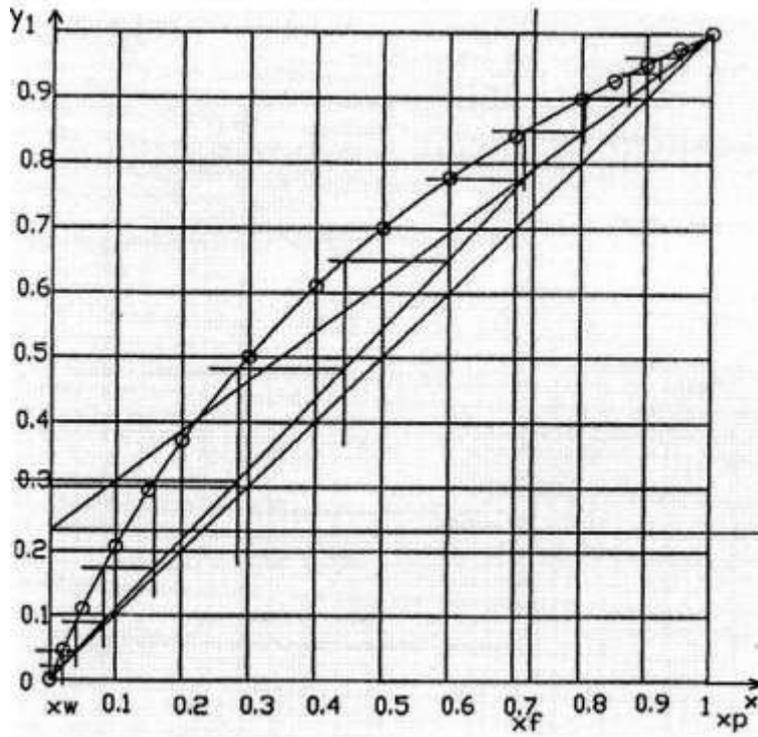


Рисунок 2. Оптимальное флегмовое число. 34 тарелок

b=4

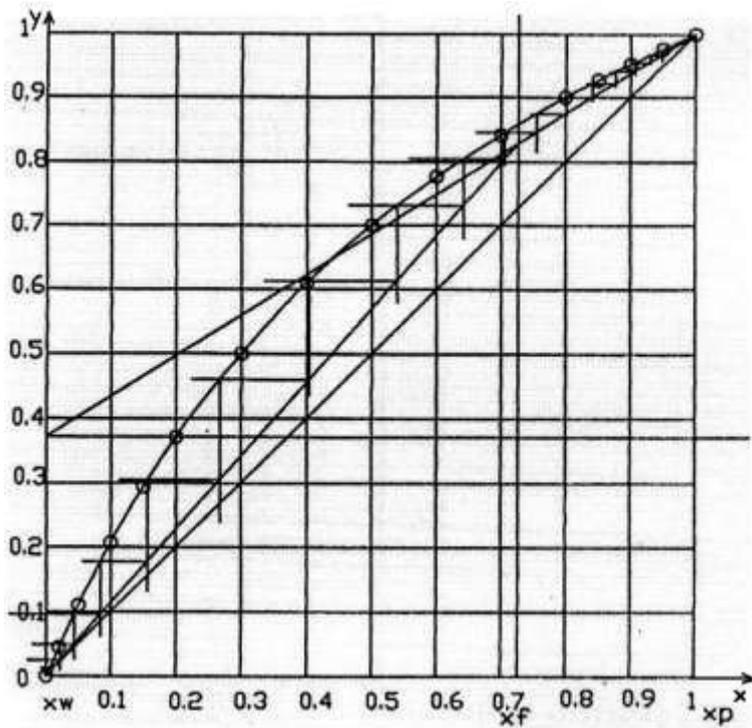


Рисунок 3. Оптимальное флегмовое число. 31 тарелка

b=1.5

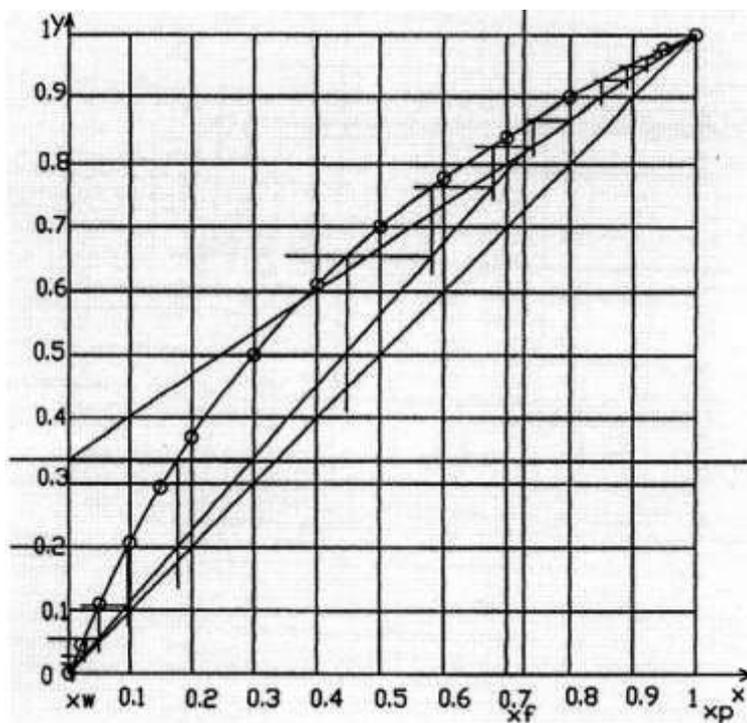


Рисунок 4. Оптимальное флегмовое число. 48 тарелок

b=1.8

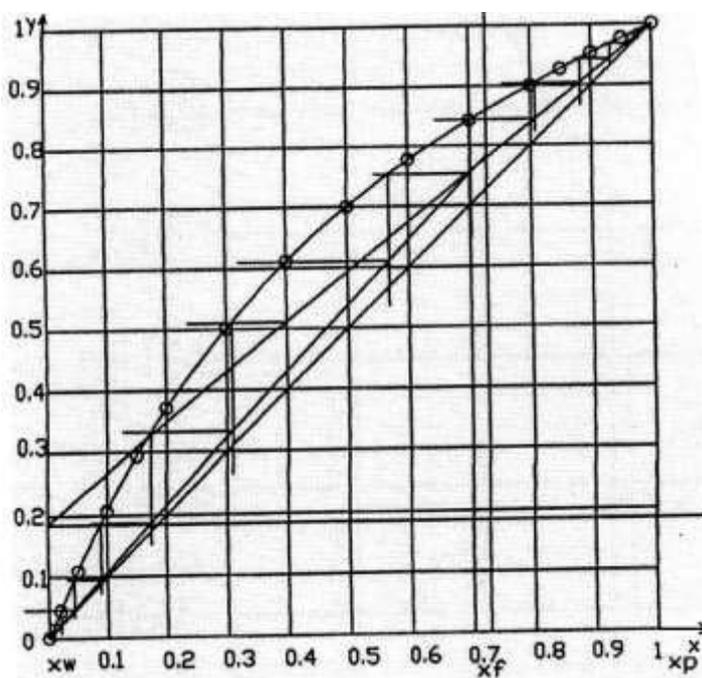


Рисунок 5. Оптимальное флегмовое число. 42 тарелки

$b=1.665$

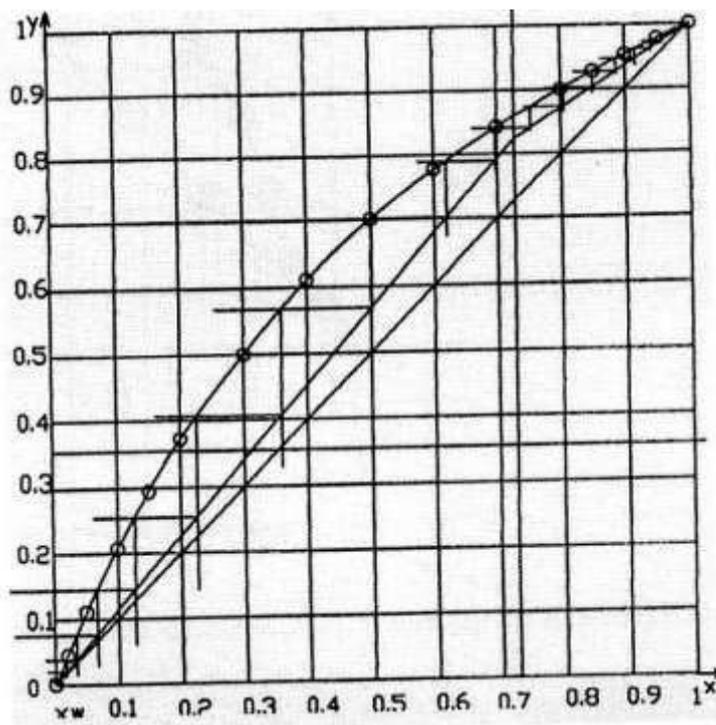


Рисунок 6. Оптимальное флегмовое число. 45 тарелок

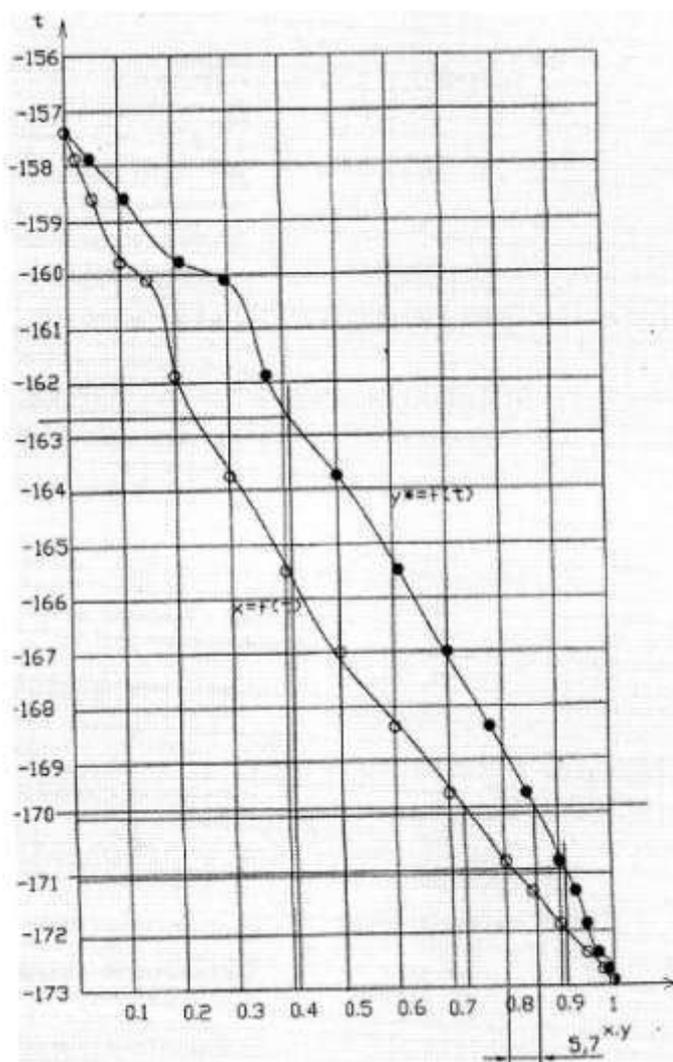


Рисунок 7. t-x, y диаграмма

б) нижней, исчерпывающей части колонны

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

Расход пара по высоте колонны:

$$G_w := G_p \cdot (R + 1) = 0.689 \quad \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

Потоки жидкости по верхней и нижней части колонны:

$$L_v := G_p \cdot R = 0.446 \quad \frac{\text{м}^3}{\text{с}} \quad L_n := G_p \cdot (R + F) = 0.78 \quad \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

Определение скорости пара и диаметра колонны

Средние концентрации жидкости:

а) в верхней части колонны

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

б) в нижней части колонны

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

Средние концентрации находим по уравнениям рабочих линий:

а) в верхней части колонны

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

б) в нижней части колонны

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

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

а) при  $y_{cr1} = 0.912$

$$t_{cr1} := -170.93 \text{ C} \quad T_{cr1} := T_0 + t_{cr1} = 102.07 \text{ K}$$

б) при  $y_{cr2} = 0.412$

$$t_{cr2} := -162.66 \text{ C} \quad T_{cr2} := T_0 + t_{cr2} = 110.34 \text{ K}$$

Средние молярные массы и плотности пара:

$$\text{а) } M_{cr1} := y_{cr1} \cdot M_{N2} + (1 - y_{cr1}) \cdot M_{O2} = 28.353 \quad \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$$

$$\rho_{cr1} := \frac{M_{cr1} \cdot T_0}{22.4 \cdot T_{cr1}} = 3.385 \quad \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$\text{б) } M_{cr2} := y_{cr2} \cdot M_{N2} + (1 - y_{cr2}) \cdot M_{O2} = 30.353 \quad \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$$

$$\rho_{cr2} := \frac{M_{cr2} \cdot T_0}{22.4 \cdot T_{cr2}} = 3.353 \quad \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Средняя плотность пара в колонне:

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

Температура вверху колонны при  $y_p=1$

$$t_p := -170.93 \text{ C} \quad T_p := t_p + T_0 = 102.07 \text{ K}$$

в кубе испарителя при  $y_w := 1$

$$t_w := -162.66 \text{ C} \quad T_w := t_w + T_0 = 110.34 \text{ K}$$

(по t-x,y диаграмме)

Плотность жидкого азота при -170 C составляет 717 кг/м<sup>3</sup>

Плотность жидкого кислорода при -162.66 C составляет 929.5 кг/м<sup>3</sup>

Принимаем среднюю плотность жидкости в колонне

$$\rho_{zh} := \frac{\rho_{N2} + \rho_{O2}}{2} = 823.25 \quad \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

## Определение скорости пара в колонне

Коэффициент  $C$ , зависящий от конструкции тарелок, расстояния между тарелками, рабочего давления в колонне, нагрузки колонны по жидкости (задаем сами):

$$C = 0.008$$

Расстояние между тарелками принимаем 200 мм:

$$h := 0.2 \text{ м}$$

$$C := 0.008$$

$$w := C \cdot \sqrt{\frac{\rho_{zh}}{\rho_p}} = 0.125 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Нахождение объемного расхода, проходящего через колонну пара

Средняя температура в колонне:

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

Мольная масса дистиллята:

$$M_p := x_p \cdot M_{N_2} + (1 - x_p) \cdot M_{O_2} = 28 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$$

Тогда объемный расход проходящего через колонну пара при средней температуре в колонне будет составлять:

$$V := \frac{G_p \cdot (R + 1) \cdot 22.4 \cdot T_{cr} \cdot P_0}{M_p \cdot T_0 \cdot P} = 0.031 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

Диаметр колонны:

$$D := \sqrt{\frac{V}{0.785 \cdot w}} = 0.559 \text{ м}$$

Принимаем  $D := 0.6 \text{ м}$

Тогда скорость пара в колонне:

$$w := \frac{V}{0.785 \cdot D^2} = 0.108 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

## 2.2 Определение действительного числа тарелок

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

Действительное число тарелок находим по формуле:

$$N_d := \frac{N}{\eta} = 90$$

Из них 58 в укрепляющей части и 32 в исчерпывающей

Принимаем большее число тарелок с запасом:

Для укрепляющей части – 59 тарелок.

Для исчерпывающей – 33 тарелки.

## 2.3 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.

Принимаем 0.8 м.

Высота части ректификационной колонны, расположенной выше верхней тарелки принимается равной (0.5-1)D.

Принимаем 0.4 м.

Высоту колонны определяем по формуле:

$$H_{\text{к}} := H_t + H_k + H_s = 19.4 \text{ м}$$

### 3 Тепловой расчет

При температуре -170.93 С

Удельные теплоты конденсации азота и кислорода в укрепляющей части колонны:

$$r_{N_2} := 170800 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \quad [\text{с.434,1}] \qquad r_{O_2} := 207200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \quad [\text{с.478,1}]$$

$$r_p := \frac{x_{pv}}{100} \cdot r_{N_2} \cdot \left(1 - \frac{x_{pv}}{100}\right) \cdot r_{O_2} = 3.539 \times 10^5 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$$

Расход теплоты, отдаваемой жидкому кислороду в конденсаторе-дефлегматоре:

$$Q_p := G_p \cdot 3600 \cdot (1 + R) \cdot r_p = 8.78 \times 10^8 \text{ Вт}$$

## 4 Механический расчет колонны

По итогам технологического расчета определен внутренний диаметр колонны - 0.6 м 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.

$$H := 19.4 \text{ м}$$

$$D = 0.6 \text{ м}$$

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

### 4.1 Расчетное давление

Рабочее давление в колонне 0.7 МПа

Гидростатическое давление:  $P_g := \rho_{zh} \cdot g \cdot H \cdot 10^{-6} = 0.157 \text{ МПа}$

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

Пробное давление при гидроиспытаниях:

$$P_r \cdot 0.005 = 3.5 \times 10^{-3} \text{ МПа}$$

$$P_{пр} := 1.25 \cdot P_r = 0.875 \text{ МПа}$$

Расчетная температура:  $t_1 := 20 \text{ С}$

Расчетная температура:  $t_1 = 20 \text{ С}$

Допускаемое напряжение стали 12Х18Н10Т при расчетной температуре:

$$t_r := 20 \text{ С}$$

$$\sigma_d := 184 \text{ МПа}$$

Коэффициент сварного шва для автоматической дуговой электросварки:

$$\phi := 1 \quad [\text{с.25,2}]$$

$$\sigma := \sigma_d \cdot \phi = 184 \text{ МПа} \quad [\text{с.11,2}]$$

При гидравлических испытаниях  $\sigma_{t20} := 240$  МПа - для стали 12Х18Н10Т  
при температуре  $t_i := 20$  С

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

Прибавка к расчетной толщине стенки:

Скорость коррозии стали 12Х18Н10Т составляет 0.005 мм/год

Срок эксплуатации ориентировочно 20 лет

Для компенсации коррозии

$$c_k := \Pi \cdot \tau = 0.1 \text{ мм}$$

Для компенсации эрозии

$$c_e := 0 \quad c_1 := c_k + c_e = 0.1 \text{ мм}$$

$$c_2 := 0 \quad c_3 := 0 \quad c := c_1 + c_2 + c_3 = 0.1 \text{ мм}$$

Принимаем  $c = 0.001$  м

Расчет толщины стенки цилиндрической обечайки:

$$s_r := \max\left(\frac{P_r \cdot D}{2 \cdot \sigma \cdot \phi - P_r}, \frac{P_r \cdot D}{2 \cdot \sigma_i \cdot \phi - P_r}\right) = 1.143 \times 10^{-3} \text{ м}$$

$$s := s_r + c = 2.143 \times 10^{-3} \text{ м}$$

Принимаем исполнительную толщину стенки  $s = 0.005$  м

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

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

Допускаемое давление в рабочем состоянии:  $p := \frac{2 \cdot \sigma \cdot \phi \cdot (S - c)}{D + S - c} = 2.437$  МПа

$$P_r = 0.7 \text{ МПа}$$

Расчетное давление в рабочем состоянии:

При испытаниях:

$$P_{pr} := \frac{2 \cdot \sigma_i \cdot \phi \cdot (S - c)}{D + S - c} = 2.89 \text{ МПа}$$

$$Usl_1 := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } P_{pr} < p_{pr} \\ \text{"Условие прочности НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_1 = \text{"Условие прочности выполняется"}$$

Вывод:

При полученной толщине стенки 5 мм обеспечивается прочность цилиндрической обечайки корпуса в рабочем состоянии и в условиях испытания.

## 4.2 Расчет толщины эллиптической крышки и днища

$$Se_r := \max\left(\frac{P_r \cdot D}{2 \cdot \sigma \cdot \phi - 0.5 \cdot P_r}, \frac{P_{pr} \cdot D}{2 \cdot \sigma_i \cdot \phi - 0.5 \cdot P_{pr}}\right) = 1.204 \times 10^{-3} \text{ м}$$

Принимаем толщину стенки 0.005 м

$$Usl_2 := \begin{cases} \text{"Условие применимости формул выполняется"} & \text{if } \frac{Se - c}{D} < 0.1 \\ \text{"Условие применимости формул НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_2 = \text{"Условие применимости формул выполняется"}$$

Допускаемое напряжение в рабочем состоянии:

$$p_{ww} := \frac{2 \cdot \sigma \cdot \phi \cdot (Se - c)}{D + 0.5 \cdot (Se - c)} = 2.445 \text{ МПа}$$

Расчетное давление  $P_r = 0.7$  МПа

$$Usl_3 := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } P < p \\ \text{"Условие прочности НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_3 = \text{"Условие прочности выполняется"}$$

При испытаниях:

$$p_i := \frac{(2 \cdot \sigma_i \cdot \phi) \cdot (Se - c)}{[D + 0.5 \cdot (Se - c)]} = 2.899 \text{ МПа}$$

Пробное давление 0.875 МПа

$$Usl_4 := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } P_{pr} < p_i \\ \text{"Условие прочности НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_4 = \text{"Условие прочности выполняется"}$$

Вывод: при исполнительной толщине эллиптической крышки и днища 5 мм условия прочности выполняются.

$$\frac{5}{600} = 8.333 \times 10^{-3} \quad \text{Следовательно, аппарат тонкостенный.}$$

### 4.3 Сливные и переливные 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 должна быть меньше сливной, чтобы обеспечить гидравлический затвор закрыть доступ пара в сливную трубу.

Высота жидкости над прорезями 5 мм

Высота сливной перегородки 20 мм

Высота переливной перегородки 1 мм

## 4.4 Расчет тарелок

### Исходные данные:

Высота слоя жидкости: 0.02 м

Плотность среды 823.25 кг/м<sup>3</sup>

Диаметр отверстий на тарелке 0.004 м

Шаг отверстий 0.012 м

Плотность материала тарелки 2750 кг/м<sup>3</sup>

Свободное сечение тарелки 8%

Прибавка к расчетной толщине стенки 0.001 м

Ускорение свободного падения 9.8 м/с

### Решение

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

Предел прочности материала АмцС при 20 С составляет 120 МПа

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

Площадь поверхности тарелки:  $F := \pi \cdot \frac{(D)^2}{4} = 0.283 \text{ м}^2$

Площадь свободного сечения тарелки  $f := F \cdot 0.08 = 0.023 \text{ м}^2$

Площадь слива для колонн диаметром 600 мм [с.213,1]:  $f_s := 0.007 \text{ м}^2$

Масса жидкости на тарелке:  $m := (F - f_s - f) \cdot h \cdot \rho_{zh} = 4.168 \text{ кг}$

Нагрузка от веса жидкости:  $Q := m \cdot g = 40.843$

Примем толщину тарелки в первом приближении равную 0.002 м

Тогда масса тарелки будет:  $m_t := (F - f_s - f) \cdot s_1 \cdot \rho_m = 1.392 \text{ кг}$

Нагрузка от веса тарелки:  $Q_t := m_t \cdot g = 13.643 \text{ Н}$

Равномерная нагрузка будет:  $\underline{\underline{P}} := \frac{Q + Q_t}{0.785 \cdot D^2} = 192.805 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$

Проверка выбранной толщины стенки:

Выбранной толщины хватает для необходимой нагрузки

Коэффициент Пуассона  $\mu := 0.3$

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

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

Прогиб в центре пластины:  $\underline{\underline{W}} := 4.08 \cdot \frac{P \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^4}{64 \cdot N} = 1.742 \times 10^{-3} \text{ м}$

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

$$\sigma_{\max} := \frac{3 \cdot P \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2}{4 \cdot N^2} = 3.986 \times 10^3 \text{ Па}$$

$$Usl_5 := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } \sigma_{\max} < \sigma_m \cdot 10^6 \\ \text{"Условие прочности НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_5 = \text{"Условие прочности выполняется"}$$

Вывод: выбранная толщина стенки 2 мм полностью удовлетворяет условиям прочности и устойчивости.

#### 4.5 Определение диаметра патрубка для исходной смеси

Плотность жидкого азота при температуре на входе -172 С

$$\rho_{\text{жN}_2} := 689 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \quad [\text{с.434,1}]$$

Плотность жидкого кислорода при температуре на входе -172 С

$$\rho_{\text{жO}_2} := 1115 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \quad [\text{с.478,1}]$$

Плотность исходной смеси:

$$\rho_f := \left( \frac{x_f}{100} + \frac{1 - x_f}{100} \right)^{-1} = 1.11 \times 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Скорость потока жидкости в штуцерах находится в интервале 0.5 – 2 м/с

Примем скорость потока исходной смеси 1.5 м/с

$$\text{Диаметр патрубка: } d_f := \sqrt{\frac{G_f}{0.785 \cdot \rho_f \cdot w_f}} = 0.016 \text{ м}$$

Принимаем трубу наружным диаметром 25 мм и толщиной стенки 2.5 мм

Наружный валет патрубка 200 мм

Внутренний вылет патрубка 50 мм

#### 4.6 Определение диаметра патрубка для отвода кубовой жидкости

Плотность жидкого азота при температуре внизу колонны:

$$t_w = -162.66 \text{ С} \quad \rho_{w\text{N}_2} := 689 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \quad [\text{с.434,1}]$$

Плотность жидкого кислорода при температуре внизу колонны:

$$t_f = -172 \text{ С} \quad \rho_{f\text{O}_2} := 1115 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \quad [\text{с.478,1}]$$

Плотность исходной смеси: 
$$\rho_w := \left( \frac{\frac{x_w}{100}}{\rho_{wN2}} + \frac{1 - \frac{x_w}{100}}{\rho_{O2}} \right)^{-1} = 1.115 \times 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Тогда диаметр патрубка:

Принимаем трубу наружным диаметром 20 и толщиной стенки 2.5 мм

Наружный валет патрубка 200 мм

Внутренний вылет патрубка 0 мм

#### 4.7 Определение диаметра патрубка для отвода пара-дистиллята

Средний мольный состав пара: 
$$y_{p,v} := 0.657 \cdot x_p + 0.343 = 1$$

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

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

Плотность пара: 
$$\rho_{p,v} := \frac{M_p \cdot T_0}{22.4 \cdot T_p} = 3.343 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Расчетный диаметр патрубка пара-дистиллята: 
$$d_p := \sqrt{\frac{G_p}{0.785 \cdot \rho_p \cdot w_p}} = 0.079 \text{ м}$$

Принимаем трубу наружным диаметром 76 и толщиной стенки 3 мм

Наружный валет патрубка 150 мм

Внутренний вылет патрубка 50 мм

Принимаем патрубки по ГОСТу:

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

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

Для предохранительного клапана принимаем патрубок, изготовленный из

труб наружным диаметром 12 мм и толщиной стенки 2 мм

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

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

#### 4.8 Укрепление отверстий

$$\underline{D} := 1000 \cdot D = 600 \text{ мм}$$

Расчетный диаметр цилиндрической обечайки:  $D_r := 0.6 \text{ м}$

$$\underline{S} := 1000 \cdot S = 5 \text{ мм}$$

$$\underline{c} := 1000 \cdot c = 1 \text{ мм}$$

Расстояние от центра укрепляемого отверстия до оси эллиптического днища

$r < 0.4 \cdot D - 0.5 \cdot (d \cdot 1000 + 2 \cdot S)$	$r_{\text{fl}} := 90 \text{ мм}$
$0.4 \cdot D - 0.5 \cdot (d_{\text{fl}} \cdot 1000 + 2 \cdot S) = 225 \text{ мм}$	$r_{\text{fl}} := 0 \text{ мм}$
$0.4 \cdot D - 0.5 \cdot (d_p \cdot 1000 + 2 \cdot S) = 195.7 \text{ мм}$	$r_{\text{otb}} := 175 \text{ мм}$
$0.4 \cdot D - 0.5 \cdot (d_{\text{otb}} \cdot 1000 + 2 \cdot S) = 22 \text{ мм}$	$r_{\text{sliv}} := 90 \text{ мм}$
$0.4 \cdot D - 0.5 \cdot (d_{\text{sliv}} \cdot 1000 + 2 \cdot S) = 215 \text{ мм}$	$r_y := 175 \text{ мм}$

В расчете параметров штуцера для уровнемера нет необходимости, поскольку его параметры совпадают с параметрами штуцера отбора азота на орошение верхней части колонны.

Расчетный диаметр эллиптического днища:

$$D_{re_{\text{д}}} := 2 \cdot D \cdot \sqrt{1 - 3 \cdot \left(\frac{r_{\text{д}}}{D}\right)^2} = 1.159 \times \text{мм}$$

$$D_{re_{\text{п}}} := 2 \cdot D \cdot \sqrt{1 - 3 \cdot \left(\frac{r_{\text{п}}}{D}\right)^2} = 1.2 \times 10 \text{ мм}$$

$$D_{re_{\text{отб}}} := 2 \cdot D \cdot \sqrt{1 - 3 \cdot \left(\frac{r_{\text{отб}}}{D}\right)^2} = 1.036 \times \text{мм}$$

$$D_{re_{\text{слив}}} := 2 \cdot D \cdot \sqrt{1 - 3 \cdot \left(\frac{r_{\text{слив}}}{D}\right)^2} = 1.159 \times 10 \text{ мм}$$

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.

$$d_{\text{ф}} := d_{\text{ф}} \cdot 1000 + 2 \cdot c = 18.299 \text{ мм}$$

$$d_{\text{пр}} := d_{\text{п}} \cdot 1000 + 2 \cdot c = 80.574 \text{ мм}$$

$$d_{\text{вр}} := d_{\text{в}} \cdot 1000 + 2 \cdot c = 10.908 \text{ мм}$$

$$d_{\text{дт}} := d_{\text{д}} \cdot 1000 + 2 \cdot c = 22 \text{ мм}$$

$$d_{\text{отбр}} := d_{\text{отб}} \cdot 1000 + 2 \cdot c = 22 \text{ мм}$$

$$d_{\text{пркр}} := d_{\text{прк}} \cdot 1000 + 2 \cdot c = 10 \text{ мм}$$

$$d_{\text{сливр}} := d_{\text{слив}} \cdot 1000 + 2 \cdot c = 42 \text{ мм}$$

Расчетные толщины стенки штуцера:

$$s_f := \frac{P_f \cdot (d_f \cdot 1000 + 2 \cdot c)}{2 \cdot \phi \cdot \sigma - P_f} = 0.035 \text{ мм}$$

$$s_{pr} := \frac{P_r \cdot (d_p \cdot 1000 + 2 \cdot c)}{2 \cdot \phi \cdot \sigma - P_r} = 0.154 \text{ мм}$$

$$s_{wr} := \frac{P_r \cdot (d_w \cdot 1000 + 2 \cdot c)}{2 \cdot \phi \cdot \sigma - P_r} = 0.021 \text{ мм}$$

$$s_{flr} := \frac{P_r \cdot (d_{fl} \cdot 1000 + 2 \cdot c)}{2 \cdot \phi \cdot \sigma - P_r} = 0.042 \text{ мм}$$

$$s_{otbr} := \frac{P_r \cdot (d_{otb} \cdot 1000 + 2 \cdot c)}{2 \cdot \phi \cdot \sigma - P_r} = 0.04 \text{ мм}$$

$$s_{prkr} := \frac{P_r \cdot (d_{prk} \cdot 1000 + 2 \cdot c)}{2 \cdot \phi \cdot \sigma - P_r} = 0.019 \text{ мм}$$

$$s_{sliv} := \frac{P_r \cdot (d_{sliv} \cdot 1000 + 2 \cdot c)}{2 \cdot \phi \cdot \sigma - P_r} = 0.08 \text{ мм}$$

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

$l1_f := 150 \text{ мм}$	$l1_{sliv} := 200 \text{ мм}$	$l1_{fl} := 90 \text{ мм}$	$l1_{otb} := 150 \text{ мм}$
$l3_f := 20 \text{ мм}$	$l3_{sliv} := 0 \text{ мм}$	$l3_{fl} := 90 \text{ мм}$	$l3_{otb} := 120 \text{ мм}$
$l1_{prk} := 60 \text{ мм}$	$l3_{prk} := 20 \text{ мм}$		

Прибавка на коррозию и эрозию  $c = 1$

Толщина стенки цилиндрической обечайки  $s = 5$

$$lf_{r1} := \min[11_f, 1.25 \cdot \sqrt{(d_f \cdot 1000 + 2 \cdot c) \cdot (S - c)}] = 10.69 \text{ мм}$$

$$lp_{r1} := \min[11_f, 1.25 \cdot \sqrt{(d_p \cdot 1000 + 2 \cdot c) \cdot (S - c)}] = 22.441 \text{ мм}$$

$$lw_{r1} := \min[11_f, 1.25 \cdot \sqrt{(d_w \cdot 1000 + 2 \cdot c) \cdot (S - c)}] = 8.25 \text{ мм}$$

$$lprk_{r1} := \min[11_{prk}, 1.25 \cdot \sqrt{(d_{pr} + 2 \cdot c) \cdot (S - c)}] = 22.718 \text{ мм}$$

$$lfl_{r1} := \min[11_d, 1.25 \cdot \sqrt{(d_d \cdot 1000 + 2 \cdot c) \cdot (S - c)}] = 11.726 \text{ мм}$$

$$lotb_{r1} := \min[11_{otb}, 1.25 \cdot \sqrt{(d_{otb} \cdot 1000 + 2 \cdot c) \cdot (S - c)}] = 11.7 \text{ мм}$$

$$lsliv_{r1} := \min[11_{sliv}, 1.25 \cdot \sqrt{(d_{sliv} \cdot 1000 + 2 \cdot c) \cdot (S - c)}] = 16.202 \text{ мм} \quad +$$

$$lf_{r3} := \min[13_f, 1.25 \cdot \sqrt{(d_f + 2 \cdot c) \cdot (S - c)}] = 3.55 \text{ мм}$$

$$lp_{r3} := \min[13_f, 1.25 \cdot \sqrt{(d_p \cdot 1000 + 2 \cdot c) \cdot (S - c)}] = 20 \text{ мм}$$

$$lw_{r3} := \min[11_f, 1.25 \cdot \sqrt{(d_w \cdot 1000 + 2 \cdot c) \cdot (S - c)}] = 8.257 \text{ мм}$$

$$lw_{r3} := \min[13_f, 1.25 \cdot \sqrt{(d_w \cdot 1000 + 2 \cdot c) \cdot (S - c)}] = 8.25 \text{ мм}$$

$$lprk_{r3} := \min[13_{prk}, 1.25 \cdot \sqrt{(d_{pr} + 2 \cdot c) \cdot (S - c)}] = 20 \text{ мм}$$

$$lsliv_{r3} := \min[11_{sliv}, 1.25 \cdot \sqrt{(d_{sliv} \cdot 1000 + 2 \cdot c) \cdot (S - c)}] = 16.202 \text{ мм}$$

$$lotb_{r3} := \min[13_{otb}, 1.25 \cdot \sqrt{(d_{otb} \cdot 1000 + 2 \cdot c) \cdot (S - c)}] = 11.7 \text{ мм}$$

$$lfl_{r3} := \min[13_d, 1.25 \cdot \sqrt{(d_d \cdot 1000 + 2 \cdot c) \cdot (S - c)}] = 11.726 \text{ мм}$$

Ширина зоны укрепления в обечайке и днище:

$$L0 := \sqrt{Dr \cdot 1000 \cdot (S - c)} = 48.99 \text{ мм}$$

$$L0e_p := \sqrt{Dre_p \cdot (S - c)} = 69.282 \text{ мм}$$

$$L0e_{sliv} := \sqrt{Dre_{sliv} \cdot (S - c)} = 68.082 \text{ мм}$$

$$L0e_d := \sqrt{Dre_d \cdot (S - c)} = 68.082 \text{ мм}$$

$$L0e_{otb} := \sqrt{Dre_{otb} \cdot (S - c)} = 64.362 \text{ мм}$$

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

$$d_{0r} := 0.4 \cdot \sqrt{D_r \cdot 1000 \cdot (S - c)} = 19.596 \text{ мм}$$

$$d_{0re} := 0.4 \cdot \sqrt{D_r \cdot 1000 \cdot (S_e \cdot 1000 - c)} = 19.596 \text{ мм}$$

$$d_{0rw} := 0.4 \cdot \sqrt{D_r \cdot 1000 \cdot (S - c)} = 19.596 \text{ мм}$$

Отверстия для штуцеров, манометра, предохранительного клапана, измерительного преобразователя в укреплении не нуждаются.

Принимаем начальную толщину укрепления 0 мм

Расчетная длина образующей оболочки в зоне укрепления:

$$L_{0r} := \sqrt{D_r \cdot 1000 \cdot (s_{yr} + S - c)} = 48.99 \text{ мм}$$

$$L_{0e_p} := \sqrt{D_{re_p} \cdot (s_{yr} + S - c)} = 69.282 \text{ мм}$$

$$L_{0e_{sliv}} := \sqrt{D_{re_{sliv}} \cdot (s_{yr} + S - c)} = 68.082 \text{ мм}$$

$$L_{0e_d} := \sqrt{D_{re_d} \cdot (s_{yr} + S - c)} = 68.082 \text{ мм}$$

$$L_{0e_{otb}} := \sqrt{D_{re_{otb}} \cdot (s_{yr} + S - c)} = 64.362 \text{ мм}$$

Расчетная толщина стенки штуцера из того же материала, что и колонна 12X18H10T:

$$s_{r_{shf}} := \frac{P_r \cdot (d_r \cdot 1000 + 2 \cdot c)}{2 \cdot \sigma \cdot \phi - P_r} = 0.035 \text{ мм}$$

$$s_{r_{shp}} := \frac{P_r \cdot (d_p \cdot 1000 + 2 \cdot c)}{2 \cdot \sigma \cdot \phi - P_r} = 0.154 \text{ мм}$$

$$s_{r_{shw}} := \frac{P_r \cdot (d_w \cdot 1000 + 2 \cdot c)}{2 \cdot \sigma \cdot \phi - P_r} = 0.021 \text{ мм}$$

$$s_{r_{shd}} := \frac{P_r \cdot (d_d \cdot 1000 + 2 \cdot c)}{2 \cdot \sigma \cdot \phi - P_r} = 0.042 \text{ мм}$$

$$s_{r_{shotb}} := \frac{P_r \cdot (d_{otb} \cdot 1000 + 2 \cdot c)}{2 \cdot \sigma \cdot \phi - P_r} = 0.042 \text{ мм}$$

$$sr_{shsliv} := \frac{P_r \cdot (d_{sliv} \cdot 1000 + 2 \cdot c)}{2 \cdot \sigma \cdot \phi - P_r} = 0.08 \quad \text{мм}$$

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

$$sr := 1000 \cdot sr = 1.143 \quad \text{мм}$$

Используем комбинированное укрепление приварным кольцом снаружи.

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

Но стенка вывода пара дистиллята  $S_{shp} := S$

Условие укрепления отверстия комбинированным укреплением:

$$A := kf_{r3} \cdot (S_{sh} - 2 \cdot c) + \sqrt{Dr \cdot 1000 \cdot (syr + S - c)} \cdot (k2 \cdot syr + S - sr - c) = 141.715$$

$$Z := (kf_{r1} + syr + S - sr - c) \cdot (0.8 \cdot S_{sh} - sr_{shf} - c) + A = 154.794$$

$$Z_z := 0.5 \cdot (d_{fr} - d_{or}) \cdot sr = -0.742$$

$$Usl_6 := \begin{cases} \text{"Условие укрепления отверстий выполняется. Приварное кольцо не требуется."} & \text{if } Z_z < Z \\ \text{"Условие укрепления отверстий НЕ выполняется. Требуется приварное кольцо."} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$Usl_6 = \text{"Условие укрепления отверстий выполняется. Приварное кольцо не требуется."}$

$$A := kf_{r3} \cdot (S_{sh} - 2 \cdot c) + \sqrt{Dre_{fr} \cdot (syr + S - c)} \cdot (k2 \cdot syr + S - sr - c) = 200.341$$

$$Z := (kf_{r1} + syr + S - sr - c) \cdot (0.8 \cdot S_{sh} - sr_{shf} - c) + A = 214.312$$

$$Z_z := 0.5 \cdot (d_{fr} - d_{or}) \cdot sr = 1.375$$

$$Usl_7 := \begin{cases} \text{"Условие укрепления отверстий выполняется. Приварное кольцо не требуется."} & \text{if } Z_z < Z \\ \text{"Условие укрепления отверстий НЕ выполняется. Требуется приварное кольцо."} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$Usl_7 = \text{"Условие укрепления отверстий выполняется. Приварное кольцо не требуется."}$

$$\underline{A}_{r3} := l_{pr3} \cdot (S_{shp} - 2 \cdot c) + \sqrt{Dre_p \cdot (syr + S - c)} \cdot (k2 \cdot syr + S - sr - c) = 257.906$$

$$\underline{Z}_{r3} := (l_{pr1} + syr + S - sr - c) \cdot (0.8 \cdot S_{shp} - sr_{shp} - c) + A = 329.913$$

$$\underline{Z}_{r3} := 0.5 \cdot (d_{pr} - d_{or}) \cdot sr = 34.863$$

$$Usl_8 := \begin{cases} \text{"Условие укрепления отверстий выполняется. Приварное кольцо не требуется."} & \text{if } Z_2 < Z \\ \text{"Условие укрепления отверстий НЕ выполняется. Требуется приварное кольцо."} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_8 = \text{"Условие укрепления отверстий выполняется. Приварное кольцо не требуется."}$$

$$\underline{A}_{sliv} := l_{sliv_{r3}} \cdot (S_{sh} - 2 \cdot c) + \sqrt{Dre_{sliv} \cdot (syr + S - c)} \cdot (k2 \cdot syr + S - sr - c) = 202.579$$

$$\underline{Z}_{sliv} := (l_{sliv_{r1}} + syr + S - sr - c) \cdot (0.8 \cdot S_{sh} - sr_{shsliv} - c) + A = 220.112$$

$$\underline{Z}_{sliv} := 0.5 \cdot (d_{sliv} - d_{or}) \cdot sr = 12.809$$

$$Usl_9 := \begin{cases} \text{"Условие укрепления отверстий выполняется. Приварное кольцо не требуется."} & \text{if } Z_2 < Z \\ \text{"Условие укрепления отверстий НЕ выполняется. Требуется приварное кольцо."} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_9 = \text{"Условие укрепления отверстий выполняется. Приварное кольцо не требуется."}$$

$$\underline{A}_{otb} := l_{otb_{r3}} \cdot (S_{sh} - 2 \cdot c) + \sqrt{Dre_{otb} \cdot (syr + S - c)} \cdot (k2 \cdot syr + S - sr - c) = 189.714$$

$$\underline{Z}_{otb} := (l_{otb_{r1}} + syr + S - sr - c) \cdot (0.8 \cdot S_{sh} - sr_{shotb} - c) + A = 203.685$$

$$\underline{Z}_{otb} := 0.5 \cdot (d_{otbr} - d_{or}) \cdot sr = 1.375$$

$$Usl_{10} := \begin{cases} \text{"Условие укрепления отверстий выполняется. Приварное кольцо не требуется."} & \text{if } Z_2 < Z \\ \text{"Условие укрепления отверстий НЕ выполняется. Требуется приварное кольцо."} & \text{otherwise} \end{cases}$$

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

Принимаем  $su=0$ , то есть приварное кольцо не требуется.

Все отверстия укрепляются с помощью штуцера снаружи и изнутри.

Допускаемое внутреннее давление узла сопряжения штуцера и стенки аппарата:

для обечаек  $k1 = 1$

$$\nu := \min \left[ \frac{L0 \cdot (k2 \cdot \text{sy}r + S - c) + [(\text{lf}_{r1} + \text{sy}r + S - \text{sr} - c) \cdot (0.8 \cdot S_{\text{sh}} - c) + \text{lf}_{r3} \cdot (S_{\text{sh}} - 2 \cdot c)] \cdot k1}{\left[ L0 + 0.5 \cdot (d_{\text{f}} - d_{\text{or}}) + k1 \cdot (\text{lf}_{r1} + \text{sy}r + 1000 \cdot s - \text{sr} - c) \cdot \frac{1000 \cdot d_{\text{f}} + 2 \cdot c}{D_r \cdot 1000} \right] \cdot (S - c)}, 1 \right] = 1$$

$$P_{\text{sh}} := \left( 2 \cdot k1 \cdot \phi \cdot \sigma \cdot \frac{S - c}{D_r \cdot 1000 + S - c} \right) \cdot \nu = 2.437 \quad \text{МПа}$$

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

$$\text{Usl}_{11} = \text{"Условие прочности выполняется."}$$

$k1 := 2$  для выпуклых днищ

$$\nu := \min \left[ \frac{L0 \cdot (k2 \cdot \text{sy}r + S - c) + [(\text{lf}_{r1} + \text{sy}r + S - \text{sr} - c) \cdot (0.8 \cdot S_{\text{sh}} - c) + \text{lf}_{r3} \cdot (S_{\text{sh}} - 2 \cdot c)] \cdot k1}{\left[ L0 + 0.5 \cdot (d_{\text{n}} - d_{\text{or}}) + k1 \cdot (\text{lf}_{r1} + \text{sy}r + 1000 \cdot s - \text{sr} - c) \cdot \frac{1000 \cdot d_{\text{n}} + 2 \cdot c}{D_r \cdot 1000} \right] \cdot (S - c)}, 1 \right] = 1$$

$$P_{\text{sh}} := \left( 2 \cdot k1 \cdot \phi \cdot \sigma \cdot \frac{S - c}{D_{r_{\text{n}}} + S - c} \right) \cdot \nu = 2.532 \quad \text{МПа}$$

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

$$\text{Usl}_{12} = \text{"Условие прочности выполняется."}$$

$$\nu := \min \left[ \frac{L0 \cdot (k2 \cdot \text{sy}r + S - c) + [(\text{lotb}_{r1} + \text{sy}r + S - \text{sr} - c) \cdot (0.8 \cdot S_{\text{sh}} - c) + \text{lotb}_{r3} \cdot (S_{\text{sh}} - 2 \cdot c)] \cdot k1}{\left[ L0 + 0.5 \cdot (d_{\text{otb}} - d_{\text{or}}) + k1 \cdot (\text{lotb}_{r1} + \text{sy}r + 1000 \cdot s - \text{sr} - c) \cdot \frac{1000 \cdot d_{\text{otb}} + 2 \cdot c}{D_r \cdot 1000} \right] \cdot (S - c)}, 1 \right] = 1$$

$$P_{\text{sh}} := \left( 2 \cdot k1 \cdot \phi \cdot \sigma \cdot \frac{S - c}{D_{r_{\text{otb}}} + S - c} \right) \cdot \nu = 2.532 \quad \text{МПа}$$

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

$$\text{Usl}_{13} = \text{"Условие прочности выполняется."}$$

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

$$P_{sh} := \left( 2 \cdot k1 \cdot \phi \cdot \sigma \cdot \frac{S - c}{Dre_{sliv} + S - c} \right) \cdot \nu = 2.532 \text{ МПа}$$

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

$$Usl_{14} = \text{"Условие прочности выполняется."}$$

### Вывод:

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

## 4.9 Расчет фланцевого соединения

В качестве примера произведем расчет патрубка фланца выхода конденсата.

Диаметр штуцера 0.059 м

Допускаемое напряжение для материала болтов 12Х18Н10Т 110 МПа

Модуль упругости фланца  $2 \cdot 10^5$  МПа

Нормативный зазор между втулкой и гайкой в соответствии с рекомендациями 0.005 м

### Решение

Толщина втулки плоских приварных фланцев 0.001 м

$$s_0 > s \quad \text{Примем } S_0 = 0.004 \text{ м}$$

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 0.015 м

Диаметр болтовой окружности плоских приварных фланцев:

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

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

Примем  $D_b := 0.120 \text{ м}$

Наружный диаметр фланца:

Конструктивную добавку для размещения шестигранных гаек по диаметру фланца примем по таблице 4[с.21,3]:

$$a := 0.032 \text{ м}$$

Диаметр отверстия под болт:  $d := 0.014 \text{ м}$

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

Примем  $D_n := 0.155 \text{ м}$

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

$e := 0.03 \text{ м}$ , т.к. выбираем плоскую прокладку по таблице 1.41[с.95,8]

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

Средний диаметр прокладки:

Ширина прокладки плоской, неметаллической по таблице 1.42 [с.95,8]

$$b := 0.015 \text{ м}$$

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

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 фланца ориентировочно:

По рисунку 1.40 [с.97,8] определяем коэффициент  $\lambda_f := 0.425$

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

$\beta_1 := 2.5$  по рисунку 1.39 [с.95,8]

$$s_{\text{эк}} := s_0 \cdot \left[ 1 + \frac{h_b \cdot (\beta_1 - 1)}{h_b + 0.25 \cdot (\beta_1 + 1) \cdot \sqrt{d_p \cdot s_0}} \right] = 7.164 \times 10^{-3} \text{ м}$$

$$h_f \geq \lambda_f \cdot \sqrt{d_p \cdot s_{\text{эк}}} \quad \lambda_f \cdot \sqrt{d_p \cdot s_{\text{эк}}} = 8.738 \times 10^{-3} \text{ м}$$

Примем  $h_f := 0.01 \text{ м}$

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:

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

Выберем прокладку из фторопласта толщиной 2 мм, для нее: [с.97,8]

коэффициент, зависящий от материала и конструкции прокладки  $k_{\text{пр}} := 2.5$

толщина прокладки 0.002 м

минимальное давление обжатия 10 МПа

допускаемое давление обжатия 40 МПа

модуль упругости фторопласта 2000 МПа

эффективная ширина прокладки 0.015 м

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

расчетная площадь поперечного сечения болта  $f_b := 1.35 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$

линейная податливость прокладки при  $k_p := 1$

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

Угловая податливость фланца:

Безразмерные параметры

$$\lambda_f := \frac{h_f}{\sqrt{d_p \cdot s_{ek}}} = 0.486$$

$$\psi_2 := \frac{D_n + d_p}{D_n - d_p} = 2.229$$

$$\psi_1 := 1.28 \cdot \log\left(\frac{D_n}{d_p}\right) = 0.537$$

Приведенный изгибающий момент:

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

$$M_0 := 1.358 \cdot 10^{-3} \text{ МН} \cdot \text{м}$$

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

Максимальное напряжение в сечении, ограниченном размером  $s_0$

$$f_f := 1 \quad \sigma_0 := f_f \cdot \sigma_1 = 1.596 \times 10^{-3} \text{ МПа}$$

Тангенциальное и меридиональное напряжение 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  $s_0$ , принимаемое при количестве нагружений соединений (сборка разборка при  $P_r < 4$  МПа):

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

Тогда условие прочности втулки фланца:

$$U_{sl18} := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется."} & \text{if } \sqrt{(\sigma_0 + \sigma_m)^2 + \sigma_t^2} - (\sigma_0 + \sigma_m) \cdot \sigma_t < \phi \cdot \sigma_{d0} \\ \text{"Условие прочности НЕ выполняется."} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\sqrt{(\sigma_0 + \sigma_m)^2 + \sigma_t^2} - (\sigma_0 + \sigma_m) \cdot \sigma_t = 85.159 \text{ МПа} \quad \phi \cdot \sigma_{d0} = 600 \text{ МПа}$$

$U_{sl18} = \text{"Условие прочности выполняется."}$

$$\frac{\nu}{\mu\mu} := \frac{1}{1 + 0.9 \cdot \lambda_f \cdot \left(1 + \psi_1 \cdot \frac{h_f^2}{s_{ek}^2}\right)} = 0.528 \quad \frac{\nu_f}{\mu\mu} := \frac{[1 - \nu \cdot (1 + 0.9 \cdot \lambda_f)] \cdot \psi_2}{h_f^3 \cdot E} = 2.692 \frac{\text{М}}{\text{МН}}$$

Расстояние между опорными поверхностями головки болта и гайки:

примем конструктивно  $l_{ob} := 0.042 \text{ м}$

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

Линейная податливость болтов:  $y_b := \frac{l_b}{E \cdot f_b \cdot n_b} = 2.126 \times 10^{-7} \frac{\text{М}}{\text{МН}}$

Коэффициент жесткости фланцевого соединения:

$$k_{zh} := \frac{y_b + 0.5 \cdot y_f \cdot (D_b - d_p - s_{ek}) \cdot (D_b - D_{sn})}{y_p + y_b + 0.5 \cdot y_f \cdot (D_b - D_{sn})^2} = 1.078$$

Болтовая нагрузка в условиях монтажа [с.93,8]

$$\sigma_{b20} := 130 \text{ МПа}$$

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

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

Болтовая нагрузка в рабочих условиях

Коэффициент расширения материала болтов и фланцев 12X18H10T:

$$\alpha := 16.6 \cdot 10^{-6} \frac{1}{C} \quad [c.21,2]$$

$$t_r := 80 \quad C$$

Усилие, возникающее от температурных деформаций:

$$F_t := \frac{y_b \cdot n_b \cdot f_b \cdot E \cdot (\alpha \cdot t_r - \alpha \cdot 0.97 \cdot t_r)}{y_p + y_b + 0.5 \cdot y_f \cdot (D_b - D_{sn})^2} = 5.679 \times 10^{-4} \quad \text{МН}$$

$$F_{b2} := F_{b1} + (1 - k_{zh}) \cdot (F_d - F_1) + F_t = 0.059 \quad \text{МН}$$

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

$$Usl_{15} := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется."} & \text{if } \frac{F_{b1}}{n_b \cdot f_b} < \sigma_{b20} \\ \text{"Условие прочности НЕ выполняется."} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\sigma_{b20} = 130 \quad \text{МПа}$$

$$Usl_{15} = \text{"Условие прочности выполняется."}$$

$$Usl_{16} := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется."} & \text{if } \frac{F_{b2}}{n_b \cdot f_b} < \sigma_b \\ \text{"Условие прочности НЕ выполняется."} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\frac{F_{b2}}{n_b \cdot f_b} = 54.654 \quad \text{МПа} \quad \sigma_b = 110 \quad \text{МПа}$$

$$Usl_{16} = \text{"Условие прочности выполняется."}$$

Условие прочности неметаллических прокладок  $\frac{F_{b1}}{\pi \cdot D_{sn} \cdot b} = 15.89 \quad \text{МПа}$

$$Us1_{17} := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется."} & \text{if } \frac{F_{b1}}{\pi \cdot D_{sn} \cdot b} < P_{dpr} \\ \text{"Условие прочности НЕ выполняется."} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$P_{dpr} = 40 \text{ МПа}$$

$$Us1_{17} = \text{"Условие прочности выполняется."}$$

Условие прочности втулки фланца для сечения, ограниченного размером  $s_0$   
безразмерный параметр

$$T_f := \frac{D_n^2 \cdot \left( 1 + 8.55 \cdot \log\left(\frac{D_n}{d_p}\right) \right) - d_p^2}{\left( 1.05 \cdot d_p^2 + 1.945 \cdot D_n^2 \right) \cdot \left( \frac{D_n}{d_p} - 1 \right)} = 1.302$$

Безразмерный параметр по рисунку 1.42 [с.101,8]

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

Приведенный изгибающий момент

$$M_0 := \max[0.5 \cdot (D_b - D_{sn}) \cdot F_{b1}, 0.5 \cdot [(D_b - D_{sn}) \cdot F_{b2} + (D_{sn} - d_p - s_{ek}) \cdot F_d]] = 1.342 \times 10^{-3} \text{ МН} \cdot \text{м}$$

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

Тангенциальное и меридиональное напряжение во втулке фланца от  
внутреннего давления:

$$\sigma_{\phi} := \frac{P_{pr} \cdot d_p}{2 \cdot (s_0 - c)} = 98.333 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{\theta} := \frac{P_{pr} \cdot d_p}{4 \cdot (s_0 - c)} = 49.167 \text{ МПа}$$

Допускаемое напряжение для фланца в сечении  $s_0$ , принимаемое при количестве нагружений соединения (сборка-разборка) при  $P_p < 4$  МПа

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

Тогда условие прочности втулки фланца:

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

$$\sqrt{(\sigma_0 + \sigma_m)^2 + \sigma_t^2} - (\sigma_0 + \sigma_m) \cdot \sigma_t = 85.159 \text{ МПа} \quad \phi \cdot \sigma_{d0} = 600 \text{ МПа}$$

$$U_{sl_{18}} = \text{"Условие прочности выполняется."}$$

Условие герметичности фланцевого соединения определяется углом поворота фланца.

Максимальное напряжение в кольце аппарата:

$$\sigma_k := M_0 \cdot [1 - \nu \cdot (1 + 0.9 \cdot \lambda_f)] \cdot \frac{\psi_2}{d_p \cdot h_f^2} = 122.46 \text{ МПа}$$

Допускаемый угол поворота для плоского приварного фланца:

$$\theta_d := 0.013 \text{ рад}$$

$$\theta := \left( \frac{\sigma_k}{E} \right) \cdot \left( \frac{d_p}{h_f} \right) = 3.613 \times 10^{-3} \text{ рад}$$

$$U_{sl_{19}} := \begin{cases} \text{"Условие герметичности выполняется."} & \text{if } \theta < \theta_d \\ \text{"Условие герметичности НЕ выполняется."} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$U_{sl_{19}} = \text{"Условие герметичности выполняется."}$$

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

Наименование штуцера	$D_v$ , мм	$d_n$ , мм	$D_a$ , мм	$D_b$ , мм	$D_1$ , мм	$d_b$ , мм	$z$	$h$ , 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

Таблица 1. Фланцы и штуцеры.

Нормы и методы расчета на прочность [с.1,9]

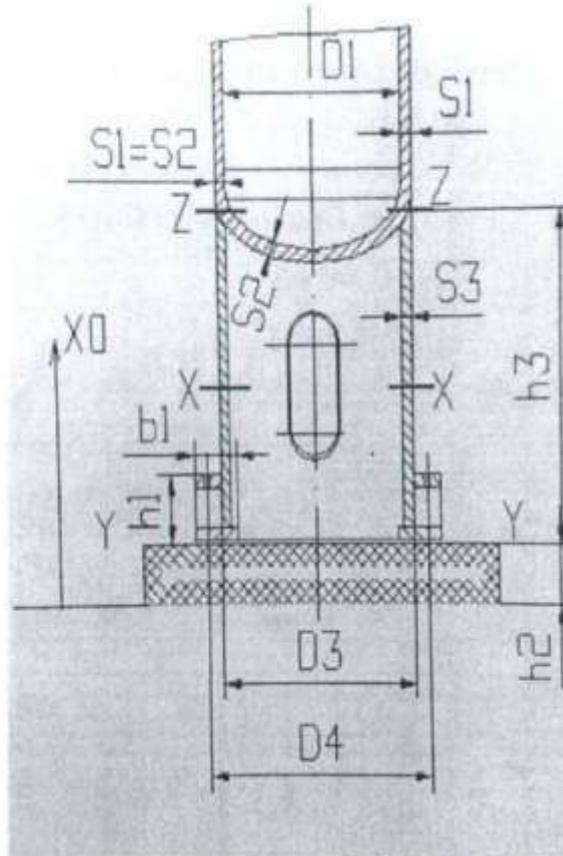
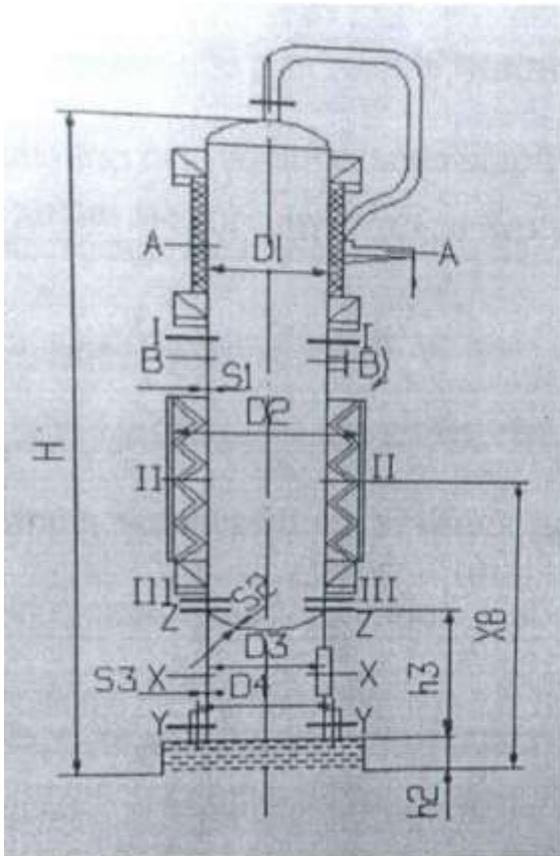
Расчетные сечения

При расчете колонного аппарата устанавливаются следующие основные расчетные сечения:

- поперечное сечение в месте присоединения 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. Опорные цилиндрические обечайки



Исходные данные:

$$\sigma := \sigma \cdot 10^6 = 1.84 \times 10^8 \text{ Па}$$

Допускаемое напряжение для опорной обечайки, выполненной из стали ВСт3 140 МПа

Допускаемое напряжение в анкерных болтах 126 МПа

Допускаемое напряжение бетона на сжатие 30 МПа

Толщина сварного шва 0.003 м

Исполнительная толщина стенки опорной обечайки 0.01 м

Сумма всех прибавок к расчетным толщинам 0.001 м

Начальный внутренний диаметр анкерных болтов 0.02 м

Ширина верхнего опорного элемента 0.12 м

Минимальное расстояние между двумя смежными ребрами 0.52 м

Диаметр окружности, вписанной в шестигранник анкерного болта 0.014 м

Расстояние между анкерным болтом и обечайкой 0.045 м

Число анкерных болтов 8 шт

Высота опорного узла 0.25 м

Площадь поперечного сечения анкерного болта  $3.142 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$

Внутренний диаметр опорной обечайки 0.606 м

Диаметр окружности анкерных болтов 0.7 м

Модуль продольной упругости  $2 \cdot 10^{11} \text{ Па}$

Коэффициент сварного шва 0.6

Коэффициент сварного шва нижнего опорного узла 1

Количество расчетных сечений 6 шт  $i := 0..5$   
 $s_1 := 0.005$

Толщина стенки в соответствующем расчетном сечении, м:

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

Наружный диаметр колонны в соответствующем расчетном сечении, м:

$$D = 606 \quad x_0 = \begin{pmatrix} 3.7 \\ 3.5 \\ 2.9 \\ 2.3 \\ 1.7 \\ 0.5 \end{pmatrix}$$

Внутренний диаметр колонны в соответствующем расчетном сечении, м:

$$D_1 := D - 2 \cdot s_1 = 599.99 \quad x_0 = \begin{pmatrix} 3.7 \\ 3.5 \\ 2.9 \\ 2.3 \\ 1.7 \\ 0.5 \end{pmatrix}$$

Осевое сжимающее усилие, Н

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

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

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

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

$$M_{v1} := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

В условиях испытания

$$M_{v2} := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

В условиях монтажа

$$M_{v3} := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

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

Сочетание нагрузок

Рабочие условия:

- Давление, МПа

$$p_1 := P_r = 0.7$$

- осевое сжимающее усилие, Н

$$F_{ww} := G_{p,max} = 2.549 \times 10^3$$

- расчетный изгибающий момент, Н\*м

$$M_1 := \max(M_{G1} + M_{v1}, M_{G1}) = 0$$

Условия испытания:

- Давление, МПа

$$p_2 := P_{pr} = 0.875$$

- осевое сжимающее усилие, Н

$$F_2 := G_{r,max} = 8.145 \times 10^3$$

- расчетный изгибающий момент, Н\*м

$$M_2 := M_{G2} \cdot 0.6 \cdot M_{v2} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Условия монтажа:

- Давление, МПа

$$p_3 := 0$$

- осевое сжимающее усилие, Н

$$F_3 := G_{м.макс} = 1.163 \times 10^3$$

- расчетный изгибающий момент, Н\*м

$$M_3 := \max(M_{G3} + 0.8 \cdot M_{v3}, M_{G3}) = 0$$

#### 4.10 Корпус колонного аппарата

Стенка колонного аппарата должна быть рассчитана на прочность и устойчивость.

Расчет напряжения для рабочих условий:

Продольные напряжения для расчетных сечений, Па

$$\sigma_{x1} := \frac{p_1 \cdot (D_1 + s_1)}{4 \cdot (s_1 - c)} - \frac{F_1}{\pi \cdot D_1 \cdot (s_1 - c)} - \frac{4 \cdot M_1}{\pi \cdot D_1^2 \cdot (s_1 - c)} = 2.591 \times 10^4$$

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

Кольцевые напряжения для расчетных сечений, Па

$$\sigma_y := \frac{p_1 \cdot (D_1 - s_1)}{2 \cdot (s_1 - c)} = 5.25 \times 10^4$$

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

Эквивалентные напряжения для расчетных сечений, Па

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

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

$$\sigma_{E1} := \sqrt{\sigma_{x1}^2 - \sigma_{x1} \cdot \sigma_y \cdot \frac{\phi_T}{\phi_P} + \left(\sigma_y \cdot \frac{\phi_T}{\phi_P}\right)^2} = 4.547 \times 10^4$$

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

Проверка условий прочности для расчетных сечений:

$$\max(\sigma_{x1}, \sigma_{E1}) = 4.547 \times 10^4 \quad \sigma \cdot \phi_T = 1.84 \times 10^8$$

$$Us1_{20} := \begin{cases} \text{"Условие прочности в рабочих условиях выполняется."} & \text{if } \max(\sigma_{x1}, \sigma_{E1}) < \sigma \cdot \phi_T \\ \text{"Условие прочности в рабочих условиях НЕ выполняется."} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Us1_{20} = \text{"Условие прочности в рабочих условиях выполняется."}$$

Расчет напряжений для условий монтажа:

Продольные напряжения для расчетных сечений, Па

$$\sigma_{x1} := \frac{p_3 \cdot (D_1 + s_1)}{4 \cdot (s_1 - c)} - \frac{F_3}{\pi \cdot D_1 \cdot (s_1 - c)} + \frac{4 \cdot M_3}{\pi \cdot D_1^2 \cdot (s_1 - c)}$$

Кольцевые напряжения для расчетных сечений, Па

$$\sigma_{\theta\theta} := \frac{p_2 \cdot (D_1 - s_1)}{2 \cdot (s_1 - c)} = 6.562 \times 10^4 \quad x_0 = \begin{pmatrix} 3.7 \\ 3.5 \\ 2.9 \\ 2.3 \\ 1.7 \\ 0.5 \end{pmatrix}$$

Эквивалентные напряжения для расчетных сечений, Па

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

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

$$\sigma_{E1} := \sqrt{\sigma_{x1}^2 - \sigma_{x1} \cdot \sigma_y \cdot \frac{\phi_T}{\phi_P} + \left(\sigma_y \cdot \frac{\phi_T}{\phi_P}\right)^2} = 6.562 \times 10^4 \quad x_0 = \begin{pmatrix} 3.7 \\ 3.5 \\ 2.9 \\ 2.3 \\ 1.7 \\ 0.5 \end{pmatrix}$$

Проверка условий прочности для расчетных сечений:

$$\max(\sigma_{x1}, \sigma_{E1}) = 6.562 \times 10^4 \quad \sigma \cdot \phi_T = 1.84 \times 10^8$$

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

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

Проверка устойчивости.

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

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

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

## 5 Расчет опорной обечайки

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 сечения X-X используют расчетные нагрузки сечения Y-Y. Проверку прочности сварного шва, соединяющего корпус колонны с опорной обечайкой (сечение Z-Z) для рабочих условий следует проводить по формуле:

$$\sigma_x := \frac{1}{\pi \cdot D_3 \cdot a_1} \cdot \left( \frac{4 \cdot M_1}{D_3} + F_1 \right) = 4.463 \times 10^5 \text{ Па}$$

$$\phi_s \cdot \min(\sigma_{d0}, \sigma) = 8.4 \times 10^7 \text{ Па}$$

$$Usl_{22} := \begin{cases} \text{"Условие прочности сварного шва для рабочих условий выполняется."} & \text{if } \sigma_x < \phi_s \cdot \min(\sigma_{d0}, \sigma) \\ \text{"Условие прочности сварного шва для рабочих условий НЕ выполняется."} & \text{otherwise} \end{cases}$$

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

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

$$\sigma_{\text{исп}} := \frac{1}{\pi \cdot D_3 \cdot a_1} \cdot \left( \frac{4 \cdot M_2}{D_3} + F_2 \right) \qquad \sigma_{\text{исп}} := 1.708 \times 10^6 \text{ Па}$$

$$\phi_s \cdot \min(\sigma_{d0}, \sigma) = 8.4 \times 10^7 \text{ Па}$$

$$Usl_{22} := \begin{cases} \text{"Условие прочности сварного шва для рабочих условий выполняется."} & \text{if } \sigma_x < \phi_s \cdot \min(\sigma_{d0}, \sigma) \\ \text{"Условие прочности сварного шва для рабочих условий НЕ выполняется."} & \text{otherwise} \end{cases}$$

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

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

$$\psi_1 := 1 \qquad \psi_2 := 0.91 \qquad \psi_3 := 0.25$$

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  $\psi_2$  не более 0.95

Проверку устойчивости опорной обечайки в зоне отверстия следует проводить по формуле:

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

$$\frac{0.012 - c}{s_3 - c} = 1.222 \quad \frac{0.15}{D_3} = 0.248 \quad \frac{0.5}{D_3} = 0.825$$

Обечайки, нагруженные осевым сжимающим усилием

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условий прочности:

$$F_{дП} := \pi \cdot (D_3 + s_3 - c) \cdot (s_3 - c) \cdot \sigma_{д0} = 2.434 \times 10^6 \text{ Па}$$

Осевое сжимающее усилие, определяемое из условия местной устойчивости в пределах упругости по формуле: [с.7,2]

$$n_y := 2.4$$

$$F_{дЕ1} := \frac{310 \cdot 10^{-6} \cdot E}{n_y} \cdot D_3^2 \cdot \left[ \frac{100 \cdot (s_3 - c)}{D_3} \right]^{2.5} = 2.55 \times 10^7 \text{ Па}$$

$$D_1 := 0.5$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие в пределах упругости из условий устойчивости:

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

$$F_{дЕ} = 2.55 \times 10^7$$

Для условий испытания

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условий прочности

$$F_{дП} := \pi \cdot (D_3 + s_3 - c) \cdot (s_3 - c) \cdot \sigma_{д0} = 2.434 \times 10^6 \text{ Па}$$

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

$$n_{yy} := 1.1 \quad \text{для условий испытаний [с.7,2]}$$

$$F_{дЕ1} := \frac{310 \cdot 10^{-6} \cdot E}{n_y} \cdot D_3^2 \cdot \left[ \frac{100 \cdot (s_3 - c)}{D_3} \right]^{2.5} = 5.564 \times 10^7 \text{ Па}$$

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

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

$$F_{дЕ} = 5.564 \times 10^7$$

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

$$F_{д2} := \frac{F_{дП}}{\sqrt{1 + \left( \frac{F_{дП}}{F_{дЕ}} \right)^2}} = 2.432 \times 10^6 \text{ Па}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности рассчитывать по формуле:

$$M_{дП} := \frac{\pi}{4} \cdot D_3 \cdot (D_3 + s_3 - c) \cdot (s_3 - c) \cdot \sigma_{д0} = 3.688 \times 10^5 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости:

$$n_{\text{экв}} := 1.1 \quad \text{для условий испытания [с.7,2]}$$

$$M_{\text{дЕ}} := \frac{D_3}{3.5} \cdot \left[ \frac{310 \cdot 10^{-6} \cdot E}{n_y} \cdot D_3^2 \cdot \left[ \frac{100 \cdot (s_3 - c)}{D_3} \right]^{2.5} \right] = 9.633 \times 10^6 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Допускаемый изгибающий момент:

$$M_{\text{д2}} := \frac{M_{\text{дП}}}{\sqrt{1 + \left( \frac{M_{\text{дП}}}{M_{\text{дЕ}}} \right)^2}} = 3.685 \times 10^5 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Для рабочих условий допускаемый изгибающий момент:

$$n_{\text{экв}} := 2.4 \quad \phi_3 := 0.88 \quad [\text{с.7,2}]$$

$$M_{\text{д1}} := \frac{\pi}{4} \cdot D_3 \cdot (D_3 + s_3 - c) \cdot (s_3 - c) \cdot \sigma_{\text{д0}} \cdot \phi_3 = 3.246 \times 10^5 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$\frac{D_3}{s_3 - c} = 67.333 \quad \frac{\sigma_{\text{д0}} \cdot 10^3}{E} = 0.7$$

1) Условие устойчивости опорной обечайки в зоне отверстия для рабочих условий (сечение X-X)

$$\Phi := \frac{F_1}{\psi_1 \cdot F_{\text{д1}}} + \frac{M_1 + F_1 \cdot \psi_3 \cdot D_3}{\psi_2 \cdot M_{\text{д1}}} = 2.359 \times 10^{-3}$$

$$\text{Usl}_{24} := \begin{cases} \text{"Условие устойчивости выполняется."} & \text{if } \Phi \leq 1 \\ \text{"Условие устойчивости НЕ выполняется."} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Usl}_{24} = \text{"Условие устойчивости выполняется."}$$

2) Условие устойчивости для опорной обечайки в зоне отверстия для условий испытания (сечение X-X)

$$\Phi := \frac{F_2}{\psi_1 \cdot F_{\text{д2}}} + \frac{M_2 + F_2 \cdot \psi_3 \cdot D_3}{\psi_2 \cdot M_{\text{д2}}} \quad \Phi := 0.04$$

$$\text{Usl}_{25} := \begin{cases} \text{"Условие устойчивости выполняется."} & \text{if } \Phi \leq 1 \\ \text{"Условие устойчивости НЕ выполняется."} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Usl}_{25} = \text{"Условие устойчивости выполняется."}$$

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

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

Если кольцевой шов находится в зоне отверстий, то коэффициенты:

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

В рабочих условиях:

$$\sigma_x := \frac{1}{\pi \cdot D_3 \cdot (s_3 - c)} \cdot \left[ \frac{4 \cdot (M_1 + F_1 \cdot \psi_3 \cdot D_3)}{\psi_2 \cdot D_3} - \frac{F_1}{\psi_1} \right] = -1.488 \times 10^5 \text{ Па}$$

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

$$Usl_{26} := \begin{cases} \text{"Условие выполняется."} & \text{if } \sigma_x \leq \phi_T \cdot \sigma_{д0} \\ \text{"Условие НЕ выполняется."} & \text{otherwise} \end{cases}$$

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

В условиях испытания

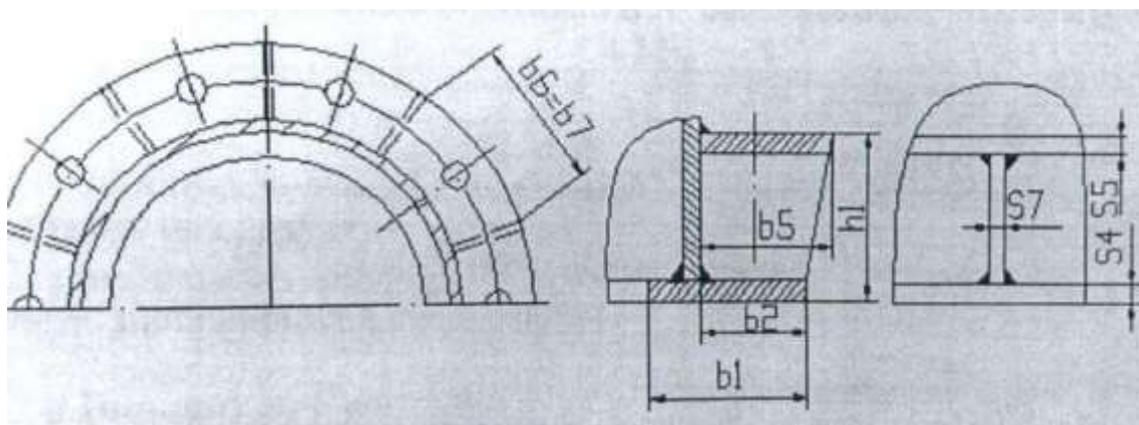
$$\sigma_x := \frac{1}{\pi \cdot D_3 \cdot (s_3 - c)} \cdot \left[ \frac{4 \cdot (M_2 + F_2 \cdot \psi_3 \cdot D_3)}{\psi_2 \cdot D_3} - \frac{F_2}{\psi_1} \right] \quad \sigma_x := -2.562 \times 10^6 \text{ Па}$$

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

$$Usl_{27} := \begin{cases} \text{"Условие выполняется."} & \text{if } \sigma_x \leq \phi_T \cdot \sigma_{д0} \\ \text{"Условие НЕ выполняется."} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_{27} = \text{"Условие выполняется."}$$

## Расчет нижнего опорного узла [с.11,9]



Расчет нижнего опорного узла следует проводить для рабочих условий и для условий испытания.

Расчетные нагрузки принимаем в соответствии с разделом 3.

Выбираем тип опорного кольца исполнения С.

Ширина нижнего опорного кольца устанавливается конструктивно, при этом необходимо соблюдать условие:

$$b_{1R} := \frac{1}{\pi \cdot D_4 \cdot \sigma_{дбет}} \cdot \left( \frac{4 \cdot M_1}{D_4} + F_1 \right) = 3.864 \times 10^{-5} \text{ м}$$

Ширину нижнего опорного кольца принимаем 0.15 м

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

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

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

Пусть  $b_2 = 0.09$  м

Выступающая ширина нижнего опорного кольца  $b_2$  удовлетворяет условию.

Напряжение сжатия в бетоне следует рассчитать по формуле:

$$\sigma_{\text{бет}} := \sigma_{\text{дбет}} \cdot \frac{b_{1R}}{b_1} = 7.727 \times 10^3 \text{ Па}$$

Напряжение в сварном шве ниже 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 исполнений В, С, D проверку проводить не следует.

Для выбранного опорного кольца исполнения С расчет напряжения в сварном шве производить не следует.

Толщину нижнего опорного кольца для выбранного исполнения следует проводить по формуле:

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

$$\chi_1 := 1 \quad \text{для опорного кольца исполнения А}$$

Для исполнения В, С, D

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

$$\max \left( \chi_1 \cdot b_2 \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot \sigma_{\text{бет}}}{\sigma_{\text{д0}}}} + c, 1.5 \cdot s_3 \right) = 0.015 \quad \text{м}$$

Выбираем толщину нижнего опорного кольца

$s_4 := 0.02$  м что удовлетворяет условию

для опорного кольца исполнения А  $s_4$  дополнительно следует проверять по формуле:

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

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

Толщину верхнего опорного элемента- кольца следует определять по формуле:

Коэффициент

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

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

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

Принимаем  $s_5 := 0.03$  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.

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

Т.к. соотношение меньше 20, проверка не требуется.

Нагрузки стенки опорной обечайки от верхнего элемента-кольца

Местное напряжение изгиба

Коэффициент  $\chi_4 := 0.0106$

$$\sigma_{1x} := \frac{6 \cdot \chi_4 \cdot A_{\sigma} \cdot \sigma_{дВ} \cdot e_2}{(s_3 - c)^2 \cdot h_1} = 5.595 \times 10^4 \text{ Па}$$

Для опорного узла исполнения С вместо b4 принимается b5, а для исполнения D b6+b7

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

$K_{20} := 1.5$

$n_T := 1.5$  при условиях испытания

Определим предельное напряжение изгиба

$$v := \frac{K_{21}}{n_T} \cdot \frac{1}{\sigma_{д0} \cdot \phi_0} \cdot \frac{1}{3.14 \cdot D_3 \cdot (s_3 - c)} \cdot \left( \frac{4 \cdot M_2}{D_3} - F_1 \right) \quad v := -3.82 \times 10^{-3}$$

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

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

$Usl_{28} = \text{"Условие выполняется."}$

Местное напряжение изгиба не превышает допустимое.

Высота нижнего опорного узла исполнений С и D

Высоту  $h_1$  опорного узла при выполнении условия следует определять по формуле:

$$b_2 := b_5 = 0.12 \text{ м}$$

$$h_1 > \frac{D_4 \cdot e_2 \cdot b_1}{2 \cdot (s_5 - c) \cdot b_5} \cdot \frac{\sigma_{бер}}{\sigma_{п0}} \cdot \left( \frac{1}{\chi_5} + \frac{6.58}{n^2 \cdot \chi_6} \cdot \frac{D_4}{b_5} \right)$$

$$\chi_7 := \frac{1.56 + \sqrt{D_3 \cdot (s_3 - c)}}{b_5} \cdot \frac{s_3 - c}{s_5 - c} = 4.225$$

$$\chi_6 := 1 + 2 \cdot \chi_7 \cdot \left( 1 + \frac{s_3 - c}{b_5} - \frac{\chi_7}{2} \right) = -7.77$$

$$\chi_5 := 1 + \chi_7 = 5.225$$

$$\frac{D_4 \cdot e_2 \cdot b_1}{2 \cdot (s_5 - c) \cdot b_5} \cdot \frac{\sigma_{бер}}{\sigma_{п0}} \cdot \left( \frac{1}{\chi_5} + \frac{6.58}{n^2 \cdot \chi_6} \cdot \frac{D_4}{b_5} \right) = 4.279 \times 10^{-6}$$

$h_1 = 0.25 \text{ м}$ , что удовлетворяет условию.

Коэффициент  $\chi_4$  определяем по номограмме:

$$\frac{b_5}{D_3} = 0.198 \quad \frac{D_1}{s_3 - c} = 55.556$$

Расчет нижнего опорного узла для условий испытания

Выбираем тип опорного кольца С

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

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

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 удовлетворяет условию.

Напряжение сжатия в бетоне следует рассчитывать по формуле:

$$\sigma_{\text{бет}} := \sigma_{\text{дбет}} \cdot \frac{b_{1R}}{b_1} = 7.727 \times 10^3 \text{ Па}$$

Напряжение в сварном шве ниже 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 исполнений В, С, D проверку проводить не следует.

Для выбранного опорного кольца исполнения С расчет напряжения в сварном шве производить не следует.

Толщину нижнего опорного кольца для исполнений А, В, С и D следует рассчитывать по формуле:

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

$$\chi_1 := 1 \quad \text{для опорного кольца исполнения А}$$

Для исполнений В, С и D

$$\chi_1 := \frac{\left[ 1 + 1.81 \cdot \left( \frac{b_2}{b_7} \right)^3 \right]^2}{1 + 2.97 \cdot \left( \frac{b_2}{b_7} \right)^3} = 0.988 \quad \max \left( \chi_1 \cdot b_2 \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot \sigma_{\text{бет}}}{\sigma_{\text{д0}}}} + c, 1.5 \cdot s_3 \right) = 0.015 \text{ м}$$

Выбираем толщину опорного кольца 0.02 м, что удовлетворяет условию.

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

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

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

Толщину верхнего опорного элемента- кольца следует определять по формуле:

Коэффициент

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

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

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

Принимаем  $s_5 := 0.03 \text{ м}$ , 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.

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

Т.к. соотношение меньше 20, проверка не требуется.

Нагрузки стенки опорной обечайки от верхнего опорного элемента-кольца

Местное напряжение изгиба:

$$\chi_4 := 0.0106$$

$$\sigma_{1x} := \frac{6 \cdot \chi_4 \cdot A_{\sigma} \cdot \sigma_{дВ} \cdot e_2}{(s_3 - c)^2 \cdot h_1} = 5.595 \times 10^6 \text{ Па}$$

Для опорного узла исполнения С вместе b4 применяется b5, а для исполнения D b6+b7

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

$K_{20} = 1.5$

$n_T := 1.1$  при условиях испытания

Определим предельное напряжение изгиба

$$v := \frac{K_{21}}{n_T} \cdot \frac{1}{\sigma_{д0} \cdot \phi_0} \cdot \frac{1}{3.14 \cdot D_3 \cdot (s_3 - c)} \cdot \left( \frac{4 \cdot M_2}{D_3} - F_2 \right) \quad v := -0.017$$

$$\sigma_{дП} := \frac{K_{20} \cdot \sigma_{д0} \cdot n_T}{K_{21}} = 2.31 \times 10^8 \text{ Па}$$

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

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

Местное напряжение изгиба не превышает допустимое

Высота нижнего опорного узла исполнений С и D

Высоту  $h_1$  опорного узла при выполнении условия следует определять по формуле:

$$b_2 := b_5 = 0.12 \text{ м}$$

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

$$\chi_7 := \frac{1.56 + \sqrt{D_3 \cdot (s_3 - c)}}{b_5} \cdot \frac{s_3 - c}{s_5 - c} = 4.225$$

$$\chi_6 := 1 + 2 \cdot \chi_7 \cdot \left( 1 + \frac{s_3 - c}{b_5} - \frac{\chi_7}{2} \right) = -7.77$$

$$\chi_5 := 1 + \chi_7 = 5.225$$

$$\frac{D_4 \cdot e_2 \cdot b_1}{2 \cdot (s_5 - c) \cdot b_5} \cdot \frac{\sigma_{бет}}{\sigma_{д0}} \cdot \left( \frac{1}{\chi_5} + \frac{6.58}{n^2 \cdot \chi_6} \cdot \frac{D_4}{b_5} \right) = 4.279 \times 10^{-6}$$

$h_1 = 0.25 \text{ м}$ , что удовлетворяет условию.

## 5.1 Расчет анкерных болтов [с.15.9]

Расчет прочности анкерных болтов следует проводить 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:

$$d_2 \geq \chi_8 \cdot \sqrt{\frac{M_Y + 0.44 \cdot F_Y \cdot D_4}{n \cdot \sigma_{дВ} \cdot D_4}} + c \quad \text{где} \quad \chi_8 := 2.25 \quad \text{коэффициент.}$$

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

Принимаем  $n=8$  болтов М20.

## 6 Гидравлический расчет

Гидравлическое сопротивление для верхней части колонны:

Коэффициент сопротивления для неорошаемых ситчатых тарелок со свободным сечением 7-10% (в данном случае 8%) от общей площади тарелки:

Примем  $\zeta := 1.82$

Площадь паровых патрубков найдена ранее  $f=0.035 \text{ м}^2$

Скорость пара 0.136 м/с

Плотность паров вверху колонны  $3.385 \text{ кг/м}^3$

Плотность жидкости вверху колонны  $717 \text{ кг/м}^3$

Высота слоя жидкости на тарелке по уровню сливной перегородки 0.02 м

Сопротивление сухой тарелки в верхней части колонны:

$$\Delta P_{sy} := \frac{\zeta \cdot w^2 \cdot \rho_{cr1}}{2 \cdot f^2} = 29.562 \text{ Па}$$

Сопротивление слоя жидкости на тарелке:

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

Сопротивление за счет поверхностного натяжения тарелок мало и им пренебрегают.

Общее гидравлическое сопротивление для верха колонны:

$$\Delta P_y := \Delta P_{sy} + \Delta P_{zhy} = 170.094 \text{ Па}$$

Гидравлическое сопротивление нижней части колонны:

Плотность пара внизу колонны  $3.353 \text{ кг/м}^3$

Плотность жидкости внизу колонны  $1.115 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$

Сопротивление сухой тарелки в нижней части колонны:

$$\Delta P_{si} := \frac{\zeta \cdot w^2 \cdot \rho_{cr2}}{2 \cdot f^2} = 29.276 \text{ Па}$$

Сопротивление слоя жидкости на тарелке:

$$\Delta P_{zhi} := \rho_{O2} \cdot g \cdot h_s = 218.54 \text{ Па}$$

Сопротивление за счет поверхностного натяжения тарелок мало и им пренебрегают.

Общее гидравлическое сопротивление для верха колонны:

$$\Delta P_i := \Delta P_{si} + \Delta P_{zhi} = 247.816 \text{ Па}$$

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

$$\Delta P := \Delta P_y = 170.094 \text{ Па}$$

Проверим, соблюдается ли при выбранном ранее расстоянии между тарелками 200 мм условие, необходимое для нормальной работы тарелок:

$$Usl_{30} := \begin{cases} \text{"Условие выполняется."} & \text{if } h \leq 1.8 \cdot \frac{\Delta P}{\rho_{zh} \cdot g} \\ \text{"Условие НЕ выполняется."} & \text{otherwise} \end{cases}$$
$$Usl_{30} = \text{"Условие выполняется."}$$

Условие нормальной работы выполняется.

## 7 Расчет тепловой изоляции

$$D := 0.6 \text{ м}$$

$$S := 0.003 \text{ м}$$

$$H := 3.315 \text{ м}$$

В качестве теплоизоляции служит вспученный перлитовый песок.

Плотность такого песка  $150 \text{ кг/м}^3$

Коэффициент теплопроводности материала  $\lambda_{iz} := 0.039 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$

Поверхность теплоотдачи:

$$F_{iz} := \pi \cdot (D + 2 \cdot S) \cdot H + \frac{\pi \cdot (D + 2 \cdot S)^2}{2} = 6.888 \text{ м}^2$$

Температура внутреннего слоя изоляции  $-180 \text{ С}$

Требуемую температуру наружного слоя изоляции принимаем  $5 \text{ С}$

Температура окружающей среды  $20 \text{ С}$

Суммарный коэффициент теплоотдачи:

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

## **8 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

### **Введение**

Основная цель данного раздела – оценить перспективность развития и планировать финансовую и коммерческую ценность конечного продукта, представленного в рамках исследовательской программы. Коммерческая ценность определяется не только наличием более высоких технических характеристик над конкурентными разработками, но и тем, насколько быстро разработчик сможет ответить на следующие вопросы – будет ли продукт востребован на рынке, какова будет его цена, каков бюджет научного исследования, какое время будет необходимо для продвижения разработанного продукта на рынок.

Данный раздел, предусматривает рассмотрение следующих задач:

- Оценка коммерческого потенциала разработки.
- Планирование научно-исследовательской работы;
- Расчет бюджета научно-исследовательской работы;
- Определение ресурсной, финансовой, бюджетной эффективности исследования.

Цель данной НИ (ВКР) – разработка основного массообменного оборудования установки получения кислорода.

### **Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения**

#### **Анализ конкурентных технических решений**

В ходе исследования были рассмотрены две конкурирующие разработки получения кислорода:

- 1) Получение кислорода с помощью массообменного оборудования;
- 2) Криогенная ректификация.

Обозначим  $b_{ip}$  – получение кислорода с помощью массообменного оборудования,  $b_{il}$  – криогенная ректификация.

Позицию разработки и конкурентов будем оценивать по десятибалльной шкале, с шагом 1 балл, где 1 – наиболее слабая позиция, а 10 – наиболее сильная. Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum V_i \cdot B_i,$$

где  $K$  – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

$V_i$  – вес показателя (в долях единицы) – это важность фактора (по пятибалльной шкале), деленая на сумму важностей всех факторов;

$B_i$  – балл  $i$ -го показателя.

Детальный анализ необходим, т.к. каждый тип покрытия имеет свои достоинства и недостатки. В таблице 4.1 показано сравнение разработок-конкурентов и разработки данного НИ с точки зрения технических и экономических критериев оценки эффективности.

Таблица 4.1 – Сравнение конкурентных технических решений (разработок)

Факторные признаки (Pj)	Вес критерия, $w_j$	Баллы		Конкурентоспособность	
		$b_{ip}$	$b_{il}$	$V_{jp}$	$V_{jl}$
1	2	3	4	5	6
<b>Технические критерии оценки</b>					
1. Помехоустойчивость	0,1	9	9	0,9	0,9
2. Трещиностойкость	0,2	9	8	1,8	1,6
3. Мобильность	0,2	10	7	2	1,4
4. Эффективность работы	0,05	2	2	0,1	0,1
5. Наличие дорогостоящего оборудования	0,1	8	9	0,8	0,9
6. Простота эксплуатации	0,1	10	9	1	0,9
<b>Экономические критерии оценки</b>					
1. Цена	0,05	8	7	0,4	0,35
2. Финансирование научной разработки	0,1	8	8	0,8	0,8
3. Трудоемкость	0,1	8	9	0,8	0,9
<b>Итого</b>	1	-	-	8,6	7,85

Проведенный анализ конкурентных технических решений показал, что исследование является наиболее актуальным и перспективным, имеет конкурентоспособность.

### SWOT-анализ

Для исследования внешней и внутренней среды проекта, в этой работе проведен SWOT-анализ с детальной оценкой сильных и слабых сторон исследовательского проекта, а также его возможностей и угроз.

Первый этап, составляется матрица SWOT, в которую описаны слабые и сильные стороны проекта и выявленные возможности и угрозы для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде, приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Матрица SWOT-анализа

<b>Сильные стороны</b>	<b>Слабые стороны</b>
С1. Заявленная экономичность и энергоэффективность технологии	Сл1. Отсутствие ссылок и материалов для соответствующих научных исследований.
С2. Более низкая стоимость производства по сравнению с другими технологиями.	Сл2. Большое количество конкурентов
С3. Экологичность технологии изготовления	Сл3. Высокие требования к экспериментальному оборудованию.
С4. Актуальность научного исследования.	Сл4. Вероятность получения брака.
<b>Возможности</b>	<b>Угрозы</b>
В1. Создание новых технологий получения целевого продукта	У1. Отсутствие спроса на новые технологии производства
В2. Развивающиеся конкурентные отношения	У2. Развитая конкуренция технологий производства
В3. Повышение стоимости конкурентных разработок	
В4. Сокращение численности безработных	

На втором этапе на основании матрицы SWOT строятся интерактивные матрицы возможностей и угроз, позволяющие оценить эффективность проекта, а также надежность его реализации. Соотношения параметров представлены в таблицах 4.3–4.6.

Таблица 4.3 – Интерактивная матрица проекта «Возможности проекта и сильные стороны»

Сильные стороны проекта					
Возможности проекта		C1	C2	C3	C4
	B1	-	-	-	-
	B2	-	+	+	-
	B3	-	+	-	+
	B4	+	+	-	-

Таблица 4.4 – Интерактивная матрица проекта «Возможности проекта и слабые стороны»

Слабые стороны проекта					
Возможности проекта		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4
	B1	-	-	+	+
	B2	-	-	-	-
	B3	-	-	-	-
	B4	-	-	-	-

Таблица 4.5 – Интерактивная матрица проекта «Угрозы проекта и сильные стороны»

Сильные стороны проекта					
Угрозы проекта		C1	C2	C3	C4
	У1	-	+	-	-
	У2	-	+	-	-

Таблица 4.6 – Интерактивная матрица проекта «Угрозы проекта и слабые стороны»

Слабые стороны проекта					
Угрозы проекта		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4
	У1	-	-	-	+
	У2	-	-	-	-

Результаты анализа представлены в итоговую таблицу 4.7.

Таблица 4.7 – Итоговая таблица SWOT-анализа

	<p><b>Сильные стороны научно-исследовательского проекта</b> С1. Заявленная экономичность и энергоэффективность технологии</p>	<p><b>Слабые стороны научно-исследовательского проекта</b> Сл1. Отсутствие ссылок и материалов для соответствующих научных исследований.</p>
--	---	--

	<p>С2. Более низкая стоимость производства по сравнению с другими технологиями.</p> <p>С3. Экологичность технологии изготовления</p> <p>С4. Актуальность научного исследования.</p>	<p>Сл2. Большое количество конкурентов</p> <p>Сл3. Высокие требования к экспериментальному оборудованию.</p> <p>Сл4. Вероятность получения брака.</p>
<p><b>Возможности</b></p> <p>В1. Создание новых технологий получения целевого продукта</p> <p>В2. Развивающиеся конкурентные отношения</p> <p>В3. Повышение стоимости конкурентных разработок</p> <p>В4. Сокращение численности безработных</p>	<p><b>Направления развития</b></p> <p>В2С2С3. Высокая трещиностойкость и ударопрочность продукции позволяет расширить спрос, использование новейшей информации и технологий соответствует потенциальному спросу на новые разработки.</p> <p>В3С2С4. Высокая трещиностойкость и ударопрочность продукции и экологичность технологии являются хорошим основанием для внедрения технологии в аэрокосмической области.</p> <p>В4С1С2. Низкая цена исходного сырья и высокая трещиностойкость и ударопрочность продукции являются основой для экспорта за рубеж и выхода на мировой рынок.</p>	<p><b>Сдерживающие факторы</b></p> <p>В1Сл3Сл4Сл5. Использование новейшего оборудования для удовлетворения требований исследований, также может уменьшить экспериментальную ошибку и предотвратить появление брака.</p>
<p><b>Угрозы</b></p> <p>У1. Отсутствие спроса на новые технологии производства</p> <p>У2. Развитая конкуренция технологий производства</p>	<p><b>Угрозы развития</b></p> <p>У1С2. Повышение конкурентоспособности из-за низкой стоимости материалов.</p> <p>У2С2. Бюджетное производство и актуальность могли бы устранить экономические трудности продвижения проекта.</p>	<p><b>Уязвимости:</b></p> <p>У1Сл4Сл5. Введение систем совершенствования производственных процессов для снижения погрешности и неопределенности.</p>

В результате SWOT-анализа показано, что на преимущества разрабатываемой технологии преобладают над ее недостатками. Данные недостатки, которые на данный момент на практике не устранены, но в теории уже есть возможности для их устранения. Результаты анализа учтены в дальнейшей научно-исследовательской разработке.

## Планирование научно-исследовательских работ

### Структура работ в рамках научного исследования

Планирование комплекса научно-исследовательских работ осуществляется в порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;
- определение количества исполнителей для каждой из работ;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения научных исследований.

Для оптимизации работ удобно использовать классический метод линейного планирования и управления.

Результатом такого планирования является составление линейного графика выполнения всех работ. Порядок этапов работ и распределение исполнителей для данной научно-исследовательской работы, приведен в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания, утверждение плана-графика	Научный руководитель
	2	Календарное планирование выполнения работ	Инженер, научный руководитель
Выбор способа решения поставленной задачи	3	Обзор научной литературы	Инженер
	4	Выбор методов исследования	Инженер
Теоретические и экспериментальные исследования	5	Планирование эксперимента	Инженер, научный руководитель
	6	Подготовка образцов для эксперимента	Инженер
	7	Проведение эксперимента	Инженер
Обобщение и оценка результатов	8	Обработка полученных данных	Инженер
	9	Оценка правильности полученных результатов	Инженер, Научный руководитель
Оформление отчета по НИР (комплекта документации по ОКР)	10	Составление пояснительной записки	Инженер

## Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения

При проведении научных исследований основную часть стоимости разработки составляют трудовые затраты, поэтому определение трудоемкости проводимых работ является важным этапом составления сметы.

Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости использована следующая формула:

$$t_{\text{ож}i} = \frac{3t_{\text{min}i} + 2t_{\text{max}i}}{5}, \quad (4.1)$$

где  $t_{\text{ож}i}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения  $i$ -ой работы, человеко-дни;

$t_{\text{min}i}$  – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы, человеко-дни;

$t_{\text{max}i}$  – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы, человеко-дни.

Зная величину ожидаемой трудоемкости, можно определить продолжительность каждой  $i$ -ой работы в рабочих днях  $T_{pi}$ , при этом учитывается параллельность выполнения работ разными исполнителями. Данный расчёт позволяет определить величину заработной платы.

$$T_{pi} = \frac{t_{\text{ож}i}}{Ч_i}, \quad (4.2)$$

где  $T_{pi}$  – продолжительность одной работы, рабочие дни;

$t_{\text{ож}i}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, человеко-дни;

$Ч_i$  – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

Для перевода длительности каждого этапа из рабочих в календарные дни, необходимо воспользоваться формулой (4.3):

$$T_{ki.инж} = T_{pi} \cdot k_{кал}, \quad (4.3)$$

где  $T_{ki}$  – продолжительность выполнения  $i$ -й работы в календарных днях;

$T_{pi}$  – продолжительность выполнения  $i$ -й работы в рабочих днях;

$k_{кал}$  – календарный коэффициент.

Календарный коэффициент определяется по формуле:

$$k_{кал.инж} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}} = \frac{365}{365 - 104 - 14} = 1,48 \quad (4.4)$$

где  $T_{кал}$  – общее количество календарных дней в году;  $T_{вых}$  – общее количество выходных дней в году;  $T_{пр}$  – общее количество праздничных дней в году (2020 год).

Расчеты временных показателей проведения научного исследования обобщены в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоёмкость работ						Длительность работ в рабочих днях $T_{pi}$	Длительность работ в календарных днях $T_{ki}$
	$t_{min}$ , чел-дни		$t_{max}$ , чел-дни		$t_{ожг}$ , чел-дни			
	Исп.1	Исп.2	Исп.1	Исп.2	Исп.1	Исп.2		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1. Составление и утверждение технического задания, утверждение плана-графика	2	-	4	-	2,8	-	2,8	4
2. Календарное планирование выполнения работ	1	3	3	4	1,8	3,4	2,6	4
3. Обзор научной литературы	-	6	-	10	-	7,6	7,6	11
4. Выбор методов исследования	-	3	-	5	-	3,8	3,8	6
5. Планирование эксперимента	2	6	4	8	2,8	6,8	4,8	7

6. Подготовка образцов для эксперимента	-	5	-	7	-	5,8	5,8	9
7. Проведение эксперимента	-	15	-	20	-	17	17	25
8. Обработка полученных данных	-	10	-	15	-	12	12	18
9. Оценка правильности полученных результатов	2	3	4	5	2,8	3,8	3,3	5
10. Составление пояснительной записки		8		10	-	8,8	8,8	13
<b>Итого:</b>	7	59	15	84	13,5	68,5	68,5	102

Примечание: Исп. 1 – научный руководитель, Исп. 2 – инженер.

На основе таблицы составлен календарный план-график выполнения проекта с использованием диаграммы Ганта (таблица 4.10).

Таблица 4.10 – Диаграмма Ганта

№ работ	Т, кал.дн	Продолжительность выполнения работ														
		Февраль			Март			Апрель			Май			Июнь		
		2	3		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	4															
2	4															
3	11															
4	6															
5	7															
6	9															
7	25															
8	18															
9	5															
10	13															

	Научный руководитель
	Инженер и научный руководитель
	инженер

## Бюджет научно-технического исследования

При планировании бюджета научно-технического исследования учитывались все виды расходов, связанных с его выполнением. В этой работе использовать следующую группировку затрат по следующим статьям:

- материальные затраты научно-исследовательской работы (НИР);
- затраты на специальное оборудование для экспериментальных работ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- накладные расходы НИР.

## Расчет материальных затрат научно-технического исследования

Материальные затраты — это затраты организации на приобретение сырья и материалов для создания готовой продукции.

Данная часть включает затрат всех материалов, используемых при разработке основного теплообменного оборудования установки получения кислорода. Результаты расчета затрат представлены в таблице 4.11.

Таблица 4.11 – Расчет затрат

Наименование статей	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Итого затраты, руб.
Азот в баллоне	т	0,507	30000	15210
Перчатки резиновые, технические	пар	1	12	12
<b>Итого:</b>				15222

## Расчет амортизации специального оборудования

Расчет сводится к определению амортизационных отчислений, так как оборудование было приобретено до начала выполнения данной работы и эксплуатировалось ранее, поэтому при расчете затрат на оборудовании учитываем только рабочие дни по данной теме.

Расчет амортизации проводится следующим образом:

Норма амортизации: рассчитывается по формуле:

$$H_A = \frac{1}{n}, \quad (4.5)$$

где  $n$  – срок полезного использования в количестве лет.

Амортизация оборудования рассчитывается по формуле:

$$A = \frac{H_A I}{12} \cdot m, \quad (4.6)$$

где  $I$  – итоговая сумма, тыс. руб.;  $m$  – время использования, мес.

Таблица 4.12 – Затраты на оборудование

№ п/п	Наименование оборудования	Кол-во ед.	Срок полезного использования, лет	Время использования, мес.	$H_A$ , %	Цена оборудования, руб.	Амортизация
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Научно-исследовательский реактор	1	25	0,2	4	2000000	13333
2	Теплообменник	1	20	0,2	5	70000	5834
3	Турбовоздуходувка	1	20	0,16	5	20000	1334
4	Испаритель	1	10	0,1	10	1000	84
5	Насос	1	10	0,1	10	200	17
<b>Итого:</b>						20602 руб.	

## Основная заработная плата исполнителей темы

В данном разделе рассчитывается заработная плата инженера и руководителя, помимо этого необходимо рассчитать расходы по заработной плате, определяемые трудоемкостью проекта и действующей системой оклада.

Основная заработная плата  $Z_{осн}$  одного работника рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_p, \quad (4.7)$$

где  $Z_{дн}$  – среднедневная заработная плата, руб.;  $T_p$  – продолжительность работ, выполняемых работником, раб.дн. (таблица 4.9).

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

Для шестидневной рабочей недели (рабочая неделя руководителя):

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d} = \frac{51285 \cdot 10,3}{246} = 2147,3 \text{ руб.}, \quad (4.8)$$

где  $Z_m$  – месячный должностной оклад работника, руб.;  $F_d$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дней;  $M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

- при отпуске в 28 раб. дня –  $M = 11,2$  месяца, 5-дневная рабочая неделя;
- при отпуске в 56 раб. дней –  $M = 10,3$  месяца, 6-дневная рабочая неделя.

Для пятидневной рабочей недели (рабочая неделя инженера):

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d} = \frac{33150 \cdot 11,2}{213} = 1743,1 \text{ руб.} \quad (4.9)$$

Должностной оклад работника за месяц:

– для руководителя:

$$Z_m = Z_{мс} \cdot (1 + k_{np} + k_d) k_p = 26300 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 51285 \text{ руб.} \quad (4.10)$$

– для инженера:

$$Z_m = Z_{мс} \cdot (1 + k_{np} + k_d) k_p = 17000 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 33150 \text{ руб.}, \quad (4.11)$$

где  $Z_{мс}$  – заработная плата, согласно тарифной ставке, руб.;  $k_{np}$  – премиальный коэффициент, равен 0,3;  $k_d$  – коэффициент доплат и надбавок, равен 0,2;  $k_p$  – районный коэффициент, равен 1,3 (для г. Томска).

Таблица 4.13 – Баланс рабочего времени исполнителей

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней - выходные дни - праздничные дни	52/14	104/14
Потери рабочего времени - отпуск - невыходы по болезни	48/5	24/10
Действительный годовой фонд рабочего времени	246	213

Таблица 4.14 – Расчет основной заработной платы исполнителей

Исполнители НИ	$Z_{мс}, руб$	$k_{np}$	$k_o$	$k_p$	$Z_m, руб$	$Z_{дн}, руб$	$T_p, раб.дн.$	$Z_{осн}, руб$
Руководитель	26300	0,3	0,2	1,3	51285	2147,3	13,5	28988,6
Инженер	17000	0,3	0,2	1,3	33150	1743,1	68,5	119402,4
Итого:								148391

Дополнительная заработная плата определяется по формуле:

– для руководителя:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн} = 0,15 \cdot 28988,6 = 4348,3 \text{ руб.} \quad (4.12)$$

– для инженера:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн} = 0,15 \cdot 119402,4 = 17910,4 \text{ руб.}, \quad (4.13)$$

где  $k_{доп}$  – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимаем равным 0,15).

### Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Отчисления во внебюджетные фонды определяется по формуле:

– для руководителя:

$$Z_{внеб} = k_{внеб} (Z_{осн} + Z_{доп}) = 0,3 \cdot (28988,6 + 4348,3) = 10001,1 \text{ руб.} \quad (4.14)$$

– для инженера:

$$Z_{внеб} = k_{внеб} (Z_{осн} + Z_{доп}) = 0,3 \cdot (119402,4 + 17910,4) = 41193,8 \text{ руб.}, \quad (4.15)$$

где  $k_{внеб}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд ОМС и социальное страхование). Общая ставка взносов составляет в 2020 году – 30% (ст. 425, 426 НК РФ).

## Накладные расходы

Накладные расходы включают в себя следующие расходы: печать ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи и т.д. Сумма 5 статьи затрат, рассчитанных выше, приведена в таблице ниже и используются для расчета накладных расходов.

Таблица 4.15 – Группировка затрат по статьям

Статьи					
1	2	3	4	5	6
Амортизация	Сырье, материалы	Основная заработная плата	Дополнительная заработная плата	Отчисления на социальные нужды	Итого без накладных расходов
20602	15222	148391	22258,7	51194,9	257668,6

Величина накладных расходов определяется по формуле (4.16):

$$Z_{накл} = (\text{сумма статей } 1 \div 5) \cdot k_{np}, \quad (4.16)$$

где  $k_{np}$  – коэффициент, учитывающий накладные расходы. Величина коэффициента принимается равной 0,2.

На основании полученных данных по отдельным статьям затрат составляется калькуляция плановой себестоимости научно-исследовательской работы по форме, приведенной в таблице 4.16. В таблице также представлено определение бюджета затрат конкурирующего научно-исследовательского проекта.

Таблица 4.16 – Группировка затрат по статьям

№	Наименование статьи	Сумма, руб.	
		Текущий Проект	Исп.2
1	Материальные затраты НИР	15222	14626,3
2	Затраты на специальное оборудование	20602	22959,8

3	Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	148391	148391
4	Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	22258,7	22258,7
5	Отчисления во внебюджетные фонды	51194,9	51194,9
6	Накладные расходы	10306,7	10606,7
Бюджет затрат НИР		267975,3	270037,4

**Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования**

Для определения эффективности исследования рассчитан интегральный показатель эффективности научного исследования путем определения интегральных показателей финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

**Интегральный показатель финансовой эффективности** научного исследования получен в процессе оценки бюджета затрат трех вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принят за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

В качестве сравнения была найдена конкурирующая разработка:

- 1) Получение кислорода с помощью массообменного оборудования;
- 2) Криогенная ректификация.

Интегральный финансовый показатель разработки рассчитывается как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{ri}}{\Phi_{\text{max}}}, \quad (4.17)$$

где  $I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i}$  – интегральный финансовый показатель разработки;

$\Phi_{ri}$  – стоимость  $i$ -го варианта исполнения;

$\Phi_{\text{max}}$  – максимальная стоимость исполнения.

$\Phi_{\text{текущ.проект}} = 267975,3$  руб,  $\Phi_{\text{исп.2}} = 270037,4$ руб.

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.1}} = \frac{\Phi_{\text{текущ.проект}}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{267975,3}{300000,3} = 0,89;$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.2}} = \frac{\Phi_{\text{исп.2}}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{270037,4}{300000,3} = 0,9;$$

**Интегральный показатель ресурсоэффективности** вариантов выполнения НИР ( $I_{ri}$ ) определен путем сравнительной оценки их характеристик, распределенных с учетом весового коэффициента каждого параметра (таблица 4.17).

Таблица 4.17 – Сравнительная оценка характеристик вариантов НИР

Объект исследования Критерии	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Исп.2
1. Безопасность при использовании установки	0,15	4	4
2. Стабильность работы	0,2	4	4
3. Технические характеристики	0,2	5	3
4. Механические свойства	0,3	5	4
5. Материалоёмкость	0,15	5	4
ИТОГО	1	4,65	3,8

Расчет интегрального показателя для разрабатываемого проекта:

$$I_{p1} = 0,15 \cdot 4 + 0,2 \cdot 4 + 0,2 \cdot 5 + 0,3 \cdot 5 + 0,15 \cdot 5 = 4,65;$$

$$I_{p2} = 0,15 \cdot 4 + 0,2 \cdot 4 + 0,2 \cdot 3 + 0,3 \cdot 4 + 0,15 \cdot 4 = 3,80;$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки вычисляется на основании показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{исп.i} = \frac{I_{р-исп.i}}{I_{финр}} \quad (20)$$

$$I_{исп.1} = \frac{4,65}{0,89} = 5,22, \quad I_{исп.2} = \frac{3,8}{0,9} = 4,23$$

Далее интегральные показатели эффективности каждого варианта НИР сравнивались с интегральными показателями эффективности других вариантов с целью определения сравнительной эффективности проекта (таблица 4.18).

Таблица 4.18 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Текущий проект	Исп.2
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,89	0,9
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,65	3,8
3	Интегральный показатель эффективности	5,22	4,23
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1	0,81

Сравнение среднего интегрального показателя сопоставляемых вариантов позволило сделать вывод о том, что наиболее финансово- и ресурсоэффективным является текущий проект. Он наиболее более эффективен по сравнению с конкурентами.

## Выводы по разделу

В результате выполнения целей раздела можно сделать следующие выводы:

1. Результатом анализа конкурентных технических решений является выбор одного из вариантов реализации НИР как наиболее подходящего и оптимального по сравнению с другими.
2. В ходе планирования для руководителя и инженера был разработан график реализации этапа работ, который позволяет оценивать и планировать рабочее время исполнителей. Определено следующее: общее количество календарных дней для выполнения работ составляет 102 дня; общее количество дней, в течение которых работал инженер, составляет 98 дней; общее количество дней, в течение которых работал руководитель, составляет 20 дней;
3. Для оценки затрат на реализацию проекта разработан проектный бюджет, который составляет 267975,3 руб;
4. Результат оценки эффективности ИР показывает следующие выводы:
  - 1) значение интегрального финансового показателя ИР составляет 0,89, что является показателем того, что ИР является финансово выгодной по сравнению с аналогами;
  - 2) значение интегрального показателя ресурсоэффективности ИР составляет 4,65, по сравнению с 3,8;
  - 3) значение интегрального показателя эффективности ИР составляет 5,22, по сравнению с 4,23, и является наиболее высоким, что означает, что техническое решение, рассматриваемое в ИР, является наиболее эффективным вариантом исполнения.

## 9 Социальная ответственность

### Введение

Ректификация известна с начала XIX века как один из важнейших технологических процессов главным образом спиртовой и нефтяной промышленности. В настоящее время ректификацию во всем мире применяют в самых различных областях химической технологии, где выделение компонентов в чистом виде имеет весьма важное значение (в производствах органического синтеза, изотопов, полимеров, полупроводников и различных других веществ высокой чистоты).

Проектируемый аппарат будет расположен на рабочей площадке Кемеровского Азота и будет работать в составе установки разделения воздуха для получения кислорода и азота. Установка располагается в помещении размерами 125x90 м<sup>2</sup>.

На представленной рабочей площадке, помимо ректификационной колонны, размещается другое рабочее оборудование (ректификационная колонна, охладители, насосы ...). Данное оборудование создает опасные и вредные факторы. Поэтому необходимо строго соблюдать технику безопасности и применять различные меры для обеспечения безопасности рабочего персонала во время работы на установке.

В этом разделе выпускной квалификационной работы будут проанализированы условия труда с точки зрения возникновения вредных и опасных факторов, рассмотрены мероприятия по технике безопасности и производственной санитарии, а также мероприятия по противопожарной профилактике на рабочем месте сотрудников данного предприятия.

## **Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**

В соответствии с Федеральным законом «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» от 21.07.97 г. № 116-ФЗ[1] разрабатываемая ректификационная колонна относится к категории опасных производственных объектов: получение, переработка легковоспламеняющихся и горючих жидкостей.

В соответствии со статьей 37 второй главы Конституцией Российской Федерации: «Каждый имеет право на труд в условиях, отвечающих требованиям безопасности ...». Согласно статье 7, п.2: «В РФ охраняется труд и здоровье людей, устанавливается гарантированный минимальный размер оплаты труда, обеспечивается государственная поддержка семьи, материнства, отцовства и детства, инвалидов и пожилых граждан». Согласно статье 41, п.1: «Каждый имеет право на охрану здоровья и медицинскую помощь». Согласно статье 42: «Каждый имеет право на благоприятную окружающую среду, достоверную информацию о ее состоянии и на возмещение ущерба, причиненного его здоровью или имуществу экологическим правонарушением», [2].

Все рабочие и служащие, поступающие на работу, подлежат предварительному медицинскому освидетельствованию. Все трудящиеся на рабочих местах, где возможно присутствие в воздухе рабочей зоны вредных газов и паров, а также возможен непосредственный контакт с опасными реагентами и продуктами производства, обеспечиваются средствами индивидуальной защиты, спецодеждой и обувью в соответствии с нормами трудового законодательства.

Оплата труда работников, занятых на работах с вредными и (или) опасными условиями труда, устанавливается в повышенном размере. Минимальный размер повышения оплаты труда работникам, занятым на работах с вредными и(или) опасными условиями труда, составляет 4

процента тарифной ставки (оклада), установленной для различных видов работ с нормальными условиями труда [ТК РФ Статья 147, 3].

Для работников, занятых на работах с вредными и(или) опасными условиями труда, где установлена сокращенная продолжительность рабочего времени, максимально допустимая продолжительность ежедневной работы (смены) не может превышать [ТК РФ Статья 94, 3]:

- При 36-часовой рабочей неделе - 8 часов;
- При 30-часовой рабочей неделе и менее – 6 часов.

В целях обеспечения защиты персональных данных работников, все персональные данные работника следует получать у него самого.

Если персональные данные работника возможно получить только у третьей стороны, то работник должен быть уведомлен об этом заранее и от него должно быть получено письменное согласие. Работодатель должен сообщить работнику о целях, предполагаемых источниках и способах получения персональных данных, а также о характере подлежащих получению персональных данных и последствиях отказа работника дать письменное согласие на их получение [ТК РФ Статья 86, 3].

При эргономическом подходе на уровне системы человек - машина необходимо изучить задачу и последовательность операций, которые должен выполнять человек, с тем чтобы оптимизировать взаимодействие, затем с непосредственным рабочим пространством и, наконец, с общей средой, в которой должны работать человек и машина. При совершенствовании существующего рабочего места, а также при проектировании принципиально новой машины необходимо оценить на месте предложенные решения.

Конструкция производственного оборудования должна

обеспечивать оптимальное распределение функций между человеком и производственным оборудованием с целью обеспечения безопасности, ограничения тяжести и напряженности труда, а также обеспечения высокой эффективности функционирования системы "человек - производственное оборудование". Конструкция всех элементов производственного оборудования, с которыми человек в процессе трудовой деятельности осуществляет непосредственный контакт, должна соответствовать его антропометрическим свойствам [ГОСТ 12.2.049-80].

Минимальная продолжительность ежегодного дополнительного оплачиваемого отпуска работникам составляет 7 календарных дней. Продолжительность ежегодного дополнительного оплачиваемого отпуска конкретного работника устанавливается трудовым договором на основании отраслевого (межотраслевого) соглашения и коллективного договора с учетом результатов специальной оценки условий труда [ТК РФ Статья 117, 3].

## **Производственная безопасность**

Для обеспечения производственной безопасности необходимо выявить и обезопасить от опасных и вредных производственных факторов работников. Эти факторы приведены в таблице 1 ниже.

На предприятии должны быть соблюдены санитарно-гигиенические нормы по метеоусловиям. Особое внимание следует уделить освещению, отоплению и вентиляции цеха[4].

При работе с ректификационной колонной, а также нахождение рядом с оборудованием запрещено без допуска к работе с вредными и токсичными веществами, без спецодежды и других защитных средств.

Таблица 1 - Возможные опасные и вредные производственные факторы на рабочем месте КАО "АЗОТ"

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015[5])	Нормативные документы
Опасные и вредные производственные факторы, связанные с аномальными микроклиматическими параметрами воздушной среды на местонахождении рабочего	ТР ТС 032/2013 О безопасности оборудования, работающего под избыточным давлением.[6]
Опасность термических ожогов	ГОСТ 12.1.038-82 Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов [7].
Опасные и вредные производственные факторы, связанные с электрическим током  Опасные производственные факторы, связанные с вибрацией	ГОСТ 12.0.003-2015 Система стандартов безопасности труда. Опасные и вредные производственные факторы. ГОСТ Р 12.1.019-2009 Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты [8]. ГОСТ ИСО 10816-1-97. Вибрация.[9]

## **Выявление вредных и опасных факторов при эксплуатации ректификационной колонны**

1. Рациональное освещение производственных помещений в светлое время суток осуществляется за счет естественного освещения через оконные проемы в наружных стенах. В темное время суток применяется общее местное и комбинированное искусственное освещение. Предусмотрено также аварийное и дежурное освещение. Это обеспечивает безопасные и здоровые условия труда. Освещение, соответствующее санитарным нормам, является главнейшим условием гигиены труда и культуры производства. При хорошем освещении устраняется напряжение зрения, ускоряется темп работы. Недостаточное освещение рабочих мест отрицательно влияет на хрусталик глаза, что может привести к близорукости.

В целях сохранения работоспособности в течение рабочей смены необходимым условием является рациональное освещение помещений и рабочих мест, которое обеспечивается естественным и искусственным освещением согласно СП 52.13330.2016 [10].

2. Источниками шума в производственном помещении являются вентиляторы и электродвигатели рабочих механизмов, уровень шума которых при установке в соответствие с техническими требованиями не должен превышать допустимых норм.

3. Согласно «ГОСТ ИСО 10816-1-97. Вибрация»[9] если число колебаний в секунду не превышает 16, то они воспринимаются человеком как сотрясения и называются вибрацией. Частота колебаний от 16 до 20000 в секунду воспринимается органами слуха как шум, колебания с частотой свыше этого предела не ощущаются человеком, и называются ультразвуками. Вибрация приводит к преждевременному износу деталей, механизмов, может вызвать аварию, вредно действует на сердечно-сосудистую и нервную системы организма, вызывает

снижение слуха и даже стойкую глухоту, является причиной снижения работоспособности, ослабления памяти, внимания, остроты зрения, что увеличивает возможность травматизма [9].

4. Микроклимат - климатические условия, созданные в ограниченном пространстве искусственно в закрытых помещениях или обусловленные природными особенностями. Он определяется действующими на организм человека сочетаниями температуры, влажности и скорости движения воздуха, а также температурой окружающих поверхностей. Поддержание оптимального микроклимата возможно только в том случае, если предприятие оснащено установкам кондиционирования микроклимата. В остальных случаях следует обеспечивать допустимые микроклиматические условия, т.е. такие, при которых хотя и могут возникать напряжения терморегуляции организма, но не выходят за пределы его физиологических приспособительных возможностей. При этом не возникают нарушения состояния здоровья, но может наблюдаться ухудшение самочувствия и понижение работоспособности. Микроклимат производственных помещений определяется назначением помещения и характером технологического процесса [11]. В целях исключения вредного влияния микроклиматических факторов на организм человека и создания нормальных условий труда в рабочей зоне параметры воздушной среды должны соответствовать СанПиН 1.2.3685-21 [12].
5. Вредное воздействие компьютера при работе оператора по контролю рабочих параметров процессов оказывает следующие воздействия: проблемы с мышцами, длительное сидячее положение негативно сказывается на циркуляции крови в теле и на положение позвоночника; негативное воздействие на зрение человека при длительной работе; нарушение внимания и усталость при поиске информации; воздействие на нервную систему. В целях уменьшения пагубного влияния компьютера необходимо сокращение времени компьютерной работы,

увеличение числа перерывов в соответствии с рекомендацией СП 2.4.3648-20 [13].

6. При работе с электрическими установками на производстве, приборами в быту следует соблюдать требования электробезопасности. Они представляют собой систему организационных и технических мероприятий и средств, которые обеспечивают защиту людей от вредного и опасного действия электрического тока. Действие электрического тока на организм человека носит многообразный характер. Проходя через организм человека, электрический ток вызывает термическое, электролитическое и биологическое действие. Термическое действие тока проявляется в ожогах тела, нагреве до высокой температуры внутренних органов человека (кровеносных сосудов, сердца, мозга). Электролитическое действие тока проявляется в разложении органических жидкостей тела (воды, крови) и нарушении их физико-химического состава. Биологическое действие тока проявляется в раздражении и возбуждении живых тканей организма и сопровождается непроизвольными судорожными сокращениями мышц (сердца, лёгких) [14]. Основные способы и средства электрозащиты: изоляция токопроводящих частей и ее непрерывный контроль; установка оградительных устройств; предупредительная сигнализация и блокировки; использование знаков безопасности и предупреждающих плакатов; использование малых напряжений; электрическое разделение сетей; защитное заземление; выравнивание потенциалов; зануление; защитное отключение; средства индивидуальной электрозащиты [14].
7. Противопожарные мероприятия на производстве исполняются в соответствии с постановлением Правительства РФ от 16.09.2020 N 1479 (ред. от 21.05.2021) "Об утверждении Правил противопожарного режима в Российской Федерации" [15], НПБ 88-2001 "Пожарная автоматика зданий и сооружений" [16], справочником руководителя

тушения пожара (под. ред. Иванникова); СП 30.13330.2016 "Внутренний водопровод и канализация" [17], и СП 31.13330.2021 "Водоснабжение. Наружные сети и сооружения" [18] обеспечение пожарной безопасности и пожаротушения возлагается на руководителя предприятия. Так же местоположение первичных средств пожаротушения и пожарного инвентаря должно быть согласовано с органами пожарного надзора. Пожарные щиты с набором инвентаря (огнетушителями ОП-10, ОУ-5 для тушения электрооборудования, ведра, лопаты, топор), и ящиками для песка  $V=1,0 \text{ м}^3$  предусматриваются на выходе из помещений и здания цеха таким образом, чтобы не препятствовать вынужденной эвакуации людей.

## **Экологическая безопасность**

Работа данной ректификационной установки создает негативное воздействие на окружающую среду. Источником загрязнения являются кислородная и азотная фракции из блока разделения воздуха, выбрасываемые постоянно и влажный азот после регенерации и блока сушки 3 раза в сутки. В связи с этим, необходимо предусмотреть комплекс мероприятий для охраны окружающей среды и обеспечения экологической безопасности. Комплекс проектных мероприятий, направленных на уменьшение воздействия объектов на окружающую среду должен включать:

1. Принятие герметичных схем приема-откачки продуктов;
2. Обеспечение сбора утечек с оборудования с дальнейшим возвратом в технологический процесс;
3. Подъём на оптимальную высоту труб выбросов организованных источников для улучшения рассеивания;
4. Закрытый дренаж трубопроводов и оборудования;

5. Лабораторный контроль за соблюдением нормативов выбросов вредных веществ в атмосферу.

## **Безопасность при чрезвычайных ситуациях**

В результате реализации принятых в ходе работы над ВКР проектных решений на производстве могут возникнуть следующие чрезвычайные ситуации:

1. возникновение пожара и взрыва (ввиду пожаро- и взрывоопасности разделяемой фракционной смеси);
2. возникновение производственных аварий техногенного характера (нарушение герметичности оборудования, разрыв трубопроводов).

Меры по предотвращению ЧС включают в себя соблюдение техники безопасности, оснащение производственных зданий и территории промышленной площадки первичными средствами пожаротушения и мероприятия по пожарной безопасности в соответствии с Федеральным законом "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности" от 22.07.2008 N 123-ФЗ (последняя редакция). Об утверждении правил пожарной безопасности в российской Федерации (ППБ 01-03). [19]. Местоположение первичных средств пожаротушения и пожарного инвентаря должно быть согласовано с органами пожарного надзора.

При возникновении пожара необходимо отключить ректификационную колонну от сети, вентиляцию, убрать огнеопасные предметы в безопасное место, одновременно, по возможности, ликвидировать очаг. Средства тушения применять с учетом того, что является источником пожара. Для тушения горящей одежды использовать воду, для горящих электроустановок - углекислые огнетушители, для тушения воспламененных установок, закрепленных штативом - асбестовое одеяло.

## Выводы по разделу

Фактические значения выявленных факторов соответствуют нормативным документам.

По взрывопожарной и пожарной опасности согласно СП12.13130.2009 «Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности»[20], помещение предприятия относится к категории В4 пожароопасность.

Характеристика веществ и материалов, находящихся (обращающихся) в помещении категории В4: Горючие и трудногорючие жидкости, твердые горючие и трудногорючие вещества и материалы (в том числе пыли и волокна), вещества и материалы, способные при взаимодействии с водой, кислородом воздуха.

По негативному воздействию на окружающую среду, производственный объект предприятия относится к объектам IV категории: отсутствие выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух или наличие на объекте стационарных источников загрязнения окружающей среды, масса загрязняющих веществ в выбросах в атмосферный воздух которых не превышает 10 тонн в год; отсутствие сбросов загрязняющих веществ в составе сточных вод в централизованные системы водоотведения, другие сооружения и системы отведения и очистки сточных вод.

## Заключение

В данной выпускной квалификационной работе объектом разработки является ректификационная колонна для получения жидкого кислорода на производстве АО «СДС Азот» г. Кемерово.

В ходе работы были проведены технологический, тепловой, механический расчеты. Была выбрана ректификационная цельносварная колонна с неразборными ситчатыми тарелками, т.к. они лучше всего подходят для разделения незагрязненной жидкости с постоянной нагрузкой.

В разделе «Социальная ответственность» были рассмотрены основные опасные и вредные факторы работы в цехе получения жидкого кислорода, разобраны основные требования соблюдения правил техники безопасности.

В разделе «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» были рассчитаны себестоимость готовой продукции, технико-экономические показатели, найдена точка безубыточности и проведен конкурентный анализ.

## Список использованной литературы

1. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: Учебник для вузов. – 15-е изд., стереотипное. Перепечатка с девятого издания 1973 г.
2. – М.: ООО «Альянс», 2009. – 753 с.
3. Архаров А.М. и др. "Криогенные системы. Основы теории и расчета. Том 2" Машиностроение, 1996 год, 720 стр.
4. АТК 24.218.06-90 Штуцера для сосудов и аппаратов стальных сварных. Типы, основные параметры, размеры и общие технические требования
5. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей М., 1972 г. 720 стр. с илл.
6. Алексеев В. П. и др. Расчет и моделирование аппаратов криогенных установок/ В. П. Алексеев, Г. Е. Вайнштейн, П. В. Герасимов. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1987. – 280 с.: ил.
7. Дытнерский Ю.И. Основные процессы и аппараты химической технологии: Пособие по проектированию /Г.С.Борисов, В.П.Брыков, Ю.И. Дытнерский и др. 2-е изд., перераб. и доп. М.:Химия, 1991. - 452 с.
8. Лацинский А.А. Основы конструирования и расчета химической аппаратуры / Толчинский А.Р., - Ленинград : Изд-во: "Машиностроение" , 1970. - 752 с.
9. Беляев В.М., Миронов В.М. Расчет и конструирование основного оборудования отрасли Учебное пособие. - Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. - 288с.
10. ОСТ 26 -291-94 Сосуды и аппараты стальные сварные. Общие технические условия

11. ГОСТ 24755-89 (СТ СЭВ 1639-88) Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность укрепления отверстий
12. Павлов К.Ф., Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии / Романков П.Г., Носков А.А. - 14-е изд., стереотипное. Перепечатка с издания 1987 г. М.: ООО ИД «Альянс», 2007. - 576 с.
13. Физические величины. Справочник. А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др.; Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 1232 с.
14. ГОСТ Р 52857.3- 2007 Сосуды и аппараты НОРМЫ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА НА ПРОЧНОСТЬ Укрепление отверстий в обечайках и днищах при внутреннем и внешнем давлениях. Расчет на прочность обечаек и днищ при внешних статических нагрузках на штуцер
15. Михалев М.Ф. Расчет и конструирование машин и аппаратов химических производств / Ленинград "Машиностроение". - Ленинград : Изд-во: Ленинградское отделение, 1984. - 302 с.
16. ГОСТ 52857.1-2007 Сосуды и аппараты нормы и методы расчета на прочность общие требования.
17. Федеральный закон «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» от 21.07.97 г. № 116-ФЗ
18. Конституция Российской Федерации (принята всенародным голосованием 12.12.1993) (с учетом поправок, внесенных Законами РФ о поправках к Конституции РФ от 30.12.2008 N 6-ФКЗ, от 30.12.2008 N 7-ФКЗ, от 05.02.2014 N 2-ФКЗ, от 01.07.2020 N 11-ФКЗ) // Собрание законодательства РФ, 01.07.2020, N 31, ст. 4398.
19. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 25.02.2022) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.03.2022) [Электронный ресурс] — URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_law\\_34683](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_law_34683)

20. Кушелев В.П. Основы техники безопасности на предприятиях химической промышленности. - Л.: Химия, 1977 - 279 с.
21. ГОСТ 12.0.003-2015. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.
22. *ТР ТС 032/2013* Технический регламент Таможенного союза "О безопасности оборудования, работающего под избыточным давлением"
23. ГОСТ 12.1.038-82 Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов.
24. ГОСТ Р 12.1.019-2009 Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты
25. ГОСТ ИСО 10816-1-97. Вибрация.
26. Строительные нормы и правила: СП 52.13330.2016. Естественное и искусственное освещение: нормативно-технический материал.
27. Крепша Н.В. Безопасность жизнедеятельности: учебное пособие для иностранных студентов / Н.В. Крепша; Национальный исследовательский Томский политехнический университет - Томск: изд-во Томского политехнического университета, 2014. - 198 с.
28. Санитарные нормы и правила: СанПиН 1.2.3685-21. "Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания".
29. Строительные нормы и правила: СП 2.4.3648-20. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы. - Москва: 2003. - 32 с.
30. Правила устройства электроустановок: ПУЭ от 01.01.2003. Общие правила.- Москва: 2003. - 14 с.
31. Постановление Правительства РФ от 16.09.2020 N 1479 (ред. от 21.05.2021) "Об утверждении Правил противопожарного режима в Российской Федерации".

32. Строительные нормы и правила: НПБ 88-2001 Пожарная автоматика зданий и сооружений.
33. Строительные нормы и правила: СП 30.13330.2016 Внутренний водопровод и канализация.
34. Строительные нормы и правила: СП 31.13330.2021 «Водоснабжение. Наружные сети и сооружения»
35. Федеральный закон "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности" от 22.07.2008 N 123-ФЗ (последняя редакция). Об утверждении правил пожарной безопасности в российской Федерации (ППБ 01-03).
36. Строительные нормы и правила: СП 12.13130.2009 определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной безопасности.