

Школа **Инженерная школа новых производственных технологий**  
 Отделение школы (НОЦ) **Научно-образовательный центр Н.М.Кижнера**  
 Направление подготовки **18.04.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии**

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Тема работы
<b>Модернизация ректификационной колонны разделения пропан-пропиленовой фракции</b>

УДК 66.048.37:662.76.034.2

**Студент**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4KM81	Кабанова Дарья Вячеславовна		

**Руководитель**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Беляев В.М.	к.т.н., доцент		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

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
Доцент	Романцов И.И.	к.т.н., доцент		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Беляев В.М.	к.т.н., доц		

## Планируемые результаты обучения по ООП 18.04.02 выпуска 2020

Код	Результат обучения	Требования ФГОС ВО, СУОС, критериев АИОР, и/или заинтересованных сторон
P1	Осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ), <i>CDIO Syllabus</i> . Критерии АИОР, согласованные с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> , требования профессиональных стандартов: 40.011 «Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским работам»
P2	Осуществлять управление проектом на всех этапах его жизненного цикла	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ, <i>CDIO Syllabus</i> . Критерии АИОР, согласованные с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> , требования профессиональных стандартов: 40.011 - «Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским работам».
P3	Организовывать и руководить работой команды, вырабатывать командную стратегию для достижения цели	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ, <i>CDIO Syllabus</i> . Критерии АИОР, согласованные с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> , требования профессиональных стандартов: 40.011 - «Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским работам»,
P4	Применять современные коммуникативные технологии в том числе на иностранном языке (-ах) для академического и профессионального взаимодействия	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ, <i>CDIO Syllabus</i> . Критерии АИОР, согласованные с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> , требования профессиональных стандартов: 40.011 - «Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским работам», 01.004 «Педагог профессионального обучения, профессионального образования и дополнительного профессионального образования»
P5	Формулировать, разрабатывать и реализовывать методы решения научно-исследовательских задач, в области проектирования и конструирования энерго и ресурсоэффективных химических, нефтегазоперерабатывающих и нефтехимических производств, представлять и защищать результаты	Требования ФГОС ВО, СУОС, <i>CDIO Syllabus</i> . Критерии АИОР, согласованные с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> , требования профессиональных стандартов: 40.011- «Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским работам»

Р6	<p>Проводить все стадии проектирования с использованием компьютерного 3-х мерного моделирования, коммерческих симуляторов и пакетов прикладных программ, в области проектирования и конструирования энерго и ресурсоэффективных химических, нефтегазоперерабатывающих и нефтехимических производств, представлять и защищать результаты</p>	<p>Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ, <i>CDIO Syllabus</i>. Критерии АИОР, согласованные с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>, требования профессиональных стандартов: 40.011- «Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским работам».</p>
Р7	<p>Формулировать, разрабатывать и реализовывать методы решения научно-исследовательских задач, в области проектирования и конструирования энерго и ресурсоэффективных химических, нефтегазоперерабатывающих и нефтехимических производств</p>	<p>Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ, <i>CDIO Syllabus</i>. Критерии АИОР, согласованные с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>, требования профессиональных стандартов: 40.011 «Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским работам ».</p>

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

Школа **Инженерная школа новых производственных технологий**  
 Отделение школы (НОЦ) **Научно-образовательный центр Н.М.Кижнера**  
 Направление подготовки **18.04.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии**

УТВЕРЖДАЮ:  
 Руководитель ООП  
 \_\_\_\_\_ Беляев В.М.  
 (Подпись)                      (Дата)                      (Ф.И.О.)

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

В форме:

Магистерская диссертация
--------------------------

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

Студенту:

Группа	ФИО
4КМ81	Кабанова Дарья Вячеславовна

Тема работы:

Модернизация ректификационной колонны разделения пропан-пропиленовой фракции	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	02.03.2020 №62-11/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	07.06.2020
--	------------

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<p><b>Исходные данные к работе</b>  <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><b>1. Ректификационная колонна непрерывного действия с ситчатыми тарелками разделения пропан-пропиленовой фракции.</b>          Производительность колонны по исходной смеси 2708 кг/час.          Содержание легколетучего компонента, % масс.:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• в исходной смеси 62%;</li> <li>• в дистилляте 95%;</li> <li>• в кубе не более 5%.</li> </ul> <p>Исходная смесь питания поступает в колонну при температуре 45 °С под давлением 2,1 МПа.</p> <p><b>2. Конденсатор-холодильник для конденсации паров пропан-пропиленовой фракции, с содержанием пропилена 95%.</b>          Пары поступают в межтрубное пространство под давлением 2,1 МПа и температурой 38 °С. Охлаждающая среда - вода, поступает в трубное пространство под давлением 0,1 МПа и температурой 12 °С.</p>
---	--

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b> (аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</p>	<p>Реферат Оглавление Введение 1 Обзор литературы 2 Описание технологической схемы 3 Расчет ректификационной колонны 4 Расчет кожухотрубчатого конденсатора- холодильника 5 Автоматизация и контроль производства 6 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение 7 Социальная ответственность Заключение Список использованной литературы Приложения</p>
<p><b>Перечень графического материала</b> (с точным указанием обязательных чертежей)</p>	<p>Технологическая схема с КИПиА (А1, А0). Общий вид ректификационной колонны (А1, А0). Выносные элементы ректификационной колонны (А1,); Общий вид конденсатора-холодильника (А!); Выносные элементы конденсатора холодильника</p>

### Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

(с указанием разделов)

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Кащук Ирина Вадимовна
Социальная ответственность	Романцов Игорь Иванович
Раздел на иностранном языке	Диденко Анастасия Владимировна.

#### Названия разделов на русском и иностранном языках:

Литературный обзор

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	02.03.2020
--	------------

#### Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Беляев В.М.	к.т.н., доц		

#### Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4КМ81	Кабанова Дарья Вячеславовна		

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

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
4КМ81	Кабанова Дарья Вячеславовна

<b>Школа</b>	<b>ИШНПТ</b>	<b>Отделение школы</b>	<b>НОЦ Н.М.Кижнера</b>
<b>Уровень образования</b>	Магистр	<b>Направление</b>	Энерго- и ресурсосберегающие процессы химической технологии, нефтехимии и биотехнологии

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

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	<i>Стоимость материальных ресурсов и специального оборудования определены в соответствии с рыночными ценами г. Томска. Тарифные ставки исполнителей определены штатным расписанием НИ ТПУ.</i>
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	<i>Норма амортизационных отчислений на специальное оборудование.</i>
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	<i>Отчисления во внебюджетные фонды 30 %. (НК РФ)</i>

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

1. <i>Анализ конкурентных технических решений (НИ)</i>	<i>Анализ и оценка конкурентоспособности НИ. SWOT-анализ</i>
2. <i>Формирование плана и графика разработки и внедрения (НИ)</i>	<i>Определение структуры выполнения НИ. Определение трудоемкости работ. Разработка графика проведения исследования.</i>
3. <i>Составление бюджета инженерного проекта (НИ)</i>	<i>Расчет бюджетной стоимости НИ по разработке стенда</i>
4. <i>Оценка ресурсной, финансовой, бюджетной эффективности (НИ)</i>	<i>Определение: интегрального финансового показателя; интегрального показателя ресурсоэффективности; интегрального показателя эффективности.</i>

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

1. Оценка конкурентоспособности НИ
2. Матрица SWOT
3. Диаграмма Ганта
4. Бюджет НИ
5. Основные показатели эффективности НИ

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	02.03.2020
---	------------

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент	Кашук Ирина Вадимовна	к.т.н, доцент		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
4КМ81	Кабанова Дарья Вячеславовна		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
4КМ81	Кабанова Дарья Вячеславовна

<b>Школа</b>	<b>ИШНПТ</b>	<b>Отделение (НОЦ)</b>	<b>НОЦ Н.М.Кижнера</b>
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	18.04.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы химической технологии, нефтехимии и биотехнологии

Тема ВКР:

<b>Модернизация ректификационной колонны разделения пропан-пропиленовой фракции</b>	
<b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объект исследования – ректификационная колонна для разделения пропан пропиленовой фракции. Колонна устанавливается на открытой площадке площадью около 200 м2 на территории предприятия. Имеется естественное и искусственное освещение. Ректификационная колонна для разделения пропан-пропиленовой фракции применяется в нефтеперерабатывающей промышленности для получения товарного пропилена.
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>– специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul>	Федеральный закон от 1.07.97 г. № 11 -ФЗ "О промышленной безопасности опасных производственных объектов " Конституция Российской Федерации от 12.12.1993 Федеральный закон № 4 -ФЗ от 8 декаб я 01 года «О специальной оценке условий труда» Федеральный закон №184-ФЗ «о техническом регулировании от 7 декаб я 00 года. Федеральный закон № 1 -ФЗ от .07. 008 г ( ед от 10.07 01 г) «Технический регламент о требовании к пожарной безопасности» ГОСТ 12.1.005-88 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. СНиП 23-03-2003. Защита от шума: СНиП 23-05-95*. Естественное и искусственное освещение СанПин 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений НПБ 88-2001* Установки пожаротушения и сигнализации. Нормы и правила проектирования ГН 2.2.5.3532-18 Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны
<b>2. Производственная безопасность:</b> 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов	2.1.1 Повышенный уровень вибрации 2.1.2 Повышенная температура рабочей зоны

2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	2.1.3 Повышенный уровень шума 2.1.4 Недостаточная освещенность рабочей зоны 2.1.5 Монотонность труда 2.1.6 Нервное и эмоциональное напряжение 2.1.7 Возможный выброс вредных веществ 2.2 Анализ опасных выявленных факторов при эксплуатации проектируемой ректификационной колонны 2.2.1 Электрический ток 2.2.2 Повышенная температура поверхности оборудования 2.2.3 Работа на высоте 2.2.4 Работа с сосудами под давлением
<b>3. Экологическая безопасность:</b>	3.1 Применение санитарно-защитной зоны вследствие выбросов вредных веществ, отходов, облучения. 3.2 Не допустить выбросы вредных веществ в атмосферу: бензин, серосодержащие соединения, пары предельных и непредельных углеводородов. 3.3 Предотвратить химическое загрязнение водотоков в результате отмывания химических отходов в канализационную сеть ароматические соединения, анилин; 3.4 Осуществление раздельного сбора и хранения отходов.
<b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b>	Перечень возможных ЧС на объекте: ЧС на пожаро- и взрывоопасных объектах, ЧС на электроэнергетических системах и системах связи. Наиболее типичная ЧС: пожар Рассмотреть профилактические мероприятия, требования к безопасности и меры по ликвидации её последствий: 1. использование огнетушителя, песка, асбестового одеяла, пожарного крана и пожарного щита; 2. обеспечение средствами индивидуальной защиты; 3. организационная эвакуация работников
Дата выдачи задания для раздела по линейному графику <b>02.03.2020</b>	

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Романцов Игорь Иванович	к.т.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4КМ81	Кабанова Дарья Вячеславовна		



## Реферат

В магистерской диссертации рассчитана непрерывно работающая ректификационная колонна разделения пропан-пропиленовой фракции, с внутренними устройствами – ситчатыми тарелками и конденсатор-холодильник для конденсации пропилена. В проекте представлены расчеты основных технологических и расчет конструктивных показателей аппаратов.

Был проведен технологический и конструктивно-механический расчет проектируемых аппаратов.

Найдены вредные и опасные производственные факторы, а также переложены способы снижения негативного воздействия на организм человека и окружающую среду.

На основании расчета построены чертежи общего вида аппарата, сборочные единицы ректификационной колонны и конденсатора-холодильника.

Диссертационная работа содержит расчетно-пояснительную записку из 233 страниц текста, 31 таблица, 30 рисунков, 74 литературных источника и графическую часть из 4 листов формата А1.

Проект выполнен с использованием системы автоматизированного проектирования MathCad, графического редактора Microsoft Visio, текстового редактора Microsoft Word 2016, а также Компас 3D-V16.

## **Abstract**

In the master's thesis, a continuously operating distillation column for the separation of propane-propylene fraction, with internal devices - sieve plates and a condenser-cooler for condensation of propylene was calculated. The project presents the calculations of the main technological and design indicators of devices.

A technological and structural-mechanical calculation of the designed devices was carried out.

Harmful and dangerous production factors were found, and ways to reduce the negative impact on the human body and the environment were shifted.

Based on the calculation, drawings of the general view of the apparatus, assembly units of a distillation column and a condenser-cooler were built.

The thesis contains a settlement and explanatory note of 233 pages of text, 31 tables, 30 figures, 74 literary sources and a graphic part of 4 sheets of A1 format.

The project was carried out using the computer-aided design system MathCad, the graphic editor Microsoft Visio, the text editor Microsoft Word 2016, as well as the Compass 3D-V16.

## Определения, обозначения, сокращения, нормативные ссылки

### Определения

**Конденсация** - переход вещества в жидкое или твёрдое состояние из газообразного.

**Конденсатор-холодильник** – кожухотрубчатый аппарат в котором происходит конденсация и охлаждение среды одновременно.

**Ректификация** - процесс разделения двойных или многокомпонентных смесей за счёт противоточного массообмена между паром и жидкостью.

**Ректификационная колонна** - аппарат для разделения многокомпонентных смесей путем двустороннего тепло- и массообмена.

**Расчетное давление** - давление, на которое проводят расчет на прочность.

**Пробное давление**- давление, при котором проводят испытание сосуда или аппарата.

**Расчетная температура**- наибольшая температура стенки элемента с учетом температурных условий, ожидаемых в процессе эксплуатации.

### Обозначения

AB	суммарная площадь сечения болтов (шпилек) по внутреннему диаметру резьбы или нагруженному сечению наименьшего диаметра, мм <sup>2</sup> ;
V <sub>пер</sub>	ширина перегородки в трубном пространстве, мм; b <sub>п</sub> ширина плоской прокладки, мм;
b <sub>0</sub>	эффективная ширина прокладки, мм; b <sub>1</sub> ширина тарелки фланца кожуха, мм;
b <sub>2</sub>	b <sub>2</sub> ширина тарелки фланца камеры, мм;
c	сумма прибавок к расчетным толщинам стенок, мм;
c <sub>к</sub>	расчетная прибавка к толщине стенки кожуха, мм;
D	внутренний диаметр кожуха, днища, крышки, мм;
D <sub>сп</sub>	средний диаметр прокладки, мм;
D <sub>р</sub>	расчетный внутренний диаметр укрепляемого элемента, мм
d	наружный диаметр трубы, мм;
d <sub>вн</sub>	внутренний диаметр трубы, мм;
E <sub>к</sub>	модуль продольной упругости материала кожуха, МПа;
F	суммарная осевая сила, действующая на кожух, Н;

$f_b$	площадь поперечного сечения болта, мм <sup>2</sup> ;
$H$	высота днища, крышки, мм;
$h_{\Pi}$	толщина прокладки, мм;
$h_1$	толщина тарелки фланца кожуха, мм;
$K_T$	коэффициент условий работы при расчете труб на устойчивость;
$M$	расчетный изгибающий момент, Н*мм;
$P_{61}$	расчетная нагрузка на шпильки при затяжке, необходимая для обеспечения в рабочих условиях давления на прокладку, достаточного для герметизации фланцевого соединения, Н;
$P_{62}$	расчетная нагрузка на шпильки при затяжке, необходимая для обеспечения обжатия прокладки и минимального начального натяжения шпилек, Н;
$p$	расчетное давление в камере аппарата воздушного охлаждения, МПа;
$Q_1, Q_2$	количество теплоты, Дж/с;
$s$	толщина стенки кожуха, днища, крышки, мм;
$s_p$	толщина трубной решетки, мм;
$s_{p1}$	расчетная толщина стенки кожуха, мм
$t$	расстояние между осями труб трубного пучка, мм;
$t_k$	расчетная температура стенки, °С;
$U_{\Pi}$	линейная податливость прокладки, мм/Н;
$U_{\text{фн}}$	угловая податливость фланца, 1/Н * мм;
$Z$	число рядов труб в поперечном направлении;
$\alpha_k$	коэффициент линейного расширения материала кожуха при температуре $t_k$ , 1/°С;
$\alpha_T$	коэффициент линейного расширения материала труб при температуре $t_T$ , 1/ °С;
$\gamma$	коэффициент жесткости фланцевого соединения;
$\sigma_{\text{доп}}$	допустимое напряжение материала при расчетной температуре, МПа;
$\sigma_m$	допускаемое значение общих мембранных и изгибных напряжений;
$\sigma_p$	расчетное напряжение, МПа.

## Оглавление

Реферат .....	9
Abstract.....	10
Определения, обозначения, сокращения, нормативные ссылки .....	11
Введение.....	16
1 Обзор литературы .....	17
1.1 Основные характеристики процесса ректификации .....	17
1.1.1 Непрерывная ректификация .....	17
1.1.2 Периодическая ректификация .....	19
1.2 Виды ректификационных колонн.....	20
1.2.1 Тарельчатые ректификационные колонны .....	20
1.2.2 Насадочные ректификационные колонны .....	21
1.3 Описание процесса ректификации .....	22
1.4 Устройства для модернизации существующей колонны разделения пропан-пропиленовой фракции.....	23
1.4.1 Высокопроизводительные тарелки VGPlus .....	23
1.4.2 Тарелки с вихревыми элементами Shell ConSep .....	25
2 Описание технологической схемы .....	27
3 Расчет ректификационной колонны .....	29
3.1 Материальный расчет .....	29
3.1.1 Материальный баланс ректификационной колонны .....	29
3.1.2 Пересчет составов фаз из массовых долей в мольные доли .....	30
3.1.3 Массовые расходы жидкости и пара в различных частях колонны.....	35
3.1.4 Определение скорости пара и диаметра колонны .....	37
3.1.5 Определение высоты колонны.....	40
3.2 Конструктивно-механический расчет для ректификационной колонны .....	49
3.2.1 Расчет толщины стенки цилиндрической обечайки, крышки и днища .....	49
3.2.2 Расчет толщины стенки эллиптической крышки и днища .....	54
3.2.3 Расчет штуцеров .....	57
3.2.4 Подбор люка-лаза .....	59
3.2.5 Расчет укрепления отверстий .....	60
3.2.6 Расчет фланцев.....	65

3.2.7	Расчет тарелок на прогиб .....	80
3.2.8	Расчет ветровой нагрузки и сейсмического воздействия .....	83
3.2.9	Расчет опорной обечайки .....	111
4	Расчет кожухотрубчатого конденсатора- холодильника .....	116
4.1	Технологический расчет .....	116
4.1.1	Тепловой расчет .....	116
4.1.2	Ориентировочный расчет и подбор конденсатора .....	119
4.1.3	Уточненный расчет и выбор кожухотрубчатого конденсатора .....	122
4.1.3.1	Коэффициент теплоотдачи от стенки к смеси (зона конденсации) .....	123
4.1.3.2	Коэффициент теплоотдачи от смеси к стенке (зона охлаждения) .....	126
4.1.3.3	Суммарное термическое сопротивление стенки и загрязнений .....	128
4.1.3.4	Коэффициенты теплопроводности теплообмена .....	129
4.2	Конструктивно-механический расчет .....	130
4.2.1	Подбор и расчет штуцеров .....	130
4.2.2	Выбор конструкционных материалов .....	132
4.2.3	Подбор продольных и поперечных перегородок .....	133
4.2.4	Расчет тепловой изоляции .....	134
4.2.5	Гидравлический расчет конденсатора .....	135
4.2.6	Расчет потерь давления в трубопроводе .....	136
4.2.7	Расчет потерь давления в трубном пространстве конденсатора .....	138
4.2.8	Подбор насоса .....	139
4.2.9	Механический расчет конденсатора .....	140
4.2.10	Расчет толщины стенки кожуха .....	140
4.2.11	Расчет толщины стенки эллиптического днища .....	143
4.2.12	Расчет толщины распределительной камеры .....	144
4.2.13	Расчет на прочность и герметичность фланцевых соединений .....	145
4.2.14	Расчет толщины плоской крышки .....	155
4.2.15	Проверка необходимости укрепления отверстий .....	158
4.2.16	Расчет веса аппарата .....	161
4.2.17	Подбор и расчет опорных лап .....	162
5	Автоматизация и контроль производства .....	164
6	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение .....	166

6.1	Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения .....	166
6.1.1	Предпроектный анализ. Анализ рынка. Основные потребители и конкуренты. ....	166
6.1.2	Анализ конкурентных технических решений.....	167
6.1.3	SWOT-анализ .....	168
6.2	Планирование научно-исследовательских работ.....	170
6.2.1	Структура работ в рамках научного исследования.....	170
6.2.2	Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения.....	172
6.3	Бюджет научно технического исследования (НТИ).....	175
6.3.1	Расчет материальных затрат НТИ.....	175
6.3.2	Расчет затрат на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ .....	177
6.3.3	Основная и дополнительная заработная плата исполнителей темы .....	178
6.3.4	Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления).....	180
6.3.5	Накладные расходы .....	181
6.4	Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта.....	182
6.5	Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования .....	183
7	Социальная ответственность.....	187
7.1	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.....	187
7.1.1	Специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства.....	187
7.1.2	Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. ....	188
7.2	Промышленная безопасность .....	189
7.2.1	Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть при производстве объекта на предприятии. ....	189
7.2.3	Обоснование мероприятий по защите персонала предприятия от действия опасных и вредных факторов .....	190
7.3	Экологическая безопасность.....	203
	Заключение.....	207
	Список использованной литературы .....	209
	Приложения.....	216

## **Введение**

В современной промышленности все большее внимание уделяется необходимости использования чистых и особо чистых материалов. Вследствие чего, производство становится еще более сложным и дорогостоящим. Технологий по разделению веществ, а также их очистке от примесей уделяется все большее внимание.

Самой распространенной технологией разделения в промышленности является ректификация - процесс разделения жидких неоднородных смесей на практически чистые компоненты, либо фракции, различающиеся по температуре кипения [1].

Огромные ректификационные колонны химических и нефтехимических заводов, в некотором смысле даже, являются символами современной промышленности. Высота ректификационных колонн часто достигает 30 метров и более, что сказывается на стоимости изготовления оборудования, эксплуатации, а стоимость ремонта колонн становится огромной [2].

Физические свойства перегонки, заключаются в двустороннем массообмене и теплообмене между потоком жидкости и потоком пара с турбулизацией контактирующих фаз. Далее пары, которые отделились после массообмена, обогащаются низкокипящими компонентами, а жидкость - высококипящими компонентами. После определенного количества контактов между жидкостью и паром, получаются пары, в составе которых в основном низкокипящие компоненты. А жидкая фаза будет состоять из высококипящих компонентов. Как и любой диффузионный процесс разделение ректификацией происходит в противотоке пара и жидкости. Орошение жидкостью во время ректификации паров создается за счет конденсации части пара в верхней части колонны, а паровое орошение - за счет испарения части жидкости в нижней части колонны. Конструкция ректификационной колонны меняется в зависимости от способа контакта фаз и организации процесса [2].



## **1 Обзор литературы**

### **1.1 Основные характеристики процесса ректификации**

Конструкция колонны представляет собой вертикально стоящий полый цилиндр, внутри которого находятся тарелки (контактные устройства различной конструкции) или размещен материал - насадка. Куб и обратный холодильник (дефлегматор) обычно представляют собой кожухотрубные теплообменники.

Процесс ректификации является одним из энергоемких, и во многих случаях потребляет до 50 % всей энергии от всего предприятия.

Ректификация применяется для получения отдельных фракций, а также индивидуальных углеводородов из нефтяного сырья в нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности, окиси этилена, акрилонитрила, акрилхлорсиланов - в химической промышленности. Так же ректификацию широко использует и в отраслях народного хозяйства: коксохимической, химико-фармацевтической, лесохимической, пищевой промышленности

Ректификационные установки по принципу действия подразделяются на периодические и непрерывные. В установках непрерывного действия отделенная сырьевая смесь поступает в колонну, а продукты разделения непрерывно удаляются из нее. В установках периодического действия отделенную смесь одновременно загружают в куб и подвергают перегонке для получения продуктов заданного конечного состава [2][3].

#### **1.1.1 Непрерывная ректификация**

Наиболее распространено в промышленности применение ректификационных колонн непрерывного действия (рисунок 1).

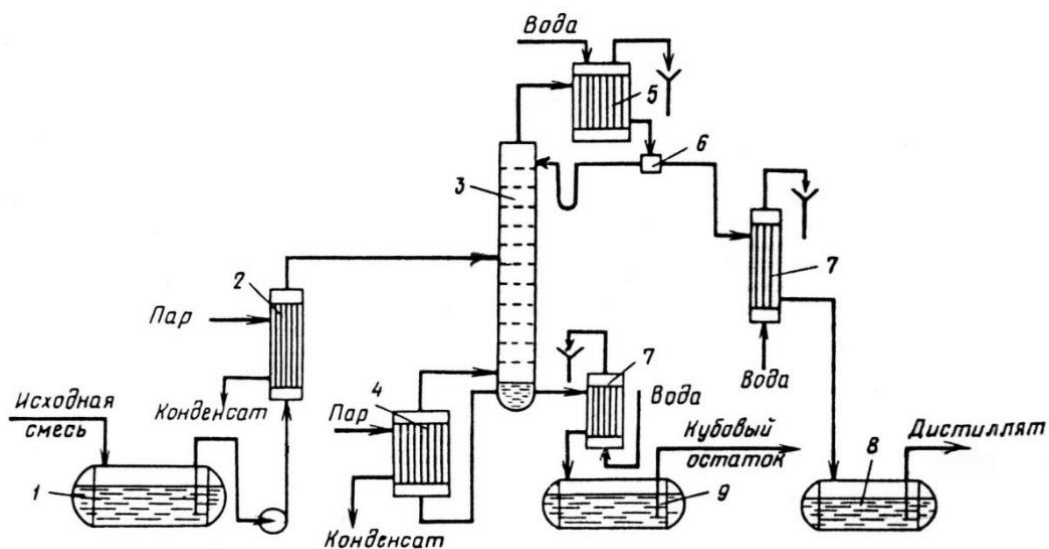


Рисунок 1 – Схема непрерывно действующей ректификационной установки:

- 1 – емкость исходной смеси; 2 – подогреватель; 3 - ректификационная колонна;  
 4 – кипятильник; 5 – дефлегматор; 6 – делитель флегмы; 7 – холодильник;  
 8 – сборник дистиллята; 9 – сборник кубового остатка

Аппарат представляет собой цилиндрический корпус, внутри которого установлены контактные устройства (тарелки, насадки). Снизу-верх по колонне движутся пары, поступающие в нижнюю часть аппарата из теплообменника. С помощью кипятильника создается восходящий поток пара.

С верха колонны в виде пара отбирается чистый низкокипящий компонент и направляются в дефлегматор, где происходит их конденсация и делится на дистиллят и флегму.

Жидкость, выходящая с низа колонны (близкая по составу к высококипящему компоненту), также делится на две части. Одна часть направляется в кипятильник, а вторая – остаток, последовательно поступает в холодильник и сборник.

На рисунке 1 показана принципиальная схема непрерывно ректификационной установки. Такие установки необходимо оборудовать контрольно-измерительными и регулируемыми приборами, которые автоматизируют работу и проводят процесс с помощью программного управления в оптимальных условиях [3].

### 1.1.2 Периодическая ректификация

При небольшом масштабе производства применяются ректификационные установки периодического действия (рисунок 2).

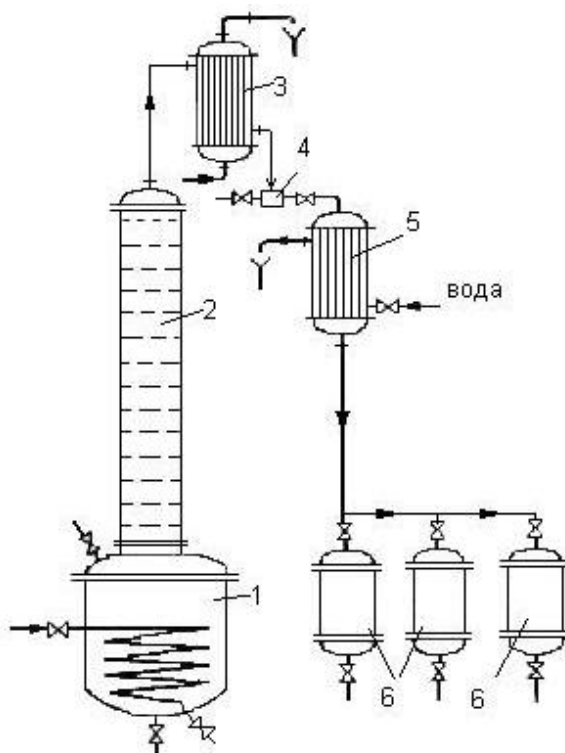


Рисунок 2 – Схема периодически действующей ректификационной установки:  
1-куб; 2-ректификационная колонна; 3-дефлегматор; 4-делитель флегмы; 5-холодильник; 6-сборники дистиллята [3]

Исходная смесь загружается в куб, подогревается до кипения, и пары поступают в колонну. По мере поднятия по колонне, пары обогащаются низкокипящим компонентом и поступают в дефлегматор. В дефлегматоре происходит полная или частичная конденсация. В первом случае жидкость разделяется на флегму и дистиллят. Полученный продукт охлаждают и направляют в емкость-сборник.

При сравнении периодически действующей колонны (рисунок 2) с ректификационной колонной непрерывного действия (рисунок 1), необходимо обратить внимание, что периодическая работает, подобно верхней части непрерывно-действующей колонны, как колонна для укрепления паров, а куб играет роль исчерпывающей части [3].

## 1.2 Виды ректификационных колонн

### 1.2.1 Тарельчатые ректификационные колонны

Тарельчатые колонны в основном распространены в нефтеперерабатывающей промышленности и в крупных отраслях. Колонны представляют собой вертикальную трубу, в которые пластины определенной конфигурации устанавливаются после определенного расстояния, где происходит контакт между паровой и жидкой фазами.

Расстояние между тарелками в тарельчатой колонне обычно от 0,4...0,5 метра. Нужно учитывать число теоретических ступеней разделения, [3, с.106] на практике эффективность тарелок обычно не больше 50%. Из-за чего, реальная высота разделения в колонне примерно в 2 раза больше теоретической.

В колонных аппаратах в настоящее время используются десятки конструкций различных контактных устройств, отличающихся по своим характеристикам и технико-экономическим показателям. Наряду с тарелками первого поколения: колпачковые и ситчатые (рисунок 3), которые до сих пор эксплуатируются на старых производствах, широкое распространение получили S-образные, клапанные (рисунок 4) [4].

На рисунке 3 представлены основные виды используемых в промышленности тарелок.

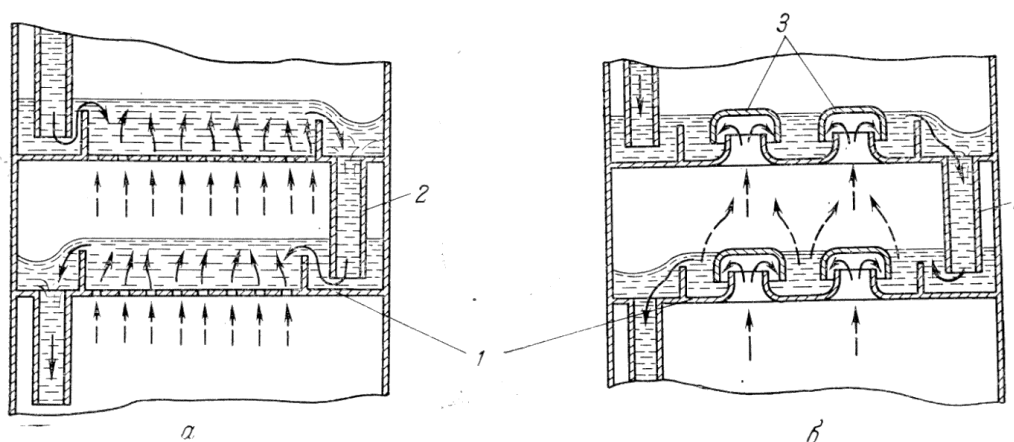


Рисунок 3 - Схемы устройства ректификационных тарелок:

а – ситчатая; б – колпачковая; 1 – тарелки; 2 – переливные стаканы; 3 – колпачки.

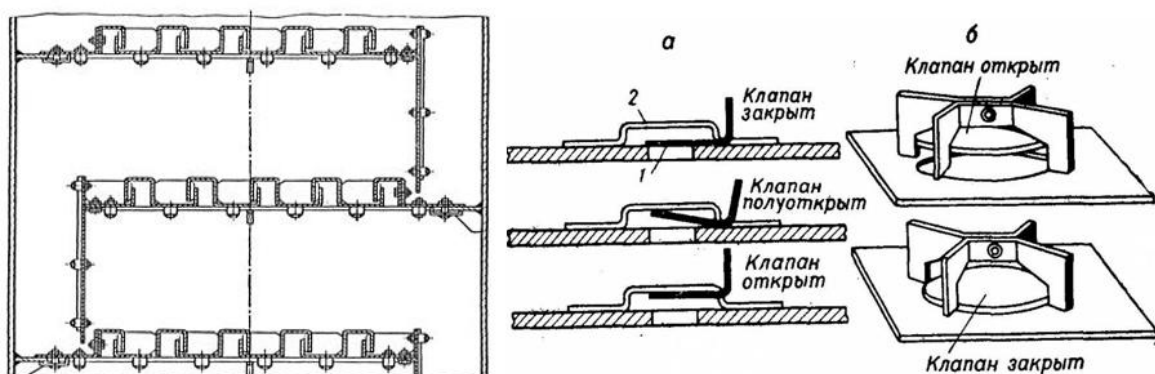


Рисунок 4- Схемы устройства ректификационных тарелок: 1- S-образные, 2- клапанные тарелки

### 1.2.2 Насадочные ректификационные колонны

Насадочные колонны используются при необходимости обеспечить небольшое удержание жидкости в колонне, небольшой перепад давления, и для малотоннажного производства. Для насадочных колонн были изобретены типы насадок (кольца Полла, вырезанный металл, решетки и т. д.), которые оказались весьма эффективными в колоннах большого диаметра.

Колонны с насадками - высоко эффективные. Высота теоретической ступени разделения для колонн большой производительности составляет от 0,4 метра и выше. Это происходит из-за байпас-эффекта, степень влияния которого увеличивается с ростом диаметра колонны.

Внутренние устройства представляют собой твердые тела различной формы, которые загружаются в колонну. Развитая поверхность насадок обуславливает значительную поверхность контакта пара и жидкости. Известно много конструктивных модификаций упакованных тел, основные типы которых показаны на рисунке 5 [3], [4].

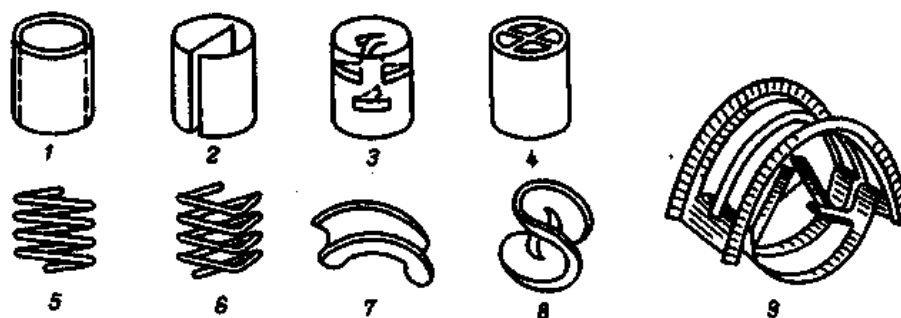


Рисунок 5- Основные типы насадок:

1-4 – кольца Рашига, Лесинга, Палля и кольца с крестообразными перегородками;  
 5, 6 – круглые и трехгранные пружины; 7, 9 – керамические и штампованные  
 металлические насадки Инталокс; 8 – насадка Берля.

### 1.3 Описание процесса ректификации

Путем процесса ректификации происходит процесс разделения пропан-пропиленовой фракции. Пропилен необходим для получения конечного продукта- полипропилена.

Исходным сырьем для получения пропилена является прямоугольный бензин, который направляется в печи пиролиза. После выхода из печей газообразная смесь продуктов пиролиза проходит ряд технологических процессов (отделение воды, пара, первичного разделения, сероочистки, осушки, компримирования и т.д.) и направляется в отделение фракционирования, где происходит разделение смеси на отдельные компоненты [5].

По России суммарные мощности по пиролизу для производства пропилена—порядка 1,5 млн. тонн в год. На рисунке 6 представлены данные по выпуску пропилена в России [5].



Рисунок 6- Производство пропилена в России.

В 2019 году в Тобольске СИБУР запустил завод мощностью 500 тыс. тонн пропилена год.

Большинство предприятий были построены в 70-80 годах 20вв. и оборудование в том числе и колонное давно не обновлялось.

В современном мире каждый завод ставит оптимизацию и модернизацию производства на первый план. Для того, чтобы полностью заменить оборудование необходимы огромные денежные затраты. Это не всегда выгодно для компании.

Модернизацию и оптимизацию можно провести с меньшими затратами - заменить внутренние контактные устройства.

## **1.4 Устройства для модернизации существующей колонны разделения пропан-пропиленовой фракции**

### **1.4.1 Высокопроизводительные тарелки VGPlus**

Высокопроизводительные тарелки сочетают полотна особой конструкции для увеличения производительности по парам и передовую технологию конструкции переливных устройств для наращивания производительности по жидкости. Тарелки можно использовать и для

модернизации существующей колонны, и для уменьшения размеров проектируемых колонн [6].

Тарелки VGPlus относятся к высокопроизводительным тарелкам с сегментными переливными карманами и одними из высокопроизводительных в мире, что доказано десятками успешных примеров их практического применения.

Конструкция тарелок сочетает в себе улучшенную барботажную зону и модифицированный переливной карман увеличенной производительности. Особенности:

- Присутствие на тарелке дополнительных элементов, которые направляют и перераспределяют поток вспененной жидкости, улучшает взаимодействие жидкой и газовой фаз на полотне тарелки.

- Улучшенные системы переливных карманов. Переливные камеры (наклонные, многохордовые, усеченные и ступенчатые) уменьшают захват газа сливающейся жидкостью и повышают производительность сливных камер, что обеспечивает при этом наибольшую площадь барботажной зоны [6].

Эта комбинация элементов позволяет достичь наибольшей производительности и эффективности тарельчатого устройства.



Рисунок 7- Двухсливные тарелки с направляющими планками и усечёнными переливными карманами



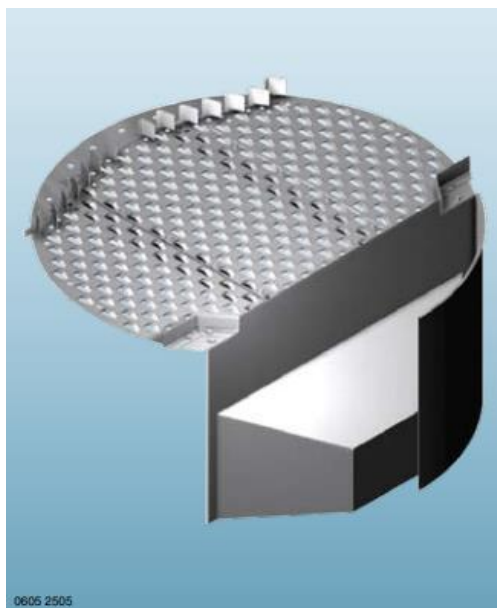


Рисунок 8 - Односливная тарелка с направляющей планкой и многогранным переливным карманом Stepark™

Преимуществами тарелок VGPlus является увеличенная производительность (до 30 %), уменьшение гидравлического сопротивления (до 20 %), равномерное распределение пара и жидкости

Тарелки VGPlus применяются для модернизации существующих колонн, а также для проектирования новой колонны разделения пропан-пропиленовой и этан-этиленовой фракции, деметанизации, деизобутанизации, деэтанализации, дебутанизации, депропанализации и для колонн фракционирования в нефтепереработке.

#### **1.4.2 Тарелки с вихревыми элементами Shell ConSep**

Производительность тарелок Shell ConSep может достигать на 80% больше в сравнении с классическими тарелками и на 50% больше, чем у иных высокопроизводительных тарелок, при этом сохраняя очень высокую массообменную эффективность. Разделение газа и жидкости на тарелке происходит за счет вихревых элементов. Из-за центробежного эффекта разделения получается заметно превысить ограничения, которые характерны для устройств с гравитационным разделением фаз. Тарелка может быть выполнена как ситчатая, так и клапанная тарелки с различными видами клапанов [6].

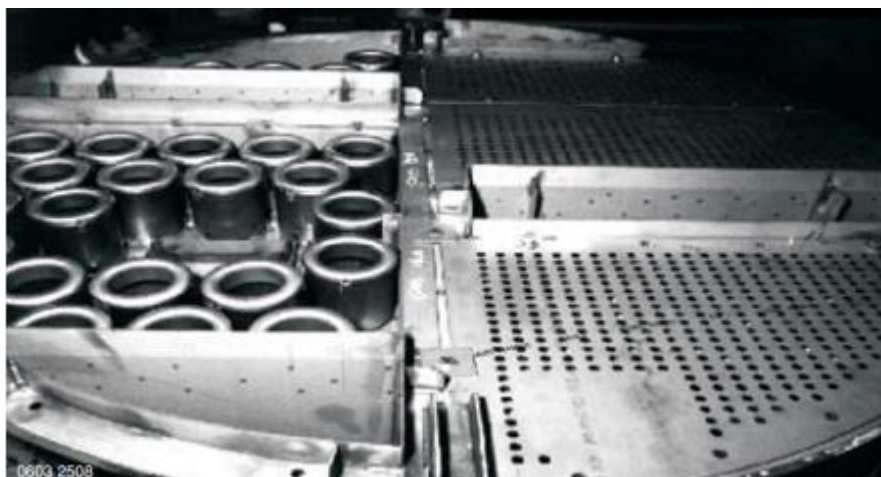


Рисунок 9 - Тарелка с вихревыми элементами Shell ConSep

Жидкость уносится с тарелки потоком пара и в режиме прямотока попадает на центробежные элементы, которые находятся под вышерасположенной тарелкой. В центробежном элементе идет разделение жидкости и пара, далее отделенная жидкость по трубе стекает в переливную камеру и через нее – на полотно тарелки, которая находится ниже той, с которой эта жидкость ранее была унесена. Отделенный газ направляется под вышележащую тарелку, проходит через ее, при этом взаимодействуя с находящейся там жидкостью, и после уносит эту жидкость в вихревые элементы вышележащей тарелки. Это позволяет увеличить скорость пара в колонне.

Тарелки Shell ConSep могут использоваться в нефтеперерабатывающей, нефтехимической промышленности и на морских платформах.

Основные области применения тарелок - колонны депропанзации, деэтанзации, секции циркуляционного орошения, дебутанизации, основные фракционирующие колонны, колонны разделения этан-этиленовой и пропан-пропиленовой фракций, а также там, где нужно повысить предельную производительность колонны.

## 2 Описание технологической схемы

Технологическая схема представлена в приложении А.

Осушенная ППФ из осушителя С-4 поступает в теплообменник Т-63/1-2, где охлаждается и частично конденсируется оборотной водой. Далее газожидкостная смесь из теплообменника направляется в емкость Е-34.

Жидкая пропан-пропиленовая фракция, из емкости Е-34 насосами Н-32/1-2 направляется колонну К-16, где происходит отпарка из ППФ легких углеводородных фракций С<sub>2</sub>, метана, водорода.

Кубовая жидкость колонны К-16 нагревается в межтрубном пространстве кипятильника Т-67, горячей водой. Пары с верха колонны К-16 направляются в межтрубное пространство дефлегматора Т-66, где охлаждаются и частично конденсируются. Газожидкостная смесь из дефлегматора направляется во флегмовую емкость Е-35. Жидкие углеводороды из емкости Е-35 насосом Н-33/1-2 направляются в колонну К-16 в качестве орошения.

Кубовый продукт колонны К-16 (жидкая ППФ) поступает для разделения в колонну К-17.

Разделение ППФ из-за близких температур кипения пропана и пропилена, входящих в ее состав, требует колонную аппаратуру с большим количеством тарелок.

Колонна К-17 состоит из К-17/1 и К-17/2.

Нагрев кубовой жидкости колонны К-17/1 осуществляется в межтрубном пространстве кипятильников Т-69/1-4 горячей циркуляционной водой.

Кубовый продукт колонны К-17/1 (пропановая фракция) направляется в межтрубное пространство теплообменника Т-70а, где охлаждается оборотной водой и далее выводится.

Пары с верха колонны К-17/1 направляются в нижнюю кубовую часть колонны К-17/2. Жидкость из куба колонны К-17/2 насосом Н-34/1-3 подается на верхнюю тарелку колонны К-17/1 в качестве орошения.

Пары с верха колонны К-17/2 охлаждаются и частично конденсируются в межтрубном пространстве трех параллельно работающих конденсаторов Т-68а/1-3 оборотной водой.

Газожидкостная смесь из конденсаторов Т-68а/1-3 поступает в флегмовую емкость Е-41.

Жидкая пропиленовая фракция из емкости Е-41, насосом Н-34/4-6 подается на верхнюю тарелку колонны К-17/2 в качестве орошения.

### 3 Расчет ректификационной колонны

#### 3.1 Материальный расчет

##### 3.1.1 Материальный баланс ректификационной колонны

Материальный баланс необходим для определения расходов дистиллята и кубового остатка процесса ректификации и состоит из двух уравнений.

Одно из них, общее уравнение материального баланса [2, с. 229]:

$$F = P + W \quad (1)$$

где,  $F$  - массовый исход по исходной смеси, кг/с;

$P$  - массовый исход по дистилляту, кг/с;

$W$  - массовый исход по кубовому остатку, кг/с.

Уравнение материального баланса по низкокипящему компоненту выгладит следующим образом [2, с.229]:

$$F\bar{x}_f = P\bar{x}_p + W\bar{x}_w \quad (2)$$

где  $x_f$  -массовая доля легколетучего компонента в смеси питания % масс.;  $x_p$  -массовая доля легколетучего компонента в дистилляте, % масс.;  $x_w$  –массовая доля легколетучего компонента в кубе, % масс.

Из уравнения (1) выразим массовый расход дистиллята или кубового остатка и подставим его в уравнение (2). Таким образом можно найти массовый расход кубового остатка или дистиллята. Подставим полученное значение расхода в уравнение определяем значение расхода.

Получаем [2, с.229]:

$$W = \frac{F(\bar{x}_p - \bar{x}_f)}{\bar{x}_f - \bar{x}_w} = \frac{0,752(0,95 - 0,63)}{0,62 - 0,05} = 0,276$$

$$P = F - W = 0,752 - 0,276 = 0,476$$

Чтобы определить нагрузки на ректификационную колонну по пару и жидкости необходимо найти флегмовое число  $R$ . Так как в соответствии с [2] способа определения оптимально флегмового числа в настоящее

время еще не изобрели, в соответствии с [2] выполним расчет, который основан на поиске коэффициента избытка флегмы  $\beta = R/R_{min}$ .  $R_{min}$  - наименьшее флегмовое число:

$$R_{min} = \frac{x_P - y_F^*}{y_F^* - x_F}$$

где,  $x_P$  и  $x_F$  - мольные доли легколетучего компонента соответственно в исходной смеси и дистилляте, кмоль/кмоль;  $y_F^*$  - концентрация легколетучего компонента в паре, находящемся в равновесии с исходной смесью, кмоль/кмоль смеси [2, с. 229].

Для расчета флегмового числа в соответствии с [2, с. 229], нужно провести пересчет составов фаз из массовых долей в мольные.

### 3.1.2 Пересчет составов фаз из массовых долей в мольные доли

Произведём пересчет по формуле [2, с.229]:

$$x = \frac{\frac{\bar{x}}{M_{HK}}}{\frac{\bar{x}}{M_{HK}} + \frac{(1 - \bar{x})}{M_{BK}}} \quad (3)$$

где,  $M_{HK}$  и  $M_{BK}$  - молярные массы низкокипящего и высококипящего компонентов соответственно, г/моль;  $x$  и  $\bar{x}$  - соответственно мольная и массовая доля низкокипящего компонента в исходной смеси, в кубовом остатке или дистилляте.

Низкокипящий компонент - пропилен, с молярной массой  $M_{HK} = 42$  г/моль, высококипящий компонент - пропан, с молярной массой  $M_{BK} = 44$  г/моль.

Переводим массовые доли в мольные.

Исходная смесь, кмоль/кмоль смеси:

$$x_f = \frac{\frac{\bar{x}_f}{M_{HK}}}{\frac{\bar{x}_f}{M_{HK}} + \frac{(1 - \bar{x}_f)}{M_{BK}}} = \frac{\frac{0,62}{42}}{\frac{0,62}{42} + \frac{(1 - 0,62)}{44}} = 0,631 \frac{\text{кмоль}}{\text{кмоль смеси}}$$

Дистиллят, кмоль/кмоль смеси:

$$x_p = \frac{\frac{\bar{x}_p}{M_{\text{НК}}}}{\frac{\bar{x}_p}{M_{\text{НК}}} + \frac{(1 - \bar{x}_p)}{M_{\text{ВК}}}} = \frac{\frac{0,95}{42}}{\frac{0,95}{42} + \frac{(1 - 0,95)}{44}} = 0,952 \frac{\text{кмоль}}{\text{кмоль смеси}}$$

Определим кубовый остаток, кмоль/кмоль смеси:

$$x_w = \frac{\frac{\bar{x}_w}{M_{\text{НК}}}}{\frac{\bar{x}_w}{M_{\text{НК}}} + \frac{(1 - \bar{x}_w)}{M_{\text{ВК}}}} = \frac{\frac{0,05}{42}}{\frac{0,05}{42} + \frac{(1 - 0,05)}{44}} = 0,052 \frac{\text{кмоль}}{\text{кмоль смеси}}$$

### 3.1.2.1 Построение фазовых диаграмм

Построение фазовых диаграмм необходимого для нахождения числа теоретических тарелок.

Необходимо построить t-x-y - диаграмму бинарной пропан-пропиленовой смеси и ее линию равновесия. Для построения этих диаграмм нужно определить равновесные составы паровой и жидкой фаз разделяемой смеси. Воспользуемся справочными данными [7, с. 641].

Таблица 1- Равновесные составы паровой и жидкой фаз пропан-пропиленовой смеси.

Пропан-пропиленовая смесь			
% C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>		Мольная доля C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	
0	0	0	0
10	11,02	0,1	0,1102
20	21,72	0,2	0,2172
30	32,12	0,3	0,3212
40	42,27	0,4	0,4227
50	52,23	0,5	0,5223
60	62,02	0,6	0,6202
70	71,66	0,7	0,7166
80	81,2	0,8	0,812
90	90,63	0,9	0,9063
100	100	1	1

По данным из таблицы 1 строим y-x диаграмму (рисунок 10).

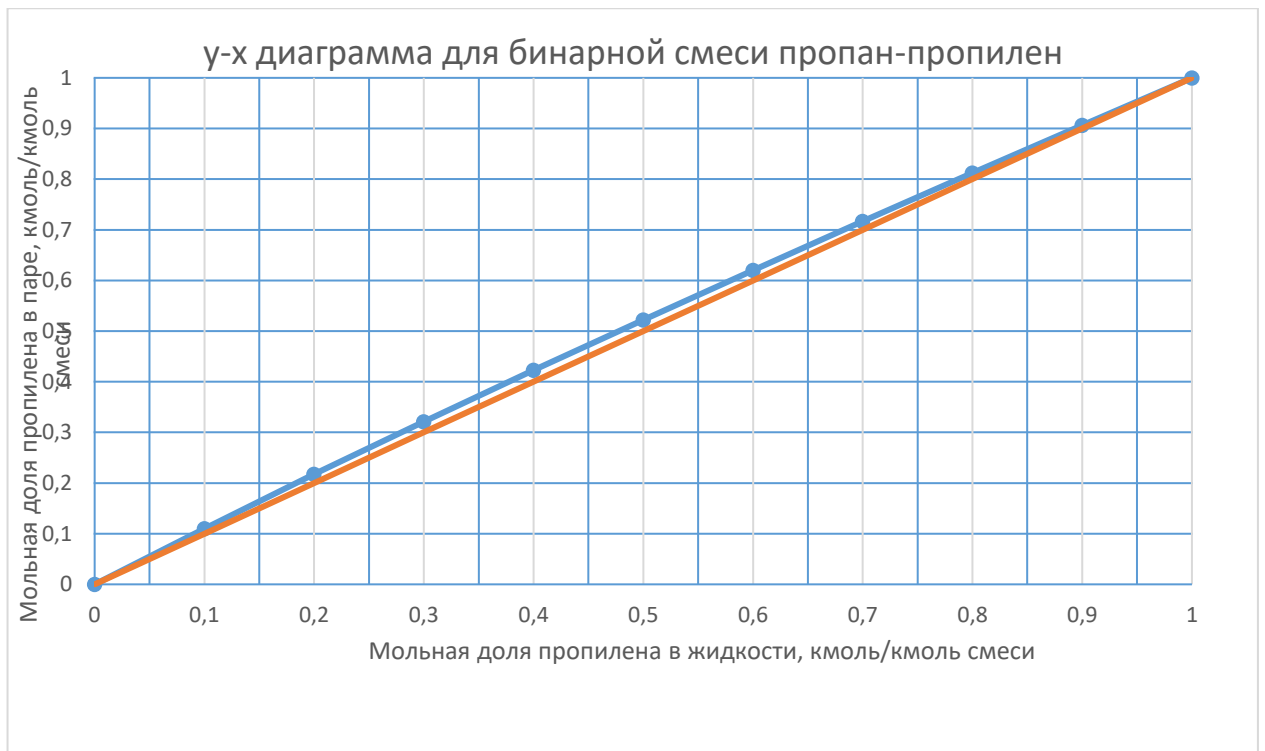


Рисунок 10- у-х диаграмма для бинарной смеси пропан-пропилен

Определяем по рисунку 10 значения  $y_w$ ,  $y_f$  и  $y_p$ .

Получаем:  $Y_p = 0,96$ ,  $Y_f = 0,67$ ,  $Y_w = 0,05$ .

Для наибольшей точности расчета найдем оптимальное флегмовое число и число теоретических тарелок графическим методом.

$$R_{min} = \frac{x_p - y_f^*}{y_f^* - x_f} \quad (4)$$

где,  $x_p$ ,  $x_f$ ,  $y_f^*$  – мольные доли в дистилляте, исходной смеси и в паре исходной смеси соответственно.

$$R_{min} = \frac{x_p - y_f^*}{y_f^* - x_f} = \frac{0,952 - 0,67}{0,67 - 0,631} = 7,216$$

Принимаем значение коэффициента избытка флегмы в пределах от 1,1 до 2,5, поскольку лишь в данных пределах вариации коэффициента избытка флегмы, возможно определение по x-y диаграмме числа теоретических тарелок (рисунок 1-8 приложение А).



В ходе расчетов выяснилось, что при коэффициенте избытка флегмы 1,1 и менее, увеличивается угол наклона рабочей линией укрепляющей части колонны, которая при значении  $\beta \leq 1,1$  не пересекает вертикаль заданного состава исходной жидкости.

Примем коэффициент избытка флегмы  $\beta$  от 1,2 до 2,5 и рассчитаем рабочие флегмовые числа  $R$  по формуле [2, с. 229]:

$$R = R_{min} * \beta \quad (5)$$

Тогда:

$$R_1 = R_{min} * \beta_1 = 7,216 * 1,1 = 7,938$$

$$R_2 = R_{min} * \beta_2 = 7,216 * 1,3 = 9,381$$

$$R_3 = R_{min} * \beta_3 = 7,216 * 1,5 = 10,824$$

$$R_4 = R_{min} * \beta_4 = 7,216 * 1,8 = 12,989$$

$$R_5 = R_{min} * \beta_5 = 7,216 * 2,3 = 16,597$$

$$R_6 = R_{min} * \beta_6 = 7,216 * 2,5 = 18,04$$

Для каждого значения  $R$  на  $y$ - $x$  диаграмме строим рабочие линии укрепляющей и исчерпывающей частей колонны по уравнениям [2, с.230]:

для укрепляющей части:

$$y = \frac{R}{R + 1} * x + \frac{x_p}{R + 1} \quad (6)$$

для исчерпывающей части:

$$y = \frac{R + F}{R + 1} * x + \frac{F - 1}{R + 1} * x_w \quad (7)$$

Построим диаграммы  $x$ ,  $y$ . На диаграммах построим рабочие линии укрепляющей и исчерпывающей части колонны и нанесем линии обозначающие теоретические тарелки. По количеству ступеней изменения концентрации, определим число теоретических тарелок ( $N_T$ ).

Все результаты расчетов для удобства занесены в таблицу 2.

Таблица 2-Определение оптимального рабочего флегмового числа

№ п/п	R	$\beta$	N	N(R+1)
1	7,938	1,1	132	1180
2	9,381	1,3	123	1277
3	10,824	1,5	110	1301
4	12,989	1,8	89	1245
5	16,597	2,3	74	1302
6	18,4	2,5	68	1295

Строим график зависимости  $N(R+1) = f(R)$ . По графику определяем оптимальное рабочее флегмовое число, которое соответствует минимуму значения произведения  $N(R+1)$ .

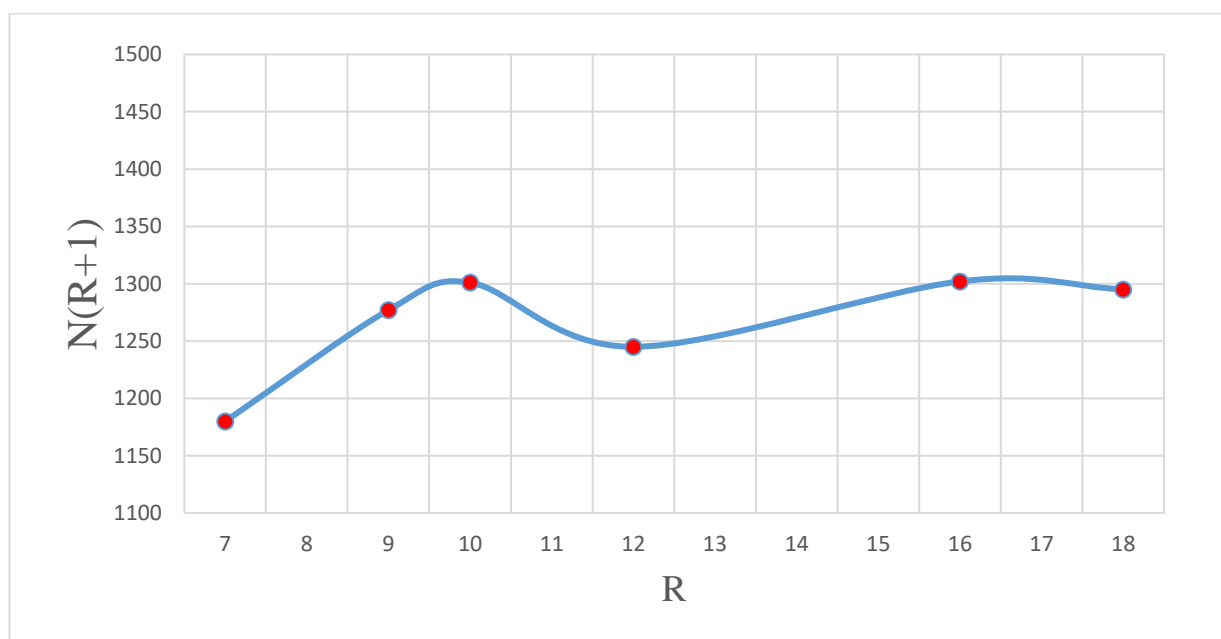


Рисунок 11 - Определение рабочего флегмового числа

Минимальное произведение  $N(R+1)$  соответствует флегмовому числу  $R = 7,938$ , число тарелок 132. Примем с запасом реальное число тарелок равное 134, что соответствует реальному аналогу проектируемой колонны.

Уравнения рабочих линий:

для верхней части колонны:

$$y = \frac{R}{R+1} * x + \frac{x_p}{R+1} = \frac{7,938}{7,938+1} * x + \frac{0,952}{7,938+1} = 0,888 * x + 0,107$$

для нижней части колонны:

$$y = \frac{R+F}{R+1} * x + \frac{F-1}{R+1} * x_w = \frac{7,938+1,56}{7,938+1} * x + \frac{7,938-1,56}{7,938+1} * 0,052 =$$

$$= 1,06 * x + 0,00325$$

где, F – относительный мольный расход питания:

### 3.1.3 Массовые расходы жидкости и пара в различных частях

#### КОЛОННЫ

Определим средние массовые расходы по жидкости для верхней и нижней частей колоны [2, с. 230]:

$$L_v = PR \frac{M_v}{M_p} \quad (8)$$

$$L_n = PR \frac{M_n}{M_p} + F \frac{M_n}{M_f} \quad (9)$$

где,  $M_p$  и  $M_f$  – мольные массы дистиллята и исходной смеси;

$M_v$  и  $M_n$  -средние мольные массы жидкости в верхней и нижней частях колонны.

Определим среднее значение мольных масс в верхней и нижней частях колонны [2, с.230]:

$$M_v = M_{нк} x_{ср.в.} + M_{вк} (1 - x_{ср.в.}) \quad (10)$$

$$M_n = M_{нк} x_{ср.н.} + M_{вк} (1 - x_{ср.н.}) \quad (11)$$

$$x_{ср.в.} = \frac{x_p + x_f}{2} = \frac{0,952 + 0,631}{2} = 0,795 \frac{\text{кмоль}}{\text{кмоль смеси}}$$

$$x_{ср.н.} = \frac{x_w + x_f}{2} = \frac{0,631 + 0,052}{2} = 0,342 \frac{\text{кмоль}}{\text{кмоль смеси}}$$

Тогда:

$$M_v = M_{нк} x_{ср.в.} + M_{вк} (1 - x_{ср.в.}) = 42 * 0,795 + 44 * (1 - 0,795) = 42,42 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$$

$$M_n = M_{нк} x_{ср.н.} + M_{вк} (1 - x_{ср.н.}) = 42 * 0,342 + 44 * (1 - 0,342) = 43,317 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$$

Найдем мольную массу исходной смеси:

$$M_F = M_{\text{НК}}x_f + M_{\text{БК}}(1 - x_f) = 42 * 0,631 + 44 * (1 - 0,631) = 42,728 \frac{\text{КГ}}{\text{КМОЛЬ}}$$

Мольная масса смеси дистиллята:

$$M_p = M_{\text{НК}}x_p + M_{\text{БК}}(1 - x_p) = 42 * 0,952 + 44 * (1 - 0,952) = 42,096 \frac{\text{КГ}}{\text{КМОЛЬ}}$$

Таким образом, подставив полученные значения в уравнения (8) и (9), получим средние массовые расходы по жидкости для верхней и нижней частей колонны:

$$L_B = PR \frac{M_B}{M_P} = 0,476 * 7,938 * \frac{42,42}{42,096} = 3,809 \frac{\text{КГ}}{\text{С}}$$

$$L_H = PR \frac{M_H}{M_P} + F \frac{M_H}{M_F} = 0,476 * 7,938 * \frac{43,317}{42,096} + 1,56 * \frac{43,317}{42,728} = 5,47 \frac{\text{КГ}}{\text{С}}$$

Пусть средние массовые потоки пара в верхней и нижней частях колонны равны [2, с. 231]:

$$G_B = P(R + 1) \frac{M'_B}{M_P} \quad (12)$$

$$G_H = P(R + 1) \frac{M'_H}{M_P} \quad (13)$$

Здесь  $M'_B$  и  $M'_H$  - средние мольные массы паров в верхней и нижней частях колонны [2, с. 239]:

$$M'_B = M_H y_{\text{ср.в.}} + M_B (1 - y_{\text{ср.в.}}) \quad (14)$$

$$M'_H = M_H y_{\text{ср.н.}} + M_B (1 - y_{\text{ср.н.}}) \quad (15)$$

где,

$$y_{\text{ср.в.}} = \frac{y_P + y_F}{2} = \frac{0,96 + 0,66}{2} = 0,82 \frac{\text{КМОЛЬ}}{\text{КМОЛЬ СМЕСИ}}$$

$$y_{\text{ср.н.}} = \frac{y_W + y_F}{2} = \frac{0,05 + 0,66}{2} = 0,35 \frac{\text{КМОЛЬ}}{\text{КМОЛЬ СМЕСИ}}$$

Найдем средние мольные массы паров в верхней и нижней частях колонны:

$$M'_B = M_H y_{\text{ср.в.}} + M_B (1 - y_{\text{ср.в.}}) = 42 * 0,815 + 44 * (1 - 0,815) = 42,37 \frac{\text{КМОЛЬ}}{\text{КМОЛЬ СМЕСИ}}$$

$$M'_H = M_H y_{\text{ср.н.}} + M_B (1 - y_{\text{ср.н.}}) = 42 * 0,36 + 44 * (1 - 0,36) = 43,28 \frac{\text{КМОЛЬ}}{\text{КМОЛЬ СМЕСИ}}$$

Подставляя значения в уравнения получаем (1.12-1.13):

$$G_B = P(R + 1) \frac{M'_B}{M_P} = 0,476 * (7,938 + 1) * \frac{42,37}{42,096} = 4,284 \frac{\text{КГ}}{\text{С}}$$

$$G_H = P(R + 1) \frac{M'_H}{M_P} = 0,476 * (7,938 + 1) * \frac{43,28}{42,096} = 4,376 \frac{\text{КГ}}{\text{С}}$$

### 3.1.4 Определение скорости пара и диаметра колонны

Пусть средняя температура паров в колонне по [8]:

Вверху колонны  $t_B = 38 \text{ }^\circ\text{C}$

Внизу колонны  $t_H = 52 \text{ }^\circ\text{C}$

Вычислим плотности пара в верхней и нижней частях колонны:

$$\rho_{\text{ув}} = \frac{42,37 \cdot 273}{22,4 \cdot (273 + 38)} = 1,66 \text{ кг/м}^3$$

$$\rho_{\text{ун}} = \frac{43,28 \cdot 273}{22,4 \cdot (273 + 52)} = 1,623 \text{ кг/м}^3$$

В соответствии с [8] примем  $\rho_{\text{хв}} = 483 \text{ кг/м}^3$   $\rho_{\text{хн}} = 445 \text{ кг/м}^3$

#### 3.1.4.1 Расчёт вязкости компонентов

Вязкости паров в верхней и нижней части колонный [2]:

$$\mu_{\text{ув}} = \frac{M'_B}{y_{\text{ср.в.}} \cdot \frac{M_H}{\mu_H} + (1 + y_{\text{ср.в.}}) \cdot \frac{M_B}{\mu_B}} \quad (16)$$

$$\mu_{\text{ун}} = \frac{M'_H}{y_{\text{ср.н.}} \cdot \frac{M_H}{\mu'_H} + (1 + y_{\text{ср.н.}}) \cdot \frac{M_B}{\mu'_B}} \quad (17)$$

Динамические коэффициенты вязкости пропана и пропилена примем после интерполяции значений, которые представлены в [9], [10, с.1003]:

для верхней части колонны

$$\mu_H = 894 \cdot 10^{-8} \text{ Па} \cdot \text{с}$$

$$\mu_{\text{в}} = 845 \cdot 10^{-8} \text{Па} \cdot \text{с}$$

для нижней части колонны

$$\mu'_{\text{н}} = 935 \cdot 10^{-8} \text{Па} \cdot \text{с}$$

$$\mu'_{\text{в}} = 883 \cdot 10^{-8} \text{Па} \cdot \text{с}$$

Найдем вязкость паров в верхней и нижней части колонны:

$$\mu_{\text{ув}} = \frac{42,37}{0,815 \cdot \frac{42}{894 \cdot 10^{-8}} + (1 + 0,815) \cdot \frac{44}{845 \cdot 10^{-8}}} = 0,008842 \text{ мПа} \cdot \text{с}$$

$$\mu_{\text{ун}} = \frac{43,28}{0,36 \cdot \frac{44}{883 \cdot 10^{-8}} + (1 + 0,36) \cdot \frac{42}{935 \cdot 10^{-8}}} = 0,00927 \text{ мПа} \cdot \text{с}$$

Находим по уравнениям вязкости жидкости в верхней и нижней частях колонны [2]:

$$\lg \mu_{\text{хв}} = x_{\text{срв}} \cdot \lg \mu_{\text{н}} + (1 - x_{\text{срв}}) \cdot \lg \mu_{\text{в}} \quad (18);$$

$$\lg \mu_{\text{хн}} = x_{\text{срн}} \cdot \lg \mu'_{\text{н}} + (1 - x_{\text{срн}}) \cdot \lg \mu'_{\text{в}} \quad (19).$$

Вязкость жидкости при этом в верхней и нижней части колонны:

$$\lg \mu_{\text{хв}} = 0,792 \cdot \lg 894 \cdot 10^{-8} + (1 - 0,792) \cdot \lg 845 \cdot 10^{-8}$$

$$\mu_{\text{хв}} = 0,00883 \text{ мПа} \cdot \text{с}$$

$$\lg \mu_{\text{хн}} = 0,342 \cdot \lg 935 \cdot 10^{-8} + (1 - 0,342) \cdot \lg 883 \cdot 10^{-8}$$

$$\mu_{\text{хн}} = 0,008831 \text{ мПа} \cdot \text{с}$$

### 3.1.4.2 Скорость пара и диаметр колонны

По рекомендации [2, с. 237] расчет допустимой скорости паров рассчитывается по формуле:

$$\omega = 0,05 * \sqrt{\frac{\rho_{\text{x}}}{\rho_{\text{y}}}} \quad (20)$$

Рабочая скорость в верхней и нижней частях колонны равна:

$$\omega_{\text{в}} = 0,05 * \sqrt{\frac{483}{1,66}} = 0,853 \text{ м/с}$$

$$\omega_{\text{н}} = 0,05 * \sqrt{\frac{445}{1,623}} = 0,828 \text{ м/с}$$

Для интенсификации процесса тепло- и массообмена, для уменьшения габаритных размеров, до значений действующей аналогичной проектируемой колонне, принимаем рабочую скорость в верхней и нижней части колонны равной соответственно:  $\omega_{\text{в}} = 1,4$  м/с,  $\omega_{\text{н}} = 1,3$  [2, с. 197].

Определим диаметр колонны:

$$d = \sqrt{\frac{4G}{\pi \cdot \omega \cdot \rho}} \quad (21)$$

Так как рассчитанные диаметры верхней и нижней частей колонны отличаются, колонну изготавливают одного диаметра, который равный большему из рассчитанных значений [2].

Скорость паров нижней и верхней частей колонны близки по значению, в качестве расчетной примем среднюю скорость паров:

$$\omega = \frac{1,3 + 1,4}{2} = 1,35 \text{ м/с}$$

Массовые потоки в верхней и нижней части колонны близки по значению, в качестве расчетного значения массового потока примем среднее значение потоков:

$$G = \frac{4,3 + 4,4}{2} = 4,33 \text{ кг/с}$$

Для расчетного значения плотности паров примем среднюю плотность паров внизу и вверху колонны:

$$\rho_{\text{у}} = \frac{1,7 + 1,63}{2} = 1,66 \text{ кг/м}^3$$

Получаем диаметр колонны равный:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 4,33}{3,14 \cdot 1,35 \cdot 1,66}} = 1,568 \text{ м}$$

По рекомендации [2, с.238] необходимо выбрать исполнительную величину диаметра колонны из стандартных значений представленных в [2, с.197]. Примем диаметр колонны примем  $d_{\text{ст}} = 1,6$  м.

Тогда рабочая скорость пара:

$$\omega = \omega_{\text{ср}} \cdot \left(\frac{d}{d_{\text{ст}}}\right)^2 = 1,35 \cdot \left(\frac{1,568}{1,6}\right)^2 = 1,3 \text{ м/с}$$

По рекомендациям [2, с. 214] в качестве исполнительного типа тарелки принимаем ситчатую. Для аппаратов, которые работают под давлением в соответствии с таблицей 1, АТК 26-02-3-89 рекомендовано использование ситчатых разборных однопоточных тарелок. По АТК 26-02-3-89 примем ситчатую тарелку типа ТС-Р2. В таблице 3 для колонны диаметром 1600 мм указаны конструктивные параметрами [11].

Таблица 3- Основные параметры тарелки ТС-Р2 по АТК 26-02-3-89.

Свободное течение колонны, м <sup>2</sup>	Рабочее сечение тарелки F <sub>а</sub> , м <sup>2</sup>	Относительное свободное сечение тарелки F <sub>с</sub> , %	Сечение перелива, F <sub>сл</sub> , м <sup>2</sup>	Относительная площадь перелива $\frac{F_{\text{сл}}}{F_{\text{к}}} \times 100\%$ , м <sup>2</sup>	L <sub>сл</sub> , м	Масса, кг
2,01	1,426	5	0,292	14,5	1,28	85

Пусть диаметр отверстия  $d_{\text{отв}} = 0,003$  м, шаг между отверстиями  $t = 0,01$  м.

Рассчитаем скорости пара в рабочем сечении тарелки по формуле [2, с.238]:

$$\omega_{\text{т}} = \omega \cdot 0,785 \cdot \frac{d^2}{S_{\text{т}}} = 1,35 \cdot 0,785 \cdot \frac{1,6^2}{1,426} = 1,35 \text{ м/с}$$

### 3.1.5 Определение высоты колонны

#### 3.1.5.1 Расчет высоты светлого слоя жидкости на тарелке и паросодержания барботажного слоя

Высота слоя жидкости для ситчатых тарелок определяется по формуле [2]:

$$h_0 = 0,787 \cdot q^{0,2} \cdot h_{\text{пер}}^{0,56} \cdot \omega_{\text{т}}^m \cdot (1 - 0,31 \exp(-0,11 \cdot \mu_x)) \cdot \left(\frac{\sigma_{\text{н}}}{\sigma_{\text{в}}}\right)^{0,09} \quad (22)$$

где  $h_{\text{пер}}$ - высота переливной перегородки, м;

$q = L/(\rho_x \cdot L_{\text{сл}})$ - удельный расход жидкости на 1 метр сливной перегородки, м<sup>3</sup>/с;



$\sigma_H$  и  $\sigma_B$  - поверхностное натяжение пропилена и пропана в колонне, Н/м;

$m$  - расчетный коэффициент, м.

Высоту переливной примем равной 40 мм.

Расчетный коэффициент  $m = 0,05 - 4,6 \cdot h_{пер} = -0,134$

Поверхностное натяжение пропилена и пропана примем, интерполируя данные [10, 12] в верхней части колонны ( $t = 38^\circ\text{C}$ ):

$$\sigma_B = 6,1 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}; \sigma_H = 6 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$$

и в нижней части колонны ( $t = 52^\circ\text{C}$ )

$$\sigma_B = 3,8 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}; \sigma_H = 3,6 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$$

Определим удельный расход жидкости на один метр сливной перегородки для верхней части колонны:

$$q_B = \frac{L_B}{\rho_{XB} \cdot L_{СЛ}} = \frac{3,809}{483 \cdot 1,28} = 6,16 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$$

для нижней части:

$$q_H = \frac{L_H}{\rho_{XH} \cdot L_{СЛ}} = \frac{5,466}{445 \cdot 1,28} = 9,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$$

Высота слоя жидкости для верхней и нижней частей колонны:

$$h_{0B} = 0,787 \cdot 6,16 \cdot 10^{-3 \cdot 0,2} \cdot 0,04^{0,56} \cdot 1,35^{-0,134} \cdot (1 - 0,31 \exp(-0,11 \cdot 8,83 \cdot 10^{-6})) \cdot \left( \frac{6 \cdot 10^{-3}}{6,1 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,09} = 0,031 \text{ м}$$

$$h_{0H} = 0,787 \cdot 9,6 \cdot 10^{-3 \cdot 0,2} \cdot 0,04^{0,56} \cdot 1,35^{-0,134} \cdot (1 - 0,31 \exp(-0,11 \cdot 8,831 \cdot 10^{-6})) \cdot \left( \frac{3,6 \cdot 10^{-3}}{3,8 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,09} = 0,034 \text{ м}$$

Так как высота слоя в верхней и нижней части колонны близки по значениям, в соответствии с рекомендацией [2, с.240] в качестве расчетного примем среднее значение:

$$h_0 = \frac{h_{0B} + h_{0H}}{2} = 0,033 \text{ м}$$

Находим паросодержание барботажного слоя [2, с.240]:

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{Fr}}{1 + \sqrt{Fr}} \quad (23)$$

где, Fr безразмерный расчетный коэффициент:

$$Fr = \frac{\omega_m^2}{g \cdot h_0} \quad (24)$$

Для верхней и нижней частей колонны коэффициент:

$$Fr = \frac{1,35^2}{9,81 \cdot 0,033} = 5,69$$

Паросодержание барботажного слоя:

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{5,69}}{1 + \sqrt{5,69}} = 0,705$$

### 3.1.5.2 Определение коэффициентов массопередачи и высоты колонны

Определим коэффициенты молекулярной диффузии в жидкой и паровой фазах.

Найдем коэффициент диффузии в жидкости при средней температуре:

$$D_x = D_{x20} \cdot [1 + b \cdot (t - 20)] \quad (25)$$

Найдем коэффициент диффузии в ж при 20°C [2, с.234]:

$$D_{x20} = \frac{10^{-6} \cdot \sqrt{\frac{1}{M_H} + \frac{1}{M_B}}}{AB \cdot \sqrt{\mu_x} \cdot (v_H^{\frac{1}{3}} + v_B^{\frac{1}{3}})^2} \quad (26)$$

где, А, В - коэффициенты, которые зависят от свойств растворенного вещества и растворителя;  $v_H$  и  $v_B$  - мольный объемы компонентов в жидком состоянии при температуре кипения, см<sup>3</sup>/моль;  $\mu_x$  - вязкость жидкости, мПа\*с.

Определим температурный коэффициент b по формуле:

$$b = \frac{0,2 * \sqrt{\mu_x}}{\sqrt[3]{\rho_x}} \quad (27)$$

Для верхних и нижних частей колонны температурный коэффициент равен:

$$b_{\text{В}} = \frac{0,2 * \sqrt{0,00883}}{\sqrt[3]{483}} = 7,575 * 10^{-5}$$

$$b_{\text{Н}} = \frac{0,2 * \sqrt{0,0088}}{\sqrt[3]{445}} = 7,785 * 10^{-5}$$

Примем молярные объемы компонентов в жидком состоянии при температуре кипения [13,14]:

$$v_{\text{Н}} = 72 \frac{\text{см}^3}{\text{моль}}$$

$$v_{\text{В}} = 81,8 \frac{\text{см}^3}{\text{моль}}$$

Найдем значение коэффициента диффузии в жидкости для верхней и нижней части колонны при 20 °С:

$$D_{\text{хв}20} = \frac{10^{-6} \cdot \sqrt{\frac{1}{42} + \frac{1}{44}}}{1 \cdot 1 \cdot \sqrt{0,0088} \cdot (72^{\frac{1}{3}} + 81,8^{\frac{1}{3}})^2} = 8,551 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$$

$$D_{\text{хн}20} = \frac{10^{-6} \cdot \sqrt{\frac{1}{42} + \frac{1}{44}}}{1 \cdot 1 \cdot \sqrt{0,00883} \cdot (72^{\frac{1}{3}} + 81,8^{\frac{1}{3}})^2} = 8,552 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$$

Определим коэффициенты диффузии в жидкости для верхней и нижней части колонны:

$$D_{\text{хв}} = 8,551 \cdot 10^{-6} \cdot [1 + 7,575 * 10^{-5} \cdot (38 - 20)] = 8,562 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$$

$$D_{\text{хн}} = 8,552 \cdot 10^{-6} \cdot [1 + 7,785 * 10^{-5} \cdot (52 - 20)] = 8,572 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$$

Коэффициент диффузии в паровой фазе можем вычислим из формулы:

$$D_y = \frac{4,22 \cdot 10^{-2} \cdot T^{3/2} \cdot \sqrt{\frac{1}{M_{\text{Н}}} + \frac{1}{M_{\text{В}}}}}{P \cdot (v_{\text{Н}}^{\frac{1}{3}} + v_{\text{В}}^{\frac{1}{3}})^2} \quad (28)$$

где, T - средняя температура, К;

P - абсолютное давление в колонне, Па.

Определим коэффициент диффузии в паровой фазе, в верхней и нижней частях колонны:

$$D_{yB} = \frac{4,22 \cdot 10^{-2} \cdot 311^{3/2} \cdot \sqrt{\frac{1}{42} + \frac{1}{44}}}{2,1 \cdot 10^5 \cdot (72^{\frac{1}{3}} + 81,8^{\frac{1}{3}})^2} = 3,294 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$$

$$D_{yH} = \frac{4,22 \cdot 10^{-2} \cdot 325^{3/2} \cdot \sqrt{\frac{1}{42} + \frac{1}{44}}}{2,1 \cdot 10^5 \cdot (72^{\frac{1}{3}} + 81,8^{\frac{1}{3}})^2} = 3,519 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$$

Формулы для расчета коэффициентов массоотдачи, для тарелок барботажного [2, с. 239]:

$$\beta_x = 6,24 \cdot 10^5 \cdot D_x^{0,5} \cdot \left(\frac{U}{1-\varepsilon}\right)^{0,5} \cdot h_0 \cdot \left(\frac{\mu_y}{\mu_x + \mu_y}\right)^{0,5} \quad (29)$$

$$\beta_y = 6,24 \cdot 10^5 \cdot D_y^{0,5} \cdot F_c \cdot \left(\frac{\omega_T}{\varepsilon}\right)^{0,5} \cdot h_0 \cdot \left(\frac{\mu_y}{\mu_x + \mu_y}\right)^{0,5} \quad (30)$$

где  $U$  плотность орошения,  $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ .

$$U_B = \frac{L_B}{\rho_{xB} \cdot 0,785 \cdot d^2} = \frac{3,809}{483 \cdot 0,785 \cdot 1,6^2} = 3,924 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$$

$$U_H = \frac{L_H}{\rho_{xH} \cdot 0,785 \cdot d^2} = \frac{5,446}{445 \cdot 0,785 \cdot 1,6^2} = 6,113 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$$

Определим коэффициент массоотдачи в жидкой фазе, для верхних и нижних частей колонны:

$$\beta_{xB} = 6,24 \cdot 10^5 \cdot (8,562 \cdot 10^{-6})^{0,5} \cdot \left(\frac{3,924 \cdot 10^{-3}}{1 - 0,7065}\right)^{0,5} \cdot 0,033 \cdot \left(\frac{8,562 \cdot 10^{-6}}{8,831 \cdot 10^{-6} + 8,562 \cdot 10^{-6}}\right)^{0,5} = 4,857 \text{ м/с}$$

$$\beta_{xH} = 6,24 \cdot 10^5 \cdot (8,572 \cdot 10^{-6})^{0,5} \cdot \left(\frac{6,113 \cdot 10^{-3}}{1 - 0,7065}\right)^{0,5} \cdot 0,033 \cdot \left(\frac{9,27 \cdot 10^{-6}}{8,831 \cdot 10^{-6} + 9,27 \cdot 10^{-6}}\right)^{0,5} = 6,136 \text{ м/с}$$

Найдем коэффициент массоотдачи в паровой фазе, для верхней и нижней частей колонны:

$$\beta_{yB} = 6,24 \cdot 10^5 \cdot 3,294 \cdot 10^{-6,5} \cdot 0,06 \cdot \left(\frac{1,35}{0,705}\right)^{0,5} \cdot 0,033 \cdot \left(\frac{8,562 \cdot 10^{-6}}{8,831 \cdot 10^{-6} + 8,562 \cdot 10^{-6}}\right)^{0,5} = 2,17 \text{ м/с}$$

$$\beta_{yH} = 6,24 \cdot 10^5 \cdot 3,519 \cdot 10^{-6,5} \cdot 0,06 \cdot \left(\frac{1,35}{0,705}\right)^{0,5} \cdot 0,033 \cdot \left(\frac{9,27 \cdot 10^{-6}}{8,831 \cdot 10^{-6} + 9,27 \cdot 10^{-6}}\right)^{0,5} = 2,27 \text{ м/с}$$

Пересчитаем коэффициенты массоотдачи в жидкой и паровой фазе для верхней и нижней части колонны:

$$\beta_{xB} = 0,0138 \cdot \frac{\rho_{xB}}{M_B} = 0,157 \frac{\text{кмоль} \cdot \text{с}}{\text{м}^2}$$

$$\beta_{yB} = 1,22 \cdot \frac{\rho_{yB}}{M_B'} = 0,048 \frac{\text{кмоль} \cdot \text{с}}{\text{м}^2}$$

$$\beta_{xH} = 0,0282 \cdot \frac{\rho_{xH}}{M_H} = 0,29 \frac{\text{кмоль} \cdot \text{с}}{\text{м}^2}$$

$$\beta_{yH} = 1,6 \cdot \frac{\rho_{yH}}{M_H'} = 0,06 \frac{\text{кмоль} \cdot \text{с}}{\text{м}^2}$$

Коэффициенты массоотдачи, которые рассчитаны по средним значениям скоростей и физических свойств паровой и жидкой фаз, постоянны для верхней и нижней частей колонны. Тогда как коэффициент массопередачи это переменная величина, зависящая от кривизны линии равновесия. Чтобы найти данные, по которым строится кинетическая линия, нужно рассчитать значения коэффициента массопередачи в интервале изменения состава жидкости от  $x_w$  до  $x_p$ .

Пусть  $x=0,045$  кмоль/кмоль смеси. Тогда коэффициент распределения компонента по фазам ,(тангенс угла наклона равновесной линии в этой точке)  $m = tga = 1,178$ .

Коэффициент массопередачи по верхней части колонны вычисляем по рекомендации [2, с.241]:

$$K_{ув} = \frac{1}{\frac{1}{\beta_{ув}} + \frac{m}{\beta_{хв}}} = \frac{1}{\frac{1}{0,048} + \frac{1,178}{0,157}} = 0,048 \frac{\text{кмоль}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$$

$$K_{ун} = \frac{1}{\frac{1}{\beta_{ун}} + \frac{m}{\beta_{хн}}} = \frac{1}{\frac{1}{0,06} + \frac{1,178}{0,297}} = 0,912 \frac{\text{кмоль}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$$

Определяем общее число единиц переноса на тарелку:

$$n_{оу} = \frac{K_y \cdot M'}{\omega_T \cdot \rho_y} = \frac{0,048 \cdot 42,37}{1,35 \cdot 1,66} = 0,912$$

Найдем локальную эффективность:

$$E_y = 1 - e^{-n_{оу}} = 1 - e^{-0,912} = 0,598$$

Чтобы определить эффективность по Мэрфри нужно определить фактор массопередачи, долю байпасирующей жидкости, а также число ячеек полного перемешивания и межтарельчатый унос.

Найдем фактор массопередачи для нижней части колонны [2, с.241]:

$$\lambda = \frac{m(R + 1)}{R} = \frac{1,178 \cdot (7,938 + 1)}{7,938} = 1,326$$

По рисунку П-23 [15, с.99] примем долю байпасирующей жидкости принимаем  $\theta = 0,12$ . Для нахождения числа ячеек полного перемешивания нужно взять отношение длины пути жидкости на тарелке  $l_T$  к длине  $l$ , примем  $l=350$  мм [2, с.241]. Ширина переливного порога  $b=1,28$  м.

Тогда длина пути жидкости:

$$L_T = \sqrt{d^2 - b^2} = \sqrt{1,6^2 - 1,28^2} = 0,96 \text{ м}$$

Число ячеек полного перемешивания на тарелке:

$$S = \frac{L_T}{l} = 2,743$$

Коэффициент  $m$ , который учитывает влияние на унос физических свойств жидкости и пара, определим по уравнению [2, с.241]:

$$m = 1,15 \cdot 10^{-3} \left( \frac{\sigma_B}{\rho_y} \right)^{0,295} \cdot \left( \frac{\rho_x - \rho_y}{\mu_y} \right)^{0,425}$$

Получаем:

$$m = 1,15 \cdot 10^{-3} \left( \frac{0,006}{1,66} \right)^{0,295} \cdot \left( \frac{483 - 1,66}{8,842 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,425} = 0,425$$

Высота сепарационного пространства равна расстоянию между верхним уровнем барботажного слоя и плоскостью тарелки, расположенной выше [2, с.242]:

$$H_c = H - h_{\pi} \quad (31)$$

Пусть межтарельчатое расстояние, для колонн диаметром 1600 мм [7, с.211],  $H=500$  мм. Высота барботажного слоя [2, с.242],

$$h_{\pi} = \frac{h_0}{1 - \varepsilon} = \frac{0,033}{1 - 0,705} = 0,11 \text{ м}$$

Высота сепарационного пространства:

$$H_c = 0,5 - 0,11 = 0,39 \text{ м}$$

Относительный унос жидкости  $e$  для ситчатых тарелок [2, с. 242]:

$$\frac{\omega_T}{m \cdot H_c} = 8,159$$

$$e = 0,15 \text{ кг/кг}$$

Высота тарельчатой ректификационной колонны:

$$H_K = (N - 1) \cdot h + H_{MT} + z_B + z_H \quad (32)$$

где  $h$  - расстояние между тарелками, м;

$z_B$  и  $z_H$  - расстояние соответственно между верхней тарелкой и крышкой колонны и между дном колонны и нижней тарелкой, м.

Примем значения  $z_B$  и  $z_H$  равными 1,0 м и 2,0 м [2, с. 235],.

Расстояние между тарелками  $h = 0,6$  м. Согласно рекомендации [2, с.211], люк-лаз рекомендуется располагать через каждые 5-10 тарелок, но так как на реально колонне установлено 4 люк-лаза, расположим люк-лаз через каждые между тарелками 17 тарелок.

В месте установки люка-лаза расстояние между тарелками - 600 мм  
[2, с. 211].

$$H_k = (132 - 1) \cdot 0,6 + 1 + 2 = 34,5 \text{ м}$$

Примем высоту колонны  $H_k = 35 \text{ м}$



## 3.2 Конструктивно-механический расчет для ректификационной колонны

### 3.2.1 Расчет толщины стенки цилиндрической обечайки, крышки и днища

Исходные данные:

Высота цилиндрической обечайки	$H := 69000 \text{ мм}$
Внутренний диаметр	$D := 1600 \text{ мм}$
Рабочее давление	$P := 2.1 \text{ МПа}$
Расчетная температура	$t_c := 70$
Годовой показатель коррозии	$\Pi := 0.06 \frac{\text{мм}}{\text{год}}$
Расчетный срок эксплуатации	$\tau_B := 15 \text{ лет}$
Плотность среды при 20°	$\rho_c := 1.84 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$
Плотность воды при 20°	$\rho_B := 1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$
Атмосферное давление	$P_{ат} := 0.1 \text{ МПа}$

#### 3.2.1.1 Выбор материала ректификационной колонны

Выбор исполнительной марки стали, по рекомендациям обоснован специфическими условиями работы, необходимостью удовлетворения выбранной маркой стали определенных критериев, таких как холодостойкость, совместимость по агрессивности среды и дешевизна [16, с.37]. Условиями применимости для материала для изготовления стальных сварных аппаратов являются химическая и коррозионностойкость в заданной среде, при рабочих параметрах, хорошая свариваемость, а также прочностные и пластические характеристиками в рабочих условиях [17, с.17].

Рабочая среда – пропан-пропиленовая фракция обладает сильной коррозионной активностью, особенно в интервале температур от 10 до 40 °С.

Годовой показатель коррозии низколегированных сталей в данной среде составляет от 0.1-0.3 мм/год [18, с. 18]. Выбираем в качестве исполнительной марки стали низколегированную низкоуглеродистую сталь.

Так как проектируемую колонну планируют разместить на открытой площадке в сибирском регионе, колонну необходимо изготовить из холодостойкой стали. В качестве исполнительной марки стали выбираем сталь 09Г2С, которую рекомендуют для изготовления сварной аппаратуры в химической промышленности, при расчетной температуре от -70 до 300 °С.

Сталь 09Г2С обладает коррозионной стойкостью в заданных условиях эксплуатации, дешевизной и доступностью на рынке, хорошей свариваемостью и холодостойкостью.

### **3.2.1.2 Определение расчетных параметров и толщин стенок ректификационной колонны**

Определим допускаемые напряжения при расчетной температуре.

Пусть расчетная температура стенки колонны, равна температуре среды:

$$t_p := t_c$$

$$t_{p, \text{min}} := \max(t_c, 20) \quad t_p = 70$$

Находим допускаемое напряжение, согласно ГОСТ 34233.1-2017 таблица А.1 интерполируя стандартные значения, с округлением в меньшую сторону в пределах до 0,5 МПа ГОСТ 34233.1-2017 [14]:

$$t := \begin{pmatrix} 20 \\ 100 \end{pmatrix} \quad \sigma := \begin{pmatrix} 196 \\ 177 \end{pmatrix}$$

Допускаемое напряжение для стали 09Г2С при расчетной температуре.

$$\sigma := \text{Floor}(\text{linterp}(t, \sigma, t_p), 0.5) \\ \sigma = 184 \text{ МПа}$$

Поправочный коэффициент, принятый в соответствии с рекомендацией [14 п.8.3.] так как аппарат изготавливается из листового проката:

$$\eta := 1$$

Допускаемое напряжение для стали с учетом поправочного коэффициента по ГОСТ 34233.1-2017 п.8.3., [14], МПа:

$$\sigma_{\text{д}} := \eta \cdot \sigma = 184$$

Найдем допускаемое напряжение для стали 09Г2С при гидравлических испытаниях:

$$\sigma_{\text{н}} := \text{Floor}\left(\frac{Re_{20}}{n_{\text{T}}}, 0.5\right) \quad (33)$$

Пусть коэффициент запаса прочности:

$$n_{\text{T}} := 1.1$$

Расчетное значение предела текучести при 20 0С для стали 09Г2С возьмем больше установленного нормативами ГОСТ 34233.1-2017 таблицей Б.1., в соответствии с рекомендацией [15 с.104]:

$$Re_{20} := 300 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{\text{н}} := \text{Floor}\left(\frac{Re_{20}}{n_{\text{T}}}, 0.5\right) = 272.5 \text{ МПа}$$

В соответствии с ГОСТ 34233.1-2017 Таблица А.3, принимаем:

$$\sigma_{20} := 233 \text{ МПа} - \text{ для стали 09Г2С при температуре } 20$$

$$\sigma_{\text{д}} := 184 \text{ МПа}$$

Пусть расчетное давление наибольшее значение давления в аппарате:

$$P_{\text{р}} := P$$

Находим пробное давление гидравлических испытаний внутри аппарата:

$$P_{\text{пр}} := 1.25 \cdot P \cdot \frac{\sigma_{20}}{\sigma} = 3.324 \text{ МПа}$$

### 3.2.1.3 Расчет толщины стенок цилиндрической части аппарата из условия прочности.

Определим исполнительную толщину стенки цилиндрического элемента обечайки [15 с.113]:

$$S \geq S_p + c \quad (34)$$

где  $s_p$  расчетная, - толщина стенки цилиндрической части колонны. Найдем прибавку к расчетным толщинам, [15 с.113], мм:

$$c := c_1 + c_2 + c_3 \quad (35)$$

где,  $c_1$  поправка - на коррозию;  $c_2$  поправка - на минусовое отклонение;  $c_3$  поправка - на утонение стенки элемента сосуда при технических операциях.

Определим прибавку к расчетной толщине стенки:

$$c_k := \Pi \cdot \tau_B = 0.9 \text{ мм}$$

Принимаем прибавку к расчетной толщине для компенсации эрозии:

$$c_3 := 0$$

В системе отсутствуют высокие скорости среды (для газа более 100 м/с), а также абразивные частицы и ударное действие среды.

$$c_1 := c_k + c_3 = 0.9 \text{ мм}$$

Минимальная толщина стенок корпуса колонного аппарата с диаметром 1600 мм, должна составлять не менее 10 мм [18, с. 211]. В соответствии с таблицей 4., ГОСТ 19903-2015:

$$c_2 := 0.8$$

Так как в ходе технологических операций изготовления цилиндрической обечайки колонны, утонения стенки не происходит, по ГОСТ 34233.1-2017 примем:

$$c_3 := 0$$

$$c := c_1 + c_2 + c_3 = 1.7$$

Коэффициент прочности продольных сварочных швов обечайки определяем при условии, что стыковые швы выполняются автоматической

сваркой с двусторонним сплошным проваром при длине контролируемых швов 100%, по таблицы Д.1. ГОСТ 34233.1-2017, [15 с.252]:

$$\phi_p := 1$$

Определим расчетную и исполнительную толщину стенок цилиндрической обечайки [18]:

$$s_p := \max \left( \frac{P \cdot D}{2 \cdot \sigma_d \cdot \phi_p - P}, \frac{P_{пр} \cdot D}{2 \cdot \sigma_{н} \cdot \phi_p - P_{пр}} \right) = 9.819 \text{ мм}$$

Тогда

$$S := s_p + c = 11.519 \text{ мм}$$

Примем толщину стенки:

$$S := 12 \text{ мм}$$

Проведем проверку:

$$\text{Пров1} := \begin{cases} \text{"условие применимости стали выполняется"} & \text{if } \frac{S - c}{D} \leq 0.1 \\ \text{"условие применимости формул НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Пров1} = \text{"условие применимости стали выполняется"}$$

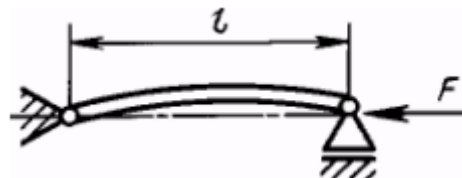
### 3.2.1.4 Расчёт цилиндрической обечайки на устойчивость

В рабочих условиях

Найдем допускаемое осевое сжимающие усилие из условия прочности:

$$F_{d\sigma} := \pi \cdot [D + (S - c)] \cdot (S - c) \cdot \sigma = 9.588 \times 10^6 \text{ МН}$$

Для расчетной схемы:



$$l_p := H \quad \text{Гибкость равна:} \quad \lambda := \frac{2.83 \cdot l_p}{D + (S - c)} = 121.263$$

Так как длина обечайки превышает диаметр более чем в 10 раз.

При этом допускаемое осевое сжимающее усилие из условия устойчивости определяют, как меньшее:

$$F_{dE1} := 310 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{E}{n_y} \cdot D^2 \cdot \left[ \frac{100 \cdot (S - c)}{D} \right]^{2.5} = 2.265 \times 10^7 \text{ Н}$$

$$F_{dE2} := \left( \frac{\pi}{\lambda} \right)^2 \cdot \frac{\pi \cdot [D + (S - c)] \cdot (S - c) \cdot E}{n_y} = 3.002 \times 10^6 \text{ Н}$$

$$F_{dE} := \min(F_{dE1}, F_{dE2}) = 3.002 \times 10^6 \text{ Н}$$

Найдем допускаемое осевое сжимающее усилие в пределах упругости из условия устойчивости:

$$F_d := \frac{F_{d\sigma}}{\sqrt{1 + \left( \frac{F_{d\sigma}}{F_{dE}} \right)^2}} = 2.865 \times 10^6 \text{ Н}$$

$$F_d := 2.865 \text{ МН}$$

Проведем проверку условия прочности:

$$\text{Пров1} := \begin{cases} \text{"условие устойчивости выполняется"} & \text{if } \frac{P_{ат}}{P} + \frac{F}{F_d} \leq 1 \\ \text{"условие устойчивости не выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Пров1 = "условие устойчивости выполняется"

### 3.2.2 Расчет толщины стенки эллиптической крышки и днища

Эллиптическая крышка подвергается воздействию только внутреннего давления, рассчитаем толщину стенки исходя из условия прочности [15, с.253].

Высота эллиптических частей определяется из допуска ГОСТ 34233.3-2017:

$$0.2 < \frac{h}{D} < 0.5$$

где,  $h$ -высота эллиптической крышки.

В соответствии с рекомендациями:

$$P := \frac{2 \cdot \sigma_{\text{д}} \cdot \phi \cdot (s_1 - c)}{R + 0.5 \cdot (s_1 - c)} \quad (36)$$

где  $R$ , радиус кривизны в вершине днища.

Рассчитаем высоту эллиптической части обечайки:

$$\begin{aligned} h &:= 0.25 \cdot D \\ h &= 400 \text{ м} \quad \underline{R} := D \end{aligned} \quad (37)$$

Рассчитаем исполнительную толщину стенки из условия прочности:

$$\begin{aligned} s_{\text{эп}} &:= \max \left( \frac{P \cdot D}{2 \cdot \sigma_{\text{д}} \cdot \phi - 0.5P}, \frac{P_{\text{пр}} \cdot D}{2 \cdot \sigma_{\text{н}} \cdot \phi - 0.5 \cdot P_{\text{пр}}} \right) \\ s_{\text{эп}} &= 9.789 \text{ мм} \\ s_{\text{э}} &:= s_{\text{эп}} + c = 11.489 \text{ мм} \end{aligned} \quad (38)$$

Примем толщину стенки обечайки равной  $s_{\text{к}} := 12 \text{ мм}$ .

Проверку применимости формул расчета эллиптических днищ [15]:

$$0.002 \leq \frac{(s_{\text{э}} - c)}{D} \leq 0.1 = 1$$

Условие применимости формул выполняется.

Определим допускаемое давление.

В рабочем состоянии:

$$P_{\text{кд}} := \frac{2 \cdot \sigma_{\text{д}} \cdot \phi \cdot (s_{\text{э}} - c)}{R + 0.5 \cdot (s_{\text{э}} - c)} = 2.244 \text{ МПа}$$

В условиях испытания:

$$\begin{aligned} P_{\text{ки}} &:= \frac{2 \cdot \sigma_{\text{н}} \cdot \phi \cdot (s_{\text{э}} - c)}{R + 0.5 \cdot (s_{\text{э}} - c)} = 3.324 \text{ МПа} \\ P &\leq P_{\text{ки}} = 1 \end{aligned}$$

Условие выполняется.

В соответствии с рассчитанными минимальными значениями толщины стенки днища и крышки из условия прочности, выберем параметры днища и крышки из стандартных значений [20].

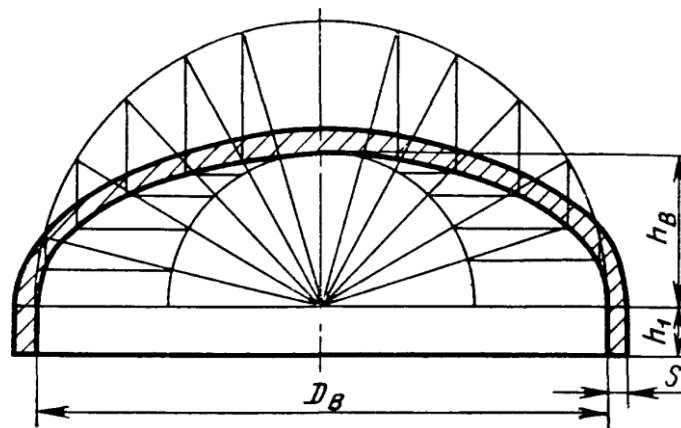


Рисунок 12 – Днище эллиптическое

Таблица 4 – Внутренние базовые размеры для днища и крышки эллиптической формы по ГОСТ 6533-78.

$D_B$ , мм	$h_1$ , мм	$h_B$ , мм	$s$ , мм	$V$ , дм <sup>3</sup>	Масса, кг
1600	40	400	12	614,1	285,3

Из стандартных значений выбираем крышку- ГОСТ 6533-78 1600-12-400, днище - ГОСТ 6533-78 1600-12-400.

Эллиптическую крышку обычно изготавливают горячей штамповкой из матрицы, при допущении утонения исходной толщины заготовки на 15%.

По требованиям ГОСТ 34347-2017 днища, изготовленные горячей штамповкой из коррозионностойкой, стали аустенитно-ферритного класса, должны быть очищены от окалина механическим путем (дробеструйным путем), без травления [21]. Стыковые швы, при присоединении эллиптической части обечайки к конической части, выполняются автоматической сваркой с двусторонним сплошным проваром при длине контролируемых швов 100% [15 с.252]. Сварку проводим с последующей проверкой качества швов внешним осмотром, ультразвуковой дефектоскопией.



### 3.2.3 Расчет штуцеров

Чтобы обеспечить герметичное соединение трубопроводов с эксплуатируемыми аппаратами необходимо наличие штуцера. Выберем в качестве исполнительного типа штуцера тип 1 исполнение 6 по АТК 24.218.06-90 которые используются на условное давление от 1,6 МПа до 16 МПа и температуре от минус 70 до 600 °С, штуцера с фланцами стальными приварными встык [23].

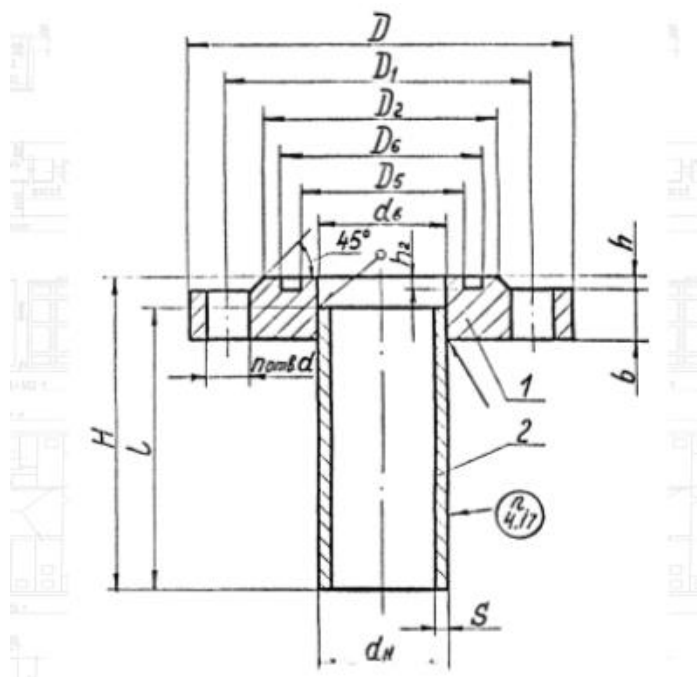


Рисунок 13 - Штуцер тип 1 исполнение 6 по АТК 24.218.06-90 [23].

1 - фланец по ГОСТ 28759.2-90; 2 - патрубок.

В качестве исполнительного типа фланца выбираем фланец на условное давление 1,6 - 2,5 МПа по ГОСТ 28759.2-90 [24].

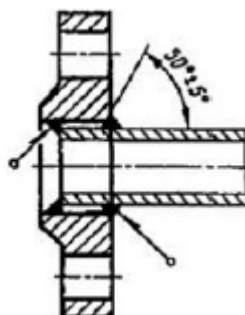


Рисунок 14 - Фланец плоский стальной приварной встык по ГОСТ 28759.2-90 [24].

Расчёт штуцеров определяется по формуле:

$$d := \sqrt{\frac{4 \cdot G}{\pi \cdot \rho \cdot \omega}} \quad (39)$$

Принимаем скорость движения:

пара  $\omega_{\text{ж}} := 2 \text{ м/с}$ ; жидкости  $\omega_{\text{п}} := 20 \text{ м/с}$ .

Плотность смеси питания:

$$\rho_{\text{исх}} := 459 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Плотность флегмы:

$$\rho_{\text{флег}} := 483 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Плотность дистиллята:

$$\rho_{\text{дист}} := 483 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Плотность кубового остатка:

$$\rho_{\text{куб}} := 445 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Плотность паров дистиллята:

$$\rho_{\text{пара.д}} := 39 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Плотность кубовой смеси:

$$\rho_{\text{пара.к}} := 41 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$G_{\text{F}} := 0.752 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

Производительность колонны по исходной смеси:

$$G_{\text{W}} := 0.276 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

$$G_{\text{P}} := 0.476 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

Производительность колонны по дистилляту:

Производительность колонны по кубовому остатку:

Штуцер для ввода исходной смеси:

$$d_1 := \sqrt{\frac{4 \cdot G_{\text{F}}}{\pi \cdot \rho_{\text{исх}} \cdot \omega_{\text{ж}}}} = 0.032 \text{ м}$$

Примем:  $d_1 := 0.05 \text{ м}$

Штуцер для ввода флегмы:

$$d_2 := \sqrt{\frac{4 \cdot G_p}{\pi \cdot \rho_{\text{флег}} \cdot \omega_{\text{ж}}}} = 0.025 \text{ м}$$

Примем:  $d_2 := 0.04 \text{ м}$

Штуцер для отвода кубового остатка:

$$d_3 := \sqrt{\frac{4 \cdot G_p}{\pi \cdot \rho_{\text{куб}} \cdot \omega_{\text{ж}}}} = 0.026 \text{ м}$$

Примем:  $d_3 := 0.04 \text{ м}$

Штуцер для вывода паров дистиллята:

$$d_4 := \sqrt{\frac{4 \cdot G_p}{\pi \cdot \rho_{\text{пара.д}} \cdot \omega_{\text{п}}}} = 0.028 \text{ м}$$

Примем:  $d_4 := 0.04 \text{ м}$

Штуцер для ввода паров кубовой смеси:

$$d_5 := \sqrt{\frac{4 \cdot G_p}{\pi \cdot \rho_{\text{пара.к}} \cdot \omega_{\text{п}}}} = 0.027 \text{ м}$$

Примем:  $d_5 := 0.04 \text{ м}$

### 3.2.4 Подбор люка-лаза

Установим 4 люка-лаза по всей длине ректификационной колонны располагая их с разных сторон колонны. Рекомендуется для диаметра колонны 1600 мм устанавливать люки диаметром 500 мм, расстояние между тарелками в месте установки люка-лаза 600 мм.

$$d_{\text{люк}} := 500 \text{ мм}$$

Примем в качестве исполнительного типа люка выбираем люк с фланцем приварным встык с уплотнительной поверхностью "шип-паз" исполнения 1, на условное давление до 2,5 МПа и температуру эксплуатации от -70 до 540 °С. Для предотвращения образования микрогольвано пары и развития коррозионных процессов из-за использования разных марок сталей в качестве исполнительной материал - сталь 09Г2С [25].

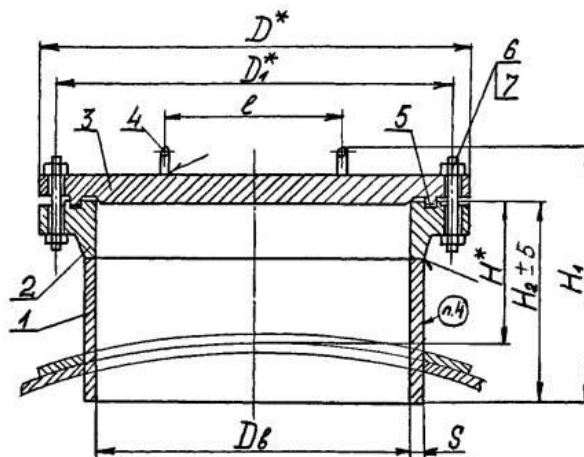


Рисунок 15 - Люк-лаз по ОСТ 26-2000-83 исполнение 1

### 3.2.5 Расчет укрепления отверстий

Расчет укреплений отверстий производим в соответствии с нормами ГОСТ 34233.3-2017 [25].

#### 3.2.5.1 Расчет укрепления отверстий крышки и днища

В эллиптическом днище аппарата нужно предусмотреть отверстие для вывода кубовой смеси в теплообменник для обогрева, диаметром 80 мм.

Необходимо предусмотреть в крышке одно отверстие для вывода паров дистиллята диаметром 32 мм. Произведем расчет в соответствии ГОСТ34233.3-2017 однократно распространив полученные конструктивные решения на все проверяемые отверстия данного диаметра [25].

Диаметр отверстия:  $d_1 := 40$  мм

Расстояние от центра укрепления отверстия до оси:  $x_a := 500$  мм

Допускаемые напряжения для материала накладного кольца при расчетной температуре, МПа:

$$\begin{aligned} \sigma_{d1} &:= \sigma_d & \sigma_{d4} &:= \sigma_d \\ \sigma_{d2} &:= \sigma_d & \sigma_{d5} &:= \sigma_d \\ \sigma_{d3} &:= \sigma_d & \sigma_{d6} &:= \sigma_d \end{aligned}$$

Пусть угол между осью центральных штуцеров днища и нормалью к поверхности обечайки, в соответствии с ГОСТ 34233.3-2017 равным [25]:

$$\gamma := 45 \cdot \text{deg}$$

Расчетный диаметр укрепляемых элементов для эллиптических днищ:  $H := 0.25 \cdot D = 400 \text{ мм}$ .

Расчетный диаметр укрепляемых элементов центрального отверстия:

$$D_{p4} := 2 \cdot D \cdot \sqrt{1 - 3 \cdot \left(\frac{x_a}{D}\right)^2} = 2.691 \times 10^3 \text{ мм}$$

Расчетная толщина стенки штуцера:

$$s_{p4} := \frac{P \cdot D_{p4}}{4 \cdot \phi \cdot \sigma_D - P} = 7.699 \text{ мм}$$

Расчетные диаметры отверстия:

$$d_{p4} := \frac{d_4 + 2 \cdot c}{\cos(\gamma)^2} = 86.8 \text{ мм}$$

Найдем расчетный диаметр одиночного отверстия не требующего укрепления, мм:

$$d_{04} := 2 \cdot \left[ \left( \frac{s_3 - c}{s_{p4}} \right) - 0.8 \right] \cdot \sqrt{D_{p4} \cdot (s_3 - c)} = 152.992$$

Проверка условий необходимости дальнейшего расчета укреплений отверстий:

$$\text{пров2} := \begin{cases} \text{"НЕ требуется укрепление отверстий"} & \text{if } d_{04} \geq d_{p4} \\ \text{"требуется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{пров2} = \text{"НЕ требуется укрепление отверстий"}$$

### 3.2.5.2 Расчет укрепления отверстий центральной обечайки

В центральной обечайке нужно предусмотреть 4 отверстия под люк-лазы диаметром 500 мм. Так же нужно установить отверстия под штуцер ввода исходной смеси 50 мм; штуцер ввода паров кубовой смеси 40 мм.

Проверим необходимость укрепления отверстия под штуцер для ввода исходной смеси:

Диаметр отверстия:  $d_1 := 50 \text{ мм}$

Расчетный диаметр укрепляемых элементов центрального отверстия для цилиндрической обечайки:

$$D_{p1} := D = 1.6 \times 10^3 \text{ мм}$$

Расчетная толщина стенки штуцера:

$$s_{p1} := \frac{P \cdot D_{p1}}{4 \cdot \phi \cdot \sigma_d - P} = 4.578 \text{ мм}$$

Расчетные диаметры отверстия:

$$d_{p1} := d_1 + 2 \cdot c = 53.4 \text{ мм}$$

Расчетный диаметр одиночного отверстия не требующего укрепления:

$$d_{01} := 2 \cdot \left[ \left( \frac{S - c}{s_{p1}} \right) - 0.8 \right] \cdot \sqrt{D_{p1} \cdot (S - c)} = 372.222 \text{ мм}$$

Проверка условий необходимости дальнейшего расчета укреплений отверстий:

$$\text{пров3} := \begin{cases} \text{"НЕ требуется укрепление отверстий"} & \text{if } d_{01} \geq d_{p1} \\ \text{"требуется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{пров3} = \text{"НЕ требуется укрепление отверстий"}$$

Проверка необходимости укрепления для отверстия люка-лаза.

Примем расчетный диаметр укрепляемых элементов центрального отверстия равным диаметру аппарата для цилиндрической обечайки:

$$D_p := D = 1.6 \times 10^3$$

Расчетная толщина стенки штуцера:

$$s_{p6} := \frac{P \cdot D_p}{4 \cdot \phi \cdot \sigma_d - P} = 4.578 \text{ мм}$$

Расчетные диаметры отверстия:

$$d_{p6} := d_{\text{люк}} + 2 \cdot c = 503 \text{ мм}$$

Расчетный диаметр одиночного отверстия не требующего укрепления:

$$d_{06} := 2 \cdot \left[ \left( \frac{S - c}{s_{p6}} \right) - 0.8 \right] \cdot \sqrt{D_p \cdot (S - c)} = 372.222 \text{ мм}$$

Проверка условий необходимости дальнейшего расчета укреплений отверстий:

$$\text{пров4} := \begin{cases} \text{"НЕ требуется укрепление отверстий"} & \text{if } d_{06} \geq d_{p6} \\ \text{"требуется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{пров4} = \text{"требуется"}$$

Рассчитаем укрепление отверстий для люк-лаза.

Независимо от результатов расчета нужно провести укрепление отверстий диаметром более 200 мм. Проведем укрепление отверстий под люк-лаз [15, с. 77].

Рекомендуется укреплять без использования накладного кольца. Наиболее рациональным и предпочтительным способом укрепления отверстий является укрепление патрубком штуцера [26, с. 181]. Учитывая это проведем укрепление отверстий патрубком, увеличивая толщину стенки патрубка, минимально необходимую величину которого рассчитаем в соответствии с уравнением (при известной толщине стенки штуцера):

$$s_{\text{штуц}} \geq \frac{s_{\text{штуц.р}}}{V_{\text{ш}}}$$

$$s_{\text{штуц.р}} := 10 \text{ мм}$$

Примем расчетные коэффициенты равными [27]:

$$K_1 := 1 \quad K_2 := 1$$

Так как исполнительная марка стали патрубка и цилиндрической обечайки одинакова, примем расчетный коэффициент - отношение допускаемых напряжений равным:

$$\chi_1 := 1$$

Стыковые швы выполняются автоматической сваркой с двухсторонним сплошным проваром при длине контролируемых швов 100%, примем коэффициент прочности продольного сварного соединения штуцера, при условии, что по таблице Д.1. ГОСТ 34233.1-2017 [14].

$$\phi_1 := 1$$

По ГОСТ 24755-89 расчетные параметры для варианта укрепления отверстия штуцером:

$$K_{\text{ш}} := \frac{d_{\text{люк}}}{D_p} \cdot \sqrt{K_1 \cdot \phi_p \cdot \frac{\sigma_D}{P}} = 2.925$$

$$K_p := \frac{K_2}{\sqrt[4]{\chi_1}} \cdot \left( \frac{\phi_p}{\phi_1} \right)^{\frac{3}{4}} \cdot \frac{d_{\text{люк}} + 2 \cdot c}{D_p} = 0.315$$

$$V_{\text{ш}} := \frac{s_{p6}}{S - c} = 0.444$$

Определим расчетный коэффициент  $V_{\text{ш}}$  по номограмме (рисунок 2) и таблицей 2, ГОСТ 24755-89 [27]:

$$V_{\text{ш}} := 0.43$$

В соответствии с рекомендацией ГОСТ 24755-89 минимальная толщина укрепления штуцера рассчитывается [27]:

$$s_{\text{штуц}} := \frac{s_{\text{штуц.р}}}{V_{\text{ш}}} = 23.256 \text{ мм}$$

Укрепление отверстий необходимых под люк-лазы проводим увеличением толщины стенки штуцера люк-лаза до толщины 25 мм

Проверка необходимости укрепления отверстия под штуцер для ввода флегмы:

$$d_2 := 40 \text{ мм}$$

Расчетный диаметр укрепляемых элементов центрального отверстия для цилиндрической обечайки:

$$D_{p2} := D$$



Расчетная толщина стенки штуцера:

$$s_{p2} := \frac{P \cdot D_{p2}}{4 \cdot \phi \cdot \sigma_d - P} = 4.578 \text{ мм}$$

Расчетные диаметры отверстия:

$$d_{p2} := d_2 + 2 \cdot c = 43.4 \text{ мм}$$

Расчетный диаметр одиночного отверстия не требующего укрепления:

$$d_{02} := 2 \cdot \left[ \left( \frac{S - c}{s_{p2}} \right) - 0.8 \right] \cdot \sqrt{D_{p2} \cdot (S - c)} = 372.222 \text{ мм}$$

Проверка условий необходимости дальнейшего расчета укреплений отверстий:

$$\text{пров4} := \begin{cases} \text{"НЕ требуется укрепление отверстий"} & \text{if } d_{02} \geq d_{p2} \\ \text{"требуется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{пров4} = \text{"НЕ требуется укрепление отверстий"}$$

### 3.2.6 Расчет фланцев

В качестве исполнительного типа фланца выбираем плоский фланец приварной встык по ГОСТ 28759.2-90, в соответствии с рекомендацией ГОСТ 34233.4-2017 для значений давления от 1,6 до 6,3 МПа рекомендуется применение фланца с уплотнительной поверхностью типа "выступ-впадина", фланец изолированного типа [29].

Во фланцевых соединениях при значениях расчетного давления менее 4 МПа и расчетной температуре менее 300 °С предпочтительно использование болтового соединения [2, с.211]. Исполнительным материалом фланцев выберем сталь той же марки что и корпус колонны - сталь 09Г2С [30].

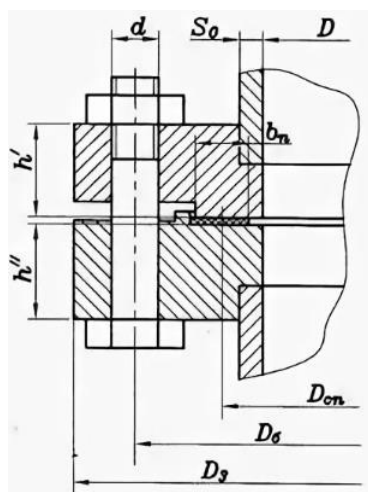


Рисунок 16 – Фланцы с уплотнительной поверхностью типа "выступ-впадина"

Для материалов болтов рекомендовано использовать сталь 40Х исполнением ХЛ, а также гайки высокопрочные и шайбы по ГОСТ 22353-77 и ГОСТ 22356-77 соответственно [31, 32]. В качестве исполнительного материала прокладки в соответствии с рекомендацией [26, с. 261] и ГОСТ 34233.4-2017 [33] так как проектируемый аппарат размещается на открытой площадке выбираем паронит с температурой эксплуатации от -200 до 400 °С. Для сжиженных газообразных углеводородов С1-С3 необходимо использовать паронит маслобензостойкий - ПМБ. По рекомендации таблица 2, ГОСТ 481-80 примем эффективную толщину плоской прокладки ПБМ равной [34]:

$$b_{\Pi} := 3 \text{ мм}$$

Пусть расчетный параметр  $b_s$  равен 1, так как используем болты, а не гайки:

$$b_s := 1$$

Примем в соответствии с таблицей В.1, ГОСТ 34233.1-2017 модуль продольной упругости стали 09Г2С при 20 °С и при 100 °С соответственно [14]:

$$E_{20} := 1.99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

$$E := 1.91 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Расчет количества болтов рассчитаем из уравнения:

$$n_{\text{б}} \geq \frac{\pi \cdot D_{\text{б}}}{t_{\text{ш}}} \quad (40)$$

где,  $D_{\text{б}}$  - диаметр болтовой окружности;  $t_{\text{ш}}$  - рекомендуемый шаг расположения болтов.

Толщина втулки фланца, рассчитывается из условия:

$$s_0 \geq S \quad (41)$$

Примем:  $s_0 := s_{\text{штуц}}$

Определим толщину втулки у основания:

$$s_1 := s_0 = 25$$

По рекомендации СТО 0041-2004 примем диаметр болта, мм [30]:

$$d_{\text{б}} := 27 \text{ мм}$$

Нормативный зазор между гайкой и втулкой [26, с.94]:

$$u := 2 \text{ мм}$$

$$D_{\text{б1}} := d_1 + 2 \cdot (s_1 + d_{\text{б}} + u) = 158 \text{ мм} \quad \text{Найдем диаметр}$$

$$D_{\text{б2}} := d_2 + 2 \cdot (s_1 + d_{\text{б}} + u) = 148 \text{ мм} \quad \text{болтовой окружности}$$

фланца:

фланец штуцера исходной смеси

фланец штуцера ввода флегмы, отвода куба, вывода паров дистиллята, ввода паров куба.

Примем  $t_{\text{ш}}$  в соответствии с рекомендацией таблицы 1.43, [26, с.94]:

$$t_{\text{ш}} := 3.5 \cdot d_{\text{б}} = 94.5 \text{ мм}$$

Количество болтов во фланцах:

- фланец штуцера исходной смеси

$$n_{\text{б1}} := \frac{\pi \cdot D_{\text{б1}}}{t_{\text{ш}}} = 5.253 \text{ шт}$$

- фланец штуцера ввода флегмы, отвода куба, вывода паров дистиллята, ввода паров куба

$$n_{\text{б2}} := \frac{\pi \cdot D_{\text{б2}}}{t_{\text{ш}}} = 4.92 \text{ шт}$$

Примем, в соответствии с рекомендацией таблицей 3.2 [16, с. 215]

$$n_{\phi 1} := 8$$

$$n_{\phi 2} := 8$$

Таким образом, число болтовых отверстий во фланцах всех представленных диаметров под болты М20 - 8 шт.

Определим расчетные параметры.

По таблице В.1, ГОСТ 34233.4-2017 расчетная температура неизолированных плоских фланцев [29]:

$$t_{\phi} := t_c = 70 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Найдем расчетную температуру болтов:

$$t_{\phi} := 0.97 \cdot t_c = 67.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Допускаемые напряжения для болтов из стали 40Х в соответствии с ГОСТ 34233.1-2017 и таблице 23 для 20 и 100 °С [28, с.159].

В рабочем состоянии:

$$t := \begin{pmatrix} 20 \\ 100 \end{pmatrix} \quad \sigma := \begin{pmatrix} 230 \\ 230 \end{pmatrix}$$

$$\sigma_{\text{д.б}} := \text{Floor}(\text{linterp}(t, \sigma, t_{\phi}), 0.5) = 230 \text{ МПа}$$

Модуль упругости для болтов при рабочей температуре в соответствии ГОСТ34233.1-2017:

$$E_{\phi 100} := 2.14 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Допускаемое напряжение для болтов при  $t = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$\sigma_{20\phi} := 230 \text{ МПа}$$

Модуль упругости для болтов при температуре испытания  $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$E_{20\phi} := 2.18 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Коэффициент линейного расширения стали 09Г2С  $t=20-100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$\alpha_{\phi} := 11.4 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{К}}$$

Коэффициент линейного расширения стали 40Х при  $t = 20-100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$\alpha_6 := 13.4 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{K}}$$

Эффективная ширина плоской прокладки в соответствии с ГОСТ 34233.1-2017 должна удовлетворять условию:

$$b_{\text{II}} := 15 \text{ мм}$$

$$b_0 := \begin{cases} b_0 \leftarrow b_{\text{II}} & \text{if } b_{\text{II}} \leq 15 \\ b_0 \leftarrow \text{Ceil}(3.8 \cdot \sqrt{b_{\text{II}}}, 1) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$b_0 = 15 \text{ мм}$$

Толщину плоской прокладки примем:

$$h_{\text{II}} := 3 \text{ мм}$$

Примем характеристики прокладки в соответствии с таблицей И.1, ГОСТ34233.1-2017

Характеристики прокладки из паронита:

Прокладочный коэффициент	$m := 2.5$
Удельное давление обжатия прокладки	$q_{\text{обж}} := 20 \text{ МПа}$
Допускаемое удельное давление	$q_d := 130 \text{ МПа}$
Коэффициент обжатия	$K_{\text{обж}} := 1$
Условный модуль сжатия прокладки	$E_{\text{II}} := 2000 \text{ МПа}$

Рассчитаем конструктивные размеры фланцевого соединения.

Рассчитаем толщину втулки из условия в соответствии с рекомендацией [15, с. 126]:

$$S \leq s_0 \leq 1.35 \cdot S$$

и

$$S - s_0 \leq 5$$

Пусть:  $s_0 = 25$

Толщина втулки у основания:

$$\beta_1 := 1.5$$

$$s_{1.1} := \beta_1 \cdot s_0 = 37.5 \text{ мм}$$

Высота втулки рассчитывается из условия:

$$l \geq 3 \cdot (s_1 - s_0) \quad (42)$$

$$l := 3 \cdot (s_1 - s_0) = 37.5 \text{ мм}$$

Примем:  $l_{\phi} := 50 \text{ мм}$

Наружный диаметр фланцев:

$$D_{\text{нар.фланца}} \geq D_{\phi} + a$$

Примем в соответствии с таблицей 25 приложения 2 [15, с.160]

$$D_{\text{нар.фланца1}} := D_{\phi 1} + a = 198 \text{ мм} \quad \text{конструктивные добавки:}$$

$$D_{\text{нар.фланца2}} := D_{\phi 2} + a = 188 \text{ мм}$$

$a := 40 \text{ мм}$  для шестигранных гаек

$e := 30 \text{ мм}$  для плоских прокладок

Тогда:

$D_{\text{нар.прокл1}} := D_{\phi 1} - e = 128 \text{ мм}$  фланец штуцера ввода  
исходной смеси

$D_{\text{нар.прокл2}} := D_{\phi 2} - e = 118 \text{ мм}$  фланцы штуцеров отвода  
кубового остатка, ввода флегмы паров дистиллята, паров кубовой смеси.

Наружный диаметр прокладки:

фланец штуцера ввода исходной смеси

фланцы штуцеров отвода кубового остатка, ввода флегмы паров  
дистиллята, паров кубовой смеси.

Примем, конструктивно в соответствии с ГОСТ 15180-86 [35]

$$D_{\text{нар.прокл1}} := 132 \text{ мм}$$

$$D_{\text{нар.прокл2}} := 126 \text{ мм}$$

Средний диаметр прокладки:

$$D_{\text{ср.пр1}} := D_{\text{нар.прокл1}} - d_{\phi} = 105 \text{ мм}$$

$$D_{\text{ср.пр2}} := D_{\text{нар.прокл2}} - d_{\phi} = 99 \text{ мм}$$

Условное обозначение выбранных прокладок: Прокладка А-80-3 ПОН-ГОСТ 15180-86. В соответствии с таблицей 3, ГОСТ 15180-86. Условное обозначение выбранных прокладок: Прокладка А-65-3 ПОН-ГОСТ 15180-86.

Расчетный диаметр прокладки по ГОСТ 34233.4-2017:

$$D_{\text{сп1}} := D_{\text{нар.прокл1}} - b_0 = 117 \text{ мм}$$

$$D_{\text{сп2}} := D_{\text{нар.прокл2}} - b_0 = 111 \text{ мм}$$

Проведем расчет фланцевого соединения на прочность и герметичность.

Фланцевое соединение должно быть прочным, жестким и герметичным [36, с.10]. По ГОСТ 34233.4-2017 необходимо провести расчет фланцевых соединений на прочность и герметичность.

Расчет прочности болтов сводится к выполнению условий,

- при затяжке

$$\sigma_{\text{б1}} \leq 1.3 \cdot \xi \cdot \sigma_{\text{б20}} \quad (43)$$

Примем:  $\xi := 1.2$

-в рабочих условиях

$$\sigma_{\text{б2}} \leq 1.3 \cdot \sigma_{\text{б}} \quad (44)$$

$$\sigma_{\text{б20}} := \sigma_{\text{д.б}}$$

$$\sigma_{\text{б}} := \sigma_{\text{д.б}}$$

Податливость прокладок:

$$u_{\text{п}} := \frac{h_{\text{п}} \cdot K_{\text{обж}}}{E_{\text{п}} \cdot \pi \cdot D_{\text{сп1}} \cdot b_{\text{п}}} = 2.721 \times 10^{-7} \frac{\text{мм}}{\text{Н}}$$

Расстояние между опорными поверхностями гайки и головки болта или опорными поверхностями гаек:

$$L_{\text{б0}} := 60 \text{ мм}$$

Эффективная длина болта (шпильки) при определении податливости, по ГОСТ 34233.4-2017:

$$d_{\text{болт}} := 20 \text{ мм}$$

$$L_{\text{б}} := \begin{cases} L_{\text{б0}} + 0.28 \cdot d_{\text{болт}} & \text{if } b_s = 1 \\ (L_{\text{б0}} + 0.56 \cdot d_{\text{болт}}) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$L_{\text{б}} = 65.6 \text{ мм}$$

Найдём площадь поперечного сечения болтов в соответствии с таблицей Д.1, ГОСТ 34233.4-2017, без проточки:

$$f_{\text{б}} := 225 \text{ мм}^2$$

Суммарная площадь сечения болтов (шпилек) по внутреннему диаметру резьбы или нагруженному сечению наименьшего диаметра:

$$A_{\text{б}} := n \cdot f_{\text{б}} = 1.8 \times 10^3 \text{ мм}^2$$

Податливость болтов:

$$y_{\text{б}} := \frac{L_{\text{б}}}{E_{206} \cdot A_{\text{б}}} = 1.672 \times 10^{-7} \frac{\text{мм}}{\text{Н}}$$

Усилие, необходимое для смятия прокладки при затяжке по ГОСТ 34322.4-2017:

$$P_{\text{обж1}} := 0.5 \pi \cdot D_{\text{сп1}} \cdot b_0 \cdot q_{\text{обж}} \cdot P = 1.158 \times 10^5 \text{ Н}$$

$$P_{\text{обж2}} := 0.5 \pi \cdot D_{\text{сп2}} \cdot b_0 \cdot q_{\text{обж}} \cdot P = 1.098 \times 10^5 \text{ Н}$$

Усилие на прокладке в рабочих условиях, необходимое для обеспечения герметичности фланцевого соединения:

$$R_{\text{п1}} := \begin{cases} \pi \cdot D_{\text{сп1}} \cdot b_0 \cdot m \cdot P & \text{if } P \geq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$R_{\text{п1}} = 2.895 \times 10^4 \text{ Н}$$

$$R_{\text{п2}} := \begin{cases} \pi \cdot D_{\text{сп2}} \cdot b_0 \cdot m \cdot P & \text{if } P \geq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$R_{\text{п2}} = 2.746 \times 10^4 \text{ Н}$$



Равнодействующая нагрузка от давления:

$$Q_d := \frac{\pi}{4} \cdot (D_{сп1})^2 \cdot P = 2.258 \times 10^4 \text{ Н}$$

$$Q_{\text{др}} := \frac{\pi}{4} \cdot (D_{сп2})^2 \cdot P = 2.032 \times 10^4 \text{ Н}$$

Приведенная нагрузка, вызванная воздействием внешней силы и изгибающего момента, примем равным нулю т.к. нет момента, создаваемого редуктором:

$$M := 0$$

Из-за отсутствия действия внешних сил, примем приведенную нагрузку QFM равной нулю в соответствии с рекомендацией ГОСТ 34233.4-2017:

$$Q_{FM} := 0$$

Длина втулки:

$$l_0 := \sqrt{D \cdot S} = 138.564 \text{ мм}$$

Расчетный коэффициент равный отношению наружного диаметра тарелки фланца к внутреннему диаметру:

$$K_{p1} := \frac{D_{\text{нар.фланца1}}}{D} = 0.124$$

$$K_{p2} := \frac{D_{\text{нар.фланца2}}}{D} = 0.117$$

Безразмерные расчетные коэффициенты, зависящие от соотношения размеров тарелки фланца в соответствии с ГОСТ 34233.4-2017:

для фланца штуцера ввода исходной смеси

$$\beta_{T1} := \frac{K_{p1}^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \log(K_{p1})) - 1}{(1.05 + 1.945 \cdot K_{p1}^2) \cdot (K_{p1} - 1)} = 1.166$$

$$\beta_{U1} := \frac{K_{p1}^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \log(K_{p1})) - 1}{1.36(K_{p1}^2 - 1) \cdot (K_{p1} - 1)} = -0.94$$

$$\beta_{Y1} := \frac{1}{(K_{p1} - 1)} \cdot \left[ 0.69 + 5.72 \cdot \frac{K_{p1}^2 \cdot \log(K_{p1})}{(K_{p1}^2 - 1)} \right] = -0.88$$

$$\beta_{Z1} := \frac{K_{p1}^2 + 1}{K_{p1}^2 - 1} = -1.031 \quad +$$

для фланца штуцеров отвода кубового остатка, ввода флегмы, паров дистиллята, паров кубовой смеси:

$$\beta_{T2} := \frac{K_{p2}^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \log(K_{p2})) - 1}{(1.05 + 1.945 \cdot K_{p2}^2) \cdot (K_{p2} - 1)} = 1.153$$

$$\beta_{U2} := \frac{K_{p2}^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \log(K_{p2})) - 1}{1.36 \cdot (K_{p2}^2 - 1) \cdot (K_{p2} - 1)} = -0.926$$

$$\beta_{Y2} := \frac{1}{(K_{p2} - 1)} \cdot \left[ 0.69 + 5.72 \cdot \frac{K_{p2}^2 \cdot \log(K_{p2})}{(K_{p2}^2 - 1)} \right] = -0.866$$

$$\beta_{Z2} := \frac{K_{p2}^2 + 1}{K_{p2}^2 - 1} = -1.028 \quad +$$

- коэффициенты для фланцевых соединений с приварными встык фланцами с прямой втулкой, плоскими фланцами и свободными фланцами по ГОСТ 34233.4-2017 принимаем:

$$\beta_F := 0.91 \quad \beta_V := 0.55 \quad f := 1$$

Толщина тарелки фланца, в соответствии с [36, с. 9] принимается из условия:

$$h \geq \lambda_{\phi} \cdot \sqrt{D \cdot s_0} \quad (45)$$

$\lambda_{\phi}$  определяем по графику 6 [40, с.9].

$$\lambda_{\phi} := 0.35$$

$$\underline{h} := \lambda_{\phi} \cdot \sqrt{D \cdot s_0} = 70$$

Расчетный коэффициент  $\lambda$ , в соответствии с ГОСТ 34233.4-2017 рассчитывается в соответствии с формулой

$$\lambda_1 := \frac{\beta_F \cdot h + l_0}{\beta_{T1} \cdot l_0} + \frac{\beta_V \cdot h^3}{\beta_{U1} \cdot l_0 \cdot (s_0)^2} = -1.065$$

$$\lambda_2 := \frac{\beta_F \cdot h + l_0}{\beta_{T2} \cdot l_0} + \frac{\beta_V \cdot h^3}{\beta_{U2} \cdot l_0 \cdot (s_0)^2} = -1.087$$

Угловая податливость фланцев в соответствии с рекомендацией ГОСТ 34233.4-2017:

1) угловая податливость фланца при затяжке:

$$y_{\phi 1} := \frac{0.91 \cdot \beta_V}{E_{20} \cdot \lambda_1 \cdot l_0 \cdot (s_0)^2} = -2.727 \times 10^{-11} \frac{\text{мм}}{\text{Н}}$$

$$y_{\phi 2} := \frac{0.91 \cdot \beta_V}{E_{20} \cdot \lambda_2 \cdot l_0 \cdot (s_0)^2} = -2.672 \times 10^{-11} \frac{\text{мм}}{\text{Н}}$$

2) угловая податливость фланца, нагруженного внешним изгибающим моментом:

$$y_{\phi \text{Н}1} := \left(\frac{\pi}{4}\right)^3 \cdot \frac{D_{\phi 1}}{E_{20} \cdot h^3 \cdot D_{\text{нар.фланца}1}} = 5.664 \times 10^{-12} \frac{\text{мм}}{\text{Н}}$$

$$y_{\phi \text{Н}2} := \left(\frac{\pi}{4}\right)^3 \cdot \frac{D_{\phi 2}}{E_{20} \cdot h^3 \cdot D_{\text{нар.фланца}2}} = 5.588 \times 10^{-12} \frac{\text{мм}}{\text{Н}}$$

Коэффициент, учитывающий изгиб тарелки фланца между шпильками (болтами) по ГОСТ 34233.4-2017:

$$C_{F1} := \max \left[ 1, \sqrt{\frac{\pi \cdot D_{\phi 1}}{n \cdot \left( 2 \cdot d_{\text{болт}} + \frac{6 \cdot h}{m + 0.5} \right)}} \right] = 1$$

$$C_{F2} := \max \left[ 1, \sqrt{\frac{\pi \cdot D_{\delta 2}}{n \cdot \left( 2 \cdot d_{\text{болт}} + \frac{6 \cdot h}{m + 0.5} \right)}} \right] = 1$$

Приведенный диаметр плоского фланца в соответствии с ГОСТ 34233.4-2017:

$$D_{\text{пр}} := D$$

Определим плечо действия усилий в болтах (шпильках) для приварных встык и плоских фланцев по ГОСТ34233.4-2017:

$$b_1 := 0.5(D_{\delta 1} - D_{\text{сп1}}) = 20.5 \text{ мм}$$

$$b_2 := 0.5(D_{\delta 2} - D_{\text{сп2}}) = 18.5 \text{ мм}$$

Плечо усилия от действия давления на фланец для всех типов фланцев:

$$e_1 := \left| 0.5 \cdot (D_{\text{сп1}} - D - s_0) \right| = 754 \text{ мм}$$

$$e_2 := \left| 0.5 \cdot (D_{\text{сп2}} - D - s_0) \right| = 757 \text{ мм}$$

Коэффициент жесткости фланцевого соединения для приварных встык и плоских фланцев:

$$\gamma_1 := \frac{1}{y_{\text{п}} + y_{\delta} \cdot \frac{E_{206}}{E} + 2 \cdot b_1^2 \cdot y_{\text{фн1}} \cdot \frac{E_{206}}{E_{\delta 100}}} = 2.138 \times 10^6 \frac{\text{Н}}{\text{мм}}$$

$$\gamma_2 := \frac{1}{y_{\text{п}} + y_{\delta} \cdot \frac{E_{206}}{E} + 2 \cdot b_2^2 \cdot y_{\text{фн2}} \cdot \frac{E_{206}}{E_{\delta 100}}} = 2.142 \times 10^6 \frac{\text{Н}}{\text{мм}}$$

Коэффициент жесткости фланцевого соединения, нагруженного внутренним давлением или внешней осевой силой для приварных встык и плоских фланцев с плоскими прокладками:

$$\alpha_1 := 1 - \frac{y_{\Pi} - 2 \cdot e_1 \cdot y_{\Pi} \cdot b_1}{y_{\Pi} + y_{\delta} + 2 \cdot b_1^2 \cdot y_{\Phi H1}} = 1.894 \times 10^4$$

$$\alpha_2 := 1 - \frac{y_{\Pi} - 2 \cdot e_2 \cdot y_{\Pi} \cdot b_2}{y_{\Pi} + y_{\delta} + 2 \cdot b_2^2 \cdot y_{\Phi H2}} = 1.72 \times 10^4$$

Коэффициент жесткости фланцевого соединения, нагруженного внешним изгибающим моментом:

$$\alpha_{M1} := \frac{y_{\delta} + 2 \cdot y_{\Phi H1} \cdot b_1 \cdot \left( b_1 + e_1 - \frac{e_1^2}{D_{\text{сп1}}} \right)}{y_{\delta} + y_{\Pi} \cdot \left( \frac{D_{\delta 1}}{D_{\text{сп1}}} \right)^2 + 2 \cdot y_{\Phi H1} \cdot b_1^2} = -1.17$$

$$\alpha_{M2} := \frac{y_{\delta} + 2 \cdot y_{\Phi H2} \cdot b_2 \cdot \left( b_2 + e_2 - \frac{e_2^2}{D_{\text{сп2}}} \right)}{y_{\delta} + y_{\Pi} \cdot \left( \frac{D_{\delta 2}}{D_{\text{сп2}}} \right)^2 + 2 \cdot y_{\Phi H2} \cdot b_2^2} = -1.13$$

Нагрузка, вызванная стесненностью температурных деформаций, в соединениях с приварными встык и плоскими фланцами:

$$Q_{t1} := \gamma_1 \cdot [2\alpha_{\Phi} \cdot h \cdot (t_{\Phi} - 20) - 2\alpha_{\delta} \cdot h \cdot (t_{\delta} - 20)] = -2.151 \times 10^4 \text{ Н}$$

$$Q_{t2} := \gamma_2 \cdot [2\alpha_{\Phi} \cdot h \cdot (t_{\Phi} - 20) - 2\alpha_{\delta} \cdot h \cdot (t_{\delta} - 20)] = -2.155 \times 10^4 \text{ Н}$$

В соответствии с рекомендацией ГОСТ 34233.4-2017 т.к. фланец не имеет рубашки, примем момент сил равным:

$$M = 0$$

$$F := 0$$

Равнодействующая нагрузка от давления:

$$Q_{д1} := \frac{\pi}{4} \cdot (D_{\text{сп1}})^2 \cdot P = 2.258 \times 10^4 \text{ Н}$$

$$Q_{д2} := \frac{\pi}{4} \cdot (D_{\text{сп2}})^2 \cdot P = 2.032 \times 10^4 \text{ Н}$$

Расчетная нагрузка на болты (шпильки) при затяжке, необходимая для обеспечения в рабочих условиях давления на прокладку, достаточного для герметизации фланцевого соединения:

$$P_{\text{б11}} := \max \left[ \begin{array}{l} \alpha_1 \cdot (Q_{\text{д1}} + F) + R_{\text{п1}} + \frac{4 \cdot \alpha_{\text{M1}} \cdot |M|}{D_{\text{сп1}}} \\ \alpha_1 \cdot (Q_{\text{д1}} + F) + R_{\text{п1}} + \frac{4 \cdot \alpha_{\text{M1}} \cdot |M|}{D_{\text{сп1}}} - Q_{\text{т1}} \end{array} \right] = 4.277 \times 10^8 \text{ Н}$$

$$P_{\text{б12}} := \max \left[ \begin{array}{l} \alpha_2 \cdot (Q_{\text{д2}} + F) + R_{\text{п2}} + \frac{4 \cdot \alpha_{\text{M2}} \cdot |M|}{D_{\text{сп2}}} \\ \alpha_2 \cdot (Q_{\text{д2}} + F) + R_{\text{п2}} + \frac{4 \cdot \alpha_{\text{M2}} \cdot |M|}{D_{\text{сп2}}} - Q_{\text{т2}} \end{array} \right] = 3.496 \times 10^8 \text{ Н}$$

Расчетная нагрузка на болты (шпильки) при затяжке, необходимая для обеспечения обжатия прокладки и минимального начального натяжения болтов (шпилек):

$$P_{\text{б21}} := \max(P_{\text{обж1}}, 0.4 \cdot A_{\text{б}} \cdot \sigma_{206}) = 1.656 \times 10^5 \text{ Н}$$

$$P_{\text{б22}} := \max(P_{\text{обж2}}, 0.4 \cdot A_{\text{б}} \cdot \sigma_{206}) = 1.656 \times 10^5 \text{ Н}$$

Расчетная нагрузка на болты (шпильки) фланцевых соединений при затяжке фланцевого соединения:

$$P_{\text{бм1}} := \max(P_{\text{б11}}, P_{\text{б21}}) = 4.277 \times 10^8 \text{ Н}$$

$$P_{\text{бм2}} := \max(P_{\text{б12}}, P_{\text{б22}}) = 3.496 \times 10^8 \text{ Н}$$

Расчетная нагрузка на болты (шпильки) фланцевых соединений в рабочих условиях:

$$P_{\text{бр1}} := P_{\text{бм1}} + (1 - \alpha_1) \cdot (Q_{\text{д1}} + F) + Q_{\text{т1}} + \frac{4 \cdot (1 - \alpha_{\text{M1}}) \cdot |M|}{D_{\text{сп1}}} = 5.152 \times 10^4 \text{ Н}$$

$$P_{\text{бр2}} := P_{\text{бм2}} + (1 - \alpha_2) \cdot (Q_{\text{д2}} + F) + Q_{\text{т2}} + \frac{4 \cdot (1 - \alpha_{\text{M2}}) \cdot |M|}{D_{\text{сп2}}} = 4.778 \times 10^4 \text{ Н}$$

Проверка прочности болтов (шпилек) и прокладки.

## 1) Для фланца штуцера ввода исходной смеси

Расчетные напряжения в болтах (шпильках)

- при затяжке

$$\sigma_{\sigma 1} := \frac{P_{\sigma m1}}{A_{\sigma} \cdot 10^3} = 237.634 \text{ МПа}$$

- в рабочих условиях

$$\sigma_{\sigma 2} := \frac{P_{\sigma p1}}{A_{\sigma}} = 28.624 \text{ МПа}$$

Проверка условий прочности болтов (шпилек) при затяжке и в рабочих условиях

$$\text{пров5} := \begin{cases} \text{"Условия прочности в при затяжке НЕ выполняются"} & \text{if } \sigma_{\sigma 1} > \sigma_{20\sigma} \\ \text{"Условия прочности в рабочих условиях НЕ выполняются"} & \text{if } \sigma_{\sigma 2} > \sigma_{d,\sigma} \\ \text{"Условия прочности выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

пров5 = "Условия прочности выполняются"

Удельное давление на прокладку:

$$q_1 := \frac{\max(P_{\sigma m1}, P_{\sigma p1})}{\pi \cdot D_{\sigma \Pi 1} \cdot b_{\Pi} \cdot 10^3} = 77.581 \text{ МПа}$$

Условие прочности прокладки (проверяется для мягких прокладок):

$$\text{пров6} := \begin{cases} \text{"Условие прочности прокладки НЕ выполняется"} & \text{if } q_1 > q_d \\ \text{"Условие прочности прокладки выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

пров6 = "Условие прочности прокладки выполняется"

## 2) для фланцев штуцеров отвода кубового остатка, ввода флегмы паров дистиллята, паров кубовой смеси

Расчетные напряжения в болтах (шпильках):

- при затяжке

$$\sigma_{\sigma 12} := \frac{P_{\sigma m2}}{A_{\sigma} \cdot 10^3} = 194.201 \text{ МПа}$$

- в рабочих условиях

$$\sigma_{622} := \frac{P_{6p2}}{A_6} = 26.546 \text{ МПа}$$

Проверка условий прочности болтов (шпилек) при затяжке и в рабочих условиях:

$$\text{пров5} := \begin{cases} \text{"Условия прочности в при затяжке НЕ выполняются"} & \text{if } \sigma_{612} > \sigma_{206} \\ \text{"Условия прочности в рабочих условиях НЕ выполняются"} & \text{if } \sigma_{622} > \sigma_{д.6} \\ \text{"Условия прочности выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

пров5 = "Условия прочности выполняются"

Найдём удельное давление на прокладку:

$$q_2 := \frac{\max(P_{6m2}, P_{6p2})}{\pi \cdot D_{сп2} \cdot b_{п} \cdot 10^3} = 66.828 \text{ МПа}$$

Условие прочности для прокладки:

$$\text{пров6} := \begin{cases} \text{"Условие прочности прокладки НЕ выполняется"} & \text{if } q_2 > q_d \\ \text{"Условие прочности прокладки выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

пров6 = "Условие прочности прокладки выполняется"

### 3.2.7 Расчет тарелок на прогиб

В соответствии с рекомендацией ОСТ 26-805-73 для колонных аппаратов, которые работают под избыточным внутренним давлением в качестве исполнительного типа тарелок необходим выбор тарелок типа ТС-Р2 [37].

Диск тарелки бескаркасного типа можно рассматривать как тонкую круглую пластину, опертую по контуру и нагруженную равномерной нагрузкой от собственного веса и веса жидкости. Исполнительная марка стали тарелок -сталь 09Г2С [38, с.100]:

Внутренний диаметр колонны:  $D := 1.6 \text{ м}$



### *Расчет веса и площади тарелок:*

Определим площадь тарелки:

$$F_{\text{тарелки}} := \frac{\pi \cdot D^2}{4} = 2.011 \text{ м}^2$$

В соответствии с данными [38, с.102] суммарная площадь отверстий составляет примерно 8% площади диска тарелки. Тогда, суммарная площадь диска тарелки:

$$F_1 := 0.08 \cdot F_{\text{тарелки}} = 0.161 \text{ м}^2$$

Примем толщину тарелки в первом приближении в соответствии с рекомендацией о минимальной толщине тарелки в 3 мм [38, с.102]:

$$S_{\text{диска}} := 0.003 \text{ м}$$

Удельный вес стали:

$$\gamma_{\text{стали}} := 0.0078 \frac{\text{МН}}{\text{м}^2}$$

Вес тарелки:

$$G_{\text{тарелки}} := (F_{\text{тарелки}} - F_1) \cdot S_{\text{диска}} \cdot \gamma_{\text{стали}} = 4.328 \times 10^{-5} \text{ МН}$$

Диаметр отверстия примем:

$$d_{\text{отв}} := 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$f_{\text{отв}} := \frac{\pi \cdot d_{\text{отв}}^2}{4} = 1.257 \times 10^{-5} \text{ м}$$

Количество отверстий:

$$n_{\text{отв}} := \text{ceil} \left( \frac{F_1}{f_{\text{отв}}} \right) = 1.28 \times 10^4$$

С учетом веса слоя жидкости на поверхности тарелки высотой 40 мм. Тогда вес жидкости на тарелки равен:

$$G_{\text{в}} := \rho_{\text{исх}} \cdot 0.04 \cdot (F_{\text{тарелки}} - n_{\text{отв}} \cdot f_{\text{отв}}) \cdot 9.8 \cdot 10^{-6} = 3.328 \times 10^{-4} \text{ МН}$$

Общая нагрузка на тарелку:

$$G := G_B + G_{\text{тарелки}} = 3.761 \times 10^{-4} \text{ МН}$$

Примем конструктивную прибавку равной сумме прибавки на коррозию и на минусовое отклонение в соответствии с рекомендацией [38, с.102]:

$$c_T := c_K + c_2 = 1.7 \text{ мм}$$

Толщина диска:

$$S_{\text{диск.т}} := 0.56 \cdot \frac{D}{10^3} \cdot \sqrt{\frac{P}{\sigma_D}} + c_T \cdot 10^{-3} = 1.796 \times 10^{-3} \text{ м}$$

Примем:

$$S_{\text{диск.т}} := 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$\text{Пров7} := \begin{cases} \text{"расчет верный"} & \text{if } S_{\text{диск.т}} \leq S_{\text{диска}} \\ \text{"неверный"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Пров7 = "расчет верный"

В качестве исполнительного типа тарелки выбрана тарелка ТС-Р2 1600-400 ОСТ 26-805-73.

Коэффициент Пуассона  $\mu$  в соответствии с рекомендацией [38, с.101]

примем:  $\mu := 0.3$

Цилиндрическая жесткость:

$$N := \frac{E \cdot 3^3}{12 \cdot (1 - \mu^2)} = 4.723 \times 10^5 \text{ Н·м}$$
$$R := \frac{1}{2} \cdot D = 0.8 \text{ м}$$

---

Прогиб в центре тарелки:

$$\omega := 4.08 \cdot \frac{P \cdot R^4}{64 \cdot N} = 1.161 \times 10^{-7} \text{ м}$$

В соответствии с [38, с.101] величина прогиба тарелки не должна превышать 1/2000 ее диаметра, и не более 3-х мм:

$$\omega \leq \omega_{\text{д}}$$

$$\omega_{\text{д}} := \frac{1}{2000} \cdot D \cdot 10^3 = 0.8 \quad \text{мм}$$

$$\text{Пров8} := \begin{cases} \text{"каркас не нужен"} & \text{if } \omega \cdot 10^3 \leq \omega_{\text{д}} \\ \text{"Нужен каркас"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Пров8 = "каркас не нужен"

### 3.2.8 Расчет ветровой нагрузки и сейсмического воздействия

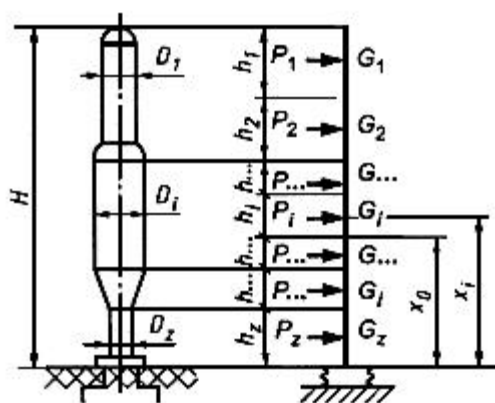


Рисунок 17 - Расчетная схема аппарата колонного типа по ГОСТ Р 51273-99 [39]

Высота колонны-  $H_{\text{к}} := 74 \text{ м.}$

Расчет усилий, которые возникают в элементах проектируемой колонны от ветровой нагрузки и сейсмических воздействий проводим в соответствии с ГОСТ Р 51273-99 [39]. В соответствии с рекомендацией ГОСТ Р 51273-99 о необходимости разбиения проектируемой колонны на отдельные участки высотой не более 10 метров, произведем разбиение проектируемой колонны на 9 расчетных участков:

количество участков  $hr_z := 9$

Примем значение высоты опоры в соответствии с рекомендацией АТК 24.200.04-90.

Высота опоры -  $H_{\text{оп}} := 5 \text{ м}$

Высота участков колонны:

$$\begin{array}{lll} hr_1 := 7 & hr_5 := 9 & hr_9 := 5 \\ hr_2 := 9 & hr_6 := 9 & \\ hr_3 := 9 & hr_7 := 9 & \\ hr_4 := 9 & hr_8 := 8 & \end{array}$$

Расстояние от середины  $i$ -го участка до поверхности земли

$$\begin{array}{lll} xr_1 := 70.5 & xr_5 := 35.5 & xr_9 := 2.5 \\ xr_2 := 60.5 & xr_6 := 26.5 & \\ xr_3 := 53.5 & xr_7 := 17.5 & \\ xr_4 := 44.5 & xr_8 := 9 & \end{array}$$

Высота расчетного сечения аппарата до поверхности земли  $x_{0i}=xr_i$ , м. (Рисунок 17) Расчетные сечения выбирают в местах расположения патрубков и других элементов):

$$\begin{array}{ll} x_{r_1} := 0 & \text{место установки штуцера для вывода паров дистилата} \\ x_{r_2} := 2 & \text{место установки штуцера для ввода флегмы} \\ x_{r_3} := 4 & \text{место установки люк-лаза;} \\ x_{r_4} := 19 & \text{место установки люк-лаза} \\ x_{r_5} := 37 & \text{место установки патрубка для ввода исходной смеси} \\ x_{r_6} := 37 & \text{место установки люк-лаза} \\ x_{r_7} := 54 & \text{место установки люк-лаза} \\ x_{r_8} := 67 & \text{место установки патрубка для ввода паров кубового остатка} \\ x_{r_9} := 69 & \text{место установки патрубка для вывода кубового остатка} \end{array}$$

Наружный диаметр по участкам, м:

$$\begin{array}{lll} D_{r_1} := 1.6 & D_{r_5} := 1.6 & D_{r_9} := 1.6 \\ D_{r_2} := 1.6 & D_{r_6} := 1.6 & \\ D_{r_3} := 1.6 & D_{r_7} := 1.6 & \\ D_{r_4} := 1.6 & D_{r_8} := 1.6 & \end{array}$$

Количество обслуживающих площадок примем конструктивно в соответствии с рекомендацией [40]. Лестницы высотой более 10 метров

должна оборудоваться площадками для отдыха через каждые 5 м подъема, и шириной лестниц не менее 400 мм, расстояние между ступеньками не больше 300 мм.

Установку обслуживающих площадок произведем в местах установки люк-лазов, и штуцеров для ввода исходной смеси, паров кубового остатка и ввода флегмы. Примем количество обслуживающих площадок равным 9. Четыре для обсаживания четырех люк-лазов, и патрубков для ввода флегмы, и исходной смеси, высоты которых совпадают. Произведем установку первой площадки на высоте 12 м от поверхности земли.

Количество обслуживающих площадок - 9

В качестве исполнительного типа обслуживающей площадки выберем круговую площадку ввиду необходимости контроля периметра колонны на заданных высотах (поскольку люк-лаз и патрубки находятся на одной высоте колонны по разные стороны). В соответствии с рекомендацией [41] минимальная ширина обслуживающих площадок составляет не менее 1 м.

Наружный диаметр обслуживающей площадки (без учета толщины изоляции):

$$D_{\text{н.площ}} := 2.628 \text{ м}$$

$$D_{\text{н.колонны}} := 1.628 \text{ м}$$

Площадь обслуживающих площадок на участках №1- n, м<sup>2</sup>:

$$n := \frac{\pi \cdot (D_{\text{н.площ}}^2 - D_{\text{н.колонны}}^2)}{4} = 3.343 \text{ м}^2$$

Примем :  $n := 4$  .

Примем расчётную площадь обслуживающих площадок равной:

$$A_1 := 4$$

$$A_6 := 4$$

$$A_2 := 4$$

$$A_7 := 4$$

$$A_3 := 4$$

$$A_8 := 4$$

$$A_4 := 4$$

$$A_9 := 4$$

$$A_5 := 4$$

Высота обслуживающих площадок от поверхности земли, м.:

$$\begin{array}{ll} x_{г1} := 74 & x_{г6} := 37.25 \\ x_{г2} := 70 & x_{г7} := 29.75 \\ x_{г3} := 63 & x_{г8} := 21 \\ x_{г4} := 52 & x_{г9} := 12 \\ x_{г5} := 46 & \end{array}$$

Вес по высоте колонны распределен и, чтобы с достаточной точностью просчитать вес каждого участка, можно воспользоваться следующими практическими рекомендациями:

1) вес:

1 м<sup>3</sup> стальных площадок - 120 кг;

1 погонного метра ограждения лестниц - 15 кг;

1 погонного метра лестниц - 37 кг;

1 м<sup>2</sup> ректификационных тарелок, включая жидкость на ней,  
-  $G_{т.1кв.м} := 205 \text{ кг}$  ;

изоляция, днищ, люков, штуцеров - 18...20 % от веса стального корпуса;

2) удельный вес:

стали -  $\gamma_{ст} := 7860 \text{ кг/м}^3$  ;

воды -  $\gamma_{в} := 1000 \text{ кг/м}^3$  ;

Вес участков колонны для условий гидроиспытания складывается из веса кожуха этого участка и суммы весов элементов, расположенных на этом участке. В весе участка в котором находится днище колонны учесть вес воды, действующий на днище при полном заполнении колонны.

Вес участков колонны, начиная с верха колонны согласно рисунку

$$D_{нар} := 1.628 \text{ м} \quad D_{нар.опоры} := 1.66 \text{ м}$$

Массы цилиндрических частей колонны по участкам:

$$M_{ц1} := \frac{(D_{нар}^2 - D^2) \cdot \pi}{4} \cdot h_{г1} \cdot \gamma_{ст} = 3.906 \times 10^3 \text{ кг}$$

$$M_{ц2} := \frac{(D_{нар}^2 - D^2) \cdot \pi}{4} \cdot hr_2 \cdot \gamma_{ст} = 5.022 \times 10^3 \text{ кг}$$

$$M_{ц8} := \frac{(D_{нар}^2 - D^2) \cdot \pi}{4} \cdot hr_8 \cdot \gamma_{ст} = 4.464 \times 10^3 \text{ кг}$$

$$M_{ц9} := \frac{(D_{нар.опоры}^2 - D^2) \cdot \pi}{4} \cdot hr_9 \cdot \gamma_{ст} = 6.037 \times 10^3 \text{ кг}$$

Масса слоя жидкости на тарелке:

$$M_{слоя} := 0.4 \cdot F_{тарелки} \cdot \frac{\rho_{дист} + \rho_{куб}}{2} = 373.171 \text{ кг}$$

Вес участков колонны для условий гидроиспытания складывается из веса кожуха этого участка и суммы весов элементов, расположенных на этом участке. В весе участка в котором находится днище колонны учесть вес воды, действующий на днище при полном заполнении колонны.

$$G_{г1} := (1.2 \cdot M_{ц1} + 8M_T) \cdot 9.8 = 5.26 \times 10^4 \text{ Н}$$

$$G_{г2} := (1.2 \cdot M_{ц2} + 20M_T) \cdot 9.8 = 7.571 \times 10^4 \text{ Н}$$

$$G_{г3} := (1.2 \cdot M_{ц2} + 20M_T) \cdot 9.8 = 7.571 \times 10^4 \text{ Н}$$

$$G_{г4} := (1.2 \cdot M_{ц2} + 20M_T) \cdot 9.8 = 7.571 \times 10^4 \text{ Н}$$

$$G_{г5} := (1.2 \cdot M_{ц2} + 20M_T) \cdot 9.8 = 7.571 \times 10^4 \text{ Н}$$

$$G_{г6} := (1.2 \cdot M_{ц2} + 20M_T) \cdot 9.8 = 7.571 \times 10^4 \text{ Н}$$

$$G_{г7} := (1.2 \cdot M_{ц2} + 20M_T) \cdot 9.8 = 7.571 \times 10^4 \text{ Н}$$

$$G_{г8} := (1.2 \cdot M_{ц8} + 20M_T) \cdot 9.8 = 6.915 \times 10^4 \text{ Н}$$

$$G_{г9} := M_{ц9} \cdot 9.8 = 5.917 \times 10^4 \text{ Н}$$

Вес участков колонны для рабочих условий складывается из веса кожуха этого участка и суммы весов элементов, расположенных на этом участке:

$$G_{p1} := [1.2 \cdot M_{\Pi 1} + 8 \cdot (M_T + M_{\text{слоя}})] = 8.352 \times 10^3 \text{ Н}$$

$$G_{p2} := [1.2 \cdot M_{\Pi 2} + 20 \cdot (M_T + M_{\text{слоя}})] = 1.519 \times 10^4 \text{ Н}$$

$$G_{p3} := [1.2 \cdot M_{\Pi 2} + 20 \cdot (M_T + M_{\text{слоя}})] = 1.519 \times 10^4 \text{ Н}$$

$$G_{p4} := [1.2 \cdot M_{\Pi 2} + 20 \cdot (M_T + M_{\text{слоя}})] = 1.519 \times 10^4 \text{ Н}$$

$$G_{p5} := [1.2 \cdot M_{\Pi 2} + 20 \cdot (M_T + M_{\text{слоя}})] = 1.519 \times 10^4 \text{ Н}$$

$$G_{p6} := [1.2 \cdot M_{\Pi 2} + 20 \cdot (M_T + M_{\text{слоя}})] = 1.519 \times 10^4 \text{ Н}$$

$$G_{p7} := [1.2 \cdot M_{\Pi 2} + 20 \cdot (M_T + M_{\text{слоя}})] = 1.519 \times 10^4 \text{ Н}$$

$$G_{p8} := [1.2 \cdot M_{\Pi 8} + 20 \cdot (M_T + M_{\text{слоя}})] = 1.452 \times 10^4 \text{ Н}$$

$$G_{p9} := M_{\Pi 9} \cdot 9.8 = 5.917 \times 10^4 \text{ Н}$$

Вес участков колонны для условий монтажа складывается из веса кожуха этого участка и суммы весов элементов, расположенных на этом участке:

$$G_{M1} := 1.2 M_{\Pi 1} \cdot 9.8 = 4.593 \times 10^4 \text{ Н}$$

$$G_{M2} := 1.2 M_{\Pi 2} \cdot 9.8 = 5.905 \times 10^4 \text{ Н}$$

$$G_{M3} := 1.2 M_{\Pi 2} \cdot 9.8 = 5.905 \times 10^4 \text{ Н}$$

$$G_{M4} := 1.2 M_{\Pi 2} \cdot 9.8 = 5.905 \times 10^4 \text{ Н}$$

$$G_{M5} := 1.2 M_{\Pi 2} \cdot 9.8 = 5.905 \times 10^4 \text{ Н}$$

$$G_{M6} := 1.2 M_{\Pi 2} \cdot 9.8 = 5.905 \times 10^4 \text{ Н}$$

$$G_{M7} := 1.2 M_{\Pi 2} \cdot 9.8 = 5.905 \times 10^4 \text{ Н}$$

$$G_{M8} := 1.2 M_{\Pi 8} \cdot 9.8 = 5.249 \times 10^4 \text{ Н}$$

$$G_{M9} := M_{\Pi 9} \cdot 9.8 = 5.917 \times 10^4 \text{ Н}$$

Так как диаметр колонны постоянен по высоте то высоты переменных сечений примем:

$$\text{Высота переменного сечения(рисунок 18) - } H_1 := 0 \text{ м;}$$

$$\text{Высота переменного сечения(рисунок 18) - } H_2 := 0 \text{ м;}$$

$$\text{Высота переменного сечения(рисунок 18) - } H_3 := 0 \text{ м;}$$



Примем класс ветрового района установки проектируемой колонны в соответствии с таблицей 1, ГОСТ Р 51272-99: III и нормативное значение ветрового давления.

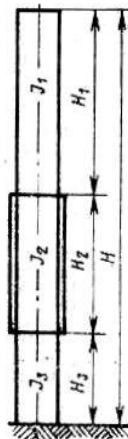


Рисунок 18 - Расчетная схема

Район установки- III,  $q_0 := 350 \text{ Н/м}^2$ ;

В соответствии с ГОСТ Р 51273-99 расчету на сейсмические воздействия подлежат аппараты, предназначенные для установки в районах с сейсмичностью 7 и более баллов по шкале MSK-64. Примем сейсмичность равной, баллы

$$ses := 7$$

Диаметр в верхней и нижней части колонны и опорной обечайки.

Диаметр верхней части колонны-  $D_1 := 1.6 \text{ м}$  ;

Диаметр нижней части колонны-  $D_2 := 1.6 \text{ м}$  ;

Диаметр опорной обечайки колонны-  $D_3 := 1.6 \text{ м}$  ;

Толщина:

Стенки верхней части колонны-  $S_1 := 0.014 \text{ м}$  ;

Стенки в нижней части колонны-  $S_2 := 0.014 \text{ м}$  ;

Стенки опоры-  $S_0 := 0.040 \text{ м}$  ;

изоляция-  $S_{\text{И}} := 0.05 \text{ м}$  .

Прибавка к толщине стенки-  $c := 0.002 \text{ м}$  м

Примем по таблице 2 ГОСТ Р 51273-99 аэродинамический коэффициент для аппарата:

$$K_{эп} := 0.7$$

Площадь опорной площадки равна:

$$A_f := 5 \text{ м}^2$$

Коэффициент неравномерности сжатия грунта, примем для плотных грунтов в соответствии с ГОСТ Р 51273-99:

$$C_f := 15 \cdot 10^7 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$$

$$C_f := \text{if} \left( A_f < 10, C_f \cdot \frac{3.2}{\sqrt{A_f}}, C_f \right) \quad C_f = 2.147 \times 10^8 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$$

Проверка необходимости расчета аппарата на ветровую и сейсмическую нагрузку:

$$D_{\min} := \min(D_1, D_2, D_3) \quad D_{\min} = 1.6$$

spr1 := "Расчет на ветровую нагрузку проводить не требуется "

spr2 := "Расчет на ветровую и сейсмические нагрузки требуется провести"

spr3 := "Неверно введены высоты сечений, сумма сечений не равна высоте"

$$I := \begin{cases} \text{spr1} \\ \text{spr2} & \text{if } H_k > 10 \wedge H_k \geq 1.5 \cdot D_{\min} \\ \text{spr2} & \text{if } H_k < 10 \wedge H_k > 5D_{\min} \\ \text{spr3} & \text{if } H_k \neq \sum_i h_{i,0} \end{cases}$$

I = "Расчет на ветровую и сейсмические нагрузки требуется провести"

### 3.2.8.1 Определение веса аппарата и расчетных коэффициентов

1.1. Вес аппарата при гидроиспытании:

$$G_{г.маx} := \sum_i G_{гi} \quad G_{г.маx} = 576036.0207 \text{ Н}$$

1.2. Вес аппарата для рабочих условий:

$$G_{р.маx} := \sum_i G_{pi} \quad G_{р.маx} = 173175.1866 \text{ Н}$$

1.3. Вес аппарата для условий монтажа:

$$G_{M.max} := \sum_i G_{M_i} \quad G_{M.max} = 511918.7221 \text{ Н}$$

1.4. Момент инерции верхней части колонны:

$$I_1 := \frac{\pi}{8} \cdot (D_1 + S_1 - c)^3 \cdot (S_1 - c) \quad I_1 = 0.0197 \text{ м}^4$$

1.5. Момент инерции нижней части колонны:

$$I_2 := \frac{\pi}{8} \cdot (D_2 + S_2 - c)^3 \cdot (S_2 - c) \quad I_2 = 0.0197 \text{ м}^4$$

1.6. Момент инерции опорной обечайки колонны:

$$I_3 := \frac{\pi}{8} \cdot (D_3 + S_0 - c)^3 \cdot (S_0 - c) \quad I_3 = 0.0656 \text{ м}^4$$

1.7. Безразмерный коэффициент  $\Delta$ :

$$\Delta := \frac{1}{3} + \frac{I_1}{I_2} \cdot \frac{H_2}{H_1} \cdot \left[ \frac{1}{3} \cdot \left( \frac{H_2}{H_1} \right)^2 + \frac{H_2}{H_1} + 1 \right] \quad \Delta = 0.333$$

1.8. Безразмерный коэффициент  $\mu$ :

$$\mu := \frac{I_1}{I_3} \cdot \frac{H_3}{H_1} \cdot \left( \frac{H_3}{H_2} + 1 \right) \quad \mu = 0$$

1.9. Безразмерный коэффициент  $\gamma$ :

$$\gamma := \frac{2}{H_k^3} \cdot \left[ H_1^3 \cdot (\Delta + \lambda) + H_2^3 \cdot \mu + 2 \cdot \frac{I_1}{I_3} \cdot H_1 \cdot H_2 \cdot H_3 \right] \quad \gamma = 0$$

1.10. Безразмерный коэффициент  $\lambda$ :

$$\lambda := \frac{I_1}{I_3} \cdot \frac{H_3}{H_1} \cdot \left[ \frac{1}{3} \cdot \left( \frac{H_3}{H_1} \right)^2 + \frac{H_3}{H_1} + 1 \right] \quad \lambda = 0$$

### 3.2.8.2 Расчет для условий гидротестирования

Определим статическую составляющую:

Коэффициент  $\theta_i$  определяем с помощью расчетного модуля:

$$\Theta_i := \begin{cases} \left(\frac{x_i}{10}\right)^{0.32} & \text{if } x_i > 10 \\ 1 & \text{if } x_i \leq 10 \end{cases}$$

$$\Theta_i =$$

1.868
1.779
1.71
1.612
1.5
1.366
1.196
1
1

$$x_i =$$

70.5
60.5
53.5
44.5
35.5
26.5
17.5
9
2.5

Определим нормативное значение статической составляющей, Н/м<sup>2</sup>:

$$q_i := q_0 \cdot \Theta_i \cdot K$$

$$q_i =$$

1.913·10 <sup>3</sup>
1.821·10 <sup>3</sup>
1.751·10 <sup>3</sup>
1.651·10 <sup>3</sup>
1.536·10 <sup>3</sup>
1.398·10 <sup>3</sup>
1.225·10 <sup>3</sup>
1.024·10 <sup>3</sup>
1.024·10 <sup>3</sup>

$$\Theta_i =$$

1.868
1.779
1.71
1.612
1.5
1.366
1.196
1
1

$$x_i =$$

70.5
60.5
53.5
44.5
35.5
26.5
17.5
9
2.5

Найдем статическая составляющую от ветровой нагрузки на каждом участке, Н:

$$P_{st_i} := q_i \cdot D_{H_i} \cdot h_i$$

$$P_{st_i} =$$

2.142·10 <sup>4</sup>
2.623·10 <sup>4</sup>
2.521·10 <sup>4</sup>
2.377·10 <sup>4</sup>
2.211·10 <sup>4</sup>
2.014·10 <sup>4</sup>
1.763·10 <sup>4</sup>
1.31·10 <sup>4</sup>
8.19·10 <sup>3</sup>

$$h_i =$$

7
9
9
9
9
9
9
8
5

Определение динамической составляющей ветровой нагрузки

Определения коэффициентов  $b_i$ ,  $b_k$ :

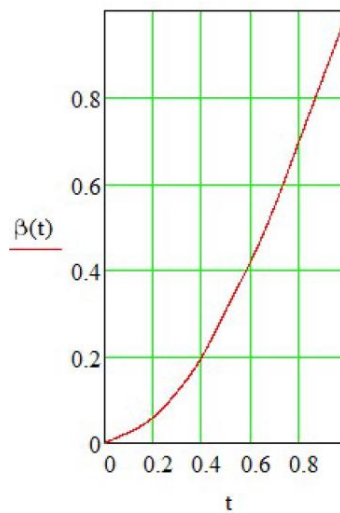
$$r := \frac{x}{H_k} \quad r = \begin{pmatrix} 0.953 \\ 0.818 \\ 0.723 \\ 0.601 \\ 0.48 \\ 0.358 \\ 0.236 \\ 0.122 \\ 0.034 \end{pmatrix}$$

$$xx := (0 \ 0.1 \ 0.2 \ 0.3 \ 0.4 \ 0.5 \ 0.6 \ 0.7 \ 0.8 \ 0.9 \ 1)^T$$

$$y := (0 \ 0.025 \ 0.06 \ 0.12 \ 0.2 \ 0.31 \ 0.42 \ 0.55 \ 0.7 \ 0.85 \ 1)^T$$

$$wu := cspline(xx, y)$$

$$\beta(t) := \text{interp}(wu, xx, y, t) \quad +$$



$$\beta(r) = \begin{pmatrix} 0.929 \\ 0.727 \\ 0.583 \\ 0.422 \\ 0.287 \\ 0.163 \\ 0.079 \\ 0.031 \\ 8.721 \times 10^{-3} \end{pmatrix}$$

$$\beta := \beta(r)$$

$$\beta = \begin{pmatrix} 0.929 \\ 0.727 \\ 0.583 \\ 0.422 \\ 0.287 \\ 0.163 \\ 0.079 \\ 0.031 \\ 8.721 \times 10^{-3} \end{pmatrix}$$

Относительное перемещение центров тяжести участков,  $1/(H^*M)$ :

$$\alpha := \gamma \cdot \frac{H_k}{2 \cdot E \cdot I_1} \cdot \beta \quad \alpha = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Чтобы определить данные коэффициенты, нужно вычислить период собственных колебаний аппарата. Так как не имеется данных о размерах фундамента (бетонной подушке) для аппарата, то период собственных колебаний для аппарата переменного сечения можно подсчитать:

$$T_{\Gamma} := 2 \cdot \pi \cdot H_k \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{\text{last}(x)} [G_{\Gamma_i} \cdot (\alpha_i)^2]}{g \cdot \frac{H_k}{2 \cdot E \cdot I_1} \cdot \gamma + \frac{1}{C_f \cdot I_3}}} \quad T_{\Gamma} = 0$$

Определим коэффициенты для расчета динамической составляющей.

Используя модуль определения коэффициента динамичности при ветровой нагрузке  $x$  :

$$\varepsilon_{ww} := \frac{T_{\Gamma} \cdot \sqrt{q_0}}{840} \quad \varepsilon = 0$$

$$xx := (0 \ 0.05 \ 0.1 \ 0.15 \ 0.2)^T$$

$$y := (1.1 \ 2 \ 2.3 \ 2.7 \ 2.9)^T$$

$$ww := \text{cspline}(xx, y)$$

$$O(t) := \text{interp}(ww, xx, y, t)$$

получим

$$O(\varepsilon) = 1.1$$

$$\xi := O(\varepsilon)$$

$$\xi = 1.1$$

Коэффициент  $\nu$  находим по расчетному модулю:

$$\varepsilon := \text{if}(\varepsilon \leq 0.05, 0.05, \varepsilon)$$

$$\varepsilon_{0.05} := \text{if}(H_k \leq 60, -0.0033 \cdot H_k + 0.85, -0.0008 \cdot H_k + 0.7) \quad \varepsilon_{0.05} = 0.641$$

$$\varepsilon_{0.1} := \text{if}(H_k \geq 60, -0.0017 \cdot H_k + 0.85, 0.75) \quad \varepsilon_{0.1} = 0.724$$

$$\varepsilon_{0.2} := 0.75 \quad \varepsilon_{0.2} = 0.75$$

$$\nu := \begin{cases} \varepsilon_{0.05} & \text{if } \varepsilon \leq 0.05 \\ \varepsilon_{0.1} & \text{if } 0.1556 > \varepsilon > 0.05 \\ \varepsilon_{0.2} & \text{if } 0.1556 < \varepsilon \end{cases}$$

$$\nu = 0.641$$

Коэффициент пульсации скоростного напора для середины участка определяем с помощью модуля определения коэффициента пульсации скоростного напора  $m_{k,j}$  для середины  $k$ -того участка на высоте  $x_k$  и  $j$ -той площадки на высоте  $x_j$ :

$$m_i := \begin{cases} 0.6 \cdot \left(\frac{x_i}{10}\right)^{-0.16} & \text{if } x_i > 10 \\ 0.6 & \text{if } x_i \leq 10 \end{cases}$$

Приведенное относительное ускорение центра тяжести  $i$ -го участка:

$$\eta_{\Gamma_i} := \alpha_i \cdot \frac{\sum_{i=0}^{\text{last}(x)} (\alpha_i \cdot m_i \cdot P_{st_i})}{\sum_{i=0}^{\text{last}(x)} [(\alpha_i)^2 \cdot G_{\Gamma_i}]}$$

$m_i =$	$x_i =$	$\eta_{\Gamma_i} =$	$x_i =$
0.439	70.5	0	70.5
0.45	60.5	0	60.5
0.459	53.5	0	53.5
0.473	44.5	0	44.5
0.49	35.5	0	35.5
0.513	26.5	0	26.5
0.549	17.5	0	17.5
0.6	9	0	9
0.6	2.5	0	2.5

Найдем динамическую составляющую ветровой нагрузки на  $i$ -м участке, Н:

$$P_{\Gamma, \text{dyn}_i} := \nu \cdot G_{\Gamma_i} \cdot \xi \cdot \eta_{\Gamma_i}$$

$P_{\Gamma, \text{dyn}_i}$	$x_i =$
0	70.5
0	60.5
0	53.5
0	44.5
0	35.5
0	26.5
0	17.5
0	9
0	2.5

Ветровая нагрузка в условиях гидроиспытаний.

Ветровая нагрузка на  $i$ -м участке, Н:

$$P_{\Gamma_i} := P_{st_i} + P_{\Gamma, \text{dyn}_i}$$

$P_{\Gamma_i} =$	$x_i =$
$2.142 \cdot 10^4$	70.5
$2.623 \cdot 10^4$	60.5
$2.521 \cdot 10^4$	53.5
$2.377 \cdot 10^4$	44.5
$2.211 \cdot 10^4$	35.5
$2.014 \cdot 10^4$	26.5
$1.763 \cdot 10^4$	17.5
$1.31 \cdot 10^4$	9
$8.19 \cdot 10^3$	2.5



Изгибающий момент в расчетном сечении  $x_0$  от действия ветровой нагрузки,  $H^*m$ .

Коэффициент пульсации скоростного напора для середины участка найдем с помощью модуля определения коэффициента пульсации скоростного напора  $j$ -й площадки на высоте  $x_{jj}$ :

$$m_j := \begin{cases} 0.6 \cdot \left(\frac{x_{jj}}{10}\right)^{-0.16} & \text{if } x_{jj} > 10 \\ 0.6 & \text{if } x_{jj} \leq 10 \end{cases}$$

$$m_{j,0} := m_j$$

$x_{jj} =$	$m_j =$
74	0.436
70	0.439
63	0.447
52	0.461
46	0.47
37.25	0.486
29.75	0.504
21	0.533
12	0.583

$$\left[ \frac{x_j}{H} \right] := \frac{x_j}{H_k} \quad \left[ \frac{x_j}{H} \right] = \begin{pmatrix} 1 \\ 0.946 \\ 0.851 \\ 0.703 \\ 0.622 \\ 0.503 \\ 0.402 \\ 0.284 \\ 0.162 \end{pmatrix}$$

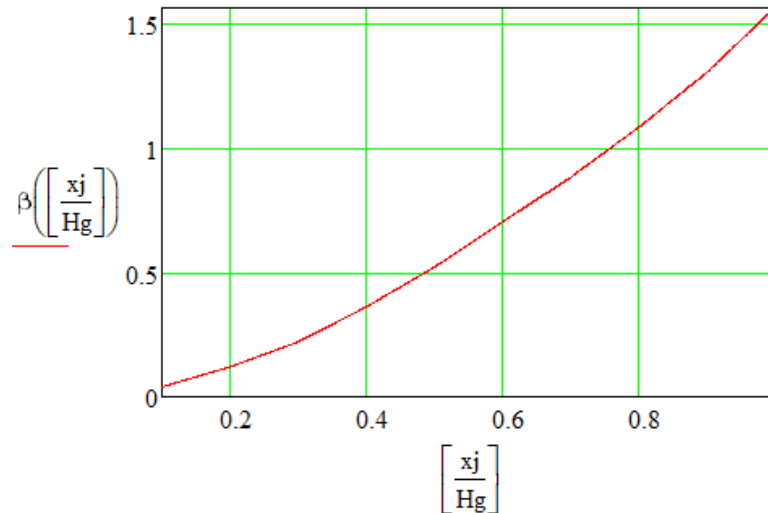
Коэффициент  $x_j$  в зависимости  $\left[ \frac{x_j}{H} \right]$  от определяют по расчетному модулю:

$$\mathbf{xx} := (0.1 \ 0.2 \ 0.3 \ 0.4 \ 0.5 \ 0.6 \ 0.7 \ 0.8 \ 0.9 \ 1)^T$$

$$\mathbf{xjgr} := (0.04 \ 0.12 \ 0.22 \ 0.36 \ 0.52 \ 0.7 \ 0.88 \ 1.08 \ 1.3 \ 1.56)^T$$

$$\mathbf{ww} := \text{cspline}(\mathbf{xx}, \mathbf{xjgr})$$

$$\beta\left(\left[\frac{x_j}{H_g}\right]\right) := \text{linterp}\left(\mathbf{xx}, \mathbf{xjgr}, \left[\frac{x_j}{H_g}\right]\right)$$



$$\beta\left(\left[\frac{x_j}{H}\right]\right) = \begin{pmatrix} 1.56 \\ 1.419 \\ 1.193 \\ 0.885 \\ 0.739 \\ 0.526 \\ 0.363 \\ 0.204 \\ 0.09 \end{pmatrix} \quad \chi_j := \beta\left(\left[\frac{x_j}{H}\right]\right) \quad \chi_j = \begin{pmatrix} 1.56 \\ 1.419 \\ 1.193 \\ 0.885 \\ 0.739 \\ 0.526 \\ 0.363 \\ 0.204 \\ 0.09 \end{pmatrix}$$

Коэффициент  $Q_j$  определяют по расчетному модулю:

$$\Theta_j := \begin{cases} \left(\frac{x_j}{10}\right)^{0.32} & \text{if } x_j > 10 \\ 1 & \text{if } x_j \leq 10 \end{cases}$$

$$\Theta_{j,0} := \Theta_j \quad \Theta_j = \begin{pmatrix} 1.868 \\ 1.779 \\ 1.71 \\ 1.612 \\ 1.5 \\ 1.366 \\ 1.196 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad x_{j,j} = \begin{pmatrix} 74 \\ 70 \\ 63 \\ 52 \\ 46 \\ 37.25 \\ 29.75 \\ 21 \\ 12 \end{pmatrix}$$

Изгибающий момент в расчетном сечении на высоте  $x_0$  от действия ветровой нагрузки на обслуживающую площадку  $j$ , Н\*м:

$$M_{vj} := 0.85 \cdot q_0 \cdot \Theta_j \cdot (x_{j,j} - x_0) \cdot (1 + \xi \cdot \chi_j \cdot m_j) A_j$$

$$M_{vj} = \begin{pmatrix} 1.584 \times 10^6 \\ 1.584 \times 10^6 \\ 1.584 \times 10^6 \\ 1.584 \times 10^6 \\ 1.584 \times 10^6 \\ 1.584 \times 10^6 \\ 1.584 \times 10^6 \\ 1.584 \times 10^6 \\ 1.584 \times 10^6 \end{pmatrix} \quad x_{j,j} = \begin{pmatrix} 74 \\ 70 \\ 63 \\ 52 \\ 46 \\ 37.25 \\ 29.75 \\ 21 \\ 12 \end{pmatrix} \quad x_{0,j} = \begin{pmatrix} 0 \\ 2 \\ 4 \\ 19 \\ 37 \\ 37 \\ 54 \\ 67 \\ 69 \end{pmatrix}$$

Изгибающий момент в расчетном сечении на высоте  $x_0$ , Н\*м:

$$\underline{n} := 0..hr_z - 1$$

$$M_{v2_n} := \sum_{i=0}^n \left[ P_{r_i} \cdot (x_i - x_{0_i}) \right] + \sum_{j=0}^{\text{last}(x)} M_{vj}$$

$$M_{V2_n} =$$

1.577·10 <sup>7</sup>
1.73·10 <sup>7</sup>
1.855·10 <sup>7</sup>
1.916·10 <sup>7</sup>
1.913·10 <sup>7</sup>
1.891·10 <sup>7</sup>
1.827·10 <sup>7</sup>
1.751·10 <sup>7</sup>
1.697·10 <sup>7</sup>

$$x_{0_i} =$$

0
2
4
19
37
37
54
67
69

### 3.2.8.3 Расчет для рабочих условий

Определение статической составляющей:

$$P_{st_i} := q_i \cdot D_{H_i} \cdot h_i$$

$$P_{st_i} =$$

2.142·10 <sup>4</sup>
2.623·10 <sup>4</sup>
2.521·10 <sup>4</sup>
2.377·10 <sup>4</sup>
2.211·10 <sup>4</sup>
2.014·10 <sup>4</sup>
1.763·10 <sup>4</sup>
1.31·10 <sup>4</sup>
8.19·10 <sup>3</sup>

$$h_i =$$

7
9
9
9
9
9
9
8
5

Определим вспомогательные величины.

Так как обычно не имеется данных о размерах фундамента (бетонной подушке) для аппарата, то период собственных колебаний для аппарата переменного сечения можно подсчитать:

$$T_p := 2 \cdot \pi \cdot H_k \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{\text{last}(x)} [G_{p_i} \cdot (\alpha_i)^2]}{g \cdot \frac{H_k}{2 \cdot E \cdot I_1} \cdot \gamma + \frac{1}{C_f \cdot I_3}}} \quad T_p = 0$$

Коэффициент динамичности при ветровой нагрузке  $x$  :

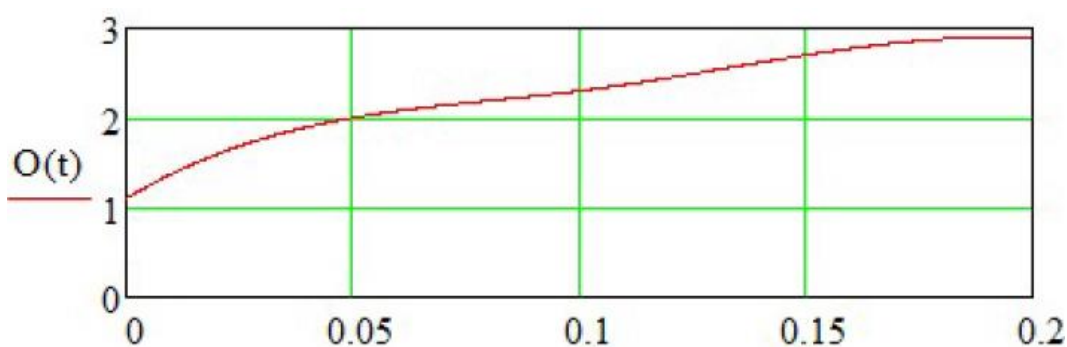
$$\underline{\varepsilon} := \frac{T_p \cdot \sqrt{q_0}}{840} \quad \varepsilon = 0$$

$$\underline{xx} := (0 \ 0.05 \ 0.1 \ 0.15 \ 0.2)^T$$

$$\underline{y} := (1.1 \ 2 \ 2.3 \ 2.7 \ 2.9)^T$$

$$\underline{ww} := \text{cspline}(\underline{xx}, \underline{y})$$

$$\underline{O}(t) := \text{interp}(\underline{ww}, \underline{xx}, y, t)$$



$$O(\varepsilon) = 1.1$$

$$\underline{\xi} := O(\varepsilon)$$

$$\xi = 1.1$$

Коэффициент  $n$  находим по расчетному модулю:

$$\underline{\varepsilon} := \text{if}(\varepsilon \leq 0.05, 0.05, \varepsilon)$$

$$\underline{\varepsilon}_{0.05} := \text{if}(H_k \leq 60, -0.0033 \cdot H_k + 0.85, -0.0008 \cdot H_k + \varepsilon_{0.05} = 0.641$$

$$\underline{\varepsilon}_{0.1} := \text{if}(H_k \geq 60, -0.0017 \cdot H_k + 0.85, 0.75) \quad \varepsilon_{0.1} = 0.724$$

$$\underline{\varepsilon}_{0.2} := 0.75 \quad \varepsilon_{0.2} = 0.75$$

$$\underline{\nu} := \begin{cases} \varepsilon_{0.05} & \text{if } \varepsilon \leq 0.05 \\ \varepsilon_{0.1} & \text{if } 0.1556 > \varepsilon > 0.05 \\ \varepsilon_{0.2} & \text{if } 0.1556 < \varepsilon \end{cases}$$

$$\nu = 0.641$$

Приведенное относительное ускорение центра тяжести  $i$ -го участка:

$$\eta_{p_i} := \alpha_i \cdot \frac{\sum_{i=0}^{\text{last}(x)} (\alpha_i \cdot m_i \cdot P_{st_i})}{\sum_{i=0}^{\text{last}(x)} [(\alpha_i)^2 \cdot G_{p_i}]}$$

$\eta_{p_i} =$

0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0

$x_i =$

70.5
60.5
53.5
44.5
35.5
26.5
17.5
9
2.5

Динамическая составляющая ветровой нагрузки на  $i$ -м участке, Н:

$$P_{p.dyn_i} := \nu \cdot G_{p_i} \cdot \xi \cdot \eta_{p_i}$$

$P_{p.dyn_i}$

0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0

$x_i =$

70.5
60.5
53.5
44.5
35.5
26.5
17.5
9
2.5

Ветровая нагрузка для рабочих условия.

Ветровая нагрузка на  $i$ -м участке, Н:

$$P_{p_i} := P_{st_i} + P_{p.dyn_i}$$

$P_{p_i} =$

$2.142 \cdot 10^4$
$2.623 \cdot 10^4$
$2.521 \cdot 10^4$
$2.377 \cdot 10^4$
$2.211 \cdot 10^4$
$2.014 \cdot 10^4$
$1.763 \cdot 10^4$
$1.31 \cdot 10^4$
$8.19 \cdot 10^3$

$x_i =$

70.5
60.5
53.5
44.5
35.5
26.5
17.5
9
2.5

Изгибающий момент в расчетном сечении на высоте  $x_0$  от действия ветровой нагрузки,  $H^*m$ :

$$M_{V1_n} := \sum_{i=0}^n [P_{p_i} \cdot (x_i - x_{0_i})] + \sum_{j=0}^{\text{last}(x)} M_{Vj_j}$$

$M_{V1_n} =$

$1.577 \cdot 10^7$
$1.73 \cdot 10^7$
$1.855 \cdot 10^7$
$1.916 \cdot 10^7$
$1.913 \cdot 10^7$
$1.891 \cdot 10^7$
$1.827 \cdot 10^7$
$1.751 \cdot 10^7$
$1.697 \cdot 10^7$

$x_{0_i} =$

0
2
4
19
37
37
54
67
69

Определение расчетных усилий от сейсмических воздействий.

Значение сейсмического коэффициента для средних грунтов

$$K_s := \begin{cases} 0.025 & \text{if } ses = 7 \\ 0.050 & \text{if } ses = 8 \\ 0.100 & \text{if } ses = 9 \end{cases} \quad K_s = 0.025$$

Коэффициент динамичности при сейсмической нагрузке

$$D_k := \frac{\sum_i D_{H_i}}{5}$$

$$\begin{aligned}
xx &:= (0.3 \ 0.4 \ 0.6 \ 0.8 \ 1 \ 1.2 \ 1.4 \ 1.6 \ 1.8 \ 2.2)^I \\
yy &:= \begin{cases} (4.8 \ 4.75 \ 2.5 \ 1.8 \ 1.49 \ 1.25 \ 1.09 \ 1 \ 0.99 \ 0.92)^T & \text{if } \left(\frac{H_k}{D_k}\right) \geq 5 \\ (3.23 \ 2.5 \ 1.7 \ 1.26 \ 1 \ 0.8 \ 0.7 \ 0.6 \ 0.6 \ 0.6)^T & \text{if } \left(\frac{H_k}{D_k}\right) \leq 5 \end{cases} \\
ww &:= \text{cspline}(xx, yy) \\
O(t) &:= \text{interp}(ww, xx, yy, t) \\
O(T_p) &= -10.694 \\
\beta &:= \text{if} \left[ T_p > 0.3, O(T_p), \text{if} \left[ \left[ \left(\frac{H_k}{D_k}\right) \geq 5 \right], 4.8, 3.23 \right] \right] \\
\beta &= 4.8
\end{aligned}$$

Найдем расчётную сейсмическую силу в середине i-го участка для первой формы колебаний колонны, Н:

$$S_i := K_s \cdot \beta \cdot G_{P_i} \cdot \alpha_i \cdot \frac{\left[ \sum_i (G_{P_i} \cdot \alpha_i) \right]}{\left[ \sum_i [G_{P_i} \cdot (\alpha_i)^2] \right]}$$

Найдем расчетный изгибающий момент от сейсмических воздействий в соответственном расчетном сечении на высоте X0 при учете только первой формы колебаний, Н\*м:

$$M_{R1_i} := S_i \cdot x_{0_i}$$

$M_{R1_i} =$	$x_{0_i} =$
0	0
0	2
0	4
0	19
0	37
0	37
0	54
0	67
0	69

Пусть максимальный изгибающий момент в нижнем сечении колонны при учете только первой формы колебаний, Н\*м:



$$M_{\max} := \sum_i (S_i \cdot x_i) \quad M_{\max} = 0$$

Расчетный изгибающий момент в нижнем сечении колонны с учетом влияний высших форм колебаний:

$$M_{R1\max} := 1.25 \cdot M_{\max} \quad M_{R1\max} = 0 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

Если расчетная сейсмичность не входит в пределы 7-9 баллов, то определение расчетных усилий от сейсмических воздействий не производится:

$$M_{\max} := \text{if}(7 > \text{ses} > 9, 0, M_{\max}) \quad M_{\max} = 0 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

$$M_{R1\max} := \text{if}(7 > \text{ses} > 9, 0, M_{R1\max}) \quad M_{R1\max} = 0 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

### 3.2.8.4 Расчет для условий монтажа

Определение статической составляющей:

$$P_{st_i} := q_i \cdot D_{H_i} \cdot h_i$$

$P_{st_i} =$

2.142·10 <sup>4</sup>
2.623·10 <sup>4</sup>
2.521·10 <sup>4</sup>
2.377·10 <sup>4</sup>
2.211·10 <sup>4</sup>
2.014·10 <sup>4</sup>
1.763·10 <sup>4</sup>
1.31·10 <sup>4</sup>
8.19·10 <sup>3</sup>

$h_i =$

7
9
9
9
9
9
9
8
5

Определим вспомогательные величины.

Период собственных колебаний аппарата. Так как обычно не имеется данных о размерах фундамента (бетонной подушке) для аппарата, то период собственных колебаний для аппарата переменного сечения можно подсчитать:

$$T_M := 2 \cdot \pi \cdot H_k \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{\text{last}(x)} [G_{M_i} \cdot (\alpha_i)^2]}{g \cdot \frac{H_k}{2 \cdot E \cdot I_1} \cdot \gamma + \frac{1}{C_f \cdot I_3}}} \quad T_M = 0$$

Коэффициента динамичности при ветровой нагрузке x:

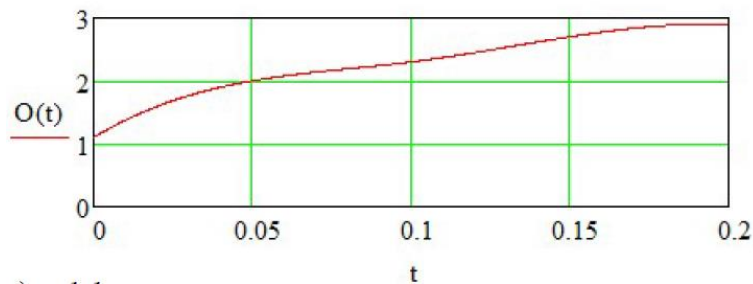
$$\varepsilon := \frac{T_M \cdot \sqrt{q_0}}{840} \quad \varepsilon = 0$$

$$xx := (0 \ 0.05 \ 0.1 \ 0.15 \ 0.2)^T$$

$$y := (1.1 \ 2 \ 2.3 \ 2.7 \ 2.9)^T$$

$$ww := \text{cspline}(xx, y)$$

$$O(t) := \text{interp}(ww, xx, y, t)$$



Коэффициент n находим по расчетному модулю:

$$\varepsilon := \text{if}(\varepsilon \leq 0.05, 0.05, \varepsilon)$$

$$\varepsilon_{0.05} := \text{if}(H_k \leq 60, -0.0033 \cdot H_k + 0.85, -0.0008 \cdot H_k + 0.7)$$

$$\varepsilon_{0.1} := \text{if}(H_k \geq 60, -0.0017 \cdot H_k + 0.85, 0.75)$$

$$\varepsilon_{0.2} := 0.75$$

$$\varepsilon_{0.05} = 0.641$$

$$\varepsilon_{0.1} = 0.724$$

$$\varepsilon_{0.2} = 0.75$$

$$\nu := \begin{cases} \varepsilon_{0.05} & \text{if } \varepsilon \leq 0.05 \\ \varepsilon_{0.1} & \text{if } 0.1556 > \varepsilon > 0.05 \\ \varepsilon_{0.2} & \text{if } 0.1556 < \varepsilon \end{cases}$$

$$\nu = 0.641$$

Приведенное относительное ускорение центра тяжести i-го участка:

$$\eta_{M_i} := \alpha_i \cdot \frac{\sum_{i=0}^{\text{last}(x)} (\alpha_i \cdot m_i \cdot P_{st_i})}{\sum_{i=0}^{\text{last}(x)} [(\alpha_i)^2 \cdot G_{M_i}]}$$

$$\eta_{M_i} =$$

0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0

$$x_i =$$

70.5
60.5
53.5
44.5
35.5
26.5
17.5
9
2.5

Динамическая составляющая ветровой нагрузки на i-м участке, Н:

$$P_{M.dyn_i} := \nu \cdot G_{M_i} \cdot \xi \cdot \eta_{M_i}$$

$$P_{M.dyn_i}$$

0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0

$$x_i =$$

70.5
60.5
53.5
44.5
35.5
26.5
17.5
9
2.5

Ветровая нагрузка для условий монтажа.

Ветровая нагрузка на i-м участке, Н:

$$P_{M_i} := P_{st_i} + P_{M.dyn_i}$$

$$P_{M_i} =$$

$2.142 \cdot 10^4$
$2.623 \cdot 10^4$
$2.521 \cdot 10^4$
$2.377 \cdot 10^4$
$2.211 \cdot 10^4$
$2.014 \cdot 10^4$
$1.763 \cdot 10^4$
$1.31 \cdot 10^4$
$8.19 \cdot 10^3$

$$x_i =$$

70.5
60.5
53.5
44.5
35.5
26.5
17.5
9
2.5

Изгибающий момент в расчетном сечении на высоте  $x_0$  от действия ветровой нагрузки, Н\*м:

$$M_{V3_n} := \sum_{i=0}^n \left[ P_{M_i} \cdot (x_i - x_{0_i}) \right] + \sum_{j=0}^{\text{last}(x)} M_{Vj_j}$$

$M_{V3_n} =$

1.577·10 <sup>7</sup>
1.73·10 <sup>7</sup>
1.855·10 <sup>7</sup>
1.916·10 <sup>7</sup>
1.913·10 <sup>7</sup>
1.891·10 <sup>7</sup>
1.827·10 <sup>7</sup>
1.751·10 <sup>7</sup>
1.697·10 <sup>7</sup>

$x_{0_i} =$

0
2
4
19
37
37
54
67
69

## Определение расчетных усилий от сейсмических воздействий:

Значение сейсмического коэффициента для средних грунтов:

$$K_s := \begin{cases} 0.025 & \text{if } ses = 7 \\ 0.050 & \text{if } ses = 8 \\ 0.100 & \text{if } ses = 9 \end{cases} K_s = 0.025$$

Коэффициент динамичности при сейсмической нагрузке:

$$D_k := \frac{\sum_i D_{H_i}}{5}$$

$$xx := (0.3 \ 0.4 \ 0.6 \ 0.8 \ 1 \ 1.2 \ 1.4 \ 1.6 \ 1.8 \ 2.2)^T$$
$$yy := \begin{cases} (4.8 \ 4.75 \ 2.5 \ 1.8 \ 1.49 \ 1.25 \ 1.09 \ 1 \ 0.99 \ 0.92)^T & \text{if } \left(\frac{H_k}{D_k}\right) \geq 5 \\ (3.23 \ 2.5 \ 1.7 \ 1.26 \ 1 \ 0.8 \ 0.7 \ 0.6 \ 0.6 \ 0.6)^T & \text{if } \left(\frac{H_k}{D_k}\right) \leq 5 \end{cases}$$

$$ww := \text{cspline}(xx, yy)$$

$$O(t) := \text{interp}(ww, xx, t)$$

$$O(T_M) = -10.694$$

$$\beta := \text{if} \left[ T_M > 0.3, O(T_M), \text{if} \left[ \left[ \left(\frac{H_k}{D_k}\right) \geq 5 \right], 4.8, 3.23 \right] \right]$$

$$\beta = 4.8$$

Найдем расчетную сейсмическую силу в середине  $i$ -го участка для первой формы колебаний колонны,  $H$ :

$$S_i := K_s \cdot \beta \cdot G_{M_i} \cdot \alpha_i \cdot \frac{\left[ \sum_i (G_{M_i} \cdot \alpha_i) \right]}{\left[ \sum_i [G_{M_i} \cdot (\alpha_i)^2] \right]} \quad S_i = 0$$

Расчетный изгибающий момент от сейсмических воздействий в соответственном расчетном сечении на высоте  $X_0$  при учете только первой формы колебаний,  $H^*m$ :

$$M_{R3_i} := S_i \cdot x_{0_i}$$

$M_{R3_i} =$
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0

$x_{0_i} =$
0
2
4
19
37
37
54
67
69

Пусть максимальный изгибающий момент в нижнем сечении колонны при учете только первой формы колебаний:

$$M_{\max} := \sum_i (S_i \cdot x_i) \quad M_{\max} = 0 \quad \text{Н}\cdot\text{м}$$

Определим расчетный изгибающий момент в нижнем сечении колонны с учетом влияний высших форм колебаний, Н\*м:

$$M_{R3\max} := 1.25 \cdot M_{\max} \quad M_{R3\max} = 0 \quad \text{Н}\cdot\text{м}$$

Если расчетная сейсмичность не входит в пределы 7-9 баллов, определение расчетных усилий от сейсмических воздействий не производится и:

$$M_{\max} := \text{if}(7 > \text{ses} > 9, 0, M_{\max}) \quad M_{\max} = 0 \quad \text{Н}\cdot\text{м}$$

$$M_{R3\max} := \text{if}(7 > \text{ses} > 9, 0, M_{R3\max}) \quad M_{R3\max} = 0 \quad \text{Н}\cdot\text{м}$$

Модуль связи:

$$MFS_{i,0} := x_{0_i} \quad MFS_{i,1} := M_{v1_i} \quad MFS_{i,2} := M_{v2_i} \quad MFS_{i,3} := M_{v3_i}$$

$$MFS_{i,4} := M_{R1_i} \quad MFS_{i,5} := M_{R3_i} \quad MFS_{1,6} := G_{p.\max} \quad MFS_{2,6} := G_{r.\max}$$

$$MFS_{3,6} := G_{m.\max}$$

Максимальный изгибающий момент

$$M_{\max MFS} := \max(MFS) = 1.916 \times 10^7 \quad \text{Н}\cdot\text{м}$$

### 3.2.9 Расчет опорной обечайки

Установка химических аппаратов происходит на фундаменты или специальные несущие конструкции с помощью опор. Для установки данной колонны используем цилиндрическую опору.

Рассчитаем вес всего аппарата в рабочем состоянии.

По ГОСТ Р 51273-99, для аппаратов высотой более 10 метров, при отношении высоты к диаметру колонны больше 4,5, в целях увеличения устойчивости колонны, в качестве исполнительного типа опорной обечайки рекомендуется выбирать цилиндрическую опорную обечайку [28, с.105].

1) Масса цилиндрической обечайки

$$\rho_{\text{стали}} := 7800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$
$$H := 69 \text{ м}$$
$$M_{\text{цилиндр}} := \pi \cdot \frac{(D_H^2 - D^2)}{4} \cdot \rho_{\text{стали}} \cdot H = 3.821 \times 10^4 \text{ кг}$$

Масса днища и крышки, в соответствии с ГОСТ 6533-78

$$M_{\text{днища.крышки}} := M_{\text{крышки}} \cdot 2 = 570.6 \text{ кг}$$

#### Масса штуцеров и фланцев

Масса штуцера для ввода флегмы:

$$M_{50} := 3.7 \text{ кг}$$

Масса штуцеров для отвода кубового остатка, вывода паров дистиллята, ввода паров кубовой смеси составляет:

$$M_{40} := 3 \text{ кг}$$

$$M_{\text{общ}40} := M_{40} \cdot 4 = 12 \text{ кг}$$

Общая масса всех штуцеров и фланцев:

$$M_{\text{общ.штуц}} := M_{\text{общ}40} + M_{50} = 15.7 \text{ кг}$$

Масса люк-лазов:

$$M_{\text{л}} := 228 \text{ кг}$$

$$M_{\text{люк}} := M_{\text{л}} \cdot 4 = 912 \text{ кг}$$

Масса воды в аппарате при гидравлических испытаниях:

$$M_{\text{В}} := \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot H \cdot \rho_{\text{В}} \cdot 10^{-3} = 138.733 \quad \text{кг}$$

Масса тарелок:

$$M_{\text{Т.общ}} := M_{\text{Т}} \cdot 132 = 1.122 \times 10^4 \quad \text{кг}$$

Общая масса аппарата

Примем, массу вспомогательных устройств составляет 10% от массы всей колонны без среды. Отсюда общая масса крышки, днища и цилиндрической обечайки:

$$M_{\text{Обеч}} := M_{\text{цилиндр}} + M_{\text{днища.крышки}} + M_{\text{общ.штуц}} = 3.879 \times 10^4 \quad \text{кг}$$

Общая масса пустого аппарата:

$$M_{\text{общ.пуст}} := 1.1 \cdot (M_{\text{Обеч}} + M_{\text{Люк}} + M_{\text{Т.общ}}) = 5.602 \times 10^4 \quad \text{кг}$$

Общая масса аппарата при гидравлических испытаниях:

$$M_{\text{полн.апп}} := M_{\text{общ.пуст}} + M_{\text{В}} = 5.615 \times 10^4 \quad \text{кг}$$

Вес аппарата:

$$G_{\text{полн.апп}} := M_{\text{полн.апп}} \cdot 9.8 \cdot 10^{-6} = 0.55 \quad \text{МН}$$

$$G_{\text{пуст.апп}} := M_{\text{общ.пуст}} \cdot 9.8 \cdot 10^{-6} = 0.549 \quad \text{МН}$$

максимальный вес аппарата

$$G_{\text{max}} := G_{\text{полн.апп}}$$

минимальный вес аппарата

$$G_{\text{min}} := G_{\text{пуст.апп}}$$

Примем расчетную толщину стенки опорной обечайки:

$$S_{\text{опор}} := S = 14 \quad \text{мм}$$

В качестве исполнительного материала обечайки выбираем сталь 09Г2С обладающую отличной холодостойкостью. В соответствии с рекомендацией АТК 24.200.04-90 примем количество болтов равным [42]:



$$n_{\text{опоры}} := 24$$

Внутренний диаметр фундаментного кольца ОСТ 26-467-72:

$$D_1 := D_H \cdot 0.92 = 1.498 \text{ м}$$

Наружный диаметр фундаментного кольца:

$$D_2 := 1.10 \cdot D_H = 1.791 \text{ м}$$

Изгиб выступающей части кольца

$$b_{\text{оп}} := \frac{D_2 - D_H}{2} = 0.081$$

Найдем момент сопротивления изгибу опорной площадки фундаментного кольца [38, с.104]:

$$W := \frac{\pi}{32} \cdot \left( \frac{D_2^4 - D_1^4}{D_2} \right) = 0.288 \text{ м}^2$$

Находим опорную площадь фундаментного кольца:

$$F_{\text{фунд.кольца}} := \frac{\pi \cdot (D_2^2 - D_1^2)}{4} = 0.757 \text{ м}^2$$

Максимальное напряжение на опорной поверхности фундаментного кольца находим по уравнению:

$$\sigma_{\text{max1}} := \frac{G_{\text{max}} \cdot 10^{-6}}{F_{\text{фунд.кольца}}} + \frac{M_{\text{maxMFS}} \cdot 10^{-6}}{W} = 66.536 \text{ МПа}$$

В качестве исполнительного материала болтов в соответствии с рекомендацией АТК 24.200.04-90 выбираем сталь 40Х:

$$\delta_{\text{к}} := b_{\text{оп}} \cdot \sqrt{3 \cdot \frac{\sigma_{\text{max1}}}{\sigma_{20}}} = 0.075 \text{ м}$$

Расчетную толщину фундаментного кольца необходимо принять не менее, чем [42, с.105]:

$$\delta_{\text{к}} := S_{\text{опор}} + 6 \tag{46}$$

В соответствии с таблицей 1, АТК 24.200.04-90 примем толщину опоры равной:

$$S_{\text{опор}} := 30$$

$$\delta_{\text{ж}} := S_{\text{опор}} + 6 = 36 \text{ мм}$$

Примем исполнительную толщину фундаментного кольца равной 40.

Минимальное напряжение на опорной поверхности фундаментного кольца:

$$\sigma_{\text{min1}} := \frac{G_{\text{min}} \cdot 10^{-6}}{F_{\text{фунд.кольца}}} - \frac{M_{\text{maxMFS}} \cdot 10^{-6}}{W} = -66.536 \text{ МПа}$$

Отрицательное значение  $\sigma_{\text{min1}}$  свидетельствует об отрыве фундаментного кольца от фундамента, так как фундаментные болты работают на растяжение [42, с. 106].

Нагрузка на наиболее нагруженный болт составляет:

$$P_{\text{б}} := \sigma_{\text{min1}} \cdot \frac{F_{\text{фунд.кольца}}}{n_{\text{опоры}}} = -2.098 \text{ МПа}$$

Примем прибавку на атмосферную коррозию равной [3, с.106]:

$$c_{\text{к.атм}} := 0.03$$

Найдем внутренний диаметр резьбы фундаментного болта из условия прочности на растяжение:

$$d_0 := \sqrt{\frac{4 \cdot |P_{\text{б}}|}{\pi \cdot \sigma_{20}}} + c_{\text{к.атм}} = 0.137 \text{ м}$$

Примем в соответствии с таблицей 1, АТК 24.200.04-90 исполнительный диаметр фундаментного болта равным:

$$d_{\text{болт.ф}} := 0.042 \text{ м}$$

Определим площадь опасного сечения сварного шва:

$$f_{\text{с}} := \pi \cdot D_{\text{н}} \cdot 0.7 \cdot S_{\text{опор}} \cdot 10^{-3} = 0.107 \text{ м}^2$$

Найдем момент сопротивления сварного шва изгибу:

$$W_c := 0.8 \cdot 0.7 \cdot S_{\text{опор}} \cdot D_H^2 = 44.526 \text{ м}^3$$

Определение напряжения в сплошном сварном шве крепящим корпус аппарата к цилиндрической опорной части:

$$\sigma_c := \frac{\sigma_{\text{max1}} \cdot 10^{-6}}{f_c} + \frac{M_{\text{maxMFS}} \cdot 10^{-6}}{W_c} = 0.431 \text{ МПа}$$

Напряжение в сварном шве должно удовлетворять условию:

$$\text{Пров10} := \begin{cases} \text{"условия выполняется"} & \text{if } \sigma_c \leq 0.8 \cdot \sigma_{20} \\ \text{"условие не выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Пров10} = \text{"условия выполняется"}$$

В соответствии с рекомендацией [38, с.107] все отверстия в опорной обечайке диаметром более 100 мм необходимо укреплять патрубками с толщиной стенки не менее толщины стенки опорной обечайки, и длиной не менее  $l_0 \geq 0.25 \cdot d_{\text{отв}}$ , но не менее 50 мм.

## 4 Расчет кожухотрубчатого конденсатора- холодильника

### 4.1 Технологический расчет

Технологический расчет заключается в тепловом расчете конденсатора, и выбор из ряда стандартных теплообменников для дальнейших расчетов.

Исходные данные:

Производительность –  $\Pi = 43$  тонн/сутки

Содержание низкокипящего компонента в смеси (% массовые) –  $x_{п.ен}\% = 95$  %. Давление в межтрубном пространстве:  $P = 2.1$  МПа;

Температура конденсации:  $T_K = 18$  °С;

Температура охлаждающей воды:

- на входе –  $t_H = 8$  °С;

- на выходе –  $t_K = 26$  °С.

#### 4.1.1 Тепловой расчет

Производительность смеси в кг/с:

$$G_{см} = 0,476 \text{ кг/с.}$$

Состав смеси в процентах, переведем их в массовые доли:

$$X_{п.ен} = \frac{x_{п.ен}\%}{100} = 0.95 \text{ масс. доля}$$

$$X_{п.ан} = \frac{x_{п.ан}\%}{100} = 0.05 \text{ масс. доля}$$

где  $X_{п.ен}$  – массовая доля пропилена;  $X_{п.ан}$  – массовая доля пропана;

$x_{п.ен}\%$  – процентная доля пропилена в смеси, %;  $x_{п.ан}\%$  – процентная доля пропана в смеси, %.

Содержание пропилена в массовых долях:

$$x_{п.ен} = 0.952$$

Температура кипения пропан-пропиленовой фракции при  $P=2,1$  МПа, °С [43, стр 16]:

$$T_{конд} = 45$$

Построим температурную схему процесса (рисунок 19).

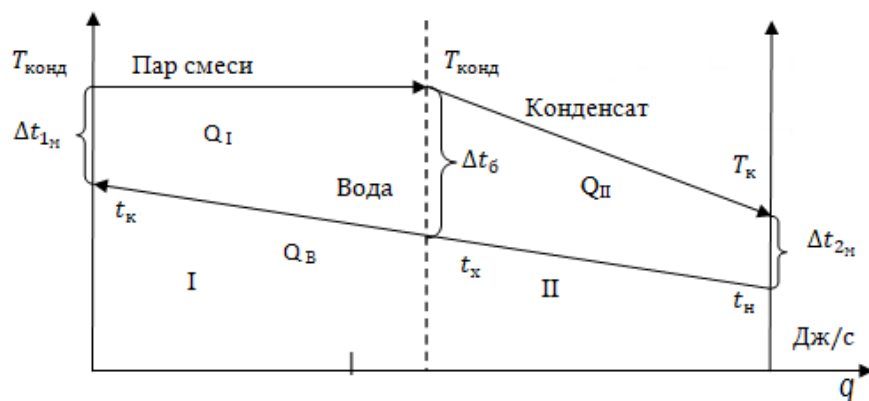


Рисунок 19 – Температурная схема конденсации пропан-пропиленовой смеси.

Уравнение теплового баланса имеет вид:

$$Q_I + Q_{II} = Q_B \quad (47)$$

$$G_{см} \cdot r_{см} + G_{см} \cdot C_{pсм} \cdot (T_{конд} - T_к) = G_B \cdot C_{pB} \cdot (t_к - t_н) \quad (48)$$

где,  $Q_I$  – тепло, отданное смесью пропан-пропилен при конденсации в первой зоне, Дж/с;

$Q_{II}$  – тепло, отданное смесью пропан-пропилен при охлаждении во второй зоне, Дж/с;

$Q_B$  – тепло принимаемое водой, Дж/с;

$G_{см}$  – массовый расход потока смеси, кг/с;

$G_B$  – массовый расход воды, кг/с;

$r_{см}$  – удельная теплота конденсации пара смеси, Дж/кг;

$C_{pсм}$  – теплоемкость смеси при средней температуре, Дж/(кг·К);

$C_{pB}$  – теплоемкость воды при средней температуре, Дж/(кг·К).

На рисунке 20 изображен теплообменник с направлением теплоносителей и тепловыми потоками.

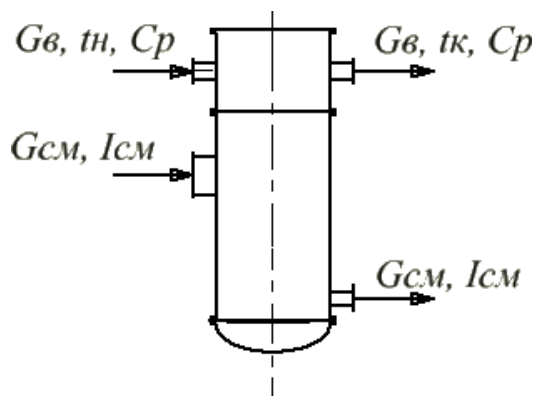


Рисунок 20 – Направление теплоносителей и тепловых потоков.

Для нахождения удельной теплоты конденсации смеси при температуре кипения (конденсации) необходимо определить удельные теплоты конденсации пропана и пропилена [44], Дж/кг:

$$\text{Удельная теплота конденсации пропилена} \quad r_{\text{п.ен}} = 280 \cdot 10^3$$

$$\text{Удельная теплота конденсации пропана} \quad r_{\text{п.ан}} = 268 \cdot 10^3$$

Удельная теплота конденсации пара смеси, Дж/кг:

$$r_{\text{см}} = r_{\text{п.ен}} \cdot X_{\text{п.ен}} + r_{\text{п.ан}} \cdot X_{\text{п.ан}} = 2.7942 \times 10^5$$

Рассчитаем теплоту горячего теплоносителя, Дж/с:

$$Q_I = G_{\text{см}} \cdot r_{\text{см}} = 1.33 \times 10^5$$

Теплоёмкость по правилу аддитивной при средней температуре:

$$C_{p_{\text{см}}} = f\left(\frac{T_{\text{конд}} + T_{\text{к}}}{2}\right) \quad (49)$$

$$\frac{T_{\text{конд}} + T_{\text{к}}}{2} = \frac{(45 + 18)}{2} = 31^\circ\text{C}$$

где,  $T_{\text{конд}}$  – температура конденсации смеси, °С;

$T_{\text{к}}$  – температура отвода конденсата, °С.

Теплоёмкости пропилена и пропана соответственно [45] Дж/(кг·С°):

$$C_{p_{\text{п.ен}}} = 2663$$

$$C_{p_{\text{п.ан}}} = 2474$$

Теплоемкость смеси, Дж/(кг·С°):

$$C_{p_{\text{см}}} = C_{p_{\text{п.ен}}} \cdot X_{\text{п.ен}} + C_{p_{\text{п.ан}}} \cdot X_{\text{п.ан}} = 2.6535 \times 10^3$$

Тепло, которое отдает смесь, во второй зоне, Дж/с:

$$Q_{II} = G_{\text{см}} \cdot C_{p_{\text{см}}} \cdot (T_{\text{конд}} - T_{\text{к}}) = 3.41034 \times 10^4$$

Тепло принятое водой, Дж/с:

$$Q_V = Q_I + Q_{II} = 1.671 \times 10^5$$

Определим теплоёмкость воды при средней температуре:

$$\frac{t_{2н} + t_{2к}}{2} = 17^\circ\text{C}$$

где  $t_{\text{ср}}$  – средняя температура воды, °С;

$t_{2н}$  – начальная температура воды, °С;

$t_{2к}$  – конечная температура воды, °С.

Теплоемкость воды [46], Дж/(кг·С°):

$$C_{pB} = 4204$$

Определим массовый расход воды с учетом потери теплоты 5 %, кг/с:

$$G_B = Q_B \cdot \frac{1.05}{C_{pB} \cdot (t_{2K} - t_{2H})} = 2.319$$

Найдем температуру воды по окончанию конденсации (I зоны):

$$t_x = \frac{Q_{II}}{G_B \cdot C_{pB}} + t_{2H} = 11.499 \text{ } ^\circ\text{C}$$

#### 4.1.2 Ориентировочный расчет и подбор конденсатора

Расчет зоны конденсации.

Рассчитаем большую и малую разности температур для зоны конденсации. Схема первой зоны представлена на рисунке 21.

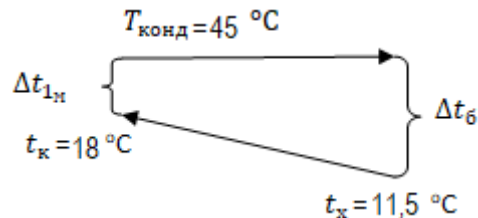


Рисунок 21 – Температурная схема конденсации.

Рассчитаем разности температур:

$$\Delta t_{1M} = T_{\text{конд}} - t_{2K} = 19 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_{1\delta} = T_{\text{конд}} - t_x = 33.5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

где,  $\Delta t_{1\delta}$  – наибольшая разность температур,  $^\circ\text{C}$ ;

$\Delta t_{1M}$  – наименьшая разность температур,  $^\circ\text{C}$ .

Определим среднюю разность температур в зоне конденсации по уравнению [46, с.169]:

$$\Delta t_{Icp} = \frac{\Delta t_{1\delta} - \Delta t_{1M}}{\ln\left(\frac{\Delta t_{1\delta}}{\Delta t_{1M}}\right)} = 25.569 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Ориентировочные значения коэффициентов теплоотдачи возьмем из [46, с 172, табл.4.8]. Для вида теплообменника от конденсирующегося пара органических веществ к воде, минимальное и максимальное значение, Вт/(м<sup>2</sup>·К):

$$K_{Imin} = 300, K_{Imax} = 800.$$

где  $K_{Imin}$  – минимальный коэффициент теплопередачи зоны конденсации, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $K_{Imax}$  – максимальный коэффициент теплопередачи зоны конденсации, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Ориентировочная поверхность теплообмена для зоны конденсации:

$$F_{Imin} = \frac{Q_I}{K_{Imax} \cdot \Delta t_{Icb}} = 6.502 \text{ м}^2$$

$$F_{Imax} = \frac{Q_I}{K_{Imin} \cdot \Delta t_{Icp}} = 17.339 \text{ м}^2$$

где  $F_{Imin}$  – минимальная поверхность первой зоны, м<sup>2</sup>;

$F_{Imax}$  – максимальная поверхность первой зоны, м<sup>2</sup>.

Принимаем приближенное значение поверхностей теплообмена:

$$F_{Imin.} = 7 \text{ м}^2$$

$$F_{Imax.} = 18 \text{ м}^2$$

Далее произведем расчет зоны охлаждения.

Наибольшая разность температур для зоны охлаждения равна большей разности температур зоны конденсации:

$$\Delta t_{26} = \Delta t_{16}$$

Найдем меньшую разность температур хоны охлаждения:

$$\Delta t_{2M} = T_K - t_{2H} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$$

Средняя разность температур в зоне охлаждения [46, с.169]:

$$\Delta t_{Icp} = \frac{\Delta t_{26} - \Delta t_{2M}}{\ln\left(\frac{\Delta t_{26}}{\Delta t_{2M}}\right)} = 19.439 \text{ }^\circ\text{C}$$

Коэффициенты теплопередачи от жидкости к жидкости (углеводы, масла) [46, с 172,табл.4.8], Вт/(м<sup>2</sup>·К):

$$K_{IImin} = 120,$$

$$K_{IImax} = 270.$$

где  $K_{IImin}$  и  $K_{IImax}$  – минимальный и максимальный коэффициенты теплопередачи первой зоны, Вт/(м<sup>2</sup>·К.



Найдем ориентировочную поверхность зоне охлаждения:

$$F_{II\min} = \frac{Q_{II}}{K_{II\max} \cdot \Delta t_{II\text{ср}}} = 6.5 \text{ м}^2$$
$$F_{II\max} = \frac{Q_{II}}{K_{II\min} \cdot \Delta t_{II\text{ср}}} = 14.62 \text{ м}^2$$

где  $F_{II\min}$  – минимальная поверхность второй зоны,  $\text{м}^2$ ;

$F_{II\max}$  – максимальная поверхность второй зоны,  $\text{м}^2$ .

Приближенное значение принимаем:

$$F_{II\min.} = 7 \text{ м}^2$$
$$F_{II\max.} = 15 \text{ м}^2$$

Найдем суммы ориентировочных поверхностей двух зон теплообмена:

$$F_{\min} = F_{I\min.} + F_{II\min.} = 14 \text{ м}^2$$
$$F_{\max} = F_{I\max.} + F_{II\max.} = 33 \text{ м}^2$$

Принимаем, что охлаждающая среда (вода) движется по трубному пространству с диаметрами труб 25x2 мм.

Наружный диаметр труб:

$$d_{\text{нар}} = 25 \text{ мм.}$$

Толщина стенки труб:

$$\delta = 2 \text{ мм.}$$

Найдем эквивалентный диаметр (внутренний):

$$d_{\text{ЭКВ}} = d_{\text{нар}} - 2 \cdot \delta = 21 \text{ мм.}$$

В первом приближении принимаем движение потока по трубам, турбулентным. Критерий Рейнольдса:

$$Re_{\text{оп}} = 15000.$$

Вязкость смеси пропан-пропиленовой фракции при средней температуре [47],  $\text{Па}\cdot\text{с}$ :

$$\mu_{\text{см}} = 838 \cdot 10^{-8}.$$

Ориентировочное число труб на один ход:

$$n_{op} = \text{ceil} \left( \frac{G_B}{0.785 \cdot Re_{op} \cdot \frac{d_{эКВ}}{1000} \cdot \mu_B} \right) = 7$$

В таблице 5 представлены параметры выбранного конденсатора по рассчитанным данным [48, табл. 7]:

Таблица 5 – Параметры кожухотрубчатого конденсатора.

Внутренний диаметр кожуха, мм	Наружный диаметр труб, мм	Толщина стенки труб, мм	Давление в кожухе, МПа	Число ходов по труба м	Общее число труб	Поверхность теплообмена на м <sup>2</sup> при длине труб
						3000
600	25	2	2,5	2	248	58,4

#### 4.1.3 Уточненный расчет и выбор кожухотрубчатого конденсатора

Проведем уточненный расчет критерия Рейнольдса:

$$Re = \frac{n_{op}}{n_B} \cdot Re_{op} = 846.774$$

где  $n_A$  – число труб одного хода, сектора А.

$Re < 2300$  – режим течения смеси ламинарный.

Действительную поверхность теплообмена выразим из уравнения теплопередачи 4.72 [46, с.168]:

$$F_{дейст} = \frac{Q_i}{K_{iдейст} \cdot \Delta t_{iср}} \quad (50)$$

где  $F_{дейст}$  – действительная поверхность теплообмена, м<sup>2</sup>;

$Q_i$  – количества тепла зоны конденсации и зоны охлаждения, Дж;

$K_{iдейст}$  – коэффициент теплопередачи зоны конденсации и охлаждения, Вт/(м<sup>2</sup> · К);

$\Delta t_{iср}$  – средняя разность температур двух зон, °С.

Рассчитаем коэффициент теплопередачи по формуле:

$$K_{\text{действ}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{см1}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{воды}}} + \Sigma R} \quad (51)$$

где  $\alpha_{\text{см1}}$  – коэффициент теплоотдачи смеси в двух зонах соответственно, Вт/(м<sup>2</sup> · К);

$\alpha_{\text{воды}}$  – коэффициент теплоотдачи воды, для двух зон можно принят их одинаковыми  $\alpha_{\text{Iводы}} \approx \alpha_{\text{IIводы}}$ , Вт/(м<sup>2</sup> · К);

$\Sigma R$  – сумма термических сопротивлений стенки и загрязнений, (м<sup>2</sup> · К)/Вт.

#### 4.1.3.1 Коэффициент теплоотдачи от стенки к смеси (зона конденсации)

Определяем коэффициент теплопередачи от стенки к смеси [46, с. 161]:

$$\alpha_{\text{см}} = 3.78 \cdot \varepsilon_t \cdot \lambda_{\text{см}} \cdot \sqrt[3]{\frac{\rho_{\text{см}}^2 \cdot N \cdot d_{\text{H}}}{\mu_{\text{см}} \cdot G_{\text{см}}}} \quad (52)$$

где  $\alpha_{\text{см}}$  – коэффициент теплоотдачи от стенки к смеси, Вт/(м<sup>2</sup> · К);

$\varepsilon_t$  – поправочная функция, для газов температурная поправка  $\approx 1$ ;

$\rho_{\text{см}}$  – плотность конденсата смеси, кг/м<sup>3</sup>;

$\mu_{\text{см}}$  – вязкость конденсата смеси, Па · с;

$N$  – общее число труб, шт.;

$\lambda_{\text{см}}$  – коэффициент теплопроводности конденсата смеси, Вт/(м<sup>2</sup> · К).

Для определения теплофизических величин, рассчитаем температуру стенки и температуру пленки у стенки.

Вычислим температуру стенки:

$$t_{\text{ст}} = T_{\text{конд}} - 0.1 \cdot \Delta t_{\text{ср}} = 42.443 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Температура пленки:

$$t_{\text{пл}} = \frac{T_{\text{конд}} + t_{\text{ст}}}{2} = 43.722 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Найдем плотность смеси при температуре пленки [44]:

Плотность пропилена, кг/м<sup>3</sup>:

$$\rho_{п.ен} = 18,4.$$

Плотность пропана, кг/м<sup>3</sup>:

$$\rho_{п.ан} = 476,9.$$

По правилу аддитивной найдем плотность смеси:

$$\rho_{см} = \rho_{п.ен} \cdot X_{п.ен} + \rho_{п.ан} \cdot X_{п.ан} = 41.325 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Плотность смеси примем [49], Па·с:

$$\mu_{см} = 838 \cdot 10^{-8}$$

Найдем коэффициент теплопроводности пропан-пропиленовой смеси [44].

Коэффициент теплопроводности пропана примем, Вт/(м · К):

$$\lambda_{п.ан} = 0,24$$

Коэффициент теплопроводности пропилена примем, Вт/(м · К):

$$\lambda_{п.ен} = 0,28$$

Коэффициент теплопроводности смеси:

$$\lambda_{см} = \lambda_{п.ен} \cdot X_{п.ен} + \lambda_{п.ан} \cdot X_{п.ан} = 0.278 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$$

Коэффициент теплоотдачи зоны конденсации:

$$\alpha_{I см} = 3.78 \cdot \epsilon_t \cdot \lambda_{см} \cdot \sqrt[3]{\frac{\rho_{см}^2 \cdot N \cdot d_H}{\mu_{см} \cdot G_{см}}} = 1.455 \times 10^3 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Коэффициент теплоотдачи воды находим по формуле [46, с. 150], Вт/(м<sup>2</sup> · К):

$$\alpha_{вода} = \frac{Nu \cdot \lambda_B}{d_{вн}} \quad (53)$$

где, Nu – критерий Нуссельта;  $\lambda_B$  – коэффициент теплопроводности воды при средней температуре воды.

Для ламинарной области критерий Нуссельта рассчитывается по формуле [46]:

$$Nu = 0.15 \cdot Re^{0.33} \cdot Pr^{0.43} \cdot \left( \frac{Pr}{Pr_{ст}} \right)^{0.25} \cdot Gr^{0.1} \quad (54)$$

где  $Pr$  – критерий Прандтля при средней температуре воды;

$Pr_{ст}$  – критерий Прандтля при средней температуре стенки.

$Gr$  – критерий Грасгофа.

Далее необходимо рассчитать критерий Грасгофа ( $Gr$ ) [46]:

$$Gr = \frac{d_{вн}^3 \cdot \rho_{в}^2 \cdot \beta_{в} \cdot \Delta t \cdot g}{\mu_{в}^2} \quad (55)$$

где  $Gr$  – критерий Грасгофа;

$\Delta t$  – разность между средней температурой и температурой стенки, °С ;

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

Для расчета критерия Грасгофа нужно рассчитать теплофизические величины при средней температуре воды равной 17 °С.

Температура стенки:

$$t_{ст} = t_{ср} + 0.8 \cdot \Delta t_{ср} = 37.455 \text{ °С}$$

Разность между средней температурой и температурой стенки:

$$\Delta t = t_{ст} - t_{ср} = 20.455 \text{ °С}$$

Теплофизические величины для воды при средней температуре XXXIX [46, с 537]:

Коэффициент объемного расширения воды, 1/К:

$$\beta_{в} = 3,738 \cdot 10^{-4}$$

Теплоемкость воды, Дж/(кг·К):

$$c_{в} = 4,18 \cdot 10^3$$

Вязкость воды, Па·с:

$$\mu_{в} = 686,4 \cdot 10^{-6}$$

Коэффициент теплопроводности воды, Вт/(м<sup>2</sup>·К):

$$\lambda_{в} = 15,4$$

Критерий Прандтля для воды:

$$Pr = 7,77$$

Вычислим критерий Прандтля для стенки:

$$Pr_{ст} = \frac{\mu_B \cdot c_B}{\lambda_B} = 120.553$$

Критерий Грасгофа:

$$Gr = \frac{d_{вн}^3 \cdot \rho_B^2 \cdot \beta_B \cdot \Delta t \cdot g}{\mu_B^2} = 1.449 \times 10^{15}$$

Найдем критерий Нуссельта:

$$Nu = 0.15 \cdot Re^{0.33} \cdot Pr^{0.43} \cdot \left( \frac{Pr}{Pr_{ст}} \right)^{0.25} \cdot Gr^{0.1} = 55.407$$

Коэффициент теплоотдачи воды:

$$\alpha_{вода} = \frac{Nu \cdot \lambda_B}{d_{вн.}} = 4.063 \times 10^4 \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$$

#### 4.1.3.2 Коэффициент теплоотдачи от смеси к стенке (зона охлаждения)

Найдем площадь межтрубного пространства:

$$S_{м.т.п} = \pi \cdot \frac{(D_{вн.})^2}{4} - N \cdot \pi \cdot \frac{(d_{нар.})^2}{4} \quad (56)$$

где  $S_{м.т.п}$  - площадь межтрубного пространства, м<sup>2</sup>;

$D_{вн.}$  – внутренний диаметр кожуха, м.

$$S_{м.т.п} = \pi \cdot \frac{(D_{вн.})^2}{4} - N \cdot \pi \cdot \frac{(d_{нар.})^2}{4} = 0.161 \text{ м}^2$$

Смоченный периметр равен, м:

$$\Pi_{смоченный} = \pi \cdot D_{вн.} + N \cdot \pi \cdot d_{нар.} = 21.363$$

Определим эквивалентный диаметр [46, с.153], м:

$$d_э = 4 \cdot \frac{S_{м.т.п}}{\Pi_{смоченный}} = 0.03$$

Найдем температуру стенки и пленки.

Температура стенки в зоне охлаждения:

$$t_{\text{ст}} = T_{\text{ср}} - 0.1 \cdot \Delta t_{\text{ст}} = 29.556 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Температура пленки:

$$T_{\text{пл}} = \frac{T_{\text{ср}} + t_{\text{ст}}}{2} = 30.528 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Вычислим скорость движения конденсата смеси:

$$\omega = \frac{G_{\text{см}}}{\rho_{\text{см}} \cdot S_{\text{м.т.п}}} = 0.072 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Критерий Рейнольдса равен:

$$Re = \frac{\omega \cdot d_3 \cdot \rho_{\text{см}}}{\mu_{\text{см}}} = 1.064 \times 10^4$$

Режим течения турбулентный  $Re > 10000$ .

Коэффициент теплоотдачи от смеси к стенке [46]:

$$\alpha_{\text{стсм}} = \frac{Nu \cdot \lambda_{\text{см}}}{d_3} \quad (57)$$

Критерий Нуссельта находим по формуле [46]:

$$Nu = 0.021 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.49} \cdot \left( \frac{Pr}{Pr_{\text{ст.}}} \right)^{0.25} \quad (58)$$

где,  $Pr$  – критерий Прандтля при средней температуре воды;

$Pr_{\text{ст}}$  – критерий Прандтля при средней температуре стенки.

Далее примем ранее найденные теплофизические величины.

Теплоемкость смеси пара, Дж/(кг·К):

$$c_{\text{см}} = 2,654 \cdot 10^3$$

Вязкость, Па·с:

$$\mu_{\text{см}} = 8,38 \cdot 10^{-6}$$

Коэффициент теплопроводности смеси, Вт/( $\text{м}^2 \cdot \text{К}$ ):

$$\lambda_{\text{см}} = 0,287$$

Найдем критерий Прандтля для смеси:

$$Pr = \frac{c_{\text{см}} \cdot \mu_{\text{см}}}{\lambda_{\text{см}}} = 0.08$$

Вычислим критерий Прандтля для стенки:

$$Pr_{ст} = \frac{c_{p,см.ст} \cdot \mu_{см}}{\lambda_{см.ст}} = 0.08$$

Отсюда найдем критерий Нуссельта:

$$Nu = 0.021 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.49} \cdot \left( \frac{Pr}{Pr_{ст}} \right)^{0.25} = 10.142$$

Вычислим коэффициент теплоотдачи зоны охлаждения:

$$\alpha_{цсм} = \frac{Nu \cdot \lambda_{см}}{d_3} = 93.522 \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$$

#### 4.1.3.3 Суммарное термическое сопротивление стенки и загрязнений

Сумма термических сопротивлений стенки найдем по формуле [46]:

$$\Sigma R = \frac{1}{r_{31}} + \frac{1}{r_{32}} + \frac{\delta}{\lambda_{ст}} \quad (59)$$

где,  $\Sigma R$  – термическое сопротивление,  $(м^2 \cdot К)/Вт$ ;  $r_{31}$  – тепловое сопротивление загрязнения со стороны пара смеси,  $Вт/(м^2 \cdot К)$ ;  $r_{32}$  – тепловое сопротивление загрязнения стенки со стороны воды,  $Вт/(м^2 \cdot К)$ ;  $\delta$  – толщина стенки трубы, м;  $\lambda_{ст}$  – коэффициент теплопроводности стенки,  $Вт/(м \cdot К)$ .

Тепловые проводимости загрязнений [46, с. 531]:

со стороны пара,  $Вт/(м^2 \cdot К)$ :

$$r_{31} = 11600$$

со стороны воды,  $Вт/(м^2 \cdot К)$ :

$$r_{32} = 2800$$

Теплопроводность стали [46, с.529],  $Вт/(м^2 \cdot К)$ :

$$\lambda_{ст} = 45,6$$

Найдем термическое сопротивление:

$$\Sigma R = \left( \frac{1}{r_{31}} + \frac{1}{r_{32}} + \frac{\delta}{\lambda_{ст}} \right) = 4.864 \times 10^{-4} \frac{м^2 \cdot К}{Вт}$$



#### 4.1.3.4 Коэффициенты теплопроводности теплообмена

Найдем действительный коэффициент теплопередачи зоны конденсации, Вт/ (м<sup>2</sup> · К):

$$K_{I\text{дейст}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{I\text{см}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{вода}}} + \Sigma R} = 834.541$$

При этом, действительная площадь теплопередачи составит, м<sup>2</sup>:

$$F_{I\text{дейст}} = \frac{Q_I}{K_{I\text{дейст}} \cdot \Delta t_{I\text{ср}}} = 30.817$$

Найдем коэффициент теплопередачи в зоне охлаждения, Вт/ (м<sup>2</sup> · К):

$$K_{II\text{дейст}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{II\text{см}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{вода}}} + \Sigma R} = 89.257$$

Площадь теплопередачи в зоне охлаждения, м<sup>2</sup>:

$$F_{II\text{дейст}} = \frac{Q_{II}}{K_{II\text{дейст}} \cdot \Delta t_{II\text{ср}}} = 19.656$$

Суммарная площадь теплообмена равна, м<sup>2</sup>:

$$F_{\text{общ}} = F_{I\text{дейст}} + F_{II\text{дейст}} = 50.473$$

Ранее выбранный ориентировочный конденсатор является подходящим (таблица 5).

Найдем запас поверхности теплообмена (не более 30%), %:

$$\Delta = \frac{F_{\text{ГОСТ}} - F_{\text{общ}}}{F_{\text{общ}}} \cdot 100 = 16$$

## 4.2 Конструктивно-механический расчет

### 4.2.1 Подбор и расчет штуцеров

Схема теплообменника с позициями штуцеров представлена на рисунке 22.

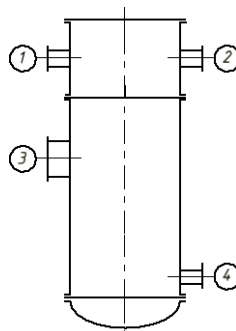


Рисунок 23 – Схема расположения штуцеров

Для определения параметров штуцеров необходимо найти объёмный расход, м<sup>3</sup>/с:

$$V = \omega \cdot S \quad (60)$$

где,  $\omega$  – скорость жидкости или пара, м/с;

$S$  – площадь поперечного сечения штуцера.

Площадь поперечного сечения определим по формуле:

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad (61)$$

где,  $d$  – внутренний диаметр штуцера, м.

Отсюда получается формула для вычисления внутреннего диаметра, м:

$$d = \sqrt{\frac{(4 \cdot V)}{\pi \cdot \omega}} \quad (62)$$

Так же объёмный расход можно найти через массовый расход потока, м<sup>3</sup>/с:

$$V = \frac{G}{\rho} \quad (63)$$

где,  $G$  – массовый расход потока, проходящего через штуцер, кг/с;

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

Получаем расчетную формулу диаметра, м:

$$d = \sqrt{\frac{(4 \cdot G)}{\pi \cdot \rho \cdot \omega}} \quad (64)$$

Скорость воды принимаем, м/с:

$$\omega_B = 1,5.$$

Скорость пара примем, м/с:

$$\omega_{\Pi} = 20.$$

По 1 и 2 штуцеру течет вода. Плотность воды при средней температуре, кг/м<sup>3</sup>:

$$\rho_B = 998.$$

Вычислим диаметр 1 и 2 штуцера:

$$d_{1.2} = \sqrt{\frac{(4 \cdot G_B)}{\pi \cdot \rho_B \cdot \omega_B}} = 0.044 \text{ м}$$

Принимаем размеры штуцера 57x4 [48], где наружный диаметр равен:

$$d_{1.2} = 57 \text{ мм}.$$

Внутренний диаметр равен:

$$d_{\text{вн}1.2} = 57 - 2 \cdot 4 = 49 \text{ мм}$$

Штуцер 3 предназначен для подачи пропан-пропиленовой смеси в конденсатор.

Найдем диаметр 3 штуцера:

$$d_3 = \sqrt{\frac{(4 \cdot G_{\text{см}})}{\pi \cdot \rho_{\text{см}} \cdot \omega_{\Pi}}} = 0.027 \text{ м}$$

Принимаем размеры штуцер 38x3,5 [48], где наружный диаметр равен:

$$d_3 = 38 \text{ мм}.$$

Внутренний диаметр третьего штуцера равен:

$$d_{\text{вн}3} = 38 - 2 \cdot 3.5 = 31 \text{ мм}.$$

Четвертый штуцер предназначен для отвода конденсата.

Плотность конденсата смеси на выходе равна [44], кг/м<sup>3</sup>:

$$\rho_{\text{см}} = 514.$$

Скорость с которой отводится конденсат примем, м/с:

$$\omega_K = 1.5$$

Определим диаметр четверного штуцера:

$$d_4 = \sqrt{\frac{(4 \cdot G_{см})}{\pi \cdot \rho_{смк} \cdot \omega_K}} = 0.028 \text{ м}$$

Принимаем размеры штуцера 38x3,5 [48], где наружный диаметр равен:

$$d_{4.} = 38 \text{ мм}$$

Внутренний диаметр штуцера равен:

$$d_{вн4} = 38 - 2 \cdot 3.5 = 31 \text{ мм}$$

Таблица 6 – Таблица штуцеров.

Наименование	Размер, мм
Штуцер для ввода/вывода воды	57x4
Штуцер для ввода смеси	38x3,5
Штуцер для отвода конденсата	38x3,5

#### 4.2.2 Выбор конструкционных материалов

В аппарате происходит теплообмен между бинарной органической смесью и водой.

Материал необходимо выбирать, учитывая свойства сред, давление в аппарате и погодные условия где будет стоять конденсатор.

Выбор материалов зависит от типа аппарата и его принадлежности, так конденсаторы могут изготавливаться следующих исполнений: М1, М3, М10, М11, М12, М19, М20. Материалы данных исполнений указаны [47, табл. 9].

Для проектируемого аппарата подходят следующие материалы [17, с. 282]: сталь 09Г2С, паронит, картон асбестовый. Сталь 09Г2С отлично подойдет для климатических условий крайнего севера.

Найдем прибавку к толщине стенки (сумма прибавок на коррозию и эрозию).

Прибавка на коррозию определяет по формуле [17, с. 272], мм:

$$c_k = \Pi \cdot \tau_a \quad (65)$$

где,  $c_k$  – прибавка на коррозию, мм;

$\Pi$  – проницаемость материала,  $\Pi = 0,1$  мм/год [17];

$\tau_a$  – срок службы аппарат,  $\tau_a = 10$  лет.

$$c_k = \Pi \cdot \tau_a = 1 \text{ мм}$$

Прибавку на эрозию принимаем, мм:

$$c_э = 1.$$

Компенсация на утонение стенки, мм:

$$c_з = 0,2.$$

Прибавка для компенсации минусового допуска [49], мм:

$$c_2 = 0,45.$$

Общая прибавка, мм:

$$c = (c_k + c_э + c_2 + c_з) = 2.65$$

### 4.2.3 Подбор продольных и поперечных перегородок

Минимальная толщина всех перегородок должна быть не менее 10 мм, при этом число поперечных перегородок в межтрубном пространстве в зависимости от длины трубок 2, расстояние между перегородками 1000 мм [47]. В таблице 7 представлены основные размеры перегородок [47,50].

Таблица 7 – Основные размеры перегородок

Поперечные перегородки					
Минимальная толщина, мм	Расстояние между перегородкой и трубной решеткой мм	Расстояние между перегородками, мм	Количество перегородок, шт.	Диаметр перегородок, мм	Ширина перегородки, мм
10	500	1000	2	697	10
Продольные перегородки					
Ширина перегородки, мм		Минимальная толщина перегородки, мм		Длина перегородки, мм	
10		8		1500	

#### 4.2.4 Расчет тепловой изоляции

Предположительно конденсатор-холодильник установят на улице под навесом.

В качестве теплоизоляции выберем совелит.

Найдем суммарный коэффициент теплоотдачи к окружающей среде лучеиспусканием и конвекцией [46], Вт/(м<sup>2</sup>·К):

$$\alpha = 9.74 + 0.07 \cdot \Delta t \quad (66)$$

где,  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи в окружающую среду, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$\Delta t$  – разность температур поверхности аппарата и окружающего воздуха.

По рекомендации [46, с. 201] температура поверхности изоляции должна быть не более 40 °С. Температура окружающего воздуха примем 40 °С

Разность температур составляет:

$$\Delta t = 40 - 20 = 20^\circ\text{C}$$

Найдем коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К):

$$\alpha = 9.74 + 0.07 \cdot \Delta t = 11.14.$$

Определим удельный тепловой поток, Вт/м<sup>2</sup>:

$$q = \alpha \cdot \Delta t = 222.8.$$

Пусть все термические сопротивления сосредоточены в изоляции, Вт/м<sup>2</sup>:

$$q = \frac{\lambda}{\delta} \cdot (T_{\text{конд}} - 20). \quad (67)$$

где,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности совелита [табл. XXXVII, 46, с. 529];

$T_{\text{конд}}$  – рабочая температура в кожухе аппарата, °С;

$\delta_{\text{и}}$  – толщина теплоизоляции, м.

Выразим отсюда толщину изоляции, м:

$$\delta_{\text{и}} = \frac{\lambda}{q} \cdot (T_{\text{конд}} - 20) = 0.011.$$

Толщину изоляции принимаем равной 12 мм.

#### 4.2.5 Гидравлический расчет конденсатора

Гидравлический расчет необходим для расчета потерь давления в трубопроводе и в трубном пространстве теплообменника с дальнейшим выбором насоса для того, чтобы охлаждаемая среда (вода) поступала в теплообменник из резервуара. Длину трубопровода, включая местные сопротивления, примем равным 15 м.

Мощность двигателя насоса для перемещения воды из резервуара в теплообменник определяется по формуле [46]:

$$N = \frac{V \cdot \Delta P_{\text{общ}}}{1000 \cdot \eta}. \quad (68)$$

где,  $N$  – мощность насоса, Вт;

$V$  – объемный расход воды, м<sup>3</sup>/с;

$\Delta P_{\text{общ}}$  – повышение давления, которое сообщается насосом перекачиваемому потоку и равно полному гидравлическому сопротивлению сети, Па;

$\eta$  – КПД насоса.

Повышение давления рассчитывается по формуле:

$$\Delta P_{\text{общ}} = \Delta P_{\text{до.тепл}} + \Delta P_{\text{тепл}} \quad (69)$$

где,  $\Delta P_{\text{до.тепл}}$  – потери давления до теплообменника, Па;

$\Delta P_{\text{тепл}}$  – потери давления в теплообменнике, Па.

#### 4.2.6 Расчет потерь давления в трубопроводе

Определим потери давления на трубопроводе [46]:

$$\Delta P_{\text{до.тепл}} = \frac{\rho_{\text{в}} \cdot \omega_{\text{в}}^2}{2} \cdot \left( 1 + \frac{\lambda \cdot L}{d_{\text{вн1.2}}} + \Sigma \zeta \right) + \rho_{\text{в}} \cdot g \cdot h_{\text{под}} + \Delta P_{\text{доп}} \quad (70)$$

где,  $\rho_{\text{в}}$  – плотность воды при средней температуре 18°C, кг/м<sup>3</sup>;

$\omega_{\text{в}}$  – скорость воды в трубопроводе, м/с;

$\lambda$  – коэффициент трения;

$L$  – длина трубопровода до теплообменника, м;

$d_{\text{вн1.2}}$  – внутренний диаметр штуцера ввода/вывода воды, м;

$\Sigma \zeta$  – сумма коэффициентов сопротивлений;

$h_{\text{под}}$  – высота подъема жидкости по трубопроводу, м;

$\Delta P_{\text{доп}}$  – дополнительные потери, Па.

Объемный расход воды найдем по формуле:

$$V_{\text{в}} = \frac{G_{\text{в}}}{\rho_{\text{в}}} = 2.323 \times 10^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

Скорость воды в трубопроводе:

$$\omega_{\text{в.}} = \frac{V_{\text{в}}}{0.785 \cdot d_{\text{вн1.2}}^2} = 1.233 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Пусть внутренний диаметр трубопровода равен диаметру штуцера для ввода и вывода воды, мм:

$$d_{\text{тр}} = d_{\text{вн1.2}} = 49.$$

Для нахождения коэффициента трения необходимо найти критерий Рейнольдса.



Вязкость воды при средней температуре [46], Па·с:

$$\mu_{\text{в}} = 1062 \cdot 10^{-6}.$$

Критерий Рейнольдса:

$$\text{Re}_{\text{..}} = \frac{\omega_{\text{в..}} \cdot d_{\text{вн1.2}} \cdot \rho_{\text{в}}}{\mu_{\text{в}}} = 5.678 \times 10^4$$

Шероховатость стальных труб [46], мм:

$$e = 0,2.$$

Определяем коэффициент трения по рисунку 1.5 [46, с.22] из отношения:

$$\frac{d_{\text{тр}}}{e} = \frac{49}{0.2} = 245.0$$

Коэффициент трения:

$$\lambda = 0,038.$$

Коэффициенты местных сопротивлений определим по [46, с. 520] (таблица 8).

Таблица 8 – Коэффициенты местных сопротивлений

Вид сопротивления	$\xi$
Вход жидкости из бака в трубопровод	0,5
Диафрагма	4
Отводы (3 шт.)	0,72
Задвижки (3 шт.)	0,5

Сумма коэффициентов местных сопротивлений:

$$\Sigma \zeta = \zeta_1 + \zeta_2 + \zeta_3 + \zeta_4 = 6.72$$

Дополнительные потери давления:

$$\Delta P_{\text{доп}} = 0.1 \cdot 9.81 \cdot 10^4 = 9.81 \times 10^3$$

Потери давления до конденсатора, Па:

$$\Delta P_{\text{до.тепл}} = \frac{\rho_{\text{в}} \cdot \omega_{\text{в}}^2}{2} \cdot \left( 1 + \frac{\lambda \cdot L}{d_{\text{вн1.2}}} + \Sigma \zeta \right) + \rho_{\text{в}} \cdot g \cdot h_{\text{под}} + \Delta P_{\text{доп}} = 1.554 \times 10^5$$

#### 4.2.7 Расчет потерь давления в трубном пространстве конденсатора

Потери давления находим по уравнению [46, с. 55]:

$$\Delta P_{\text{ТЕПЛ}} = \Delta P_{\text{СК}} + \Delta P_{\text{М.С.}} \quad (71)$$

где,  $\Delta P_{\text{СК}}$  – скоростное давление в трубах, Па;

$\Delta P_{\text{М.С.}}$  – потери давления на преодоление местных сопротивлений теплообменника, Па.

Расчет скоростного давления проведем по формуле:

$$\Delta P_{\text{СК}} = \frac{\rho_{\text{В}} \cdot \omega_{\text{В.ТР}}^2}{2} \quad (72)$$

где,  $\omega_{\text{В.ТР}}$  – скорость потока в трубках, м/с.

Выразим скорость из критерия Рейнольдса, м/с:

$$\omega_{\text{В.ТР}} = \frac{\text{Re} \cdot \mu_{\text{В}}}{d_{\text{ВН.}} \cdot \rho_{\text{В}}} = 0.043$$

Скоростные потери давления составляют, Па:

$$\Delta P_{\text{СК}} = \frac{\rho_{\text{В}} \cdot \omega_{\text{В.ТР}}^2}{2} = 0.919$$

Шероховатость стальных труб [46], мм:

$$e = 0,1.$$

Определяем коэффициент трения по рисунку 1.5 [46, с.22]:

Коэффициент трения:

$$\lambda = 0,044.$$

Потери давления на преодоление трения в трубах, Па:

$$\Delta P_{\text{ТР}} = \lambda \cdot \frac{Z \cdot L_{\text{ТР}}}{d_{\text{ВН.}}} \Delta P_{\text{СК}} = 11.55$$

где  $\Delta P_{\text{ТР}}$  – потери давления на преодоление трения, Па;

$Z$  – число ходов в трубном пространстве.

Потери давления на преодоление местных сопротивлений определим по коэффициентам местного сопротивления.

Таблица 9 – Коэффициенты местных сопротивлений

Вид сопротивления	$\xi$
Входная и входная камера	3
Вход в трубы и выход из них	8
Поворот на 180 из одной секции в другую	7,5

Потери давления на преодоление местных сопротивлений, Па:

$$\Delta P_{\text{м.с}} = \zeta_{\text{вх.вых}} \cdot \Delta P_{\text{ск}} + (8 + 7.5) \cdot \Delta P_{\text{тр}} = 181.776$$

Общее гидравлическое сопротивление трубного пространства теплообменника:

$$\Delta P_{\text{тепл}} = \Delta P_{\text{ск}} + \Delta P_{\text{м.с}} \quad (73)$$

#### 4.2.8 Подбор насоса

Общее повышение давления, Па:

$$\Delta P_{\text{общ}} = \Delta P_{\text{до.тепл.}} + \Delta P_{\text{тепл}} = 1.556 \times 10^5$$

Пусть КПД насоса:

$$\eta = 0,70.$$

Найдем мощность насоса:

$$N = \frac{V_{\text{в.}} \cdot \Delta P_{\text{общ}}}{1000 \cdot \eta} = 0.511 \text{ кВт}$$

Высота всасывания насосом:

$$H_{\text{вс}} = \frac{\Delta P_{\text{общ}}}{\rho_{\text{в}} \cdot g} = 15.909 \text{ м}$$

По расчетам принимаем насос по [46, с. 92]. Данные представлены в таблице 10.

Таблица 10 - Характеристика насоса и электродвигателя

Марка насоса	Производительность, м <sup>3</sup> с	Столб жидкости, м	n, об/с	КПД насоса	Электродвигатель		
					тип	N, кВт	$\eta$
X90/33	$2,5 \cdot 10^{-2}$	16	48,3	0,70	АО2-52-2	13	0,89

#### 4.2.9 Механический расчет конденсатора

Цель механического расчета - обеспечение механической надежности работы проектируемого конденсатора-холодильника. На рисунке 24 изображена расчетная модель кожухотрубчатого конденсатора.

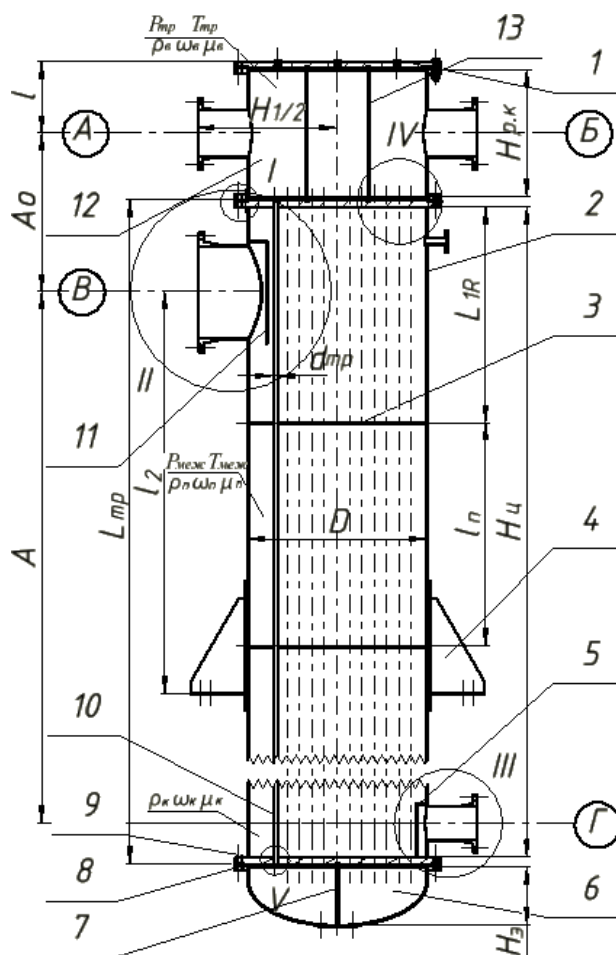


Рисунок 24 - расчетная модель кожухотрубчатого конденсатора

#### 4.2.10 Расчет толщины стенки кожуха

Целью расчета толщины цилиндрической обечайки является обеспечение механической прочности конденсатора-холодильника в рабочих условиях и в условиях испытания.

Так как трубы нагреты меньше чем корпус, то относительно труб корпус сжимается, это означает, что необходимо проверить на устойчивость кожух.

Определим расчетное давление, которое действует на обечайку,

МПа:

$$P_{Г.МЖТ} = \frac{\rho_B \cdot g \cdot H_{Ц}}{10^9} = 0.058$$

$$P_{р.МЖТ} = P_{МЕЖ} + P_{Г.МЖТ} = 2.158$$

где  $P_{р.МЖТ}$  – расчетное давление в межтрубном пространстве, МПа;

$H_{Ц}$  – высота кожуха, мм;

$P_{Г.МЖТ}$  – гидравлическое давление в кожухе, МПа.

Для определения пробного давления нужно найти допускаемые напряжения для материала обечайки. Берем напряжения при рабочей температуре равной 100°C и при температуре испытания, равно 20°C.

Расчет проводим согласно [51].

В рабочем состоянии, МПа:

$$\sigma_{20} = 196$$

$$\sigma_{45} = 189$$

где  $\sigma_{20}$  – допускаемое напряжение материала днища при рабочей температуре, МПа;

$\sigma_{45}$  – допускаемое напряжение при температуре испытания, МПа.

Поправочный коэффициент принимаем:

$$\eta = 0,9$$

Допускаемое напряжение, МПа:

$$\sigma_{д} = \max(\eta \cdot \sigma) = 176.4 \text{ МПа}$$

Расчетное значение предела текучести при 20°C для стали 09Г2С, примем согласно установленному нормативу [51], МПа:

$$Re_{20} = 280$$

Допускаемое напряжение при температуре испытания, МПа;

$$\sigma_{и} = \text{Floor}\left(\frac{Re_{20}}{1.1}, 0.5\right) = 254.5$$

Пробное давление при гидравлическом испытании, МПа:

$$P_{\text{исп}} = 1.25 \cdot P_{\text{расч}} \cdot \frac{\sigma_{\text{н}}}{\sigma_{\text{д}}} = 3.787$$

Выбираем вид шва: стыковой с двухсторонним проваром, который выполняется автоматической сваркой под слоем флюса. Длина контролируемых швов от общей длины 50% [51, табл. Д.1]. Тип шва: без скоса кромок, двусторонний. Вид сварного соединения – прямолинейное стыковое [17, табл. 10.12].

Примем коэффициент прочности сварных швов:

$$\varphi_p = 0,9.$$

Расчетная толщина стенки кожуха, м:

$$s_p = \max \left( \frac{P_{\text{расч}} \cdot D}{2 \cdot \sigma_{\text{д}} \cdot \varphi - P_{\text{расч}}}, \frac{P_{\text{исп}} \cdot D}{2 \cdot \sigma_{\text{н}} \cdot \varphi - P_{\text{исп}}} \right) = 5.002 \times 10^{-3}$$

Исполнительная толщина цилиндрической обечайки должна удовлетворять условию:

$$s \geq s_p + c \quad (74)$$

Тогда получаем толщину стенки, м:

$$s_{\text{н}} = s_p + c \cdot 10^{-3} = 7.652 \times 10^{-3}$$

Примем толщину равной, мм:

$$s_{\text{ц}} = 8.$$

Определим допускаемое давление для рабочих условий в обечайке, МПа:

$$P_{\text{д}} = \frac{2 \cdot \sigma_{\text{д}} \cdot \varphi \cdot (s_{\text{ц}} - c)}{D \cdot 10^3 + (s_{\text{ц}} - c)} = 2.806$$

Допускаемое давление для условий испытания, МПа:

$$P_{\text{н}} = \frac{2 \cdot \sigma_{\text{н}} \cdot \varphi \cdot (s_{\text{ц}} - c)}{D \cdot 10^3 + (s_{\text{ц}} - c)} \quad (75)$$

Проверим соблюдение условия:

$$P_{\text{расч}} \leq P_{\text{н}} = 1$$

$$\frac{s_{\text{ц}} - c}{D \cdot 10^3} \leq 0.1 = 1$$

Условия выполняются.

#### 4.2.11 Расчет толщины стенки эллиптического днища

Методика расчета, та же что и для обечайки.

Высота эллиптической части находим из допуска [25].

$$0.2 < \frac{h}{D} < 0.5$$

где  $h$ - высота эллиптической крышки, м.

В соответствии с рекомендациями:

$$p_w = \frac{2 \cdot \sigma_{\text{д}} \cdot \phi \cdot (s_{\text{ц}} - c)}{R + 0.5 \cdot (s_{\text{ц}} - c)} \quad (76)$$

где  $R$ , радиус кривизны в вершине днища, м  $R_{\text{д}} = D = 0.6$ .

Высота равна, м:

$$h = 0.25 \cdot D = 0.15$$

Рассчитаем исполнительную толщину стенки из условия прочности:

$$s_{\text{к}} = \max \left( \frac{p_{\text{расч}} \cdot D}{2 \cdot \sigma_{\text{д}} \cdot \phi - 0.5 p_{\text{расч}}}, \frac{p_{\text{исп}} \cdot D}{2 \cdot \sigma_{\text{н}} \cdot \phi - 0.5 p_{\text{исп}}} \right) \quad (77)$$

Толщина стенки, м:

$$s_{\text{к}} = \max \left( \frac{p_{\text{расч}} \cdot D}{2 \cdot \sigma_{\text{д}} \cdot \phi - 0.5 p_{\text{расч}}}, \frac{p_{\text{исп}} \cdot D}{2 \cdot \sigma_{\text{н}} \cdot \phi - 0.5 p_{\text{исп}}} \right) = 4.981 \times 10^{-3}$$

$$s_{\text{кк}} = s_{\text{к}} + c \cdot 10^{-3} = 7.631 \times 10^{-3}$$

Примем исполнительную толщину:

$$s_{\text{к}} = 8$$

Допускаемое давление в рабочем состоянии, МПа:

$$P_{\text{кд}} = \frac{2 \cdot \sigma_{\text{д}} \cdot \phi \cdot (s_{\text{к}} - c)}{R \cdot 10^3 + 0.5 \cdot (s_{\text{к}} - c)} = 3.866$$

В условиях испытаний, МПа:

$$P_{\text{ки}} = \frac{2 \cdot \sigma_{\text{н}} \cdot \phi \cdot (s_{\text{к}} - c)}{R \cdot 10^3 + 0.5 \cdot (s_{\text{к}} - c)} = 5.578$$

Проверим соблюдение условия прочности:

$$P_{\text{кд}} \leq P_{\text{ки}} = 1$$

Условие выполняется.

Основные размеры эллиптического днища представлены в таблице 11 [20]:

Таблица 11 – Размеры эллиптического днища.

Высота отборки, мм	25
Высота днища, мм	150
Объем днища, дм <sup>3</sup>	35,2
Масса днища, кг	28,3

#### 4.2.12 Расчет толщины распределительной камеры

Так как распределительная камера- цилиндрическая обечайка, методика расчета прежняя.

Пробное давление при гидравлическом испытании, МПа:

$$P_{\text{исп}} = 1.25 \cdot P_{\text{расч}} \cdot \frac{\sigma_{\text{н}}}{\sigma_{\text{д}}} = 0.18$$

Расчетная толщина стенки кожуха, м:

$$s_{\text{р}} = \max \left( \frac{P_{\text{расч}} \cdot D}{2 \cdot \sigma_{\text{д}} \cdot \phi - P_{\text{расч}}}, \frac{P_{\text{исп}} \cdot D}{2 \cdot \sigma_{\text{н}} \cdot \phi - P_{\text{исп}}} \right) = 2.363 \times 10^{-4}$$

Исполнительная толщина цилиндрической обечайки должна удовлетворять условию:

$$s \geq s_{\text{р}} + c$$

Тогда получаем толщину стенки, м:

$$s_{\text{ц}} = s_{\text{р}} + c \cdot 10^{-3} = 2.886 \times 10^{-3}$$

Примем толщину равной, мм:

$$s_{\text{ц}} = 8.$$



Определим допускаемое давление для рабочих условий в обечайке, МПа:

$$P_{\text{д}} = \frac{2 \cdot \sigma_{\text{д}} \cdot \phi \cdot (s_{\text{p}} - c)}{D \cdot 10^3 + (s_{\text{p}} - c)} = 2.806$$

Допускаемое давление для условий испытания, МПа:

$$P_{\text{и}} = \frac{2 \cdot \sigma_{\text{и}} \cdot \phi \cdot (s_{\text{p}} - c)}{D \cdot 10^3 + (s_{\text{p}} - c)} = 4.049$$

Проверим соблюдение условия:

$$P_{\text{расч}} \leq P_{\text{и}} = 1$$

$$\frac{s_{\text{ц}} - c}{D \cdot 10^3} \leq 0.1 = 1$$

Условия выполняются.

#### 4.2.13 Расчет на прочность и герметичность фланцевых соединений

Целью расчета фланцевого соединения является подбором типа фланца и прокладки, при которых будут выполняться условия герметизации фланцевого соединения и прочность в рабочих условиях и в условиях испытания

В таблице 12 указаны все данные необходимые для расчета.

Таблица 12 – Данные для расчета фланцевого соединения

Название	Значение
Внутренний диаметр $D$ , мм	600
Диаметр болтовой окружности $D_{\text{б}}$ , мм	680
Наружный диаметр фланца $D_{\text{н}}$ , мм	740
Диаметр середины прокладки $D_{\text{сп}}$ , мм	654
Толщина тарелки фланца $h_1$ , мм	25
Толщина края трубной решетки $h_2$ , мм	31
Толщина прокладки $h_{\text{п}}$ , мм	12
Расстояние между поверхностями фланцев $L_{\text{б0}}$ , мм	54
Диаметр болта $d$ , мм	20
Количество болтов $n$ , шт	32

Расчет фланцевого соединения будем проводить по [33].

Температура стенки распорядительной камеры равна средней температуре среды:

$$t = 18^{\circ}\text{C}$$

Расчетная температура фланцев:

$$t_{\phi} := 0.96 \cdot t = 17.28^{\circ}\text{C}$$

Температуру трубной решетки принимаем:

$$t_p = 38^{\circ}\text{C}.$$

В качестве крепежного элемента выбираем болтовое соединение, так как они применимы до давления 2,5 МПа, а также они дешевле, чем шпильки.

Расчетную температуру болта примем от максимальной температуры соединяемых элементов:

$$t_b := 0.85 \cdot t = 15.3^{\circ}\text{C}$$

Материал болтов принимаем сталь 35.

Найдем допускаемое напряжение и модуль упругости для болтов при затяжке и температуре испытания, МПа:

$$t := \begin{pmatrix} 20 \\ 40 \end{pmatrix} \quad \sigma := \begin{pmatrix} 230 \\ 230 \end{pmatrix}$$

$$\sigma_{д.б} := \text{Floor}(\text{linterp}(t, \sigma, t_b), 0.5) = 230$$

Допускаемое напряжение для болтов при затяжке в рабочих условиях и при расчете на условие испытания:

$\xi = 1,2$ - коэффициент увеличения допускаемых напряжений при затяжке;

$K_{у.р.п} = 1$ - для рабочих условий;

$K_{у.р.и} = 1,35$  - для условий испытания;

$K_{у.з} = 1$ - при обычной неконтролируемой затяжке;

$K_{у.т} = 1,25$  - при расчете фланцев с учетом нагрузки от температурных деформаций;

$$\sigma_{м.б} := \xi \cdot K_{у.р.р} \cdot K_{у.з} \cdot K_{у.т} \cdot \sigma_{д.б} = 358.8 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{р.б} := K_{у.р.н} \cdot K_{у.з} \cdot K_{у.т} \cdot \sigma_{д.б} = 403.65 \text{ МПа}$$

где  $\sigma_{м.б}$  – допускаемое напряжение болтов при затяжке, МПа;

$\sigma_{р.б}$  – допускаемое напряжение болтов в рабочих условиях и при расчете на условия испытания, МПа.

Модуль упругости болтов, МПа:

$$E_{б} = 1,974 \cdot 10^5.$$

При температуре испытания модуль упругости равен, МПа:

$$E_{20б} = 1,99 \cdot 10^5.$$

Далее определим коэффициент линейного расширения болтов, 1/К:

$$\alpha_{б} = 11,1 \cdot 10^{-6}.$$

Далее рассчитываем прокладку. Характеристики представлены в таблице 13 [33].

Таблица 13 – Характеристики паронита.

Прокладочный коэффициент $m$	2,5
Удельное давление обжатия прокладки $q_{обж}$ , МПа	20
Допускаемое удельное давление $[q]$ , МПа	130
Коэффициент обжатия $K_{обж}$	0,9
Условный модуль сжатия прокладки $E_{п}$ , МПа	$0,02 \cdot 10^5$

Эффективная ширина плоской прокладки из условия:

$$b_0 := \begin{cases} b_0 \leftarrow b_{п} & \text{if } b_{п} \leq 15 \\ b_0 \leftarrow \text{Ceil}(3.8 \cdot \sqrt{b_{п}}, 1) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$b_0 = 12 \text{ мм}$$

Усилие, необходимое для смятия прокладки при затяжке:

$$P_{обж} := 0.5 \pi \cdot D_{сп} \cdot (b_0) \cdot q_{обж} = 2.466 \times 10^5 \text{ Н}$$

Необходимое усилие для обеспечения герметичности фланцевого соединения в рабочих условиях:

$$R_{\Pi} := \begin{cases} \pi \cdot D_{\text{сп}} \cdot b_0 \cdot m \cdot P & \text{if } P \geq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$R_{\Pi} = 6.164 \times 10^3 \text{ Н}$$

Площадь поперечного сечений болтов, мм<sup>2</sup>:

$$f_6 = 201.$$

Площадь всех болтов, мм<sup>2</sup>:

$$A_6 := n \cdot f_6 = 6.432 \times 10^3.$$

Равнодействующая нагрузка на прокладку от давления определяем по формуле:

$$Q_d := \frac{\pi}{4} \cdot (D_{\text{сп}})^2 \cdot P = 3.359 \times 10^4 \text{ Н}$$

Принимаем внешнюю силу и изгибающий момент равными нулю:

$$F = 0;$$

$$M = 0.$$

Приведенная нагрузка так же равна 0:

$$Q_{FM} := \max \left( \left| F + \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{сп}}} \right|, \left| F - \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{сп}}} \right| \right) = 0 \text{ Н}$$

Найдем податливость прокладки, мм/Н:

$$y_{\Pi} := \frac{h_{\Pi} \cdot K_{\text{обж}}}{E_{\Pi} \cdot \pi \cdot D_{\text{сп}} \cdot b_{\Pi}} = 2.434 \times 10^{-7}$$

Определим эффективную длину болта, мм:

$$L_6 := L_{60} + 0.28 \cdot d = 61.6$$

Получаем значение податливости болтов, мм/Н:

$$y_6 := \frac{L_6}{E_{206} \cdot A_6} = 4.813 \times 10^{-8}$$

Длину втулки фланца найдем по уравнению, мм:

$$l_0 := \sqrt{D_1 \cdot S_0} = 71.889$$

Для расчета коэффициентов ( $\beta_T$ ,  $\beta_U$ ,  $\beta_Y$ ,  $\beta_Z$ ) необходимо найти коэффициент соотношения тарелки фланца:

$$K := \frac{D_H}{D_1} = 1.146$$

Найдем коэффициенты, зависящие от соотношения размеров тарелки фланца:

$$\beta_T := \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \log(K)) - 1}{(1.05 + 1.945 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} = 1.858$$

$$\beta_U := \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \log(K)) - 1}{1.36(K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = 15.767$$

$$\beta_Y := \frac{1}{(K - 1)} \cdot \left[ 0.69 + 5.72 \cdot \frac{K^2 \cdot \log(K)}{(K^2 - 1)} \right] = 14.49$$

$$\beta_Z := \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = 7.406$$

Коэффициенты для фланцевых соединений с приварными встык фланцами с прямой втулкой, плоскими фланцами и свободными фланцами:

$$\beta_F := 0.91$$

$$\beta_V := 0.55$$

$$f := 1$$

Коэффициент  $\lambda$ :

$$\lambda := \frac{\beta_F \cdot h + l_0}{\beta_T \cdot l_0} + \frac{\beta_V \cdot h^3}{\beta_U \cdot l_0 \cdot (S_0)^2} = 1.004$$

Определим угловую податливость фланцев.

При затяжке, мм/Н:

$$y_{\phi} := \frac{0.91 \cdot \beta_V}{E_{20} \cdot \lambda \cdot l_0 \cdot (S_0)^2} = 5.415 \times 10^{-10}$$

Угловая податливость фланца, нагруженного внешним изгибающим моментом мм/Н:

$$y_{\phi_H} := \left(\frac{\pi}{4}\right)^3 \cdot \frac{D_{\phi}}{E_{20} \cdot h^3 \cdot D_H} = 6.793 \times 10^{-11}$$

Найдем коэффициент, учитывающий изгиб тарелки фланца между шпильками (болтами):

$$C_F := \max \left[ 1, \sqrt{\frac{\pi \cdot D_{\phi}}{n \cdot \left( 2 \cdot d + \frac{6 \cdot h}{m + 0.5} \right)}} \right] = 1$$

Приведенный диаметр плоского фланца равен внутреннему:

$$D_{\text{пр}} = D = 600 \text{ мм.}$$

Найдем плечо действия усилий в болтах (шпильках) для приварных встык и плоских фланцев по формуле:

$$b := 0.5(D_{\phi} - D_{\text{сп}}) = 13 \text{ мм.}$$

Плечо усилия от действия давления на фланец для всех типов фланцев:

$$e := 0.5 \cdot (D_{\text{сп}} - D - S_0) = 23 \text{ мм.}$$

Коэффициент жесткости фланцевого соединения для приварных встык и плоских фланцев определяем:

$$\gamma := \frac{1}{y_{\text{п}} + y_{\phi} \cdot \frac{E_{20\phi}}{E_{\phi}} + 2 \cdot b^2 \cdot y_{\phi} \cdot \frac{E_{20}}{E}} = 2.106 \times 10^6$$

Определим коэффициент жесткости фланцевого соединения, нагруженного внутренним давлением или внешней осевой силой для приварных встык и плоских фланцев с плоскими прокладками:

$$\alpha := 1 - \frac{y_{\Pi} - (y_{\Phi} \cdot b + e \cdot y_{\Phi}) \cdot b}{y_{\Pi} + y_{\delta} + 2 \cdot b^2 \cdot y_{\Phi}} = 1.021$$

Коэффициент жесткости фланцевого соединения, нагруженного внешним изгибающим моментом, определим из уравнения:

$$\alpha_M := \frac{y_{\delta} + 2 \cdot y_{\Phi H} \cdot b \cdot \left( b + e - \frac{e^2}{D_{\text{сп}}} \right)}{y_{\delta} + y_{\Pi} \cdot \left( \frac{D_{\delta}}{D_{\text{сп}}} \right)^2 + 2 \cdot y_{\Phi H} \cdot b^2} = 0.33$$

Нагрузка, которая вызывается стесненностью температурных деформаций, в соединениях с приварными встык и плоскими фланцами, Н:

$$Q_t := \gamma \cdot [2\alpha_{\Phi} \cdot h \cdot (t_{\Phi} - 20) - 2\alpha_{\delta} \cdot h \cdot (t_{\delta} - 20)] = 2.852 \times 10^3$$

Расчетная нагрузка на болты (шпильки) при затяжке, необходимая для обеспечения в рабочих условиях давления на прокладку, достаточного для герметизации фланцевого соединения, Н:

$$P_{\delta 1} := \max \left[ \begin{array}{l} \alpha \cdot (Q_d + F) + R_{\Pi} + \frac{4 \cdot \alpha_M \cdot |M|}{D_{\text{сп}}} \\ \alpha \cdot (Q_d + F) + R_{\Pi} + \frac{4 \cdot \alpha_M \cdot |M|}{D_{\text{сп}}} - Q_t \end{array} \right] = 4.047 \times 10^4$$

Для обеспечения обжатия прокладки и минимального нажатия болтов, расчетная нагрузка на болты по формуле:

$$P_{\delta 2} := \max(P_{\text{обж}}, 0.4 \cdot A_{\delta} \cdot \sigma_{20\delta}) = 5.917 \times 10^5 \text{ Н}$$

При затяжке фланцевого соединения необходимо выбрать максимальное усилия из двух рассчитанных:

$$P_{\delta M} := \max(P_{\delta 1}, P_{\delta 2}) = 5.917 \times 10^5 \text{ Н}$$

Расчетная нагрузка на болты в рабочих условиях, Н:

$$P_{\bar{b}p} := P_{\bar{b}M} + (1 - \alpha) \cdot (Q_d + F) + Q_t + \frac{4 \cdot (1 - \alpha_M) \cdot |M|}{D_{сп}} = 5.939 \times 10^5$$

Проверка прочности болтов (шпилек) и прокладки.

Расчетные напряжения в болтах (шпильках):

- определяем при затяжке:

$$\sigma_{\bar{b}1} := \frac{P_{\bar{b}M}}{A_{\bar{b}}} = 92 \text{ МПа}$$

- определяем в рабочих условиях:

$$\sigma_{\bar{b}2} := \frac{P_{\bar{b}p}}{A_{\bar{b}}} = 92.333 \text{ МПа}$$

Проверка условий прочности болтов (шпилек) при затяжке и в рабочих условиях:

$$\text{пров9} := \begin{cases} \text{"Условия прочности в при затяжке НЕ выполняются"} & \text{if } \sigma_{\bar{b}1} > \sigma_{20\bar{b}} \\ \text{"Условия прочности в рабочих условиях НЕ выполняются"} & \text{if } \sigma_{\bar{b}2} > \sigma_{д.\bar{b}} \\ \text{"Условия прочности выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

пров9 = "Условия прочности выполняются"

Определим удельное давление на прокладку, МПа:

$$q := \frac{\max(P_{\bar{b}M}, P_{\bar{b}p})}{\pi \cdot D_{сп} \cdot b_{п}} = 24.088$$

Условие прочности прокладки:

$$\text{пров10} := \begin{cases} \text{"Условие прочности прокладки НЕ выполняется"} & \text{if } q > q_d \\ \text{"Условие прочности прокладки выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

пров10 = "Условие прочности прокладки выполняется"

На плоский фланец действует изгибающий момент, рассчитываемый по формуле:

$$M_M := C_F \cdot P_{\bar{b}M} \cdot b = 7.693 \times 10^6 \text{ Н}\cdot\text{мм}$$

Находим по формуле при рабочих условиях расчетный момент:



$$M_p := C_F \cdot \max[P_{\text{бпр}} \cdot b + (Q_d + Q_{FM}) \cdot e, |Q_d + Q_{FM}| \cdot e] = 8.493 \times 10^6 \text{ Н} \cdot \text{мм}$$

Расчетные напряжения во фланце при затяжке:

- меридиональное изгибное напряжение во втулке приварного встык фланца, обечайке плоского фланца:

$$\sigma_{0M} := \frac{M_M}{\lambda \cdot (S_0 - c_1)^2 \cdot D_{\text{пр}}} = 431.305 \text{ МПа}$$

- определяем радиальное напряжение:

$$\sigma_{RM} := \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + l_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot l_0 \cdot D_1} \cdot M_M = 17.814 \text{ МПа}$$

- определяем окружное напряжение:

$$\sigma_{TM} := \frac{\beta_Y \cdot M_M}{h^2 \cdot D_1} - \beta_Z \cdot \sigma_{RM} = 36.569 \text{ МПа}$$

Расчетные напряжения во фланце в рабочих условиях:

- определяем меридиональные изгибные напряжения для приварных встык фланцев с прямой втулкой и плоских фланцев:

$$\sigma_{0p} := \frac{M_p}{\lambda \cdot (S_0 - c_1)^2 \cdot D_{\text{пр}}} = 476.183 \text{ МПа}$$

- определяем максимальное меридиональные мембранные напряжения в обечайке плоского фланца:

$$\sigma_{0MP} := \max \left[ \frac{Q_d + F + \frac{4|M|}{D_{\text{сп}}}}{\pi \cdot (D_1 + S_0) \cdot (S_0 - c_1)}, \frac{Q_d + F - \frac{4|M|}{D_{\text{сп}}}}{\pi \cdot (D_1 + S_0) \cdot (S_0 - c_1)} \right] = 3.006 \text{ МПа} +$$

Найдем напряжения в тарелке приварного встык фланца или плоского фланца в рабочих условиях:

- определяем радиальное напряжение:

$$\sigma_{Rp} := \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + l_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot l_0 \cdot D_1} \cdot M_p = 19.668 \text{ МПа} +$$

- определяем окружное напряжение:

$$\sigma_{Tp} := \frac{\beta_Y \cdot M_p}{h^2 \cdot D_1} - \beta_Z \cdot \sigma_{Rp} = 40.374 \text{ МПа}$$

Проведем проверку условий статической прочности фланцев:

$$\sigma_{Pmax} := \max \left( \left( \begin{array}{c} |\sigma_{Op} - \sigma_{Omp} + \sigma_{Tp}| \\ |\sigma_{Op} - \sigma_{Omp} + \sigma_{Rp}| \\ |\sigma_{Op} + \sigma_{Omp}| \end{array} \right) \right)$$

$$\sigma_{Zmax} := \max(|\sigma_{Om} + \sigma_{Rm}|, |\sigma_{Om} + \sigma_{Tm}|) \quad (78)$$

PR\_1 := "Условия статической прочности при затяжке и в рабочих условиях выполняются"

PR\_3 := "Условия статической прочности НЕ выполняются"

КТ = 1.3 при расчете с учетом стесненности температурных деформаций. При расчете без учета стесненности температурных деформаций КТ = 1.

$$\text{пров11} := \begin{cases} \text{PR}_1 & \text{if } \sigma_{Zmax} > K_T \cdot \sigma_{20} \wedge \sigma_{Pmax} > K_T \cdot \sigma_d \\ \text{PR}_3 & \text{otherwise} \end{cases}$$

пров11 = "Условия статической прочности при затяжке и в рабочих условиях выполняются"

Проверим углы поворота фланцев.

Определяем угол поворота приварного встык фланца, плоского фланца, град:

$$\Theta := M_p \cdot y_{\phi} \cdot \frac{E_{20}}{E} = 4.599 \times 10^{-3}$$

Пусть допустимый угол поворота плоского фланца:

$$\Theta_d = 0,013 \text{ град}$$

$$\text{пров12} := \begin{cases} \text{"Условие при испытаниях НЕ выполняется"} & \text{if } \Theta > 1.3 \cdot \Theta_d \\ \text{"Условие в рабочих условиях НЕ выполняется"} & \text{if } \Theta > \Theta_d \\ \text{"Условие поворота плоского фланца выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

пров12 = "Условие поворота плоского фланца выполняется"

#### 4.2.14 Расчет толщины плоской крышки

Толщину плоской крышки аппарата, работающего под внутренним давлением, находим по [52].

Цель расчета плоской крышки определение толщины крышки, которая может выдержать возможное давление.

Отношение наружного диаметра тарелки фланца к внутреннему диаметру:

$$K_{кр} := \frac{D_H}{D_{сп}} = 1.131$$

Определим параметр плоской крышки  $X_{кр}$ :

$$X_{кр} := \frac{0.67 \cdot \left[ K_{кр}^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \log(K_{кр})) - 1 \right]}{(K_{кр} - 1) \cdot \left[ K_{кр}^2 - 1 + (1.857 \cdot K_{кр}^2 + 1) \cdot \frac{h_{кр}^3}{\delta_{кр}^3} \right]} = 0.401$$

Определим угловую податливость фланца с плоской крышкой:

$$y_{кр} := \frac{X_{кр}}{E_{20кр} \cdot \delta_{кр}^3} = 4.702 \times 10^{-11}$$

где  $y_{кр}$  – угловая податливость крышки;

$\delta_{кр}$  – толщина фланцевой части, мм.

Найдем жесткость фланцевого соединения с крышкой:

$$\chi := \frac{1}{y_{II} + y_{б} \cdot \frac{E_{20б}}{E_{б}} + b^2 \cdot \left( y_{кр} \cdot \frac{E_{20кр}}{E_{кр}} + y_{ф} \cdot \frac{E_{20}}{E} \right)} = 2.555 \times 10^6$$

Нагрузка, которую вызывает стесненностью температурных деформаций:

$$Q_t := \gamma \cdot \left[ \alpha_{ф} \cdot h \cdot (t_{ф} - 20) + \alpha_{кр} \cdot h_{кр} \cdot (t_{кр} - 20) - \alpha_{б} \cdot h \cdot (t_{б} - 20) \cdot (h + h_{кр}) \right] = 3.233 \times 10^5 \text{ Н}$$

Расчетная нагрузка на болты при затяжке, необходимая для обеспечения обжатия прокладки и минимального начального натяжения болтов шпилек, Н:

$$P_{\bar{b}2} := \max(P_{\text{обж}}, 0.4 \cdot A_{\bar{b}} \cdot \sigma_{206}) = 5.917 \times 10^5$$

Находим расчетные нагрузки на болты при затяжке и при работе соединения фланца и крышки, Н:

$$P_{\bar{b}M} := \max(P_{\bar{b}1}, P_{\bar{b}2}) = 5.917 \times 10^5 /$$

$$P_{\bar{b}p} := P_{\bar{b}M} + (1 - \alpha) \cdot (Q_d + F) + Q_t + \frac{4 \cdot (1 - \alpha_M) \cdot |M|}{D_{\text{сп}}} = 9.143 \times 10^5$$

Где  $P_{\bar{b}M}$  – расчетная нагрузка на болты при затяжке фланцевого соединения, Н;

$P_{\bar{b}p}$  – расчетная нагрузка на болты (шпильки) фланцевых соединений в рабочих условиях, Н.

Значение  $\psi$ :

$$\psi := \frac{P_{\bar{b}p}}{Q_d} = 27.218$$

Так как устанавливаемая крышка с пазами, то  $K_6$ :

$$K_6 := 0.41 \cdot \sqrt{\frac{1 + 3 \cdot \psi \cdot \left( \frac{D_3}{D_{\text{сп}}} - 1 \right) + 9.6 \cdot \frac{D_3}{D_{\text{сп}}} \cdot \frac{s_4}{D_{\text{сп}}}}{\frac{D_3}{D_{\text{сп}}}}} = 0.84$$

Определим коэффициент ослабления плоской крышки:

$$K_0 := \sqrt{\frac{1 - \left( \frac{d \cdot 3}{D_p} \right)^3}{1 - \left( \frac{d \cdot 3}{D_p} \right)}} = 1.049$$

Коэффициент  $K_7$ :

$$K_7 := 0.8 \cdot \sqrt{\frac{D_3}{D_{\text{сп}}} - 1} = 0.16$$

$$\Phi := \max\left(\frac{P_{\text{бр}}}{\sigma_{\text{д}}}, \frac{P_{\text{бм}}}{\sigma_{\text{н}}}\right) = 5.195 \times 10^3$$

Давление пробное задается следующим путем, без учета столба жидкости, так как крышка верхняя точка теплообменника:

$$P_{\text{ирк}} := 1.25 \cdot P_{\text{тр}} \cdot \frac{\sigma_{\text{н}}}{\sigma_{\text{д}}} = 0.181 \text{ Мпа}$$

Определим толщины стенок:

$$s_{\text{р1}} := \text{ceil}\left(K_0 \cdot K_6 \cdot D_{\text{р}} \cdot \sqrt{\frac{P_{\text{тр}}}{\Phi \cdot \sigma_{\text{д}}}}\right) + c = 16.56 \text{ мм}$$

$$s_{\text{р1н}} := \text{ceil}\left(K_0 \cdot K_6 \cdot D_{\text{р}} \cdot \sqrt{\frac{P_{\text{ирк}}}{\Phi \cdot \sigma_{\text{н}}}}\right) + c = 18.56 \text{ мм}$$

где  $s_{\text{р1}}$  и  $s_{\text{р1н}}$  – расчетная толщина крышки под перегородку в рабочих условиях и условиях испытания мм.

Примем толщину под перегородку, мм:

$$s_{1\text{п}} = 20$$

Толщина под прокладку, мм:

$$s_2 := \text{ceil}\left(\max\left(K_7 \cdot \sqrt{\Phi}, \frac{0.6}{D_{\text{сп}}} \cdot \Phi\right) + c\right) = 15$$

Примем толщину, мм:

$$s_2 = 25$$

Толщина стенки в зоне уплотнения, мм:

$$s_3 := \text{ceil}\left(\max\left(K_7 \cdot \sqrt{\Phi}, \frac{0.6}{D_2} \cdot \Phi\right) + c\right) = 15$$

Примем толщину, мм:

$$s_3 = 22$$

Определим рассчитываем допускаемое давление в рабочих условиях и при испытаниях:

$$p := \left( \frac{S_1 - c}{K_0 \cdot K_6 \cdot D_p} \right)^2 \cdot \phi \cdot \sigma_d = 0.267 \text{ МПа}$$

Условие прочности выполняются.

$$0.1 \leq p = 1$$

#### 4.2.15 Проверка необходимости укрепления отверстий

Проведем проверку необходимость укрепления отверстий [52]. В кожухотрубном конденсаторе имеются четыре отверстия под технологические штуцера.

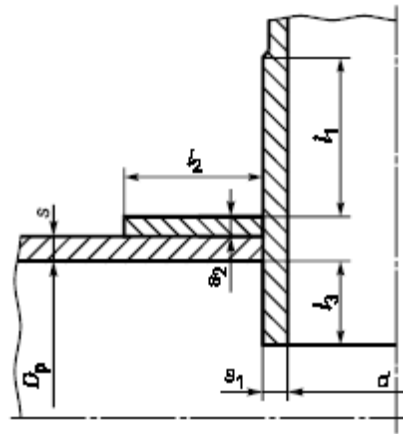


Рисунок 25- Схема укрепления штуцера

Проверим необходимость укрепления для штуцеров воды.

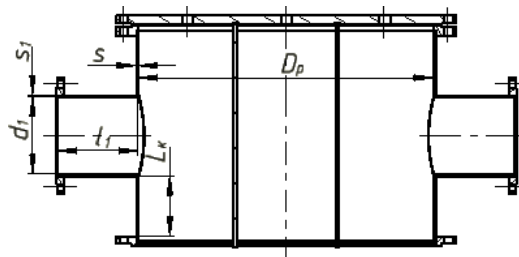


Рисунок 26 – Укрепление штуцеров для ввода/вывода воды.

Для отверстия, ось которого нормальна к оси укрепляемого элемента, расчетный диаметр определяется по формуле:

$$d_{p1.2} = d_{1.2} + 2 \cdot c = 62.3 \text{ мм}$$

Рассчитаем расчетные толщины штуцера:

$$s_{1p} = \frac{P_{н.тр} \cdot d_{p1.2}}{2 \cdot \phi \cdot \sigma_{20} - P_{н.тр}} = 0.018 \text{ мм}$$

Ширина зоны укрепления в обечайке:

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 46.807 \text{ мм}$$

Так как отсутствует избыточная толщина стенки укрепляемого элемента, получаем расчетный диаметр отверстия:

$$d_{ор} = 0.4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 18.723 \text{ мм}$$

где  $d_{ор}$  – расчетный диаметр отверстия, не требующий укрепления, мм;  $D_p$  - расчетный диаметр цилиндрической обечайки, мм.

Расстояние от штуцера к штуцеру рассчитаем, как дугу окружности, мм:

$$b_{1.2} = \frac{\pi \cdot r \cdot \alpha}{180} = 1.038 \times 10^3$$

где  $\alpha$  – угол, который находится исходя из эскиза, изображенного на рисунке 27;  $b_{1.2}$  – расстояние между штуцерами, мм.

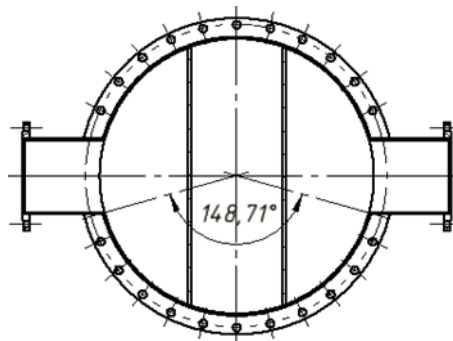


Рисунок 27-Определение взаимного влияния отверстия

Условие взаимовлияющих отверстий:

$$b_{1.2} \geq 2 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 1$$

Нет необходимости взаимовлияющих отверстий.

Наибольший диаметр отверстия не требующий укрепления определим по формуле:

$$d_{0.1.2} = 2 \cdot \left[ \left( \frac{s - c}{s_{p.к}} \right) - 0.8 \right] \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 356.161 \text{ мм}$$

Проверим выполнение требований для расчетов:

$$\text{пров2} = \begin{cases} \text{"НЕ требуется укрепление отверстий"} & \text{if } d_{0.1.2} \geq d_{1.2} \\ \text{"требуется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

пров2 = "НЕ требуется укрепление отверстий"

Далее проверим необходимость укрепления штуцера для пара.

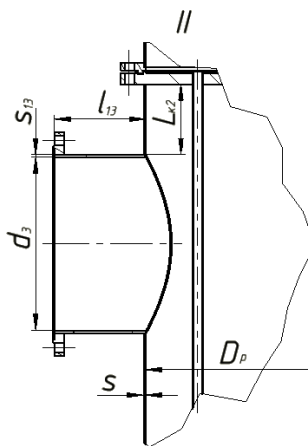


Рисунок 28 – Расчетная схема штуцера пара

Расчетный диаметр:

$$d_{p3} = d_3 + 2 \cdot c = 42.3 \text{ мм}$$

Расчетная толщина штуцера:

$$s_{3p} = \frac{P \cdot d_{p3}}{2 \cdot \phi \cdot \sigma_{20} - P} = 0.253 \text{ мм}$$

Расчетный диаметр одиночного отверстия, мм:

$$d_{0.3.4} = 2 \cdot \left[ \left( \frac{s - c}{s_{3p}} \right) - 0.8 \right] \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 2.303 \times 10^3$$



$$\text{пров3} = \left\{ \begin{array}{l} \text{"Отношение диаметров НЕ выполняется"} \text{ if } \left( \frac{d_{p3} - 2 \cdot c}{D} > 1 \right) \\ \text{"Отношение толщины к диаметру НЕ выполняется"} \text{ if } \left( \frac{s - c}{D} > 0.1 \right) \\ \text{"Условия применения формул выполняются"} \text{ otherwise} \end{array} \right.$$

пров3 = "Условия применения формул выполняются"

Так как диаметры входного для пара и выходного отверстия для конденсата одинаковы, расчет для выходного отверстия идентичен.

#### 4.2.16 Расчет веса аппарата

Рассчитаем вес пустого аппарата.

Масса кожуха, кг:

$$m_{об} = 0.785 \left( D_{нар}^2 - D_{вн.}^2 \right) \cdot H_{об} \cdot \rho_{ст} = 351.131$$

Где  $m_{об}$  – масса кожуха, кг.

Масса днища, кг:

$$m_{дн} = 28,3$$

Масса крышки, кг:

$$m_{кр} = 135$$

Найдем массу трубных решеток.

Объем решетки, м<sup>3</sup>:

$$V_p = 0.785 \cdot D_{вн.}^2 \cdot S_{т.р} - N \cdot 0.785 \cdot d_{отв.}^2 \cdot S_{т.р} = 4.836 \times 10^{-3}$$

$$m_{тр.р} = 2 \cdot V_p \cdot \rho_{ст} = 75.446 \text{ кг}$$

Масса входной камеры, кг:

$$m_{вх} = 0.785 \cdot \left( D_{нар}^2 - D_{вн.}^2 \right) \cdot L_{вх.к} \cdot \rho_{ст} = 33.728$$

Масса перегородок, кг:

$$m_{пер} = 25.5 \cdot 2 = 51$$

Масса перегородок трубного пространства, кг:

$$m_{\text{прод.пер}} = 38 \cdot 2 + 47 = 123$$

Найдем массу аппарата с учетом фланцев, штуцеров, болтов, которые составляют 20% от основной массы аппарата, кг:

$$m_{\text{ап}} = (m_{\text{об.}} + m_{\text{тр}} + m_{\text{тр.р}} + m_{\text{дн}} + m_{\text{кр}} + m_{\text{вх}} + m_{\text{пер}} + m_{\text{прод.пер}}) \cdot 1.2 = 2.567 \times 10^3$$

Вес пустого аппарата составляет:

$$G_{\text{ап}} = m_{\text{ап}} \cdot g = 2.515 \times 10^4 \text{ Н}$$

Так как аппарат подвигается гидравлическому испытанию, необходимо рассчитать вес аппарата заполненной водой.

Полная длина аппарата, м:

$$L = 0.593 + 2.934 = 3.527$$

Найдем объем эллиптического днища, м<sup>3</sup>:

$$V = 35.2 \cdot 10^{-3}$$

Объем аппарата найдем по формуле:

$$V_{\text{ап}} = \frac{\pi \cdot D_{\text{вн.}}^2}{4} \cdot L + V = 1.03 \text{ м}^3$$

Масса воды:

$$M_{\text{воды}} = V_{\text{ап}} \cdot \rho_{\text{в}} = 1.03 \times 10^3 \text{ кг}$$

Найдем общий вес аппарата с водой:

$$G_{\text{общ}} = (m_{\text{ап}} + M_{\text{воды}}) \cdot g = 3.52486 \times 10^4 \text{ Н}$$

Примем вес аппарата:

$$G = 40000 \text{ Н}$$

#### 4.2.17 Подбор и расчет опорных лап

По рекомендации [47, табл. 21], количество опор, при длине труб больше 2000 мм, должно быть не менее 4, поэтому обеспечивается равномерное распределение нагрузки.

Усилие, действующее на одну опорную лапу, с учетом что изгибающий момент равен нулю:

$$G_{\text{лапа}} = \frac{G_{\text{общ.}}}{4} = 0.01 \text{ МН}$$

По рассчитанным данным выбираем опорные лапы (таблица 14) [53].

Таблица 14 – Основные размеры опорной лапы.

мм											Масса опорной лапы, кг
c	K	b <sub>1</sub>	h		h <sub>1</sub>	l <sub>1</sub>	l <sub>F</sub>	S <sub>1</sub>	d	Катет сварного шва	
120	25	140			280	170	30	5	24	3	3.2

## 5 Автоматизация и контроль производства

Функции автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) – это совокупность действий системы, направленных на достижение целей управления.

АСУ ТП выполняет следующие основные функции:

- автоматическое регулирование технологических параметров процесса;
- автоматическая защита технологического оборудования;
- оперативное отображение состояния технологических процессов в виде мнемосхем;
- управление оборудованием по заданному алгоритму;
- ведение журнала аварий.

В процессе разделения ППФ в колоннах К-17/1,2 производится контроль таких параметров как температура, давление и перепад давления.

Регулирование температуры в колоннах осуществляется за счет изменения расхода теплоносителя в теплообменниках Т-69/1,2,3,4. Контроль перепада давления в колоннах К-17/1 и К-17/2 осуществляется параллельно работающими насосами Н-34/1-3 и Н-34а/1-3 соответственно.

Таблица 15 - Карта контроля технологических параметров.

Место измерения параметра	Контролируемый параметр	Нормы технологических показателей	Частота и способ контроля	Кто контролирует	Методы и средства контроля
К-17/1	Температура куба колонны	42–58 °С	Непрерывно по прибору с записью в журнале каждый час	Аппаратчик	Термоэлектрический преобразователь
К-17/2	Температура верха колонны	25–45 °С	Непрерывно по прибору с записью в журнале каждый час	Аппаратчик	Термоэлектрический преобразователь

Продолжение таблицы 15

Место измерения параметра	Контролируемый параметр	Нормы технологических показателей	Частота и способ контроля	Кто контролирует	Методы и средства контроля
К-17/1	Давление в колонне	1,2–1,8 МПа	Непрерывно по прибору с записью в журнале каждый час	Аппаратчик	Манометр
К-17/1	Перепад давления	Не более 90 кПа	Непрерывно по прибору с записью в журнале каждый час	Аппаратчик	Манометр дифференциальный
К-17/2	Перепад давления	Не более 150 кПа	Непрерывно по прибору с записью в журнале каждый час	Аппаратчик	Манометр дифференциальный

Первичные элементы измерительных систем размещаются на трубопроводах и аппаратах. Вторичные приборы автоматического регулирования устанавливаются в отдельном помещении – операторной – на специальных металлических щитах контроля и управления. Они имеют показывающие или самопишущие шкалы, которые дают возможность сменным операторам наблюдать за состоянием всего производства или отдельных установок, изменять технологические параметры, а также производить пуск отдельных агрегатов непосредственно из операторной.

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

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

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

#### **6.1.1 Предпроектный анализ. Анализ рынка. Основные потребители и конкуренты.**

На данный момент объем потребления полимеров в мире превысил 210 млн тонн, при этом потребление пропилена составляет порядка 27%. Так как потребность в полипропилене возрастает, необходимо увеличение производственных мощностей производства пропилена в том числе и в России. За последние 10 лет производство полипропилена, в России увеличилось в двое, показав динамичный рост по 10% в год.

Основной вклад в прирост производства внесли два новых завода: "Полиом" в г. Омске (Группа компаний "Титан", СИБУР и "Газпром нефть"),

запущенный в промышленную эксплуатацию в феврале 2013 года, а также "Запсибнефтехим" в Тюменской области (СИБУР). Мощность предприятий составляет 210 тыс. тонн и 500 тыс. тонн полипропилена соответственно [54.с.7].

Продукт: товарный пропилен. Используется при изготовлении упаковочных материалов, труб для водоснабжения, пленки, товаров бытового назначения, канцтоваров и игрушек.

Целевой рынок: тепловые сети, население города, пищевая промышленность, широкий спектр производств.

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

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить направления для ее будущего повышения. Критерии для сравнения и оценки ресурсоэффективности и ресурсосбережения, подбираются, исходя из выбранных объектов сравнения с учетом их технических и экономических особенностей разработки, создания и эксплуатации. Позиция разработки и конкурентов оценивается по каждому показателю экспертным путем по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять 1. 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);

$B_i$  – балл  $i$ -го показателя

В таблице 16 приведена оценочная карта, включающая конкурентные технические разработки в области разделения пропан-пропиленовой фракции.

Таблица 16 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических разработок

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б <sub>ф</sub>	Б <sub>к1</sub>	Б <sub>к2</sub>	К <sub>ф</sub>	К <sub>к1</sub>	К <sub>к2</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Технические критерии оценки ресурсоэффективности</b>							
1. Выход продукта	0,3	5	4	3	1,5	1,2	0,9
2. Энергоемкость процессов	0,1	4	5	4	1,2	1,5	1,2
3. Безопасность	0,3	4	3	3	1,2	0,9	0,9
<b>Экономические критерии оценки эффективности</b>							
4. Цена	0,1	5	4	3	0,5	0,4	0,3
5. Конкурентоспособность продукта	0,1	5	5	5	0,5	0,5	0,5
6. Финансирование научной разработки	0,1	4	4	4	0,4	0,4	0,4
<b>Итого</b>	<b>1</b>				<b>5,3</b>	<b>4,9</b>	<b>4,2</b>

Б<sub>ф</sub> – продукт проведенной работы;

Б<sub>к1</sub> – «Нижекамскнефтехим»;

Б<sub>к2</sub> – «Starlinger & Co. GmbH».

### 6.1.3 SWOT-анализ

Качественный подход к описанию рисков заключается в детальном и последовательном рассмотрении содержательных факторов, несущих неопределенность, и завершается формированием причин основных рисков и мер по их снижению. Одной из методик анализа сильных и слабых сторон предприятия, его внешних, благоприятных возможностей и угроз является SWOT-анализ.

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта.



SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта. В рамках данного проекта необходимо определить его сильные и слабые стороны, а также возможности и угрозы. Сильной стороной будет являться отличительное преимущество или особые ресурсы, которые могут быть эффективно использованы для достижения 46 поставленных целей. Слабость может проявляться в упущение или ограниченности научно-исследовательского проекта, которые препятствуют достижению его целей. Возможности представляют собой предпочтительную ситуацию, возникающую в условиях окружающей среды проекта, что позволяет руководству проекта улучшить свою конкурентную позицию.

Первый этап заключается в описании сильных и слабых сторон проекта, в выявлении возможностей и угроз для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде. Матрица SWOT представлена ниже (таблица 17).

Таблица 17- SWOT-анализ.

	<p><b>Сильные стороны проекта:</b>  С1. Заявленная экономичность и энергоэффективность технологии  С3. Более низкая стоимость производства по сравнению с другими технологиями.  С4. Квалифицированный руководитель.  С5. Возможность использования в качестве сырья побочных продуктов добычи (попутный нефтяной газ).</p>	<p><b>Слабые стороны проекта:</b>  Сл1. Большое количество конкурентов  Сл2. Необходимость больших капитальных затрат  Сл3. Необходимость развития широкой логистической сети по подаче сырья и транспортировки продукта</p>
--	---	--

Продолжение таблицы 17.

<p><b>Возможности:</b>  <b>В1.</b> Использование поддержки государства как производством проходящим по приоритетным направлениям развития экономики (по критерию ресурсоэффективности).  <b>В2.</b> Развитие потребительской способности рынка на производимый продукт  <b>В3.</b> Повышение стоимости конкурентных (иностраннх) разработок в виду роста отношения стоимости доллара к рублю</p>	<p>1. Развитие прочных связей с отечественными и иностранными потребителями                  2. Увеличение производственных мощностей при сохранении себестоимости продукции</p>	<p>1. Повышение квалификации кадров                  2. Необходимость привлечения значительных капитальных затрат</p>
<p><b>Угрозы:</b>  <b>У1.</b> Высокая конкуренция рынка  <b>У2.</b> Риск невозможности импорта товаров из-за введения секторальных санкций</p>	<p>1. Продвижение новой технологии с целью появления спроса                  2. Использование отечественного сырья                  3. Применение технологии к альтернативным источникам</p>	<p>1. Повышение квалификации кадров                  2. Привлечение новых заказчиков                  3. Применение технологии к альтернативным источникам</p>

Таким образом, по SWOT-анализу можно сделать вывод, что на данный момент преимущества проектируемой колонны преобладают над его недостатками.

## 6.2 Планирование научно-исследовательских работ

### 6.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Для выполнения научных исследований формируется рабочая

группа, в чей состав входят: инженер, руководитель НИР. Составим

перечень этапов и работ в рамках проведения научного исследования и проведем распределение исполнителей по видам работ (таблица 18).

Таблица 18 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

<b>Основные этапы</b>	<b>№ раб</b>	<b>Содержание работ</b>	<b>Должность исполнителя</b>
<b>Разработка технического задания</b>	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель
<b>Выбор направления исследований</b>	2	Подбор и изучение материалов по теме	Руководитель, инженер
	3	Выбор направления исследований	Руководитель, инженер
	4	Календарное планирование работ по теме	Руководитель
<b>Теоретические и экспериментальные исследования</b>	5	Проведение теоретических расчетов и обоснований	Инженер
	6	Построение макетов (моделей) и проведение экспериментов	Инженер
	7	Сопоставление результатов экспериментов с теоретическими исследованиями	Руководитель, инженер
	8	Утверждение лучшего результата	Руководитель
<b>Обобщение и оценка результатов</b>	9	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель
<b>Разработка технической документации и проектирование</b>	10	Разработка принципиальной схемы	Инженер
	11	Выбор и расчет конструкции	Инженер
	12	Оценка эффективности производства и применения проектируемого изделия	Руководитель, инженер
	13	Составление пояснительной записки (эксплуатационно-технической документации)	Руководитель, инженер

## 6.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения, ожидаемого (среднего) значения трудоемкости  $t_{ожі}$  используется формула:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{mini} + 2t_{maxi}}{5}$$

где  $t_{ожі}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения  $i$ -ой работы чел.-дн.;

$t_{mini}$  – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;

$t_{maxi}$  – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях  $T_p$ , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i},$$

где  $T_{pi}$  – продолжительность одной работы, раб. дн.;

$t_{ожі}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.

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

Для построения графика Ганта, следует, длительность каждой из выполняемых работ из рабочих дней перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой, для каждого исполнителя расчеты производятся индивидуально:

$$T_{ki.рук} = T_{pi} \cdot k_{кал},$$

$$T_{ki.инж} = T_{pi} \cdot k_{кал},$$

где  $k_{кал}$  – календарный коэффициент.

Календарный коэффициент определяется по формуле:

$$k_{кал.рук} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}},$$

где  $T_{кал}$  – общее количество календарных дней в году;  $T_{кал}$  – общее количество выходных дней в году;  $T_{пр}$  – общее количество праздничных дней в году.

Результаты расчетов представлены в таблице 19.

Таблица 19 – Временные показатели проектирования

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		$t_{ож}$ , чел-дни					
	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер
Составление и утверждение технического задания	3	-	4	-	3,4	-	1,7	-	3	-
Подбор и изучение материалов по теме	3	4	6	7	4,2	5,2	4,2	2,6	6	4
Выбор направления исследований	1	3	2	5	1,4	3,8	0,7	1,9	1	3
Календарное планирование работ по теме	2	-	4	-	2,8	-	2,8	-	4	-
Проведение теоретических расчетов и обоснований	-	10	-	15	-	12	-	12	-	18

Продолжение таблицы 19.

Название работы	Трудоёмкость работ						Длительность работ в рабочих днях $T_{pi}$		Длительность работ в календарных днях $T_{ki}$ $t_{min}$ , чел-дни	
	$t_{min}$ , чел-дни		$t_{max}$ , чел-дни		$t_{ожі}$ , чел-дни					
	Руководитель	Инженер	Руководитель		Руководитель	Инженер	Руководитель		Руководитель	Инженер
Построение макетов (моделей) и проведение экспериментов	-	2	-	6	-	3,6	-	3,6	-	5
Сопоставление результатов экспериментов с теоретическими исследованиями	2	2	4	4	2,8	2,8	2,8	1,4	4	2
Утверждение лучшего результата	2	-	4	-	2,8	-	1,4	-	2	-
Оценка эффективности полученных результатов	4	-	6	-	4,8	-	4,8	-	7	-
Разработка принципиальной схемы	-	2	-	5	-	3,2	-	3,2	-	5
Выбор и расчет конструкции	-	7	-	9	-	7,8	-	7,8	-	12
Оценка эффективности производства и применения проектируемого изделия	2	4	4	5	2,8	4,4	1,4	2,2	2	3
Составление пояснительной записки (эксплуатационно-технической документации)	-	8	-	10	-	8,8	-	4,4	-	7

После расчета и сведения в таблицу 19 временных показателей проектирования, на основе полученной таблицы строится диаграмма Ганта.

Диаграмма Ганта является наиболее удобным и наглядным способом представления графика проведения работ.

Диаграмма Ганта представляет собой отрезки, размещенные на горизонтальной шкале времени. Каждый отрезок соответствует отдельной задаче или подзадаче. Начало, конец и длина отрезка на шкале времени соответствуют началу, концу и длительности задачи.



Рисунок 29-Диаграмма Ганта

### 6.3 Бюджет научно технического исследования (НТИ)

В процессе формирования бюджета НТИ используется следующая группировка затрат по статьям:

- материальные затраты НТИ;
- затраты на основное оборудование;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- накладные расходы.

#### 6.3.1 Расчет материальных затрат НТИ

Для выполнения данной ВКР требуются материальные затраты на:

- приобретаемые со стороны сырье и материалы, необходимые для создания научно-технической продукции;

- покупные материалы, используемые в процессе создания научно-технической продукции для обеспечения нормального технологического процесса и для упаковки продукции или расходуемых на другие производственные и хозяйственные нужды;

- покупные комплектующие изделия и полуфабрикаты, подвергающиеся в дальнейшем монтажу или дополнительной обработке;

- сырье и материалы, покупные комплектующие изделия и полуфабрикаты, используемые в качестве объектов исследований (испытаний) и для эксплуатации, технического обслуживания и ремонта изделий – объектов испытаний (исследований).

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_m = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{расxi}$$

где  $m$  – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования;

$N_{расxi}$  – количество материальных ресурсов  $i$ -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, м<sup>2</sup> и т.д.);

$C_i$  – цена приобретения единицы  $i$ -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./м<sup>2</sup> и т.д.);

$k_T$  – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

Таблица 20 - Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество			Цена за ед., руб.			Затраты на материалы, (Z <sub>м</sub> ), руб.		
		Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп.1	Исп.2	Исп.3
Попутный нефтяной газ	Тыс. м <sup>3</sup>	8000	8000	8000	4	4	4	32000	32000	32000
Бензин	т	8000	8506	8350	150	150	150	1200000	1140000	1184100
Итого								<b>1232000</b>	<b>1172000</b>	<b>1216100</b>



### 6.3.2 Расчет затрат на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ

В данную статью включают все затраты, связанные с приобретением специального оборудования (приборов, контрольно-измерительной аппаратуры, стенов, устройств и механизмов), необходимого для проведения работ по конкретной теме. Определение стоимости спецоборудования производится по действующим прейскурантам, а в ряде случаев по договорной цене.

При приобретении спецоборудования необходимо учесть затраты по его доставке и монтажу в размере 15% от его цены. Стоимость оборудования, используемого при выполнении конкретного НИИ и имеющегося в данной научно-технической организации, учитывается в бюджете в виде амортизационных отчислений

Таблица 21 - Расчет бюджета затрат на приобретение спецоборудования для научных работ

№ п/п	Наименование оборудования			Кол-во единиц оборудования			Цена единицы оборудования, тыс. руб.			Общая стоимость оборудования, тыс. руб.		
	Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3
1.	Датчик температуры			4			5000			20 000		
2.	Датчик давления			4			5500			22 000		
<b>Итого:</b>										42 000		

Расчёт амортизации производится на находящееся в использовании оборудование. В итоговую стоимость проекта входят отчисления на амортизацию за время использования оборудования. Расчет амортизации проводится следующим образом:

Норма амортизации:

$$H_A = \frac{1}{n},$$

Таблица 22 – Затраты на оборудование

№	Наименование оборудования	Кол-во, шт.	Срок полезного использования, лет	Цены единицы оборудования, тыс. руб.	Общая стоимость оборудования, тыс. руб.
1	Колонна ректификационная К-17/1, К-17/2	2	15	2 500	5 000

Продолжение таблицы 22.

№	Наименование оборудования	Кол-во, шт.	Срок полезного использования, лет	Цены единицы оборудования, тыс. руб.	Общая стоимость оборудования, тыс. руб.
2	Теплообменник Т-69	4	10	350	1 400
<b>Итого:</b>	<b>6400.</b>				

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

Амортизация:

$$A = \frac{H_a I}{12} \cdot m,$$

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

Колонна:

$$H_a = \frac{1}{n} = \frac{1}{15} = 0.07$$

$$A = \frac{H_a \cdot I}{12} \cdot m = \frac{0.07 \cdot 5000000}{12} \cdot 3 = 83333,3 \text{ руб.}$$

Теплообменник:

$$H_a = \frac{1}{n} = \frac{1}{10} = 0.1$$

$$A = \frac{H_a \cdot I}{12} \cdot m = \frac{0.1 \cdot 1400000}{12} \cdot 3 = 35000 \text{ руб.}$$

Суммарные затраты амортизационных отчислений:

$$A = 118333.3 \text{ руб}$$

### 6.3.3 Основная и дополнительная заработная плата исполнителей темы

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НИИ, (включая премии и доплаты) и дополнительную заработную плату. Также включается премия,

выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20 –30 % от тарифа или оклада:

$$Z_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп} ,$$

где  $Z_{осн}$  – основная заработная плата;

$Z_{доп}$  – дополнительная заработная плата (12-20 % от  $Z_{осн}$ ).

Основная заработная плата ( $Z_{осн}$ ) руководителя (лаборанта, инженера) от предприятия (при наличии руководителя от предприятия) рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_p ,$$

где  $Z_{осн}$  – основная заработная плата одного работника;

$T_p$  – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.;

$Z_{дн}$  – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d} ,$$

где  $Z_m$  – месячный должностной оклад работника, руб.;

$M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

при отпуске в 24 раб. дня  $M = 11,2$  месяца, 5-дневная неделя;

при отпуске в 48 раб. дней  $M = 10,4$  месяца, 6-дневная неделя;

$F_d$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн.

Таблица 23- Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней		
- выходные дни	54	54
- праздничные дни	14	14
Потери рабочего времени		
- отпуск	56	28
- невыходы по болезни	0	0
Действительный годовой фонд рабочего времени	255	283

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_m = Z_{tc} \cdot (1 + k_{пр} + k_d) \cdot k_p,$$

где  $Z_{tc}$  – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$k_{пр}$  – премиальный коэффициент, равный 0,3 (т.е. 30% от  $Z_{tc}$ );

$k_d$  – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2 – 0,5 (в НИИ и на промышленных предприятиях – за расширение сфер обслуживания, за профессиональное мастерство, за вредные условия: 15-20 % от  $Z_{tc}$ );

$k_p$  – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Таблица 24- Расчёт основной заработной платы

Исполнители	$Z_{tc}$ , руб.	$k_{пр}$	$k_d$	$k_p$	$Z_m$ , руб.	$Z_{дн}$ , руб.	$T_p$ , раб. дн.	$Z_{осн}$ , руб.
Руководитель	25300,0	0,3	0,35	1,3	54268,5	1034	20	20680,8
Инженер	17400,0	0,3	0,35	1,3	37323	779,6	39	30403,2
<b>Итого <math>Z_{осн}</math></b>								<b>51084</b>

Дополнительная заработная плата составляет 12-15% от основной заработной платы.

#### **6.3.4 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)**

В данной статье расходов отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

$$Z_{внеб} = k_{внеб} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп}),$$

где  $k_{внеб}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

Общая ставка взносов составляет в 2020 году – 30% (ст. 425, 426 НК РФ):

22 % – на пенсионное страхование;

5,1 % – на медицинское страхование;

2,9 % – на социальное страхование. При этом сумма взносов к уплате зависит от того, превысил доход установленный лимит или нет.

Ставка 30% будет действовать по 2020 год включительно (ст. 425, 426 НК РФ).

Таблица 25- Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, руб.	Дополнительная заработная плата, руб.
Руководитель проекта	20680,8	2689
Инженер	30403,2	3952
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	0,3	
<b>Итого</b>		<b>75042</b>

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}}$$

где  $k_{\text{доп}}$  – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,12 – 0,15).

### 6.3.5 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование графических материалов, оплата услуг связи, электроэнергии, транспортные расходы и т.д. Их величина определяется по следующей формуле:

$$Z_{\text{накл}} = (\text{сумма статей } 1 \div 7) \cdot k_{\text{нр}},$$

где  $k_{\text{нр}}$  – коэффициент, учитывающий накладные расходы.

Величину коэффициента накладных расходов можно взять в размере 16%.

Таким образом, накладные расходы на данные НТИ составляют 1740069,6руб.

Таблица 26 – Группировка затрат по статьям

Сырье, материалы	Специальное оборудование	Основная заработная плата	Дополнительная заработная плата	Отчисления на социальные нужды	Итого без накладных расходов	Накладные расходы	Итого бюджетная стоимость
1232000	118333,3	51084	6641	17317	1425375,3	228060	1653435,35

#### 6.4 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект приведен в таблице 27.

Таблица 27- Расчет бюджета затрат НТИ

Наименование статьи	Сумма, руб.			Примечание
	Исп.1	Исп.2	Исп.3	
1. Материальные затраты НТИ	1232000	1172000	1216100	Пункт 1.4.1
2. Затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	118333,3	44000	44000	Пункт 1.4.2
3. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	51084	51084	51084	Пункт 1.4.3
4. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	6641	6641	6641	Пункт 1.4.4
5. Отчисления во внебюджетные фонды	17317,5	17317,5	17317,5	Пункт 1.4.5
6. Накладные расходы	228060	290011,6	290011,6	16 % от суммы ст. 1-7
7. Бюджет затрат НТИ	1653435,35	1581054,1	1625154	Сумма ст. 1- 8

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

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}}, \quad (15)$$

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

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

$\Phi_{\text{max}}$  – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

Исполнение 1:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп1}} = \frac{1653435.1}{1653435.1} = 1$$

Исполнение 2:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп2}} = \frac{1581054,1}{1641054,1} = 0.96$$

Исполнение 3:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп3}} = \frac{1625154}{1641054,1} = 0.99$$

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение бюджета затрат разработки в размах (значение больше единицы), либо соответствующее численное удешевление стоимости разработки в размах (значение меньше единицы, но больше нуля).

Таблица 28-Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Объект исследования Критерии	Весовой коэффициент параметра	Исп.1	Исп.2	Исп.3
1. Выход продукта	0,3	5	4	3
2. Энергоемкость	0,1	4	5	4
3. Безопасность	0,3	4	3	3
4. Цена	0,1	5	4	3
5. Конкурентоспособность продукта	0,1	5	5	5
6. Финансирование научной разработки	0,1	4	4	4
ИТОГО	1	4,5	4,2	3,7

$$I_{p-исп1} = 5*0,3 + 4*0,1 + 4*0,3 + 5*0,1 + 5*0,1 + 4*0,1 = 4,5;$$

$$I_{p-исп2} = 4*0,3 + 5*0,1 + 3*0,3 + 4*0,1 + 5*0,1 + 4*0,1 = 3,9;$$

$$I_{p-исп3} = 3*0,3 + 4*0,1 + 3*0,3 + 3*0,1 + 5*0,1 + 4*0,1 = 3,4.$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки ( $I_{исп.i}$ ) определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{исп.1} = \frac{I_{p-исп1}}{I_{финр}}$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных. Сравнительная эффективность проекта ( $\mathcal{E}_{cp}$ ):

$$\mathcal{E}_{cp} = \frac{I_{исп.1}}{I_{исп.2}}$$

Из сравнительного анализ интегральных показателей эффективности, можно сделать вывод о том, что предпочтительней по техническим задачам с позиции финансовой и ресурсной эффективности, является первое



исполнение для разделения пропан пропиленовой фракции, но и третий вариант не уступает в эффективности.

Таблица 29- Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Исп.1	Исп.2	Исп.3
1	Интегральный финансовый показатель разработки	1	0,96	0,99
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,5	4,2	3,7
3	Интегральный показатель эффективности	4,5	4,05	3,4
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	0,9	0,76	0,85

В результате выполнения можно сделать следующие выводы:

1. Результатом проведенного анализа конкурентных технических решений является выбор одного из вариантов реализации устройства, как наиболее предпочтительного и рационального, по сравнению с остальными;

2. При проведении планирования был разработан план-график выполнения этапов работ для руководителя и инженера, позволяющий оценить и спланировать рабочее время исполнителей. Были определены: общее количество календарных дней для выполнения работы – 53 дня, общее количество календарных дней, в течение которых работал инженер – 39 и общее количество календарных дней, в течение которых работал руководитель - 20;

Составлен бюджет проектирования, позволяющий оценить затраты на реализацию проекта, которые составляют 1653435,35 руб;

3. По факту оценки эффективности ИР, можно сделать выводы:

- Значение интегрального финансового показателя ИР составляет 1, что является показателем того, что ИР является финансово не выгодной, по сравнению с аналогами;

- Значение интегрального показателя ресурсоэффективности ИР составляет 4,5, по сравнению с 4,2 и 3,7;
- Значение интегрального показателя эффективности ИР составляет 4,5, по сравнению с 4,05 и 3,4, и является наиболее высоким, что означает, что техническое решение, рассматриваемое в ИР, является наиболее эффективным вариантом исполнения.

## **7 Социальная ответственность**

В научно-исследовательской работе рассчитана ректификационная колонна для получения товарного пропилена из пропан-пропиленовой фракции. Потенциальными пользователями данного решения являются нефтеперерабатывающие заводы.

Проект рассчитан на установку оборудования на площадках с резко континентальным климатом, преимущественно в средней и северо-восточной Сибири.

В ходе производственных процессов возможно возникновение вредных и опасных факторов, таких как: утечка вредных и опасных веществ, поражение электрическим током, наличие вредных шумов, получение термических ожогов, падение с высоты и возможность возникновения пожаров и взрывов.

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

#### **7.1.1 Специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства**

В соответствии с Федеральным законом "О промышленной безопасности опасных производственных объектов" от 21.07.97 г. № 116-ФЗ разрабатываемая ректификационная колонна относится к категории опасных производственных объектов по следующим пунктам:

- получение, переработка легковоспламеняющихся и горючих жидкостей;
- использование оборудования, работающего под давлением более 0,07 МПа, применение температуры среды до 360 °С [59, с. 22-23].

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 гос. 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 «, [60, с. 15-17].

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.

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. Средства защиты перед началом работы должны быть проверены.

### **7.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.**

Согласно ст. 212, посвященной обязанностям работодателя по обеспечению безопасных условий и охраны труда, работодатель обязан обеспечить: соответствующие требованиям охраны труда условия труда на каждом рабочем месте в соответствии с действующими нормативно-правовыми нормами: Федеральный закон № 426-ФЗ от 28 декабря 2013 года "О специальной оценке условий труда"; Федеральный закон №184-ФЗ "О техническом регулировании от 27 декабря 2002 года; Федеральный закон № 123-ФЗ от 22.07.2008 г (ред от 10.07 2012г) "Технический регламент о требованиях к пожарной безопасности" [61, с. 15-17].

Так как оборудование находится под давлением (2,1 МПа) и температура в аппарате достигает 70<sup>0</sup>С на рабочей площадке должны находиться автоматизированные средства противопожарной защиты, а также автоматические датчики, которые при достижении критических значений давления или температуры подает сигнал на пульт оператору. Кроме того, на площадке необходимо наличие стационарного огнетушителя на месте.

Нахождение персонала либо гостей производства без индивидуальных средств защиты строго запрещено.

## **7.2 Промышленная безопасность**

### **7.2.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть при производстве объекта на предприятии.**

В целях обеспечения производственной безопасности необходимо выявить и устранить (или предусмотреть специальные методы защиты) опасные и вредные производственные факторы. Проектируемая ректификационная колонна разделения пропан-пропиленовой фракции расположена на томской площадке ПАО "СИБУР Холдинг".

К опасным производственным факторам производства мономеров томской площадки ПАО "СИБУР Холдинг" относятся:

1. отравление парами углеводородов и иных токсичных веществ;
2. поражение электрическим током;
3. наличие оборудования и трубопроводов, работающих под давлением;
4. опасность получения термических ожогов;
5. возможность падения с высоты;
6. опасность возникновения взрыва и пожара.

К вредным производственным факторам производства мономеров томской площадки ПАО "СИБУР Холдинг" относятся:

1. недостаточная освещенность;
2. воздействие вибрации и различных шумов на производстве;

3. повышенная температура воздуха рабочей зоны, изменение микроклимата рабочей зоны;

4. воздействие паров углеводородов, продуктов сгорания углеводородов, обладающих раздражающими, сенсibiliзирующими и мутагенными свойствами.

5. воздействие компьютера;

В соответствии с рекомендацией [62, с.12] на предприятии должны быть соблюдены санитарно-гигиенические нормы по метеоусловиям. Особое внимание следует уделить освещению, отоплению и вентиляции цеха.

### **7.2.3 Обоснование мероприятий по защите персонала предприятия от действия опасных и вредных факторов**

#### **Освещенность**

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. Рациональное освещение рабочих мест 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. При недостаточном освещении глаза сильно напрягаются, темп работы снижается, снижается производительность труда. 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 СНиП 23-05-95\* [63, с. 15].

В соответствии с таблицей 1 и таблицей 2 СНиП 23-05-95 выбраны следующие разряды зрительных работ:

1. технологические помещения: IV-Г;
2. служебные помещения: Б-2;
3. физико-химическая лаборатория: А-2;
4. вентиляционные камеры: VIII-В;
5. проходы, тамбуры, лестничные клетки: Ж-1, З-1, В-2;
6. насосные: IV-Г.

В соответствии с разрядами зрительных работ по таблицам Е1 и Ж1 СНиП 23-05-95\* приняты нормативные освещенности от 10 до 300 лк. В соответствии с рекомендацией СНиП 23-05-95\* предусматриваем наружное освещение между зданиями на производственной площадке [5, с. 7-19], при необходимости предусматриваем оснащение персонала средствами освещения (фонариками).

Так как действующая проектируемая колонна установлена в Томске, то и расчет освещения проведем для этого города. Томск относится к 1 группе административного района. Характеристика зрительной работы средней точности, поэтому разряд зрительной работы принимаем 26, а освещение должно удовлетворять следующим требованиям: обеспечивать равномерность освещения, не вызывать слепящего действия, не образовывать резких теней, быть экономичным. В качестве искусственного освещения выбираем люминесцентные открытые двухламповые светильники типа ОДО-2-40, удовлетворяющим требованиям взрывопожаробезопасности, а также для работы в пыльных помещениях. В качестве естественного освещения выбираем боковую систему освещения от оконных проемов, коэффициент естественного освещения  $e=1,2$ .

В лаборатории искусственное освещение обеспечивается четырьмя люминесцентными лампами и освещенность  $E = 400$  люкс.

Расчет освещенности

Геометрические размеры следующие:

Ширина  $A = 10$  м;

Длина  $B = 15$  м;

Высота  $H = 20$  м.

Минимальное освещение:  $E_T = 400$  лк.

Коэффициент запаса для помещения с малым выделением пыли при люминесцентных лампах:  $k = 1,5$ .

Расчетная освещенность:  $E_p = E_T * k = 400 * 1,5 = 600$  лк.

Свес светильников с потолка:  $h_c = 0,2$  м.

Высота рабочей поверхности над полом:  $h_p = 14$  м.

Высота подвеса светильников над рабочим местом:  $h = H - h_c - h_p = 20 - 0,2 - 14 = 5,8$  м.

Площадь помещения:  $S = A * B = 10 * 15 = 150$  м

Удельная мощность:  $w = 15$  Вт/м<sup>2</sup>.

Суммарная установленная мощность:  $P = S * w = 150 * 15 = 2250$  Вт.

Мощность одного светильника:  $P_i = 80$  Вт.

Количество светильников:  $n = P / P_j = 2250 / 80 = 28$  шт.

Для равномерного общего освещения светильники располагаются в коридорном порядке. Размеры светильника типа ОД-2-40:

Ширина 266 мм;

Длина 1230 мм;

Высота 156 мм.

Величина светового потока лампы:

$$F = (E * k * S * z) / (n * p),$$

где  $E = 400$  лк - минимальная освещенность,

$k = 1,5$  - коэффициент запаса для люминесцентных ламп,

$S = 10 * 15 = 150$  м<sup>2</sup> - площадь помещения

$z = 0,9$  - коэффициент неравномерности освещения

$i = S / (h(A+B)) = 150 / (20(10+15)) = 0,3$  - индекс помещения,

$r_p = 70\%$  - коэффициент отражения потолка

$r_c = 50\%$  - коэффициент отражения стен



$\rho = 0,3$  - коэффициент использования светового потока.

$$F = (400 * 1,5 * 150 * 0,9) / (28 * 0,3) = 9642 \text{ лм}$$

$$F_{\text{ТАБЛ}} = 2480 \text{ лм} \quad ((F - F_{\text{ТАБЛ}}) / F) * 100\% = ((9642 - 2480) / 9642) * 100\% = 74,2\%$$

## Шум и вибрация

В цехе и других производственных помещениях источниками шума являются вентиляторы и электродвигатели рабочих механизмов, уровень шума которых при установке в соответствие с техническими требованиями не должен превышать допустимых норм. Шум и вибрация являются результатом колебания тел, передаваемого непосредственно или на расстояние другим объектам. Шум и вибрация различаются частотой колебаний в секунду. 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 [64, с. 143-144]. Допустимый уровень шума 80 Дб.

В целях снижения уровня шума в производственных помещениях до допустимых значений в соответствии с СНиП 23-03-2003 [65, с.10-30]: предусмотрено:

1. установка вент агрегатов в отдельных выгороженных помещениях - венткамерах, расположенных в удаленных от рабочих мест частях здания;

2. подбор диаметров воздуховодов по средним скоростям в магистральных воздуховодах для уменьшения сопротивления сети (4 - 8 м/с);

3. плавное соединение воздуховодов с вентиляционным агрегатом при помощи переходов и гибких вставок;

4. виброизоляция вентагрегатов с помощью пружинных амортизаторов, идущих в комплекте к вентиляционным агрегатам;

5. монтаж насосов и химического оборудования беспрокладочным методом с применением установочных винтов, удаляемых после подливки;

6. подвод питания к электродвигателям по гибким кабелепроводам.

Установка машин и механизмов на отдельно стоящих фундаментах и виброизолирующих опорах, а также применение гибких вставок в узлах воздуховодов позволяет обеспечивать уровень вибрации в допустимых пределах.

#### Изменение микроклимата рабочей зоны

Микроклимат - климатические условия, созданные в ограниченном пространстве искусственно или обусловленные природными особенностями. Микроклимат закрытых помещений создается искусственно для того, чтобы обеспечить наиболее благоприятные условия для людей и предохранить их от неблагоприятных климатических воздействий. Микроклимат в рабочей зоне определяется действующими на организм человека сочетаниями температуры, влажности и скорости движения воздуха, а также температурой окружающих поверхностей. Повышенная влажность затрудняет теплоотдачу организма путем испарений при высокой температуре воздуха и способствует перегреву, а при низкой температуре, наоборот, усиливает теплоотдачу, способствуя переохлаждению. Оптимальны такие параметры микроклимата, которые при длительном и систематическом воздействии на человека обеспечивают сохранение нормального функционального и теплового состояния организма без

напряжения реакций терморегуляции, что создает ощущение теплового комфорта и служит предпосылкой для высокой работоспособности.

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 [64, с. 123-126].

Для нормализации условий труда проводится ряд мероприятий: отопление и вентиляция производственных помещений, механизация производственного процесса, теплоизоляция нагретых поверхностей, защита рабочих от источников излучения и т. д. В целях исключения вредного влияния микроклиматических факторов на организм человека и создания нормальных условий труда в рабочей зоне параметры воздушной среды должны соответствовать СанПин 2.2.4.548-96 [66, с.1-12].

Температура, влажность и скорость движения воздуха нормированы с учетом сезона года, категории выполняемых физических работ. В процессе обслуживания ректификационной колонны персонал работает стоя, большинство операций связано с ходьбой, перемещением и переноской тяжестей до 10 кг и сопровождается умеренным физическим напряжением, поэтому работа относится к средней тяжести, категории 2б в соответствии с СанПин 2.2.4.548- 96. Данные сведены в таблице 29.

Таблица 30 - Допустимые нормы микроклимата в рабочей зоне производственных помещений.

Сезон года	Категория тяжести выполняемых работ	Температура воздуха, °С		Относительная влажность, %		Скорость движения воздуха, м/сек	
		Факт ич. знач	Допуст им. знач.	Факт ич. знач	Допуст им. знач.	Факт ич. знач	Допуст им. знач.
Холодный	26	20	19,1-22,0	53	12-75	0,1	0,2-0,4
Теплый		22	21,1-27	55	15-75	0,2	0,2-0,5

В исследуемом помещении существуют система действующей вентиляции и водяного отопления, которые позволяют поддерживать необходимую температуру, соответствующую СанПин 2.2.4.548-96 [66, с.1-12].

#### Воздействие вредных и опасных веществ

Выполнение различных видов производственных работ может сопровождаться выделением в воздушную среду вредных веществ. Вредное вещество - это вещество, которое в случае нарушения требований безопасности может вызвать производственные травмы, профессиональные заболевания или отклонения в состоянии здоровья, обнаруживаемые как в процессе работы, так и в последующей жизни. При проведении различных технологических процессов в воздух выделяются твердые и жидкие частицы, а также пары и газы. Пары и газы образуют с воздухом смеси, а твердые и жидкие частицы – аэродисперсные системы - аэрозоли. Существуют различные классификации вредных веществ, в основу которых положено их действие на человеческий организм. В соответствии с наиболее распространенной (по Е.Я. Юдину и С.В. Белову) классификацией, вредные вещества делятся на шесть групп: общетоксические, раздражающие, sensibilizing, канцерогенные, мутагенные, влияющие на

репродуктивную (детородную) функцию человеческого организма [67, с. 123-126].

В таблице 31 представлены вредные вещества, возможно встречающиеся в воздухе рабочей зоны.

Таблица 31- Вредные вещества

Название вещества	Химическая формула	ПДК, мг/м <sup>3</sup>	Класс опасности	Агрегатное состояние
Метан	СН <sub>4</sub>	300	4	газ
Этан	С <sub>2</sub> Н <sub>6</sub>		4	
Бутан	С <sub>4</sub> Н <sub>10</sub>		4	
Пропан	С <sub>3</sub> Н <sub>8</sub>		2	
Пропилен	С <sub>3</sub> Н <sub>6</sub>	100	4	

В целях обеспечения нормального функционирования производственной площадки необходимо предусмотреть ряд мер по контролю содержания опасных и вредных веществ в рабочей зоне в допустимых пределах ПДК, в соответствии с рекомендацией [6, с.133-134], заключается в снижении производственных выбросов; совершенствовании производственных фильтров; защита расстоянием (расположение факелов на большом удалении от производственной площадки, на большой высоте); использование индивидуальных средств защиты: защитные очки, обувь с усиленным носом, специальный рабочий костюм, каска и средства, предназначенные для защиты органов дыхания (респираторы и противогазы).

#### Вредное воздействие компьютера

Работа оператора по контролю рабочих параметров производственных процессов предусматривает работу за компьютером. Компьютер оказывает следующие вредные воздействия:

- Проблемы с мышцами. Длительное сидячее положение негативно сказывается на циркуляции крови в теле;

- Влияние сидячего положения на позвоночник;
- Проблемы со зрением. Негативное воздействие на глаза человека

при длительной работе с компьютером отрицательно воздействуют на зрение.

- Проблемы психоэмоционального перенапряжения. Нарушение внимания и умственная усталость в процессе поиска информации на компьютере возникают гораздо быстрее, нежели при работе с другими источниками информации;

- Отрицательное воздействие компьютера на нервную систему;

В целях уменьшения пагубного влияния компьютера необходимо сокращение времени компьютерной работы, увеличение числа перерывов в соответствии с рекомендацией СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03[68, с.1-32].

#### Электробезопасность

Электронасыщенность современного производства (электрические установки, приборы, агрегаты) формирует электрическую опасность. 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 произвольными судорожными сокращениями мышц (сердца, лёгких) [64, с. 155-159].

Для спасения пострадавшего необходимо как можно быстрее освободить его от действия электрического тока, а затем оказать ему первую помощь. Согласно ПЭУ [69, с.1-10] исследуемое рабочее место относится к помещению без повышенной электроопасности, которое характеризуется отсутствием условий, создающих повышенную и или особую опасность.

Основные способы и средства электрозащиты:

1. изоляция токопроводящих частей и ее непрерывный контроль;
2. установка оградительных устройств;
3. предупредительная сигнализация и блокировки;
4. использование знаков безопасности и предупреждающих плакатов;
5. использование малых напряжений;
6. электрическое разделение сетей;
7. защитное заземление;
8. выравнивание потенциалов;
9. зануление; защитное отключение;
10. средства индивидуальной электрозащиты [68, с.1-14].

Повышенная температура поверхности оборудования.

На ректификационную колонну необходимо установить защитный экран для предотвращения разбрызгивания жидкости в случае выхода из строя прокладок, а также от воздействия факторов. Защитный экран может быть изготовлен из листа оцинкованной или нержавеющей стали толщиной от 0,5 до 0,8 мм и размещается между пакетом пластин и шпильками, стягивающими теплообменник. Защитный экран в комплект поставки не входит. При необходимости нахождения людей вблизи горячих частей оборудования должны быть приняты меры по их защите ожогов и действия высокой температуры (ограждение действующего оборудования, маркировка, вентиляция, спецодежда и т.п.).

Все горячие части оборудования, трубопроводы, баки и другие элементы, прикосновение к которым может вызвать ожоги, должны иметь тепловую изоляцию. Температура на поверхности изоляции при температуре окружающего воздуха 25 град. С должна быть не выше 45 град. С. Окраска, условные обозначения, размеры букв и расположение надписей должны соответствовать Правилам устройства и безопасной эксплуатации трубопроводов пара и горячей воды и ГОСТ 14202-69. Трубопроводы агрессивных, легковоспламеняющихся, горючих, взрывоопасных или вредных веществ должны быть герметичными. В местах возможных утечек (краны, вентили, фланцевые соединения) должны быть установлены защитные кожухи, а при необходимости - специальные устройства со сливом из них продуктов утечек в безопасное место.

#### Работа на высоте

К работам на высоте относятся работы, при которых:

а) существуют риски, связанные с возможным падением работника с высоты 1,8 м и более, в том числе:

при осуществлении работником подъема на высоту более 5 м, или спуска с высоты более 5 м по лестнице, угол наклона которой к горизонтальной поверхности составляет более 75°;

при проведении работ на площадках на расстоянии ближе 2 м от неогражденных перепадов по высоте более 1,8 м, а также, если высота защитного ограждения этих площадок менее 1,1 м;

б) существуют риски, связанные с возможным падением работника с высоты менее 1,8 м, если работа проводится над машинами или механизмами, поверхностью жидкости или сыпучих мелкодисперсных материалов, выступающими предметами.

К работе на высоте допускаются лица, достигшие возраста восемнадцати лет.



Работники, выполняющие работы на высоте, в соответствии с действующим законодательством должны проходить обязательные предварительные (при поступлении на работу) и периодические медицинские осмотры.

Работники, выполняющие работы на высоте, должны иметь квалификацию, соответствующую характеру выполняемых работ. Уровень квалификации подтверждается документом о профессиональном образовании (обучении) и (или) о квалификации.

Все работники допускаются к работе после проведения:

- а) обучения и проверки знаний требований охраны труда;
- б) обучения безопасным методам и приемам выполнения работ на высоте.

Отравление токсическими веществами

Даже при полном безопасном производстве может возникнуть непредвиденные ситуации, когда происходит утечка веществ. При вдыхании ядовитых веществ поражаются в первую очередь верхние дыхательные пути, и наблюдаются такие симптомы, как:

- одышка и затруднённое дыхание,
- кашель,
- острая дыхательная недостаточность – замедление или остановка дыхания,
- химический ожог верхних дыхательных путей,
- заметная бледность или синеватый оттенок кожи,
- слезотечение или, напротив, сухость слизистой оболочки глаз,
- дезориентация, галлюцинации,
- потеря сознания,
- изменения в ритме работы сердца (замедление или ускорение сердцебиения).

После того как работник вдохнул пары вещества, необходимо обратиться за медицинской помощью для нейтрализации действия вещества.

Если работник находится в бессознательном состоянии, его необходимо отнести от зоны поражения и оказать первую помощь до приезда медиков (при отсутствии дыхания провести непрямой массаж сердца и искусственное дыхание),

#### Работа с сосудами под давлением

Все ректификационные колонны представляют собой весьма ответственные аппараты и требуют квалифицированного обслуживания и ремонта. Колонны, работающие под давлением, превышающим 0,07 МПа, кроме того, подведомственны инспекции Ростехнадзора, должны проходить специальное освидетельствование и периодические осмотры согласно имеющимся инструкциям.

Проекты сосудов и их элементов (в том числе запасных частей к ним), а также проекты их монтажа или реконструкции должны выполняться специализированными организациями.

Руководители и специалисты, занятые проектированием, изготовлением, реконструкцией, монтажом, наладкой, ремонтом, диагностикой и эксплуатацией сосудов, должны быть аттестованы на знание Правил в соответствии с Положением о порядке подготовки и аттестации работников организаций, осуществляющих деятельность в области промышленной безопасности опасных производственных объектов, подконтрольных Госгортехнадзору России\*, утвержденным постановлением Госгортехнадзора России.

Конструкция сосудов должна обеспечивать надежность и безопасность эксплуатации в течение расчетного срока службы и предусматривать возможность проведения технического освидетельствования, очистки, промывки, полного опорожнения, продувки, ремонта, эксплуатационного контроля металла и соединений.

Весь персонал обслуживающий колонну должен иметь допуск к работе с сосудами под давлением.

### **7.3 Экологическая безопасность.**

Функционирование проектируемой ректификационной колонны оказывает негативное влияние на качество окружающей среды. При работе с ректификационной колонной отвод сточных вод отсутствует, как и отходы в литосферу, ввиду ненадобности. Решения по обеспечению экологической безопасности, охрана окружающей среды достигается комплексом мероприятий, направленных на предотвращение утечек нефти, нефтепродуктов и сокращение потерь от испарения. Комплекс проектных мероприятий, направленных на уменьшение воздействия объектов на окружающую среду должен включать:

1. принятие герметичных схем приема-откачки нефти, нефтепродуктов;
2. обеспечение сбора утечек нефти с оборудования в подземные дренажные емкости 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. сбор проливов продуктов из отбортованных площадок в дренажные ёмкости с последующим возвратом на переработку;
6. лабораторный контроль за соблюдением нормативов выбросов вредных веществ в атмосферу;

#### **4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

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

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

3. природные ЧС (ввиду больших габаритных размеров, а именно высоты проектируемой колонны существует опасность возникновения ЧС под действие ветровой нагрузки и сейсмических сил).

Мероприятия по предотвращению воздействия ветровой нагрузки и сейсмических сил в данном проектном расчете обусловлено расчетом проектируемой колонны на действие ветровой и сейсмической нагрузки в разделе: "конструктивно-механический расчет". Механизм ликвидации последствий возникновения производственных аварий техногенного характера состоит из эвакуации персонала из зоны поражения, локализации источника аварии, ремонтных работ и устранения причин аварии.

В связи, с чем за наиболее типичную и опасную ЧС, защиту о которой необходимо предусмотреть, на данном производстве примем: возникновение пожара. Причинами возникновения пожара и взрыва могут служить:

1. технические неполадки, в результате которых происходит отклонение технологических параметров от регламентных значений, вплоть до разрушения оборудования;

2. неосторожное обращение с огнем при производстве ремонтных работ;

3. события, связанные с человеческим фактором: неправильные действия персонала, неверные организационные или проектные решения, постороннее вмешательство (диверсии) и т.п.;

4. внешнее воздействие техногенного или природного характера: аварии на соседних объектах, ураганы, землетрясения, наводнения, пожары.

Превентивные меры по предотвращению ЧС включают в себя соблюдение техники безопасности, оснащение производственных зданий и территории промплощадки первичными средствами пожаротушения и мероприятия по пожарной безопасности в соответствии с [70]. Местоположение первичных средств пожаротушения и пожарного инвентаря должно быть согласовано органами пожарного надзора.

Последовательность и механизмы действия при пожаре приведены в соответствии с действующими нормативно-правовыми актами и инструкциями [62, 64, 70-73]. При возникновении пожара необходимо отключить ректификационную колонну от сети, вентиляцию, убрать огнеопасные предметы в безопасное место, одновременно, по возможности, ликвидировать очаг.

#### Противопожарные мероприятия

В соответствии с "Правилами пожарной безопасности в Российской Федерации" [74, с. 1-12], НПБ 88-2001\* Установки пожаротушения и сигнализации. Нормы и правила проектирования [71, с. 1-17], справочником руководителя тушения пожара (под. ред. Иванникова); СНиП 2.04.01-85\* "Внутренний водопровод и канализация" [72, с. 10-17], и СНиП 2.04.02-84 "Водоснабжение. Наружные сети и сооружения" [73, с. 1-7] обеспечение пожарной безопасности и пожаротушения возлагается на руководителя предприятия. Оснащение производственных зданий и территории промплощадки первичными средствами пожаротушения и мероприятия по пожарной безопасности должны производиться в соответствии с ППБО-85 Правила пожарной безопасности в нефтяной промышленности [70].

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  $V=1,0$  м<sup>3</sup> предусматриваются на выходе из помещений и здания цеха таким образом, чтобы не препятствовать вынужденной эвакуации людей в соответствии с планами эвакуации. Средства тушения применять с учетом того, что является источником пожара. Для тушения горячей одежды использовать воду, для горящих электроустановок - углекислые огнетушители, для тушения воспламененных установок, закрепленных штативом - асбестовое одеяло.

В результате разработки раздела по социальной ответственности рассмотрели правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности, провели анализ вредных и опасных факторов в рабочей зоне.

Минимизировали риски чрезвычайных ситуаций на рабочем месте.

После всех проведенных исследований можно сделать вывод, что проектируемое оборудование возможно применять на существующих промышленных площадках.

## Заключение

По результатам расчета ректификационной колонны разделения пропан пропиленовой фракции был произведен технологический и конструктивно-механический расчет колонны.

В ходе расчета был составлен материальный баланс колонны, рассчитано оптимальное флегмовое число  $R=7,94$ . Найдено оптимальное значение числа теоретических тарелок равное 65. Рассчитан диаметр колонны равный 1,6 м.

В соответствии с рекомендациями [2, с. 214] в качестве исполнительного типа тарелки принимаем ситчатую тарелку типа ТС-Р2 по ОСТ 26-805-73. Рассчитана высота проектируемой колонны равная 35 м.

Для ректификационной колонны выбрали исполнительную марки стали 09Г2С, соответствующую всем требованиям для проектируемого аппарата. Из условия прочности и устойчивости определены значения толщины стенки цилиндрической обечайки, эллиптического днища и крышки равные 12 мм. Произведен расчет штуцеров и фланцев. Из стандартизированных значений ГОСТ и ОСТ выбраны оптимально подходящие рассчитанным параметрам исполнительные типы штуцера, фланца и люк-лазов. Рекомендуемый диаметр люк-лаза – 500 мм. В соответствии с ГОСТ 24755-81 произведен расчет укрепления отверстий. По результатам расчета, выяснилась необходимость укрепление люк-лаза. Способом укрепления отверстий является укрепление патрубком штуцера. По ГОСТ 51273-99 произведен расчет колонны на ветровую и сейсмическую нагрузку. Произведен расчет опорной обечайки, в соответствии с АТК 24.200.03-90 выбрана стандартизированная опора.

Так же был рассчитан конденсатор-холодильник для осуществления теплообмена между смесью пропан-пропилена и охлаждаемой водой.

В технологическом расчете был составлен тепловой баланс теплообменника. Рассчитаны коэффициенты теплоотдачи: для зоны конденсации  $\alpha_{Icm} = 1455 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ , для зоны охлаждения  $\alpha_{IIcm} =$

93,5 Вт/(м<sup>2</sup> · К), коэффициенты теплопередачи: для зоны конденсации  $K_{\text{Идейст}} = 834,5$  Вт/(м<sup>2</sup> · К), для зоны охлаждения  $K_{\text{Идейст}} = 89,3$  Вт/(м<sup>2</sup> · К). После чего была рассчитана требуемая поверхность теплообмена  $F=58,4$  м<sup>2</sup>. На основании поверхности был выбран нормализованный конденсатор-холодильник со всеми его конструктивными параметрами. Исходя из свойства сред, которые протекают в аппарате, и параметров теплообмена было подобрано оптимальное исполнение по материалам теплообменника - 09Г2С.

При гидравлическом расчете было получено значение давления в магистрали с водой и в трубном пространстве теплообменника.

Исходя из выбора данных материалов и геометрических данных о конденсаторе, был произведен расчет механической прочности, жесткости и устойчивости, как в целом аппарата, так и отдельных элементов, узлов фланцевого соединения с распределительной камерой, днищем и крышкой. Было выяснено, что рассчитанная позже выбранная толщина стенок сосуда  $s=8$  мм, толщина штуцеров обеспечивает укрепление отверстий. В результате расчета трубной решетки, кожуха, труб на прочность и жесткость, была выбрана толщина трубной решетки 28 мм и гладкая развальцовка.

В финансовом менеджменте произведен экономический расчет выбранной технологии, ректификационной установки. В социальной ответственности были рассмотрены всевозможные опасные и вредные факторы. Были рассмотрены мероприятия по обеспечению минимального воздействия производственных факторов на рабочего, а также на окружающую среду.



### Список использованной литературы

- 1 Баннов П.Г. Процессы переработки нефти. Часть 2. М.: ЦНИИТЭнефтехим, 2001. - 415 с.
- 2 Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии. Ч.1. Теоретические основы процессов химической технологии. Учебник для вузов. Изд. 2-е. М.: Химия, 1995. – 400 с.
- 3 Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. – 9-е изд. – М.: Химия, 1973. – 750 с.
- 4 Плановский А.Н, Николаев И.П. Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии. 5-изд. - М.: Химия, 1987 г. - 847 с.
- 5 Костин А. А. Популярная нефтехимия. Увлекательный мир химических процессов / Костин Андрей. — М.: Ломоносовъ, 2013. — 176 с.
- 6 Каталог оборудования для нефтегазовой промышленности, электроэнергетики и водного хозяйства компании «Зульцер Хемтех» [Электронный ресурс]: Режим доступа <https://www.sulzer.com/en/shared/products/column-internals> Дата обращения (10.03.2020).
- 7 Коган В.Б. Равновесия между жидкостью и паром/ В.М. Фридман, В.В. Кафаров. - Книга первая, справочное пособие. Часть 2 – Издательство "Наука", Москва, Ленинград, 1966 г. - 641 с.
- 8 Регламент производства мономеров - Томскнефтехим - 1997 - с. 986.
- 9 Динамическая вязкость газов и паров - [Электронный ресурс] - URL: <http://thermalinfo.ru/svoystva-gazov/gazy-raznye/dinamicheskaya-vyazkostgazov-i-parov> (дата обращения: 02.04.2020).
- 10 Дж. Перри Справочник инженера-химика, т. 1. Перевод с англ. под ред. акад. Жаворонкова Н.М.: Издат: "Химия" 1969 - с. 640.

11 АТК 26-02-3-89 Тарелки ситчатые с отбойными элементами для аппаратов колонного типа. Параметры. Конструкция и основные размеры (изменение N 1).

12 Поверхностное натяжение, кН/м, сжиженных углеводородных газов. Этан, Пропилен, Пропан, н-Бутилен, Изобутилен, Изобутан, н-Бутан, н-Пентан [Электронный ресурс] - URL: <http://tehtab.ru/Guide/GuidePhysics/SurfaceTension/PovNatNatGas/> (дата обращения: 05.04.2020).

13 Новоселов А.Г. Справочник по молекулярной диффузии в системах газ–жидкость и жидкость–жидкость / Тишин В.Б., Дужий А.Б. [Электронный ресурс] -URL: [http://chemanalytica.com/book/novyuy\\_spravochnik\\_khimika\\_i\\_tekhnologa/10rot\\_sessy\\_i\\_apparaty\\_khimicheskikh\\_tekhnologiy\\_chast\\_II/7220](http://chemanalytica.com/book/novyuy_spravochnik_khimika_i_tekhnologa/10rot_sessy_i_apparaty_khimicheskikh_tekhnologiy_chast_II/7220) (дата обращения: 10.04.2020).

14 Свойства пропилена [Электронный ресурс] - URL: <http://msd.com.ua/ximiya-i-texnologiya-propilena/svoystva-propilena/> (дата обращения: 10.04.2020).

15 Александров И.А. Ректификационные и адсорбционные аппараты. Методы расчета и основы конструирования - 1971 - с.138.

16 Фролов К.В. Требования, предъявляемые к конструкционным материалам// Конструкционные материалы - 1999 - С. 37-71.

17 Лацинский А.А. Конструирование сварных химических аппаратов: Справочник - 2-изд., перепечатка с1981г. М.: ИД"Альянс", 2008. -384с., ил.

18 Горицкий В.М. Диагностика металлов. - М.: Металургистиздат, 2004 – 408 с.

19 ГОСТ 19903-74 Прокат листовой горячекатаный. Сортамент.

20 ГОСТ 6533-78 Днища эллиптические отбортованные стальные для сосудов, аппаратов и котлов.

21 ГОСТ 34347-2017 Сосуды и аппараты стальные сварные. Общие технические условия.

22 ОСТ 26-2013-83 Устройства подъемно-поворотные для крышек люков стальных сварных сосудов и аппаратов. Конструкция и размеры.

23 АТК 24.218.06-90 Штуцера для сосудов и аппаратов стальных сварных. Типы, основные параметры, размеры и общие технические требования.

24 ГОСТ 12820-80 Фланцы стальные плоские приварные на 0,1 до 2,5 МПа (от 1 до 25 кгс/см).

25 ГОСТ 34233.3-2017 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Укрепление отверстий в обечайках и днищах при внутреннем и наружном давлениях. Расчет на прочность обечаяк и днищ при внешних статических нагрузках на штуцер.

26 Михалев М.Ф. Расчет и конструирование машин и аппаратов химических производств / Ленинград "Машиностроение". - Ленинград: Изд-во: Ленинградское отделение, 1984. – 302.

27 ГОСТ 24755-89 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность укрепления отверстий.

28 Беляев В. М. "Конструирование и расчёт элементов оборудования отрасли. Ч.1.: Тонкостенные сосуды и аппараты химических производств". / В. М. Миронов - Томск: Изд- во Томский политехнический университет. - 2011. - 300 с.

29 ГОСТ 34233.4-2017 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет на прочность и герметичность фланцевых соединений.

30 СТО 0041-2004 Конструкции стальные строительные. Болтовые соединения. Проектирование и расчет.

31 ГОСТ 22353-77 Болты высокопрочные класса точности В. Конструкция и размеры.

32 ГОСТ 22356-77 Болты и гайки высокопрочные и шайбы. Общие технические условия.

33 ГОСТ 34233.4-2017 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет на прочность и герметичность фланцевых соединений.

34 ГОСТ 481-80 Паронит и прокладки из него. Технические условия.

35 ГОСТ 15180-86 Прокладки плоские эластичные. Основные параметры и размеры.

36 Коптев А.А. Фланцевые соединения: конструкции, размеры, расчёт на прочность: методические указания / сост.: В.Б. Коптева, А.А. Коптев. - Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2011. - 24 с.

37 АТК 26-02-3-89 Тарелки ситчатые с отбойными элементами для аппаратов колонного типа. Параметры. Конструкция и основные размеры.

38 Семакина О.К., Машины и аппараты химических производств: учебное пособие / Томский политехнический университет. - Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. - 127 с.

39 ГОСТ Р 51273-99 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Определение расчетных усилий для аппаратов колонного типа от ветровых нагрузок и сейсмических воздействий.

40 Постановление Минтруда РФ от 21-03-97 14 (ред. от 12.02.2014) "Об утверждении Правил по охране труда в литейном производстве".

41 Кац М. И. Охрана труда в химической промышленности: Учебник для хим.-технол. техникумов / М. И. Кац, Л. И. Билинкис, В. С. Медведева. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва: Химия, 1974. - 306 с.

42 АТК 26.200.04-90 Опоры цилиндрические и конические вертикальных аппаратов. Типы и основные размеры.

43 Ошин Л.А. Производство синтетического глицерина. - Москва: Химия, 1974. - 191 с.

44 Н. Б. Варгафтик Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н. Б. Варгафтик – М.: Книга по Требованию, 2012. – 721 с.

45 Теплоемкость сжиженных углеводородных газов, кДж/(кг\*°С) [Электронный ресурс]. Режим доступа <http://www.xiron.ru/content/view/30677/28/>. Дата обращения (25.05.2020).

46 Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии: Учебное пособие для вузов под ред. чл.-корр. АН СССР П.Г. Романкова. – 10-е изд., перераб. и доп. / Репринтное воспроизведение издания 1987 г. – М.: Альянс, 2013. – 576 с.

47 ТУ 3612-024-00220302-02. Аппараты теплообменные кожухотрубчатые с неподвижными трубными решетками и кожухотрубчатые с температурным компенсатором на кожухе.

48 АТК 24.218.06-90. Штуцера для сосудов и аппаратов стальных сварных. Типы, основные параметры, размеры и общие технические требования.

49 ГОСТ 19903-2015. Прокат листовой горячекатаный. Сортамент.

50 ГОСТ 31842-2012 (ИСО 16812:2007) Нефтяная и газовая промышленность. Теплообменники кожухотрубчатые. Технические требования

51 ГОСТ 34233.1-2017 «Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Общие требования.».

52 ГОСТ 34233.3-2017 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Укрепление отверстий в обечайках и днищах при внутреннем и наружном давлениях. Расчет на прочность обечаек и днищ при внешних статических нагрузках на штуцер

53 ГОСТ 26296-84. Лапы опорные подвесных вертикальных сосудов и аппаратов. Основные размеры (с Изменением N 1).

54 Нефтехимия в России выбор вектора развития - [Электронный ресурс] - URL: <http://ru.investinrussia.com/data/files/EY-petrochemical-industry-inrussia-2015-us.pdf> (дата обращения: 02.04.2020).

55 Кузьмина Е.А, Кузьмин А.М. Методы поиска новых идей и решений "Методы менеджмента качества" №1 2018 г.

56 Скворцов Ю.В. Организационно-экономические вопросы в дипломном проектировании: Учебное пособие. – М.: Высшая школа, 2016.

57 Сущность методики FAST в области ФСА [Электронный ресурс] <http://humeur.ru/page/sushhnost-metodiki-fast-v-oblasti-fsa>.

58 Методы оценки финансово-экономической эффективности инвестиционного проекта без учета фактора времени. [Электронный ресурс] <https://studfiles.net/preview/712337/page:2/>.

59 О промышленной безопасности опасных производственных объектов: федеральный закон от 21.07.1997 № 116-ФЗ [Электронный ресурс] //Официальный интернет-портал правовой информации [сайт].: [p:// cs.c. u/ cu /9046058](p://cs.c.u/cu/9046058) (дата обращения: 15.05.2020).

60 Конституция Российской Федерации от 12.12.1993 [Электронный ресурс] // Официальный интернет-портал правовой информации [сайт].: [p://www.c si u i. u](p://www.csiu.ru) (дата обращения: 15.05.2017).

61 Трудовой кодекс Российской Федерации от от 30.12.2001 N 197-ФЗ [Электронный ресурс] // Официальный интернет-портал правовой информации [сайт].: [p://www.c su a. u/ cu /c s \\_ c \\_ W \\_34683/](p://www.csu.ru/cu/csc_W_34683/) (дата обращения: 15.05.2017).

62 Кушелев В.П. Основы техники безопасности на предприятиях химической промышленности. - Л.: Химия, 1977 - 279 с.

63 Строительные нормы и правила: СНиП 23-05-95. Естественное и искусственное освещение: нормативно-технический материал. - Москва: [б.и.], 1996. - 79 с.

64 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.

65 Строительные нормы и правила: СНиП 23-03-2003. Защита от шума: нормативно-технический материал. - Москва: [б.и.], 2004. - 30 с.

66 Строительные нормы и правила: СанПин 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. - Москва: [б.и.], 1996. - 12 с.

67 Строительные нормы и правила: СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы. - Москва: [б.и.], 2003. - 32 с.

68 Правила устройства электроустановок: ПУЭ от 01.01.2003. Общие правила. - Москва: [б.и.], 2003. - 14 с.

69 Приказ Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий: Правила пожарной безопасности в РФ от 18 июня 2003 г. № 313 - Москва: [б.и.], 2003. - 138 с.

70 Строительные нормы и правила: СНиП 2.04.09-84 Пожарная автоматика зданий и сооружений. - Москва: [б.и.], 1998. - 24 с.

71 НПБ 88-2001\* Установки пожаротушения и сигнализации. Нормы и правила проектирования

72 Строительные нормы и правила: СНиП 2.04.02-84 Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. - Москва: [б.и.], 1996. - 177 с.

73 Приказ МЧС РФ от 18.06.2003 313. Об утверждении Правил пожарной безопасности в Российской Федерации (ППБ 01-03). - 94 с.

74 ППБО-85 Правила пожарной безопасности в нефтяной промышленности.

# Приложения

## Приложение А

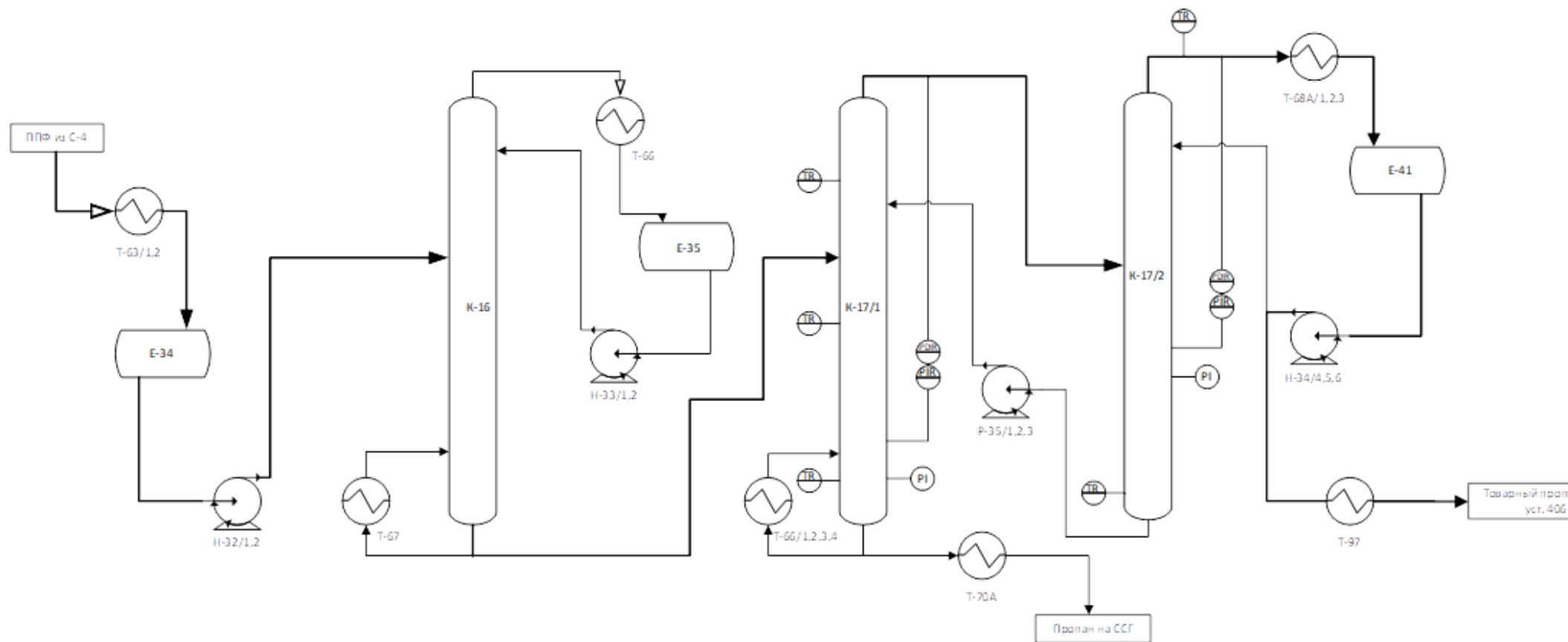


Рисунок 1п- Технологическая схема ректификационной установки



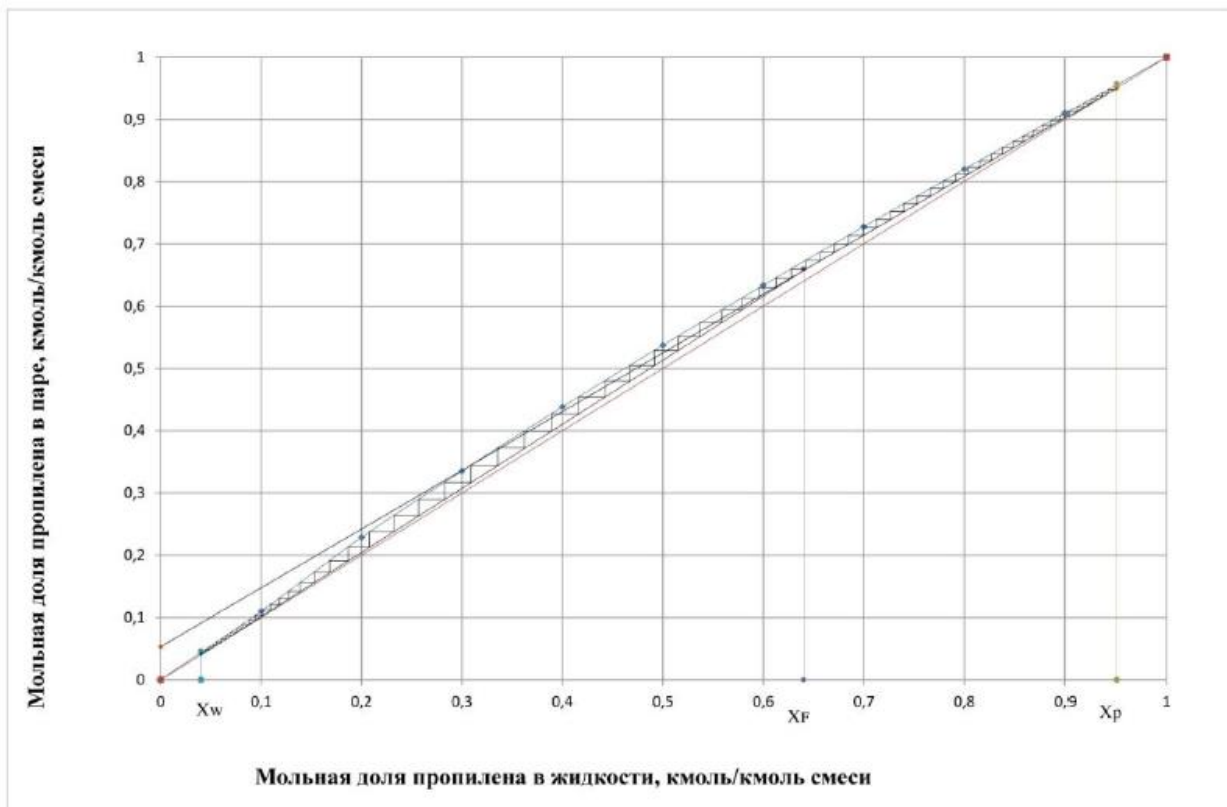


Рисунок 2п - Построение теоретических тарелок при  $R=6,5$

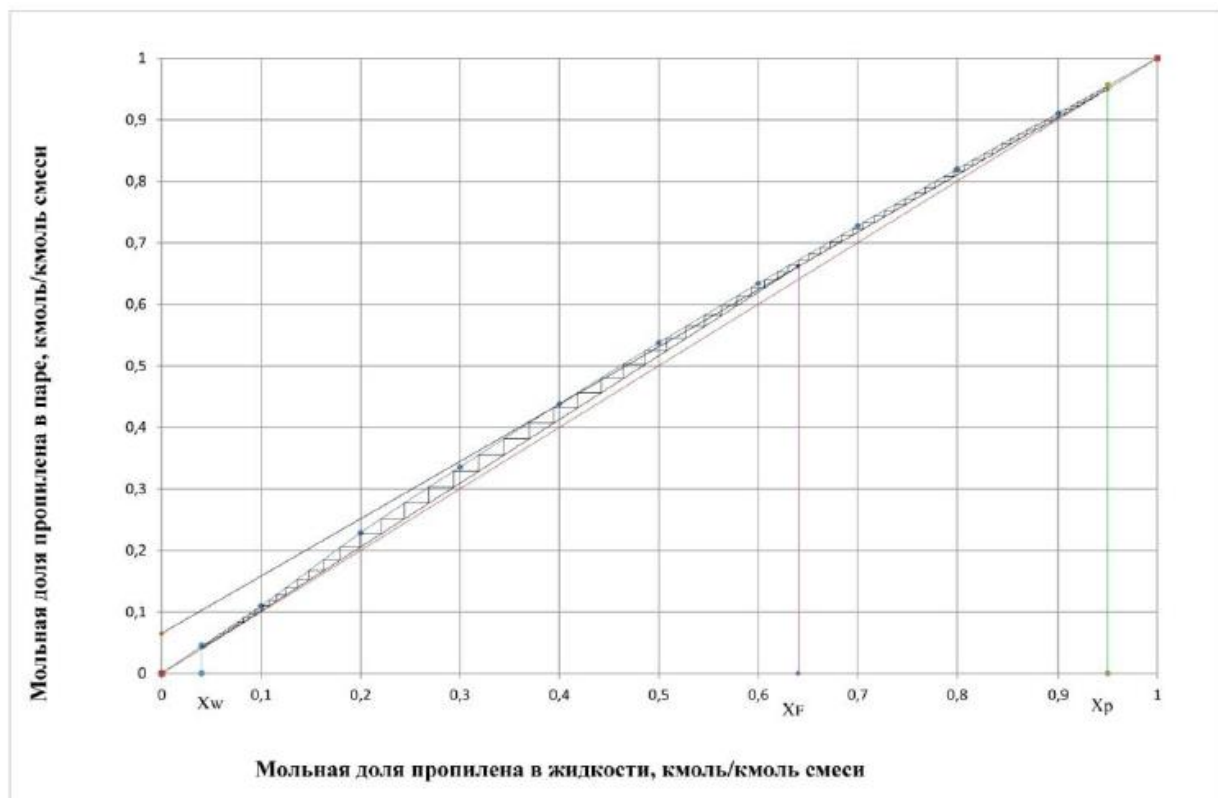


Рисунок 3п- Построение теоретических тарелок при  $R=7,938$

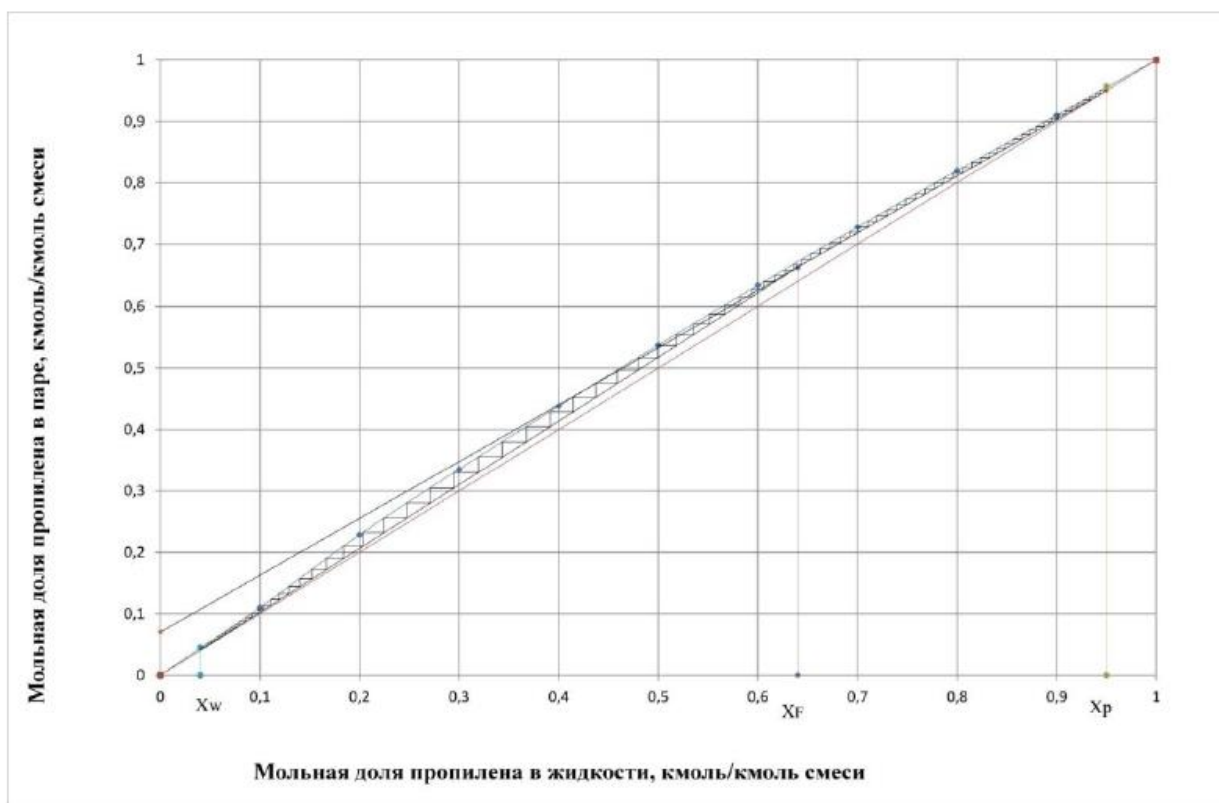


Рисунок 4п - Построение теоретических тарелок при  $R=9,381$

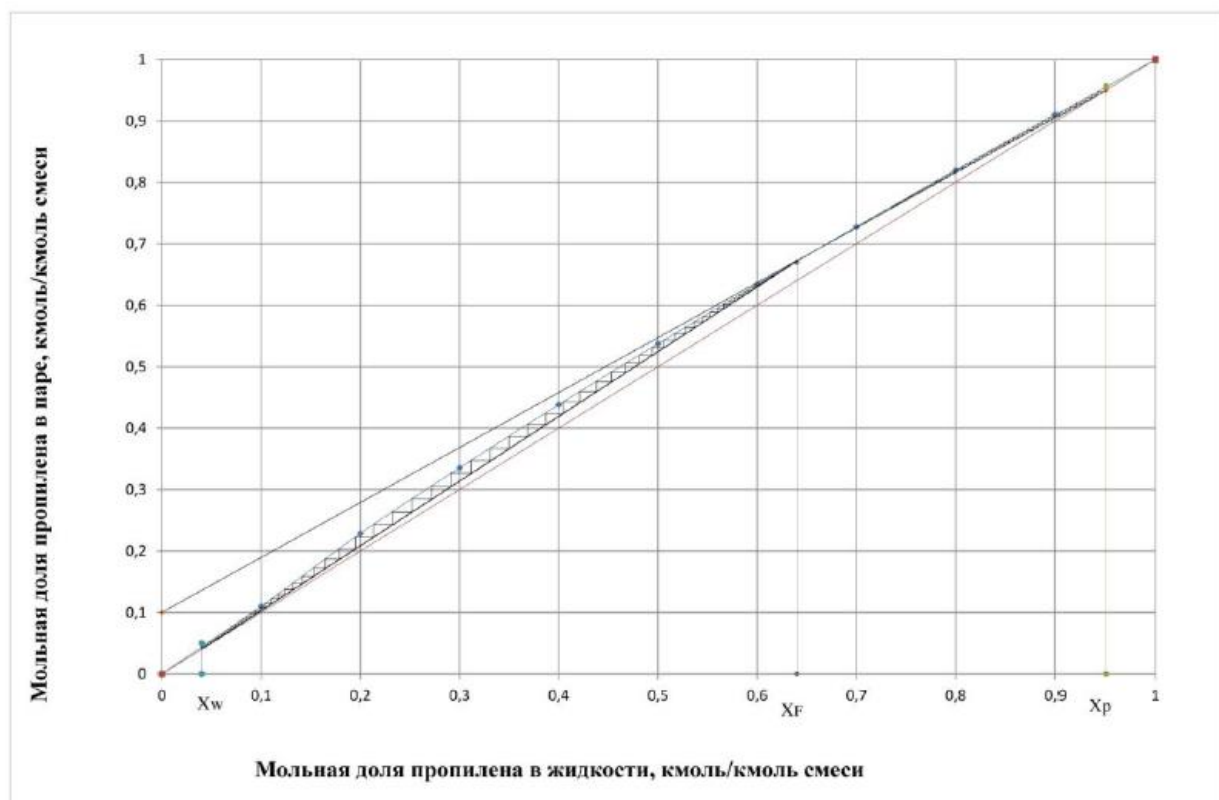


Рисунок 5п - Построение теоретических тарелок при  $R=10,824$

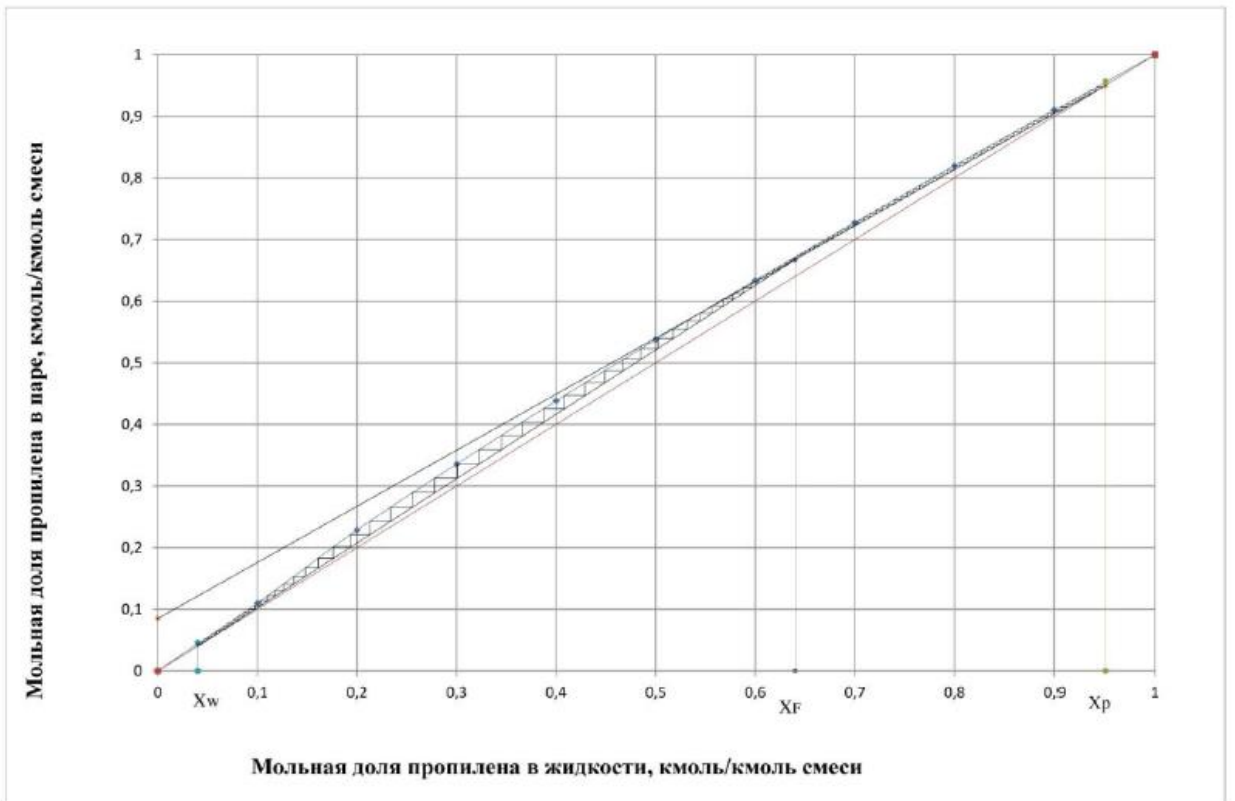


Рисунок 6п - Построение теоретических тарелок при  $R=10,824$

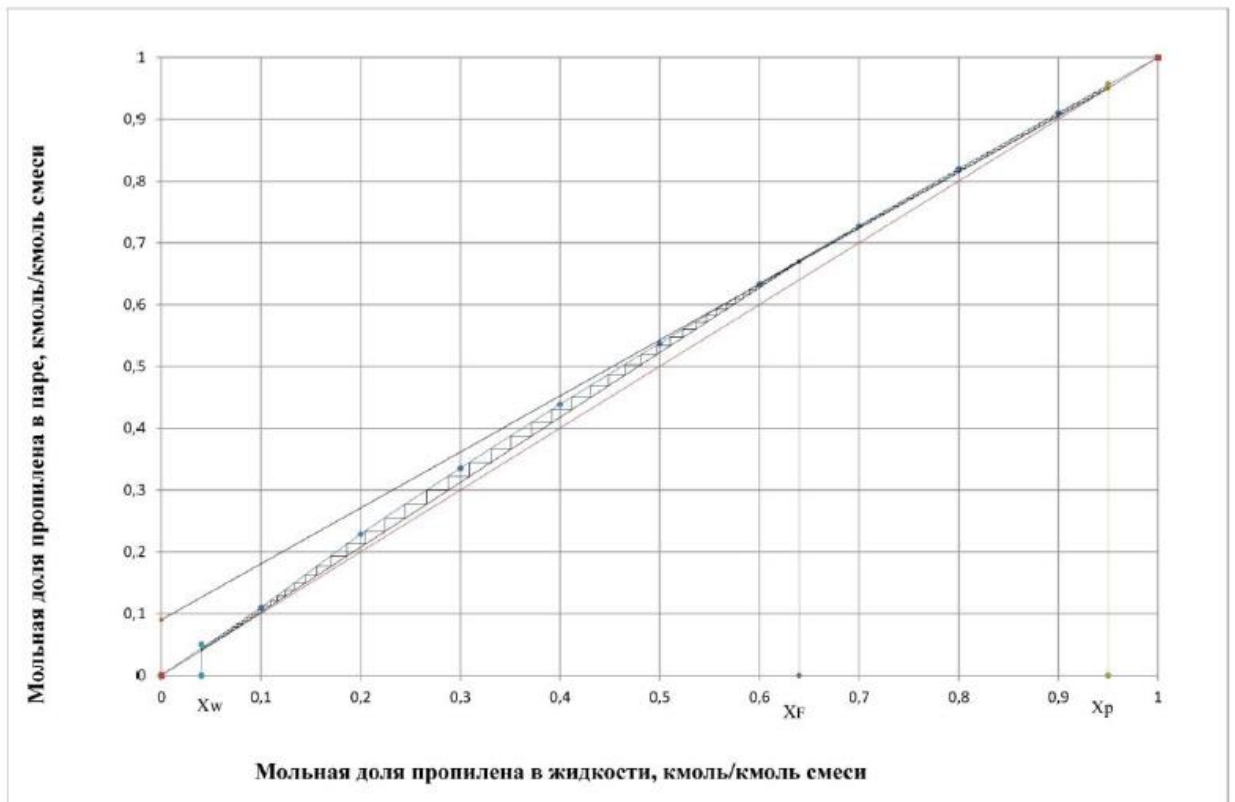


Рисунок 7п - Построение теоретических тарелок при  $R=12,988$

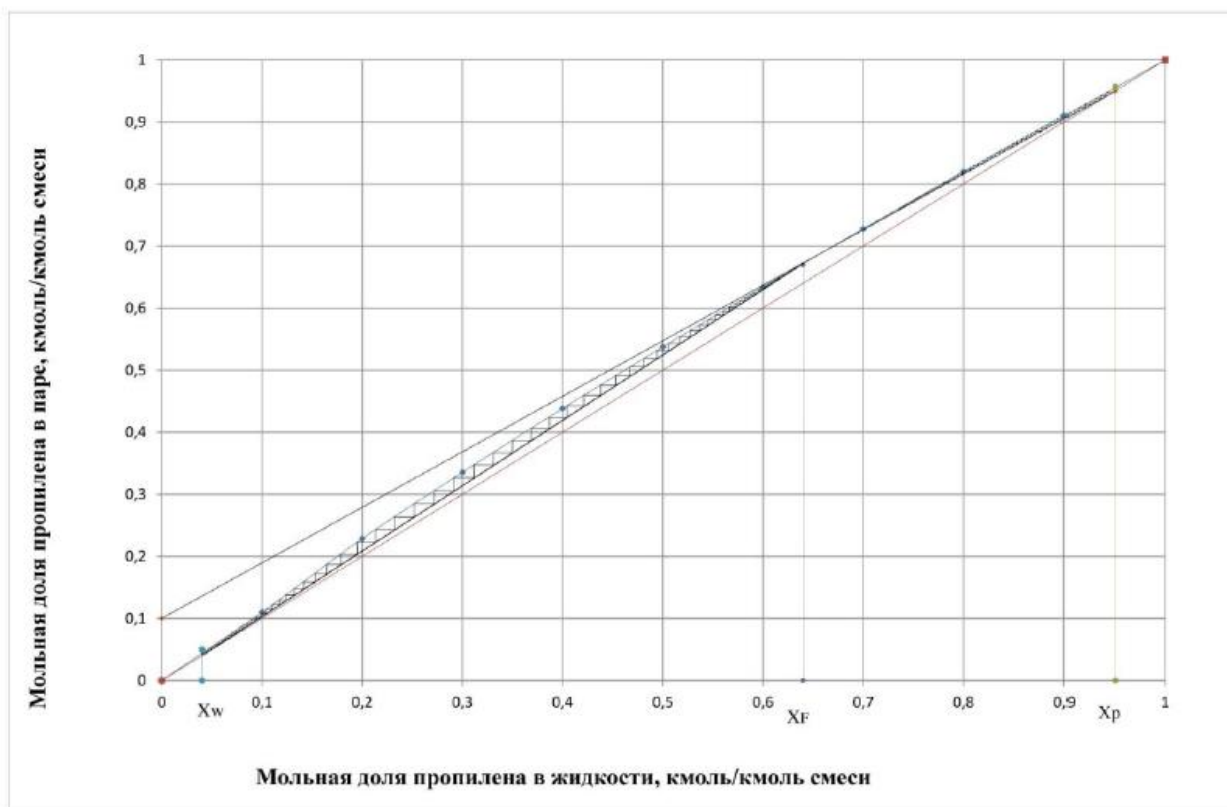


Рисунок 8п- Построение теоретических тарелок при  $R=16,597$

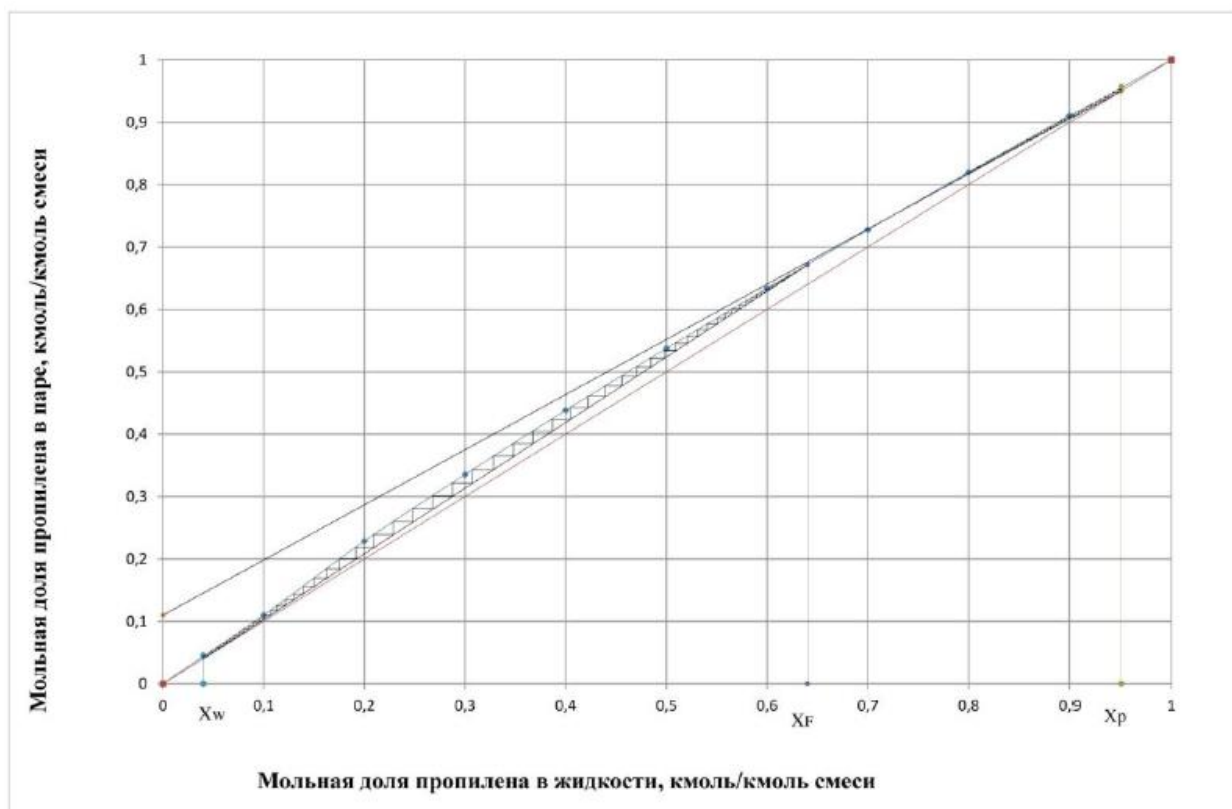


Рисунок 9п- Построение теоретических тарелок при  $R=18,04$

Раздел выполненный на английском языке

1 Literature review

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4КМ81	Кабанова Дарья Вячеславовна		

Руководитель ВКР:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Беляев В.М.	к.т.н., доц		

Консультант – лингвист кафедры \_\_\_\_\_ (аббревиатура кафедры) \_\_\_\_\_ :

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Диденко А.В.	к.ф.н		

## 1.1 Main characteristics of the rectification process

The design of the column is a vertically standing hollow cylinder, inside of which there are plates (contact devices of various designs) or material is placed - nozzle. The cube and reflux condenser (reflux condenser) are usually shell-and-tube heat exchangers (tube furnaces and external heater of bottom liquid are also used).

The rectification process is one of the most energy-intensive, and in many cases consumes up to 50% of all energy from the entire enterprise.

Rectification is used to obtain different fractions of hydrocarbons, as well as individual hydrocarbons from petroleum feedstocks in the oil refining and petrochemical industries, ethylene oxide, acrylonitrile, alkyl chlorosilanes - in the chemical industry. Rectification is also widely used in the sectors of the national economy: coke, chemical, pharmaceutical, wood chemical, food industries.

Distillation installations based on the principle of action are divided into cycling and continuous. In continuous plants, the separated raw material mixture enters the column, and the separation products are continuously removed from it. In batch plants, the separated mixture is simultaneously loaded into a cube and subjected to distillation to obtain products of a given final composition [2] [3].

### 1.1.1 Continuous rectification

The most common in industry is the use of continuous distillation columns (Figure 1).

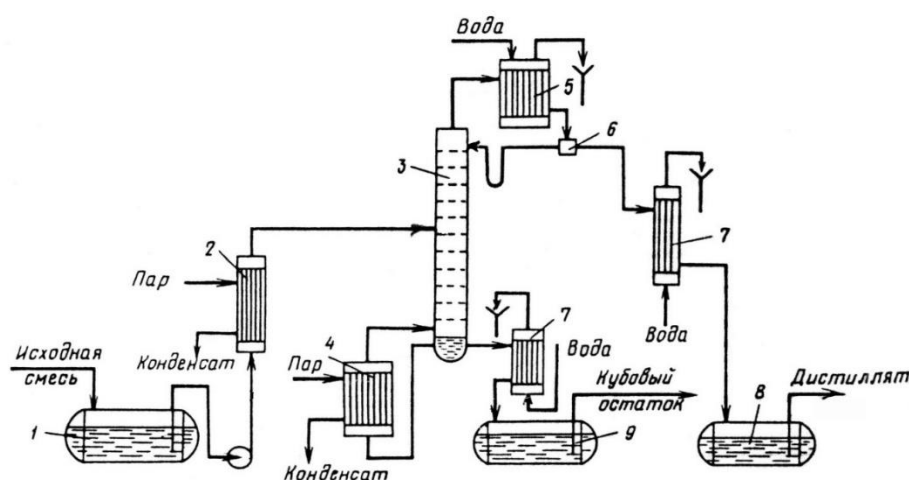


Figure 1 – Diagram of a continuously operating distillation unit:

1 – capacity for the initial mixture; 2 – heater; 3 – distillation column; 4 – boiler; 5 – reflux condenser; 6 – phlegm divider; 7 – refrigerator; 8 – collection of distillate; 9 – collection of bottoms

The distillation column consists of a cylindrical body, inside the housing mounted contact devices (disks, muzzle). In the direction from bottom to top, the vapors move in the column, they enter the lower part of the apparatus from the heat exchanger, which is a remote one, or the placement takes place directly below the column. Using a boiler, an upward flow of steam is created.

A clean low-boiling component is taken from the top of the column in the form of steam and sent to a fractionating column, where they condense and are divided into distillate and reflux.

The liquid that comes from the bottom of the column (close in composition to the high boiling component) is also divided into two parts. The first part is sent to the boiler, and the other gradually enters the refrigerator and collector.

Figure 1 shows a diagram of a continuous distillation unit. Such installations must be equipped with instrumentation and control devices that automate the work and carry out the process using software control in optimal conditions [3].

### 1.1.2. Batch rectification

With a small scale of production, batch distillation plants are used (Figure 2).

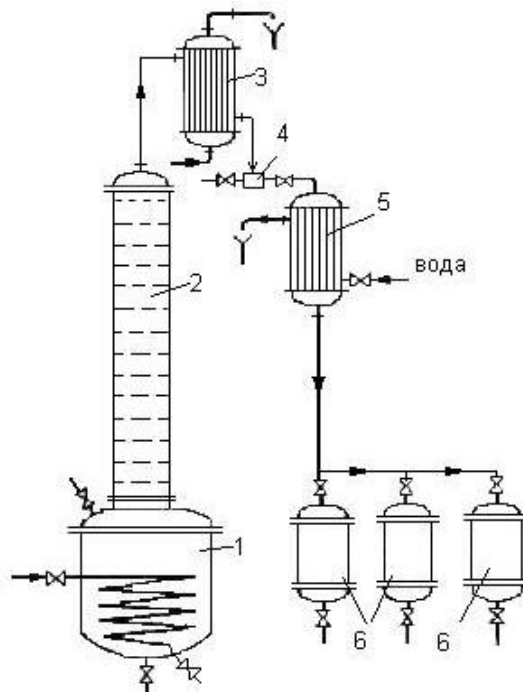


Figure 2 – Diagram of cycling operating distillation unit: 1-cube; 2-distillation column; 3-reflux condenser; 4-reflux divider; 5-fridge; 6-collection of distillate [3]

The initial mixture is loaded into a cube, heated to a boil, and the vapor enters the column. As the column rises, the vapors are enriched with a low-boiling component and enter the reflux condenser. Full or partial condensation occurs in the reflux condenser. In the first case, the liquid is separated into reflux and distillate. The resulting product is cooled and sent to the collection.

When the desired composition of the residue in the cube is reached, it is poured, the initial mixture is loaded into the cube and the operation is repeated.

When comparing a batch distillation column (Figure 2) with a continuous distillation column (Figure 1), it is necessary to pay attention to the fact that a batch distillation column, like the top of a continuously operating column, acts as a vapor strengthening column, and the cube plays the role of the exhausting part [3].

## **1.2 Types of distillation columns**

### **1.2.1 Tray distillation columns**

Plate-type columns are mainly common in the oil refining industry and in large industries. The columns are a vertical pipe in which plates of a certain configuration are installed at a certain distance, where there is contact between the vapor and liquid phases.

Distance between the plates in a plate column usually is between 0.4 ... 0.5 m. When determining the number of plates, it is necessary to take into account the number of theoretical stages of separation; in practice, the efficiency of the plates is usually not more than 50%. Consequently, the actual height of the separation in the column approximately 2 times greater than theoretical height of the separation.

Distillation columns currently use dozens of designs of various contact devices that differ in their characteristics, and technical and economic indicators. Along with plates of the first generation: cap and strainer (Figure 3), which are still used in old factories, S-shaped and valves (Figure 4) are widely used [4]. Figure 3 shows the main types of plates used in the industry.



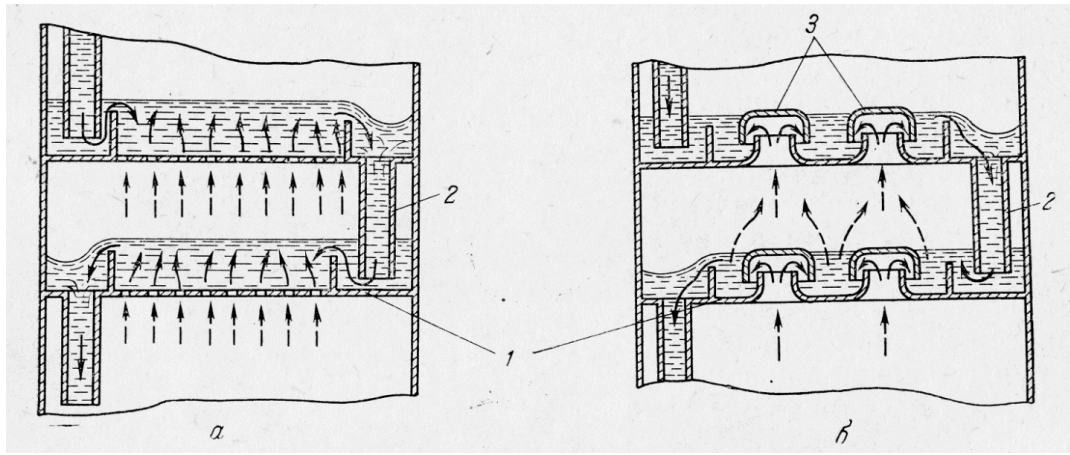


Figure 3 – Diagram of the device distillation plates: a – sieve;  
b – cap; 1 – plates; 2 – overflow glasses; 3 – caps

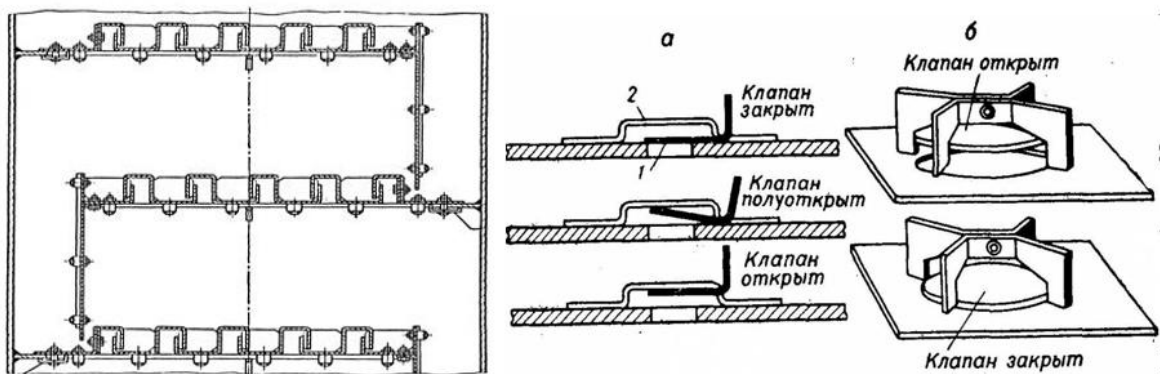


Figure 4 – Diagram of the device distillation plates: 1– S-shaped; 2 – valve plates

### 1.2.2 Packed distillation columns

Packed columns are used, if necessary, to provide a small retention of liquid in the column, a small pressure drop, and for small-tonnage production. For packed columns, types of muzzles (Pall rings, metal cuttings, gratings, etc.) were invented, which proved to be highly effective in large diameter columns.

Packed columns are highly effective. The height of the theoretical separation stage for columns of high productivity is from 0.4 meters and above. This is due to the bypass effect, the degree of influence of which increases with increasing diameter of the column.

Internal devices are solid bodies of various shapes that are loaded into the column. The developed surface of the muzzles causes a significant contact surface

of the vapor and liquid. Many constructive modifications of packed bodies are known, the main types of which are shown in Figure 5 [3, 4].

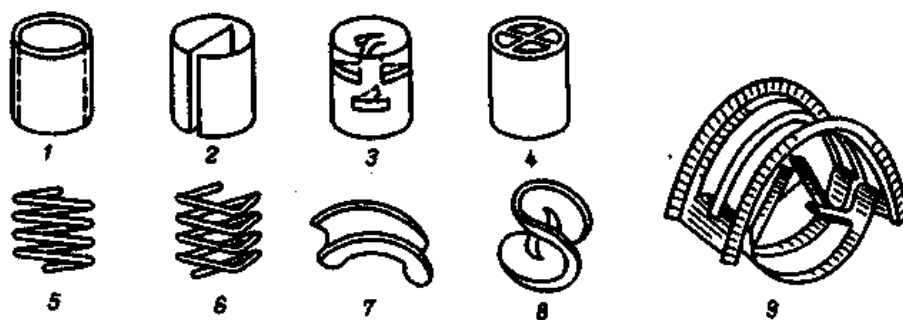


Figure 5 - The main types of muzzles: 1-4 – Rashig rings, Lessing, Pall rings and rings with cross-shaped partitions; 5, 6 – round and trihedral springs; 7, 9 – Intalox ceramic and stamped metal muzzles; 8 – Berl muzzle.

### 1.3 Description of the rectification process

Through the rectification process, the process of separation of the propane-propylene fraction occurs. Propylene is necessary to obtain the final product – polypropylene.

The feedstock for producing propylene is straight-run gasoline, which is sent to the pyrolysis furnace. After exiting the furnaces, the gaseous mixture of pyrolysis products passes through a number of technological units (for separating water, steam, primary separation, desulfurization, drying, compression , etc.) and is sent to the fractionation department, where the mixture is separated into components [5].

In Russia, the total pyrolysis capacity for the production of propylene is about 1.5 million tons per year. Figure 6 presents data on the production of propylene in Russia [5].

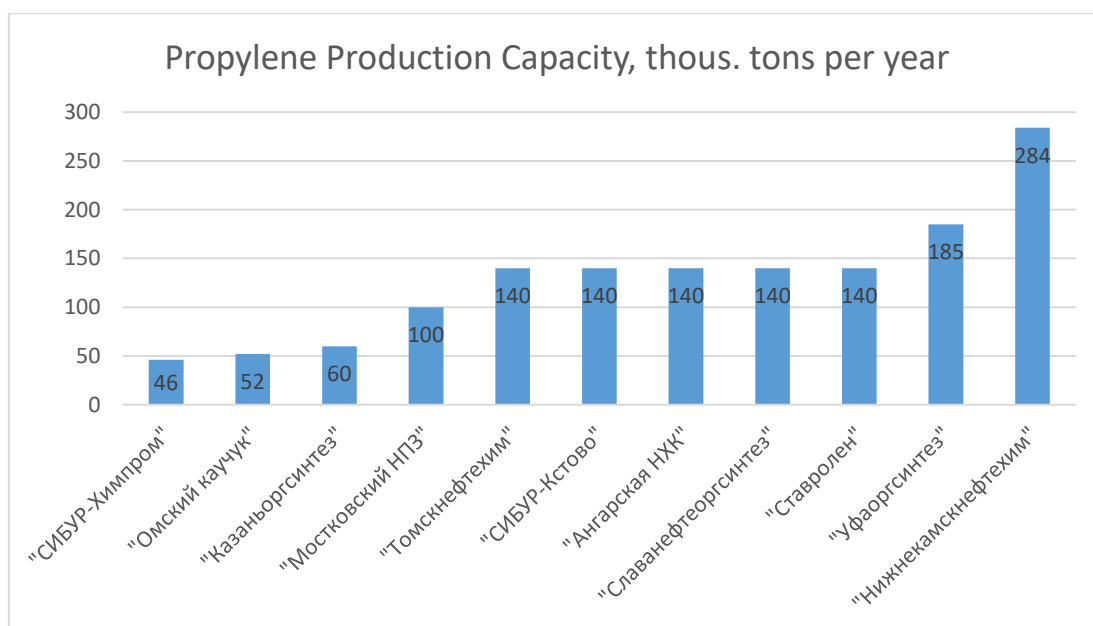


Figure 6 – Production of propylene in Russia

To date, Sibur has launched a propylene production plant in Tobolsk with a capacity of 500 thousand tons per year.

Most enterprises were built in the 70-80s of the 20th century and equipment, including column equipment, has not been updated for a long time.

In the modern world, every plant puts optimization and modernization of production at the forefront. To completely replace the equipment, huge monetary costs are required. This is not always beneficial for the company.

Modernization and optimization can be carried out at a lower cost by replacing internal contact devices.

#### **1.4 Devices for the modernization of the existing separation column for propane-propylene fraction**

##### **1.4.1 VGPlus High-performance plates**

High-performance plates combine specially designed blades to increase steam production and state-of-the-art overflow technology to increase liquid productivity. Plates can be used to modernize an existing column, and to reduce the size of the designed columns [6].

VGPlus plates are high-performance plates with overflow pockets, which are one of the highest-performing in the world, as proven by dozens of successful examples of their practical application.

The design of the plates combines an advanced bubble zone and a modified overflow pocket with increased productivity and has the following features:

- Using an optimized valve arrangement on the plate. The presence on the plates of additional elements directing and redistributing the flow of foamed liquid intensifies the interaction of the liquid and gas phases on the plate.
- Advanced design overflow pockets. Inclined, truncated, stepped and multi-chordal overflow chambers reduce gas entrainment by the draining fluid and thereby increase the productivity of the drain chambers, while ensuring the maximum area of the bubble zone of the plate [6].

This combination of elements allows achieving maximum performance and efficiency of the disk device.



Figure 7 – VGPlus double-drain plates with guide rails and truncated overflow pockets

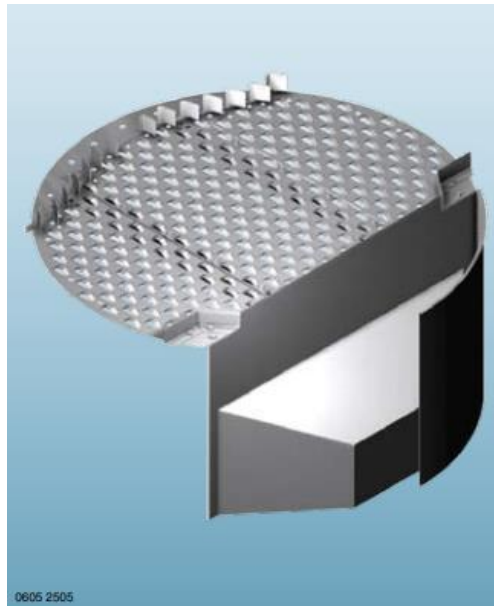


Figure 8 – VGPlus Single Drip Plate with Guide Rail and Stepark™ Polyhedral Overflow Pocket

VGPlus plates advantages over traditional plates are:

- Increased productivity: up to 30%;
- Decreased flow resistance: up to 20%;
- Equal or higher efficiency;
- Lack of a gradient of liquid on a plate;
- Uniform distribution of steam and liquid.

Application area of VGPlus plates are:

- Modernization and new columns;
- Processes with working pressure from atmospheric to high;
- For columns with medium and high phase loads.

Typical tasks of VGPlus plates are:

- Columns for the separation of propane-propylene and ethane - ethylene fractions;
  - Demethanizer, deethanizer, depropanizer, debutanizer and deisobutanizer columns;
  - Fractionation columns in oil refining.

#### **1.4.2 Shell ConSep swirl plates**

The performance of Shell ConSep plates can be up to 80% higher than traditional plates and 50% higher than other high-performance plates while maintaining high mass transfer efficiency. The separation of gas and liquid on the plate is due to the use of vortex elements. With the help of the centrifugal

separation effect, it is possible to significantly exceed the limits typical for devices with gravitational phase separation. Plates can be made as a strainer or valve plate with various types of valves [6].

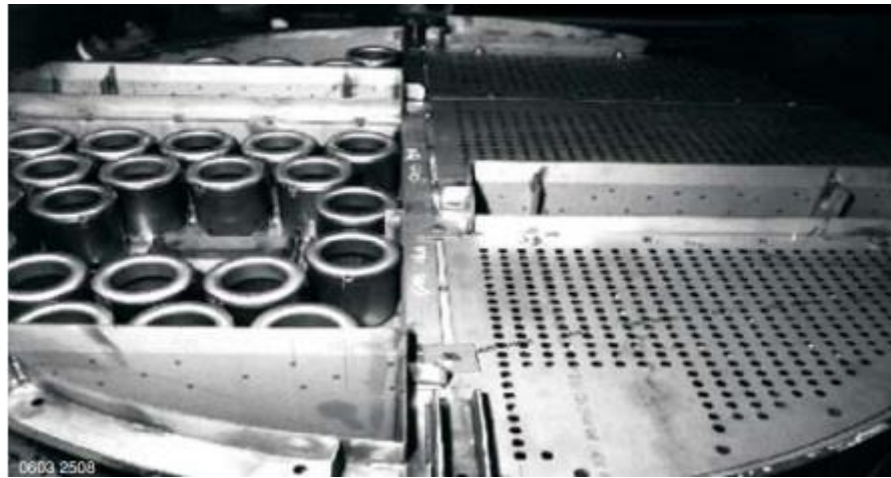


Figure 9 – Shell ConSep swirl plate

The liquid is carried away from the plate by a steam flow and in the direct-flow mode it enters the centrifugal elements located under the plate of the upper plate. In the centrifugal element, liquid and vapor are separated, after which the separated liquid flows through the pipe into the overflow chamber and through it to the plate of the plate located below the one from which this liquid was previously carried away. The separated gas rushes under the overlying plate, passes through it, interacting with the liquid located there, and then carries this liquid into the vortex elements of the overlying plate. This arrangement of flows on a plate allows extremely high steam velocities in the column to be achieved. The ConSep plate combines the large bubbling surface and high fluid throughput of the HiFi plate with a centrifugal separator.

Applications Shell ConSep plates can be reliably used in the refining, petrochemical and offshore platforms. Typical applications for these plates are deethanizer, depropanizer, debutanizer columns, main fractionation columns, pumparound sections, ethane-ethylene and propane-propylene fraction separation columns, as well as tasks in which it is necessary to significantly increase the maximum productivity of the column. The ConSep plate is successfully used for systems with a ratio of loads in the vapor and liquid phases close to 1, and in, particular, in columns such as debutanizers and main fractionation columns [6].