

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

**Инженерная школа новых производственных технологий**

**Научно-образовательный центр Н.М. Кижнера**

**Направление подготовки** 18.04.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии

**Профиль** Машины и аппараты химических и нефтехимических производств

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

| Тема работы   |
|---|
| <b>Разработка основного оборудования узла разделения сополимера от растворителя</b> |

УДК 678.7.13.023:26.002.5

Студент

| Группа | ФИО                       | Подпись | Дата |
|--------|---------------------------|---------|------|
| 4КМ61  | Курмель Герман Валериевич |         |      |

Руководитель

| Должность                  | ФИО           | Ученая степень,<br>звание | Подпись | Дата |
|----------------------------|---------------|---------------------------|---------|------|
| Доцент НОЦ<br>Н.М. Кижнера | Семакина О.К. | к.т.н.                    |         |      |

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

| Должность   | ФИО            | Ученая степень,<br>звание | Подпись | Дата |
|---|----------------|---------------------------|---------|------|
| Доцент Отделения<br>социально-<br>гуманитарных наук | Креницына З.В. | к.т.н.                    |         |      |

По разделу «Социальная ответственность»

| Должность  | ФИО              | Ученая степень,<br>звание | Подпись | Дата |
|--|------------------|---------------------------|---------|------|
| Профессор Отделения<br>контроля и<br>диагностики | Ахмеджанов Р. Р. | д.б.н.                    |         |      |

По разделу «Конструктивно-механический раздел»

| Должность                  | ФИО         | Ученая степень,<br>звание | Подпись | Дата |
|----------------------------|-------------|---------------------------|---------|------|
| Доцент НОЦ<br>Н.М. Кижнера | Беляев В.М. | к.т.н.                    |         |      |

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

| Руководитель<br>НОЦ Н.М. Кижнера | ФИО                | Ученая степень,<br>звание | Подпись | Дата |
|----------------------------------|--------------------|---------------------------|---------|------|
| Профессор                        | Краснокутская Е.А. | д.х.н.,<br>профессор      |         |      |

Томск – 2018 г.

## Запланированные результаты обучения по ООП 18.04.02 в 2018 г.

| Код результата | Формулировка цели   |
|----------------|---|
| P1             | способность к абстрактному мышлению, анализу, синтезу   |
| P2             | готовность действовать в нестандартных ситуациях, нести социальную и этическую ответственность за принятые решения  |
| P3             | готовность к саморазвитию, самореализации, использованию творческого потенциала   |
| P4             | готовность к коммуникации в устной и письменной формах на русском и иностранном языках для решения задач профессиональной деятельности  |
| P5             | готовность руководить коллективом в сфере своей профессиональной деятельности, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия                                    |
| P6             | способность к профессиональной эксплуатации современного оборудования и приборов в соответствии с направлением и профилем подготовки  |
| P7             | готовность к использованию методов математического моделирования материалов и технологических процессов, к теоретическому анализу и экспериментальной проверке теоретических гипотез                    |
| P8             | готовность к защите объектов интеллектуальной собственности и коммерциализации прав на объекты интеллектуальной собственности   |
| P9             | способность формулировать научно-исследовательские задачи в области реализации энерго- и ресурсосбережения и решать их  |
| P10            | способность организовать самостоятельную и коллективную научно-исследовательскую работу   |
| P11            | готовность к поиску, обработке, анализу и систематизации научно-технической информации по теме исследования, выбору методик и средств решения задачи  |
| P12            | способность использовать современные методики и методы, в проведении экспериментов и испытаний, анализировать их результаты и осуществлять их корректную интерпретацию;                                 |
| P13            | способность составлять научно-технические отчеты и готовить публикации по результатам выполненных исследований  |
| P14            | готовность разрабатывать математические модели и осуществлять их экспериментальную проверку   |
| P15            | готовность к разработке мероприятий по энерго- и ресурсосбережению, выбору оборудования и технологической оснастки  |
| P16            | готовность к разработке технических заданий на проектирование и изготовление нестандартного оборудования  |
| P17            | способность к анализу технологических процессов с целью повышения показателей энерго-и ресурсосбережения, к оценке экономической эффективности технологических процессов, их экологической безопасности |
| P18            | способность оценивать инновационный и технологический риски при внедрении новых технологий  |
| P19            | способность разрабатывать мероприятия по комплексному использованию сырья, по замене дефицитных материалов  |
| P20            | способность создавать технологии утилизации отходов и системы обеспечения экологической безопасности производства   |
| P21            | способность оценивать экономические и экологические последствия принимаемых организационно-управленческих решений   |

| <b>Код результата</b> | <b>Формулировка цели</b>   |
|-----------------------|--|
| P22                   | готовность к организации работы коллектива исполнителей, принятию решений и определению приоритетности выполняемых работ   |
| P23                   | способность находить оптимальные решения при создании продукции с учетом требований качества, надежности, стоимости и экологической безопасности производств   |
| P24                   | способность использовать современные системы управления качеством в конкретных условиях производства на основе международных стандартов  |
| P25                   | готовность разрабатывать информационные системы планирования и управления предприятием   |
| P26                   | способность к проектной деятельности в профессиональной сфере на основе системного подхода и использования моделей для описания и прогнозирования ситуаций, осуществления качественного и количественного анализа процессов в целом и отдельных технологических стадий |
| P27                   | способность формулировать задания на разработку проектных решений  |
| P28                   | готовность к проведению патентных исследований с целью обеспечения патентной чистоты новых проектных решений и определения показателей технического уровня проекта   |
| P29                   | способность проводить технические и технологические расчеты по проектам, технико-экономической, функционально-стоимостной и эколого-экономической эффективности проекта  |
| P30                   | готовность к оценке инновационного потенциала проекта  |
| P31                   | способность использовать пакеты прикладных программ при выполнении проектных работ   |
| P32                   | способность разрабатывать методические и нормативные документы, техническую документацию, а также предложения и мероприятия по реализации разработанных проектов и программ  |
| P33                   | готовность к разработке учебно-методической документации для обеспечения учебного процесса   |
| P34                   | готовность к постановке новых лабораторных работ и проведению практических занятий   |

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

---

**Инженерная школа новых производственных технологий**  
**Научно-образовательный центр Н.М. Кижнера**  
**Направление подготовки 18.04.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии**  
**Профиль Машины и аппараты химических и нефтехимических производств**

**УТВЕРЖДАЮ:**

Руководитель НОЦ Н.М. Кижнера

\_\_\_\_\_ Е.А. Краснокутская

(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

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

В форме:

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

Студенту:

| Группа | ФИО                         |
|--------|-----------------------------|
| 4КМБ1  | Курмель Герману Валериевичу |

Тема работы:

|   |                      |
|---|----------------------|
| <b>Разработка основного оборудования узла разделения сополимера от растворителя</b> |                      |
| Утверждена приказом директора (дата, номер)   | 23.03.2018г. №2085/с |

Срок сдачи студентом выполненной работы:

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

|   |   |
|---|---|
| <p><b>Исходные данные к работе</b><br/>(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.).</p> | <p>Рассчитать ректификационную колонну непрерывного действия для разделения бинарной смеси гексен-1 – циклогексан.</p> <p>Исходные данные:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- давление в колонне <math>P_p=0.6</math> МПа;</li><li>- производительность по исходной смеси <math>F=86</math> кг/ч;</li><li>- содержание легколетучего компонента % масс:<ul style="list-style-type: none"><li>- в исходной смеси <math>x_f=80\%</math>;</li><li>- в дистилляте <math>x_p=99\%</math>;</li><li>- в кубовом остатке <math>x_w=1\%</math>;</li></ul></li></ul> <p>Рассчитать сварной пластинчатый теплообменник для нагрева циклогексана.</p> <p>Исходные данные:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- начальная температура циклогексана <math>T_{нач}=90</math> °С;</li><li>- конечная температура циклогексана <math>T_{конеч}=91.07</math> °С;</li><li>- давление циклогексана <math>P_{ЦГ}=0.6</math> МПа;</li><li>- массовый расход <math>G_2=0.26</math> кг/с;</li><li>- начальная температура масла <math>T_{нач}=180</math> °С;</li><li>- конечная температура масла <math>T_{конеч}=101.4</math> °С;</li><li>- давление масла <math>P_M=0,2</math> МПа;</li></ul> |
|---|---|

|  |  |
|--|--|
| <b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b><br>(аналитический обзор по литературным источникам). | Глава 4. Определение краевых углов смачивания поверхностей различной природы   |
| <b>Перечень графического материала</b><br>(с точным указанием обязательных чертежей)   | Листов формата А0:<br>1. Ректификационная колонна КР-501 ВО;<br>Листов формата А1:<br>1. Сварной пластинчатый теплообменник Т-502 ВО;<br>2. Сварной пластинчатый теплообменник Т-502 СБ;<br>3. Технологическая схема;<br>4. Результаты исследования по теме «Определение краевых углов смачивания поверхностей различной природы»;<br>5. Технико-экономические показатели. |
| <b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b><br>(с указанием разделов)  |  |
| <b>Раздел</b>  | <b>Консультант</b>   |
| Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение  | Креницына З.В.   |
| Социальная ответственность   | Ахмеджанов Р. Р.   |
| Конструктивно-механический раздел  | Беляев В.М.  |
| <b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b>  |  |
| Приложение А – английский язык.  |  |

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

**Задание выдал руководитель:**

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

**Задание принял к исполнению студент:**

| Группа | ФИО                       | Подпись | Дата |
|--------|---------------------------|---------|------|
| 4КМ61  | Курмель Герман Валериевич |         |      |

## Реферат

Выпускная квалификационная работа состоит из пояснительной записки и пяти листов графического материала формата А1 и одного листа формата А0. Пояснительная записка содержит 157 стр., 3 граф., 26 рис., 45 табл., 28 источников, 2 прил.

Ключевые слова: Ректификационная колонна, сварной пластинчатый теплообменник, гексен-1, циклогексан, (со)мономер, растворитель.

Объектом исследования являются ректификационная колонна для разделения бинарной смеси гексен-1 – циклогексан, сварной пластинчатый теплообменник для нагрева циклогексана.

Цель работы – разработка основного оборудования узла разделения (со)мономера от растворителя.

Проведены технологические, конструктивные и прочностные расчёты оборудования.

Освещены такие темы как «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение», «Социальная ответственность»

## **The abstract**

The final qualification work consists of an explanatory note and five sheets of graphic material of A1 format and one sheet of A0 format. The explanatory memorandum contains 157 pages, 3 graphs, 26 figures, 45 tables, 28 sources, 2 appendices.

Key words: Rectification column, welded plate heat exchanger, hexene-1, cyclohexane, comonomer, solvent. The object of the study is, a rectification column for the separation of a hexane-1-cyclohexane binary mixture, a welded plate heat exchanger for heating cyclohexane.

The purpose of this work is to develop the main equipment of the separation unit (co) of the monomer from the solvent.

Technological, structural and strength calculations of equipment were carried out.

Topics covered include "Financial Management, Resource Efficiency and Resource Saving", "Social Responsibility"

## Оглавление

|  |    |
|--|----|
| Реферат  | 6  |
| Введение   | 11 |
| <b>1 Описание технологической схемы</b>  | 12 |
| <b>2. Расчёт насадочной ректификационной колонны КР-501</b>                            | 14 |
| 2.1 Технологический расчёт ректификационной колонны                                    | 14 |
| 2.1.1 Материальный баланс колонны и рабочее флегмовое число                            | 14 |
| 2.1.2 Скорость пара и диаметра колонны   | 20 |
| 2.2. Конструктивный расчёт   | 25 |
| 2.2.1 Расчёт патрубков и подбор фланцев  | 25 |
| 2.3 Прочностной расчёт   | 27 |
| 2.3.1 Расчёт толщины стенок  | 27 |
| 2.3.1.1 Расчёт толщины стенок цилиндрической обечайки                                  | 27 |
| 2.3.1.2 Расчёт толщины стенки эллиптической крышки                                     | 30 |
| 2.3.2 Укрепление отверстий патрубков штуцеров  | 32 |
| 2.3.2.1 Расчёт укрепления отверстия в эллиптической крышке                             | 32 |
| 2.3.2.2 Расчёт укрепления отверстия в цилиндрической обечайке                          | 36 |
| 2.3.3 Прочностной расчёт фланцевого соединения между двумя царгами                     | 41 |
| 2.3.4 Расчёт опорной обечайки  | 51 |
| 2.3.5 Резюме по прочностному расчёту   | 57 |
| <b>3. Расчёт сварного пластинчатого теплообменника Т-502</b>                           | 59 |
| 3.1 Технологический расчёт теплообменника  | 59 |
| 3.2 Конструктивный расчёт теплообменника   | 63 |
| 3.2.1 Расчёт патрубков и подбор фланцев  | 63 |
| 3.3. Прочностной расчёт теплообменника   | 65 |
| 3.3.1 Расчёт прямоугольных боковых крышек  | 66 |
| 3.3.1.1 Расчёт крышек (без отверстий), панели постой А, В                              | 66 |
| 3.3.2 Расчёт боковых крышек панели Аа, Аb  | 68 |
| 3.3.3 Расчёт боковых крышек панели Ва, Вb  | 70 |
| 3.3.4 Расчёт шпилек теплообменника   | 72 |
| 3.3.5 Расчёт крышек на максимальное напряжение и максимальный прогиб                   | 74 |
| 3.3.6 Расчёт крышек, панели Аа, Ва на максимальные напряжения и<br>максимальный прогиб | 79 |
| 3.3.7 Расчёт торцевой крышки С на максимальные напряжения                              | 83 |

|  |            |
|--|------------|
| 3.3.8 Прочностной расчёт фланцевого соединения   | 84         |
| 3.3.9 Резюме по прочностному расчёту   | 92         |
| 3.4 Гидравлический расчёт  | 95         |
| <b>4. Определение краевых углов смачивания поверхностей различной природы</b>          | <b>97</b>  |
| 4.1 Литературный обзор   | 97         |
| 4.2 Экспериментальная часть  | 100        |
| <b>5. Социальная ответственность</b>   | <b>106</b> |
| 5.1 Производственная безопасность  | 106        |
| 5.2 Анализ вредных выявленных факторов при эксплуатации проектируемого оборудования    | 107        |
| 5.2.1 Опасность поражения дыхательных путей и кожных покровов химическими реагентами   | 107        |
| 5.2.2 Производственный шум и вибрация  | 108        |
| 5.2.3 Производственное освещение   | 108        |
| 5.2.4 Микроклимат помещения  | 109        |
| 5.3 Анализ опасных выявленных факторов при эксплуатации проектируемого оборудования    | 110        |
| 5.3.1 Поражение электрическим током  | 110        |
| 5.3.2 Подвижные части производственного оборудования                                   | 111        |
| 5.3.3 Повышенная температура поверхности оборудования                                  | 112        |
| 5.4 Обоснование мероприятий по защите персонала от действия опасных и вредных факторов | 112        |
| 5.4.1 Защита дыхательных путей и кожных покровов от воздействия химических реагентов   | 112        |
| 5.4.2 Защита от производственного шума и вибрации                                      | 113        |
| 5.4.3 Поддержание микроклимата помещения   | 114        |
| 5.4.4 Электробезопасность  | 114        |
| 5.4.5 Защита от подвижных части производственного оборудования                         | 115        |
| 5.4.6 Повышенная температура поверхности оборудования                                  | 116        |
| 5.5 Экологическая безопасность   | 117        |
| 5.5.1 Анализ влияния объекта исследования на атмосферу                                 | 117        |
| 5.5.2 Анализ влияния объекта исследования на гидросферу                                | 117        |
| 5.5.3 Анализ влияния объекта исследования на литосферу                                 | 118        |
| 5.6 Анализ «жизненного цикла» объекта исследования                                     | 118        |

|   |     |
|---|-----|
| 5.7 Обоснование мероприятий по защите окружающей среды  | 119 |
| 5.8 Безопасность в чрезвычайных ситуациях   | 119 |
| 5.8.1 Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований                                   | 119 |
| 5.8.2. Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС | 121 |
| 5.9 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности   | 123 |
| <b>6. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</b>                                   | 127 |
| 6.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования  | 127 |
| 6.1.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения            | 128 |
| 6.1.3 Диаграмма Исикавы   | 129 |
| 6.1.4 Оценка готовности проекта к коммерциализации  | 131 |
| 6.1.5 Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования                                  | 132 |
| 6.2 Инициация проекта   | 133 |
| 6.3 Планирование управления научно-техническим проектом   | 135 |
| 6.3.1 Иерархическая структура работ проекта   | 135 |
| 6.3.2 Контрольные события проекта   | 136 |
| 6.3.3 План проекта  | 137 |
| 6.3.4 Бюджет научного исследования  | 139 |
| 6.3.5 Накладные расходы   | 142 |
| 6.3.6 Реестр рисков проекта   | 143 |
| 6.3.7 Определение ресурсной эффективности исследования  | 144 |
| <b>Заключение</b>   | 146 |
| <b>Список научных трудов</b>  | 147 |
| <b>Список литературы</b>  | 148 |
| <b>Приложение А</b>   | 150 |
| <b>Приложение Б</b>   | 158 |

## Введение

В настоящее время производство полиэтилена высокого и низкого давления процветает во всём мире. Одним из составляющих процесса производства полиэтилена являются (со)мономеры. (Со)мономер – это низкомолекулярное вещество, образующее полимер в реакции полимеризации. Мономерами также называют повторяющиеся звенья (структурные единицы) в составе полимерных молекул. Полиэтилены высокого или низкого давления могут содержать в своем составе до 4% или до 10% гексена соответственно. Кроме того, гексен может использоваться в производстве по изготовлению альдегидов, которые затем используются для производства ряда пластификаторов или жирных кислот. Гексен также нашел свое применение и в моторном топливе, как один из важных компонентов конечного продукта.

Гексены (или просто гексен) - это обобщенное название для ряда органических соединений, в частности - самого гексена и его 17 изомерных соединений вида  $C_6H_{12}$ . В свою очередь, гексен и его изомеры относятся к алкенам - этиленовым углеводородам. Свойства данного вещества и их химическая структура обуславливает возможность их использования в промышленности.

В России известно основное производство гексен-1 «Нижнекамскнефтехим» на котором выпускается продукт высокого качества 99,9%. Доставка (со)мономеров из другого региона в Томск сопровождается большими расходами для производства полиэтилена высокого давления ООО «Томскнефтехим». Для выхода из этой ситуации можно реконструировать действующую опытную установку «Гексен-1» выпускающую продукт 80% по содержанию гексен-1.

Для получения продукта высокого качества (99,9%) нужны определённые технологические условия. Для их создания нам потребуется разработать основное оборудование узла разделения гексен-1 от циклогексана.

Задачей выпускной квалификационной работы является расчёт насадочной ректификационной колонны для разделения бинарной смеси гексен-1 – циклогексан, подбор насадки для колонны. Также произвели расчёт сварного пластинчатого теплообменника для нагрева циклогексана.

## 1. Описание технологической схемы

Бинарная смесь гексен-1-циклогексан с глухой тарелки колонны КР-401 через клапан-регулятор подается в сырьевую емкость узла выделения товарного гексена-1 Е-501 (Рис. 1.1), откуда насосами подается на питание в насадочную ректификационную колонну КР-501 для выделения гексена-1 из бинарной смеси [1].

Для защиты колонны КР-501 от аварийного повышения давления сверх допустимой величины предусмотрено предохранительное устройство. При необходимости сброс избытка давления на факел осуществляется дистанционно открытием крана.

Пары гексена-1 с верха колонны КР-501 с температурой плюс 69 °С и давлением 0,6 МПа поступают в межтрубное пространство кожухотрубчатого теплообменника Т-7/2, где охлаждаются и конденсируются. В трубное пространство теплообменника Т-7/2 подается 40% раствор этиленгликоля с температурой плюс 10°С и давлением 0,5 МПа от узла хладагента.

Сконденсированные пары гексена-1 с температурой от плюс 40 до плюс 50 °С и давлением 0,6 МПа из теплообменника Т-7/2 поступают в емкость Е-14.

Для защиты емкости Е-14 от аварийного повышения давления сверх допустимой величины предусмотрено предохранительное устройство.

Из емкости Е-14 мембранными дозировочными насосами часть потока гексена-1 возвращается в колонну КР-501 в качестве орошения, а часть уходит в товарный парк.

Температура куба колонны 92 С поддерживается парами циклогексана которые подаются от испарителя Т-502, представляющий собой пластинчатый теплообменник. В качестве теплоносителя применяется диатермическое масло с температурой плюс 180°С и давлением 0,2 МПа, поступающее от узла нагрева теплоносителя. Кубовый продукт колонны КР-501 (циклогексан) с температурой плюс 92 °С и давлением 0,6 МПа самотеком поступает в буферную емкость Е-306 из которой насосом подаётся в узел приёма и осушки растворителя.

Для защиты емкости Е-306 от аварийного повышения давления сверх допустимой величины предусмотрены предохранительные устройства.

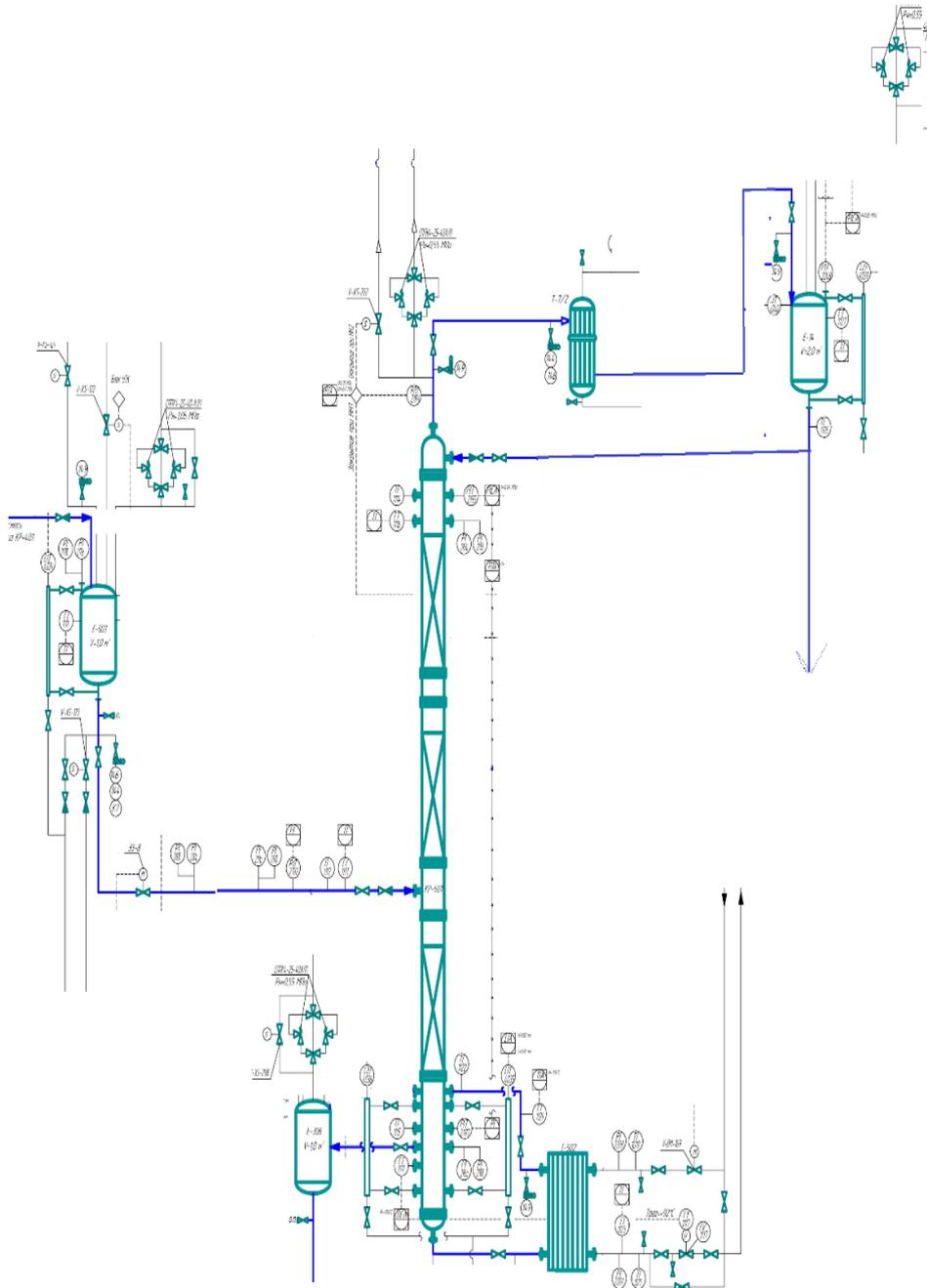


Рис. 1.1 – Технологическая схема

## 2. Расчёт насадочной ректификационной колонны КР-501

### 2.1. Технологический расчёт ректификационной колонны

**Задание на проектирование.** Рассчитать ректификационную колонну непрерывного действия для разделения бинарной смеси Гексен-1 - Циклогексан, если производительность по исходной смеси  $F=86$  кг/ч; содержание легколетучего компонента [% (масс.)]: в исходной смеси  $x_f=80\%$ ; в дистилляте  $x_p=99\%$ ; в кубовом остатке  $x_w=1\%$ ; давление в колонне составляет  $P=0.6$  МПа. Расчет производим согласно [2].

#### 2.1.1. Материальный баланс колонны и рабочее флегмовое число

Производительность по исходному компоненту:  $F := 86$  кг/ч

Содержание легколетучего компонента:

в исходной смеси 80%  $x_f := 0.80$

в дистилляте 99%  $x_p := 0.99$

в куб. остатке 1%  $x_w := 0.01$

Рабочее давление в колонне:  $P := 0.6$  МПа

Производительность колонны по дистилляту  $P$  и кубовому остатку  $W$  определим из уравнений материального баланса колонны:

$$F := P + W \quad Fx_f := Px_p + Wx_w$$

Отсюда находим:

$$W := \frac{F \cdot (x_p - x_f)}{x_p - x_w} = 16.673 \text{ кг/ч} - \text{массовый расход по кубовому остатку}$$

$$P := F - W = 69.327 \text{ кг/ч} - \text{массовый расход по дисциллятору}$$

$$D := F \cdot 25\% = 21.5 \text{ кг/ч} - \text{массовый расход флегмы}$$

Молекулярная масса:

Гексен-1  $M_{Г1} := 84$  кг/моль

Циклогексана  $M_{ЦГ} := 84$  кг/моль

Пересчитаем составы фаз из массовых долей в мольные по соотношению:

$$x_f := \frac{\frac{x_f}{M_{Г1}}}{\frac{x_f}{M_{Г1}} + \frac{(1 - x_f)}{M_{ЦГ}}} = 0.8 \quad \text{кмоль/кмоль смеси}$$

$$x_p := \frac{\frac{x_p}{M_{Г1}}}{\frac{x_p}{M_{Г1}} + \frac{(1-x_p)}{M_{ЦГ}}} = 0.99 \quad \text{кмоль/кмоль смеси}$$

$$x_w := \frac{\frac{x_w}{M_{Г1}}}{\frac{x_w}{M_{Г1}} + \frac{(1-x_w)}{M_{ЦГ}}} = 0.01 \quad \text{кмоль/кмоль смеси}$$

Рассчитываем истроим линию равновесия смеси гексен-1 - циклогексан при общем давлении П=760 мм.рт.ст.

$$t_{\text{кип.Г1}} := 63.485 \quad \text{температура кипения гексен-1 при П=760 мм.рт.ст}$$

$$t_{\text{кип.ЦГ}} := 80.76 \quad \text{температура кипения циклогексана при П=760 мм.рт.ст}$$

$$П := 760 \quad \text{мм.рт.ст}$$

Давление насыщенного пара гексен-1 P<sub>Г1</sub>

Давление насыщенного пара циклогексана P<sub>ЦГ</sub>

$$P_{Г1.63.485} := 765.94 \quad \text{мм.рт.ст} \quad P_{ЦГ.63.485} := 442.54 \quad \text{мм.рт.ст}$$

$$P_{Г1.65} := 804.745 \quad \text{мм.рт.ст} \quad P_{ЦГ.65} := 466.51 \quad \text{мм.рт.ст}$$

$$P_{Г1.70} := 929.92 \quad \text{мм.рт.ст} \quad P_{ЦГ.70} := 543.83 \quad \text{мм.рт.ст}$$

$$P_{Г1.75} := 1088.485 \quad \text{мм.рт.ст} \quad P_{ЦГ.75} := 643.55 \quad \text{мм.рт.ст}$$

$$P_{Г1.80} := 1247.05 \quad \text{мм.рт.ст} \quad P_{ЦГ.80} := 743.28 \quad \text{мм.рт.ст}$$

$$P_{Г1.80.76} := 1277.02 \quad \text{мм.рт.ст} \quad P_{ЦГ.80.76} := 760 \quad \text{мм.рт.ст}$$

Рассчитываем содержание гексен-1 в жидкости X<sub>Г1</sub>:

$$X_{Г1.63.485} := \frac{П - P_{ЦГ.63.485}}{P_{Г1.63.485} - P_{ЦГ.63.485}} = 0.982 \quad \text{мольные доли}$$

$$X_{Г1.65} := \frac{П - P_{ЦГ.65}}{P_{Г1.65} - P_{ЦГ.65}} = 0.868 \quad \text{мольные доли}$$

$$X_{Г1.70} := \frac{П - P_{ЦГ.70}}{P_{Г1.70} - P_{ЦГ.70}} = 0.56 \quad \text{мольные доли}$$

$$X_{Г1.75} := \frac{П - P_{ЦГ.75}}{P_{Г1.75} - P_{ЦГ.75}} = 0.262 \quad \text{мольные доли}$$

$$X_{Г1.80} := \frac{П - P_{ЦГ.80}}{P_{Г1.80} - P_{ЦГ.80}} = 0.033 \quad \text{мольные доли}$$

$$X_{Г1.80.76} := \frac{П - P_{ЦГ.80.76}}{P_{Г1.80.76} - P_{ЦГ.80.76}} = 0 \quad \text{мольные доли}$$

Рассчитываем содержание Гексен-1 в паре Y\*Г1:

$$Y_{Г1.63.485} := \frac{P_{Г1.63.485}}{П} \cdot X_{Г1.63.485} = 0.989 \quad \text{мольные доли}$$

$$Y_{Г1.65} := \frac{P_{Г1.65}}{П} \cdot X_{Г1.65} = 0.919 \quad \text{мольные доли}$$

$$Y_{Г1.70} := \frac{P_{Г1.70}}{П} \cdot X_{Г1.70} = 0.685 \quad \text{мольные доли}$$

$$Y_{Г1.75} := \frac{P_{Г1.75}}{П} \cdot X_{Г1.75} = 0.375 \quad \text{мольные доли}$$

$$Y_{Г1.80} := \frac{P_{Г1.80}}{П} \cdot X_{Г1.80} = 0.054 \quad \text{мольные доли}$$

$$Y_{Г1.80.76} := \frac{P_{Г1.80.76}}{П} \cdot X_{Г1.80.76} = 0 \quad \text{мольные доли}$$

Строим графическое изображение линии равновесия гексен-1 - циклогексан смеси при П=760 мм.рт.ст

$$X := \begin{pmatrix} X_{Г1.63.485} \\ X_{Г1.65} \\ X_{Г1.70} \\ X_{Г1.75} \\ X_{Г1.80} \\ X_{Г1.80.76} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.982 \\ 0.868 \\ 0.56 \\ 0.262 \\ 0.033 \\ 0 \end{pmatrix} \quad Y := \begin{pmatrix} Y_{Г1.63.485} \\ Y_{Г1.65} \\ Y_{Г1.70} \\ Y_{Г1.75} \\ Y_{Г1.80} \\ Y_{Г1.80.76} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.989 \\ 0.919 \\ 0.685 \\ 0.375 \\ 0.054 \\ 0 \end{pmatrix}$$

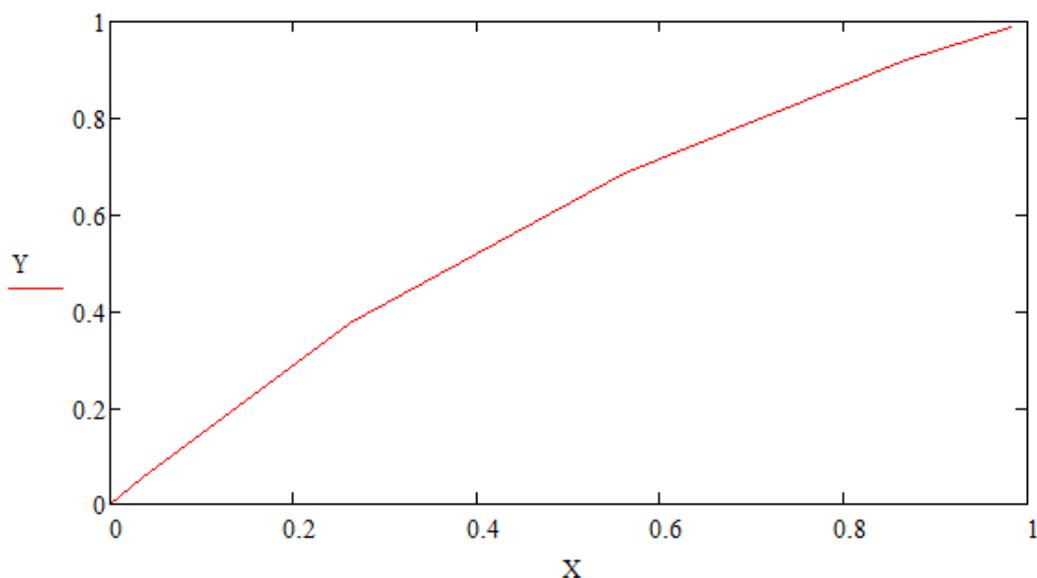


График 2.1. Линия равновесия смеси гексен-1 - циклогексан при П=760 мм.рт.ст.

По графику 2.1 при  $X_f=0.8$  находим концентрацию летучего компонента  $Y_f^*=0.89$

$$Y_f := 0.89$$

Находим минимальное флегмовое число  $R_{\min}$ :

$$R_{\min} := \frac{x_p - Y_f}{Y_f - x_F} = 1.1$$

Задаемся значениями коэффициента избытка флегмы  $\beta$ :

$$\beta_1 := 1.75 \quad \beta_2 := 2.35 \quad \beta_3 := 3.3 \quad \beta_4 := 4.5 \quad \beta_5 := 5.6 \quad \beta_6 := 6.25$$

Из формулы  $\beta := \frac{R}{R_{\min}}$  находим значения рабочего флегмового числа  $R$ :

$$R_1 := \beta_1 \cdot R_{\min} = 1.944$$

$$R_2 := \beta_2 \cdot R_{\min} = 2.611$$

$$R_3 := \beta_3 \cdot R_{\min} = 3.667$$

$$R_4 := \beta_4 \cdot R_{\min} = 5$$

$$R_5 := \beta_5 \cdot R_{\min} = 6.222$$

$$R_6 := \beta_6 \cdot R_{\min} = 6.944$$

Средний состав перегнанной жидкости  $X_D$ :

$$X_D := \frac{F \cdot x_F - W \cdot x_W}{F - W} = 0.99$$

Записываем уравнение рабочих линий для верхней части ректификационной колонны:

$$y := \frac{R}{R+1} \cdot x + \frac{X_D}{R+1}$$

При  $x := 0$  находим координату  $y$  для каждого рабочего флегмового числа:

$$y_1 := \frac{R_1}{R_1+1} \cdot x + \frac{X_D}{R_1+1} \quad y_{1w} := 0.34$$

$$y_2 := \frac{R_2}{R_2+1} \cdot x + \frac{X_D}{R_2+1} \quad y_{2w} := 0.28$$

$$y_3 := \frac{R_3}{R_3+1} \cdot x + \frac{X_D}{R_3+1} \quad y_{3w} := 0.21$$

$$y_4 := \frac{R_4}{R_4+1} \cdot x + \frac{X_D}{R_4+1} \quad y_{4w} := 0.17$$

$$y_5 := \frac{R_5}{R_5+1} \cdot x + \frac{X_D}{R_5+1} \quad y_{5w} := 0.14$$

$$y_6 := \frac{R_6}{R_6+1} \cdot x + \frac{X_D}{R_6+1} \quad y_{6w} := 0.12$$

По графику 2.1 находим общее число тарелок для каждого случая:

$$N_1 := 21 \quad N_2 := 20 \quad N_3 := 18 \quad N_4 := 19 \quad N_5 := 17 \quad N_6 := 18$$

$$N_1 \cdot (R_1 + 1) = 61.833$$

$$N_2 \cdot (R_2 + 1) = 72.222$$

$$N_3 \cdot (R_3 + 1) = 84$$

$$N_4 \cdot (R_4 + 1) = 114$$

$$N_5 \cdot (R_5 + 1) = 122.778$$

$$N_6 \cdot (R_6 + 1) = 143$$

Строим зависимость общего числа тарелок  $N(R+1)$  от флегмового числа  $R$

$$Y := \begin{bmatrix} N_1 \cdot (R_1 + 1) \\ N_2 \cdot (R_2 + 1) \\ N_3 \cdot (R_3 + 1) \\ N_4 \cdot (R_4 + 1) \\ N_5 \cdot (R_5 + 1) \\ N_6 \cdot (R_6 + 1) \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 61.833 \\ 72.222 \\ 84 \\ 114 \\ 122.778 \\ 143 \end{pmatrix} \quad X := \begin{pmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \\ R_4 \\ R_5 \\ R_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.944 \\ 2.611 \\ 3.667 \\ 5 \\ 6.222 \\ 6.944 \end{pmatrix}$$

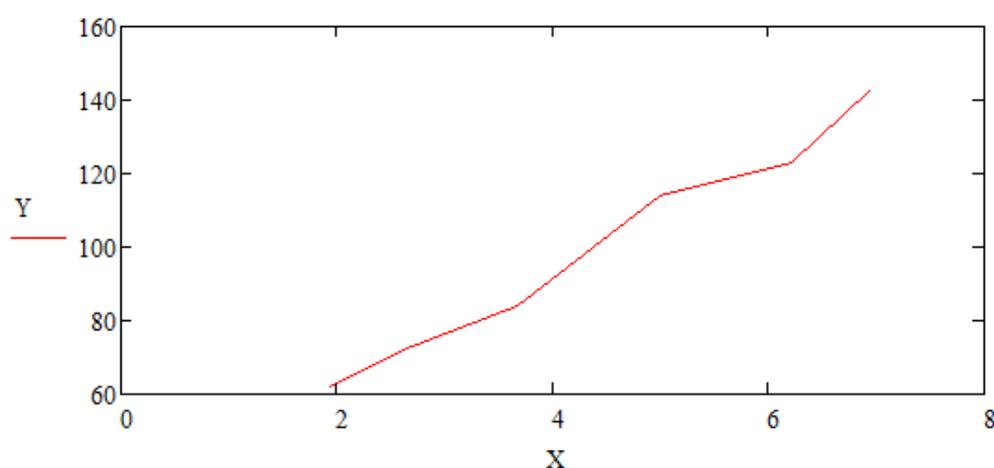


График 2.2. - Зависимость общего числа тарелок от флегмового числа

По графику 2.2 находим минимальное произведение  $N(R+1)$  соответствует флегмовому числу  $R := 1.944$

При этом коэффициент избытка флегмы:  $\beta := \frac{R}{R_{\min}} = 1.75$

Средние массовые расходы (нагрузки) по жидкости для верхней и нижней частей колонны определяются из соотношений:

$$L_{\text{в}} := \frac{P \cdot R \cdot M_{\text{в}}}{M_{\text{п}}}$$

$$L_{\text{н}} := \frac{(P \cdot R \cdot M_{\text{н}})}{M_{\text{п}}} + \frac{F \cdot M_{\text{н}}}{M_{\text{ф}}}$$

Находим средний мольный состав жидкости соответственно в верхней и нижней части колонны:

$$x_{\text{ср.в}} := \frac{(x_p + x_f)}{2} = 0.895 \quad \text{кмоль/кмоль смеси}$$

$$x_{\text{ср.н}} := \frac{(x_f + x_w)}{2} = 0.405 \quad \text{кмоль/кмоль смеси}$$

Отсюда средние мольные массы жидкости в верхней и нижней частях колонны соответственно равны:

$$M_{\text{в}} := M_{\Gamma 1} \cdot x_{\text{ср.в}} + M_{\text{ЦГ}} \cdot (1 - x_{\text{ср.в}}) = 84 \quad \text{кг/моль}$$

$$M_{\text{н}} := M_{\Gamma 1} \cdot x_{\text{ср.н}} + M_{\text{ЦГ}} \cdot (1 - x_{\text{ср.н}}) = 84 \quad \text{кг/моль}$$

Мольная масса исходной смеси:

$$M_{\text{F}} := M_{\Gamma 1} \cdot x_{\text{F}} + M_{\text{ЦГ}} \cdot (1 - x_{\text{F}}) = 84 \quad \text{кг/моль}$$

Подставляем полученные значения в уравнения:

$$L_{\text{в}} := \frac{P \cdot R \cdot M_{\text{в}}}{M_{\Gamma 1}} = 134.771 \quad \text{кг/ч}$$

$$L_{\text{н}} := \frac{P \cdot R \cdot M_{\text{н}}}{M_{\Gamma 1}} + \frac{F \cdot M_{\text{н}}}{M_{\text{F}}} = 220.771 \quad \text{кг/ч}$$

Средние массовые потоки пара в верхней  $G_{\text{в}}$  и нижней  $G_{\text{н}}$  частях колонны:

$$G_{\text{в}} := \frac{P \cdot (R + 1) \cdot \overline{M_{\text{в}}}}{M_{\text{p}}} \quad G_{\text{н}} := \frac{P \cdot (R + 1) \cdot \overline{M_{\text{н}}}}{M_{\text{p}}}$$

По графику 2.1 определяем значения концентраций легколетучего компонента в паре  $y_{\text{w}}$ ,  $y_{\text{f}}$ ,  $y_{\text{p}}$ :

$$y_{\text{w}} := 0.01 \quad \text{при} \quad x_{\text{w}} = 0.01$$

$$y_{\text{f}} := 0.88 \quad \text{при} \quad x_{\text{f}} = 0.8$$

$$y_{\text{p}} := 0.99 \quad \text{при} \quad x_{\text{p}} = 0.99$$

Находим средний мольный состав пара соответственно в верхней и нижней частях колонны:

$$y_{\text{ср.в}} := \frac{(y_{\text{p}} - y_{\text{f}})}{2} = 0.055 \quad \text{кмоль/кмоль смеси}$$

$$y_{\text{ср.н}} := \frac{(y_{\text{f}} - y_{\text{w}})}{2} = 0.435 \quad \text{кмоль/кмоль смеси}$$

Тогда средние мольные массы паров в верхней и нижней частях колонны равны:

$$M_{\text{в}} := M_{\Gamma 1} \cdot y_{\text{ср.в}} + M_{\text{ЦГ}} \cdot (1 - y_{\text{ср.в}}) = 84 \quad \text{кг/моль}$$

$$M_{\text{н}} := M_{\Gamma 1} \cdot y_{\text{ср.н}} + M_{\text{ЦГ}} \cdot (1 - y_{\text{ср.н}}) = 84 \quad \text{кг/моль}$$

Подставляем полученные значения в уравнения:

$$G_B := \frac{P \cdot (R + 1) \cdot M_B}{M_{Г1}} = 204.097 \quad \text{кг/ч}$$

$$G_H := \frac{P \cdot (R + 1) \cdot M_H}{M_{Г1}} = 204.097 \quad \text{кг/ч}$$

### 2.1.2. Скорость пара и диаметр колонны

Определяем согласно [2].

Определяем фиктивную скорость пара  $\omega_{\Pi}$ , при которой происходит захлебывание насадочных колонн, определяем по уравнению:

$$\frac{\omega_{\Pi}^2 \cdot a \cdot \rho_y \cdot \mu_x^{0.16}}{g \cdot \varepsilon^3 \cdot \rho_x} := 1.2 \cdot \exp \left[ -4 \cdot \left( \frac{L}{G} \right)^{0.25} \cdot \left( \frac{\rho_y}{\rho_x} \right)^{0.125} \right]$$

В колонне используем регулярную насадку состоящую из гофрированного стального листа толщиной  $h=0.5$  мм

$$a := 375 \quad \text{м}^2/\text{м}^3 \text{ - удельная поверхность насадки}$$

$$\varepsilon := 0.95 \quad \text{м}^3/\text{м}^3 \text{ - свободный объем}$$

$$g := 9.8 \quad \text{м} \text{ - ускорение свободного падения}$$

$$\pi = 3.142$$

Найдем плотности жидкости  $\rho_{XB}$ ,  $\rho_{XH}$  и пара  $\rho_{YB}$ ,  $\rho_{YH}$  в верхней и нижней частях колонны при средних температурах в них  $t_{срв}$  и  $t_{срн}$ . Средние температуры паров определим по диаграмме  $t$ - $y$  по средним составам фаз:

$$t := \begin{pmatrix} 63.485 \\ 65 \\ 70 \\ 75 \\ 80 \\ 80.7 \end{pmatrix} \quad x := \begin{pmatrix} X_{Г1.63.485} \\ X_{Г1.65} \\ X_{Г1.70} \\ X_{Г1.75} \\ X_{Г1.80} \\ X_{Г1.80.76} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.982 \\ 0.868 \\ 0.56 \\ 0.262 \\ 0.033 \\ 0 \end{pmatrix} \quad y := \begin{pmatrix} Y_{Г1.63.485} \\ Y_{Г1.65} \\ Y_{Г1.70} \\ Y_{Г1.75} \\ Y_{Г1.80} \\ Y_{Г1.80.76} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.989 \\ 0.919 \\ 0.685 \\ 0.375 \\ 0.054 \\ 0 \end{pmatrix}$$

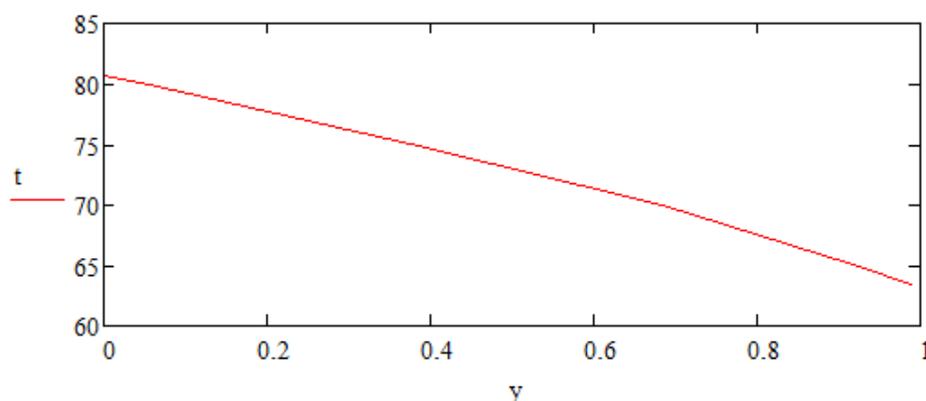


График 2.3. - Диаграмма средних составов фаз  $t$  -  $y$

По графику 2.3 определяем  $x_f$ ,  $x_p$ ,  $x_w$

$$t_f := 67.5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{при} \quad x_f = 0.8$$

$$t_p := 64 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{при} \quad x_p = 0.99$$

$$t_w := 80.5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{при} \quad x_w = 0.01$$

$$t_{\text{ср.в}} := \frac{t_f + t_p}{2} = 65.75 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ - средняя температура паров в верхней части колонны}$$

$$t_{\text{ср.н}} := \frac{t_f + t_w}{2} = 74 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ - средняя температура паров в нижней части колонны}$$

$$T_0 := 273 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\rho_{\text{ув}} := \frac{M_{\text{в}}}{22.4} \cdot \frac{T_0}{T_0 + t_{\text{ср.в}}} = 3.022 \text{ кг/м}^3$$

$$\rho_{\text{ун}} := \frac{M_{\text{н}}}{22.4} \cdot \frac{T_0}{T_0 + t_{\text{ср.н}}} = 2.95 \text{ кг/м}^3$$

Плотность физических смесей жидкостей подчиняется закону аддитивности:

$$\rho_{\text{см}} := \rho_1 \cdot x_{\text{об}} + \rho_2(1 - x_{\text{об}})$$

$x_{\text{об}} := 0.98$  - объемная доля компонента в смеси

$$\rho_{\Gamma 1\text{в}} := 629.7 \text{ кг/м}^3 \quad \rho_{\text{ЦГв}} := 735 \text{ кг/м}^3 \text{ - плотность гексен-1 и циклогексана при } 65 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\rho_{\Gamma 1\text{н}} := 619 \text{ кг/м}^3 \quad \rho_{\text{ЦГн}} := 720 \text{ кг/м}^3 \text{ - плотность гексен-1 и циклогексана при } 74 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\rho_1 := 625 \text{ кг/м}^3 \text{ - плотность гексен-1 при средней температуре } 69.5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\rho_2 := 727 \text{ кг/м}^3 \text{ - плотность циклогексана при средней температуре } 69.5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\rho_{\text{см}} := \rho_1 \cdot x_{\text{об}} + \rho_2 \cdot (1 - x_{\text{об}}) = 627.04 \text{ кг/м}^3$$

Вязкость жидких смесей  $\mu_x$  находим по уравнению:

$$\log \mu_x := x_{\text{ср}} \cdot \log \mu_{x\Gamma 1} + (1 - x_{\text{ср}}) \cdot \log \mu_{x\text{ЦГ}}$$

$$\mu_{x\Gamma 1\text{в}} := 0.17 \text{ МПа} \cdot \text{с} \text{ - вязкость гексен-1 при } 65 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\mu_{x\text{ЦГв}} := 0.798 \text{ МПа} \cdot \text{с} \text{ - вязкость циклогексана при } 65 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\mu_{x\Gamma 1\text{н}} := 0.157 \text{ МПа} \cdot \text{с} \text{ - вязкость гексен-1 при } 74 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\mu_{x\text{ЦГн}} := 0.815 \text{ МПа} \cdot \text{с} \text{ - вязкость циклогексана при } 74 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\log \mu_{x\text{в}} := x_{\text{ср.в}} \cdot \log(\mu_{x\Gamma 1\text{в}}) + (1 - x_{\text{ср.в}}) \cdot \log(\mu_{x\text{ЦГв}}) = -0.699$$

$$\log \mu_{x\text{н}} := x_{\text{ср.н}} \cdot \log(\mu_{x\Gamma 1\text{н}}) + (1 - x_{\text{ср.н}}) \cdot \log(\mu_{x\text{ЦГн}}) = -0.379$$

Отсюда:

$$\mu_{\text{XB}} := 10^{\log \mu_{\text{XB}}} = 0.2 \quad \text{МПа} \cdot \text{с}$$

$$\mu_{\text{XH}} := 10^{\log \mu_{\text{XH}}} = 0.418 \quad \text{МПа} \cdot \text{с}$$

Поскольку отношения L/G и физические свойства фаз в верхней и нижней частях колонны различны, определим скорости захлебывания для каждой части отдельно.

Предельная скорость паров в верхней части колонны  $\omega_{\text{ТВ}}$ :

$$\omega_{\text{ТВ}}^2 := \frac{\left[ 1.2 \cdot \exp \left[ -4 \cdot \left( \frac{L_{\text{В}}}{G_{\text{В}}} \right)^{0.25} \cdot \left( \frac{\rho_{\text{УВ}}}{\rho_{\text{Г1В}}} \right)^{0.125} \right] \right] \cdot (g \cdot \epsilon^3 \cdot \rho_{\text{Г1В}})}{a \cdot \rho_{\text{УВ}} \cdot \mu_{\text{XB}}^{0.16}} = 1.14$$

$$\omega_{\text{ТВ}} := \sqrt{1.14} = 1.068 \quad \text{м/с}$$

Предельная скорость паров в нижней части колонны  $\omega_{\text{ТН}}$

$$\omega_{\text{ТН}}^2 := \frac{\left[ 1.2 \cdot \exp \left[ -4 \cdot \left( \frac{L_{\text{Н}}}{G_{\text{Н}}} \right)^{0.25} \cdot \left( \frac{\rho_{\text{УН}}}{\rho_{\text{Г1Н}}} \right)^{0.125} \right] \right] \cdot (g \cdot \epsilon^3 \cdot \rho_{\text{Г1Н}})}{a \cdot \rho_{\text{УН}} \cdot \mu_{\text{XH}}^{0.16}} = 0.969$$

$$\omega_{\text{ТН}} := \sqrt{0.969} = 0.984 \quad \text{м/с}$$

Примем рабочую скорость  $\omega$  на 30% ниже предельной:

$$\omega_{\text{В}} := 0.7 \cdot \omega_{\text{ТВ}} = 0.747 \quad \text{м/с} \quad \omega_{\text{Н}} := 0.7 \cdot \omega_{\text{ТН}} = 0.689 \quad \text{м/с}$$

Диаметр ректификационной колонны определим из уравнения расхода:

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

Отсюда диаметры верхней и нижней части колонны равны соответственно:

$$G_{\text{В}} = 204.097 \quad \text{кг/с} \quad G_{\text{Н}} = 204.097 \quad \text{кг/с}$$

$$G_{\text{УВ}} := \frac{204.097}{3600} = 0.057 \quad \text{кг/с} \quad G_{\text{УН}} := \frac{204.097}{3600} = 0.057 \quad \text{кг/с}$$

$$d_{\text{В}} := \sqrt{\frac{4 \cdot G_{\text{В}}}{(\pi \cdot \omega_{\text{В}} \cdot \rho_{\text{УВ}})}} = 0.179 \quad \text{м}$$

$$d_{\text{Н}} := \sqrt{\frac{4 \cdot G_{\text{Н}}}{(\pi \cdot \omega_{\text{Н}} \cdot \rho_{\text{УН}})}} = 0.188 \quad \text{м}$$

Рационально принять стандартный диаметр обечайки  $d=0.4$  одинаковым для обеих частей колонны. При этом действительные рабочие скорости паров в колонне равны:

$$d := 0.4 \text{ м}$$

$$\omega_{\text{ДВ}} := \omega_{\text{В}} \cdot \left( \frac{d_{\text{В}}}{d} \right) = 0.334 \text{ м/с}$$

$$\omega_{\text{ДН}} := \omega_{\text{Н}} \cdot \left( \frac{d_{\text{Н}}}{d} \right) = 0.325 \text{ м/с}$$

что составляет соответственно 31 и 33% от предельных скоростей

Определяем эквивалентную высоту насадки  $h_3$  для верхней и нижней части колонны по уравнению:

$$h_3 := 5.2 \cdot d_3 \cdot \text{Re}_{\text{п}}^{0.2} \cdot \left( \frac{G}{L} \right)^{0.35} \cdot \left( \frac{\rho_{\text{ж}}}{\rho_{\text{п}}} \right)^{0.2} \cdot \frac{\log\left(\frac{L}{m \cdot G}\right)}{1 - \frac{m \cdot G}{L}}$$

Эквивалентный диаметр насадки:

$$d_3 := \frac{4 \cdot \varepsilon}{a} = 0.01$$

Критерий Рейнольдса для верхней и нижней части:

$$\mu_{\text{пГ1}} := 0.78 \cdot 10^{-5} \text{ вязкость пара Гексен-1 по справочнику при } 65 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\mu_{\text{пЦг}} := 0.817 \cdot 10^{-5} \text{ вязкость пара Циклогексан по справочнику при } 75 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{Re}_{\text{Г1}} := \frac{4 \cdot \omega_{\text{ДВ}} \cdot \rho_{\text{ув}}}{a \cdot \mu_{\text{пГ1}}} = 1.38 \times 10^3$$

$$\text{Re}_{\text{Цг}} := \frac{4 \cdot \omega_{\text{ДН}} \cdot \rho_{\text{ун}}}{a \cdot \mu_{\text{пЦг}}} = 1.25 \times 10^3$$

$$G := R + 1$$

$$L := R$$

$$m_{\text{Г1}} := 0.6 \text{ для гексен-1}$$

$$m_{\text{Цг}} := 1.07 \text{ для циклогексана}$$

- для верхней части колонны:

$$h_{\text{эВ}} := 5.2 \cdot d_3 \cdot \text{Re}_{\text{Г1}}^{0.2} \cdot \left( \frac{G}{L} \right)^{0.35} \cdot \left( \frac{\rho_{\text{Г1В}}}{\rho_{\text{ув}}} \right)^{0.2} \cdot \frac{\log\left(\frac{L}{m_{\text{Г1}} \cdot G}\right)}{1 - \frac{m_{\text{Г1}} \cdot G}{L}} = 0.343 \text{ м}$$

- для нижней части колонны:

$$h_{\text{эН}} := 5.2 \cdot d_3 \cdot \text{Re}_{\text{Цг}}^{0.2} \cdot \left( \frac{G}{L} \right)^{0.35} \cdot \left( \frac{\rho_{\text{ЦгН}}}{\rho_{\text{ун}}} \right)^{0.2} \cdot \frac{\log\left(\frac{L}{m_{\text{Цг}} \cdot G}\right)}{1 - \frac{m_{\text{Цг}} \cdot G}{L}} = 0.257 \text{ м}$$

Как следует из графика 2.1,  $m_{Г1} = 0.6$ ,  $m_{ЦГ} = 1.07$ , число ступеней изменения в пределах от  $x_p = 0.99$  до  $x_f = 0.8$  составляет  $n_{ТВ} = 7$ , а в пределах от  $x_f = 0.8$  до  $x_w = 0.01$  составляет  $n_{ТН} = 14$ . Следовательно, требуемая высота насадки по уравнению:

$$n_{ТВ} := 7 \quad \text{- число ступеней в верхней части}$$

$$n_{ТН} := 14 \quad \text{- число ступеней в нижней части}$$

$$H_B := n_{ТВ} \cdot h_{ЭВ} = 2.4 \quad \text{м- требуемая высота насадки для верхней части}$$

$$H_H := n_{ТН} \cdot h_{ЭН} = 3.603 \quad \text{м - требуемая высота насадки для нижней части}$$

Принимаем высоту насадки для нижней части  $H_H = 3200$  мм, а для верхней принимаем две насадки каждая высотой  $H_B = 2560$  мм.

$$\underline{H_H} := 3.2 \quad \text{м}$$

$$\underline{H_B} := 2.56 \quad \text{м}$$

Принимаем общую высоту цилиндрической части колонны  $H_K = 13500$  мм без крышек.

$$H_K := 13.5 \quad \text{м}$$

## 2.2. Конструктивный расчёт ректификационной колонны

### 2.2.1. Расчет патрубков и подбор фланцев

Расчёт патрубков производим по [3].

Для ввода исходной смеси:

$W_{исх} := 0.1$  м/с - скорость течения исходной смеси в патрубке

Объемный расход:

$$V_{исх} := \frac{F}{\rho_{см}} = \frac{3600}{\rho_{см}} = 3.81 \times 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$$

$$D_{исх} := \sqrt{\frac{V_{исх} \cdot 4}{\pi \cdot W_{исх}}} = 0.022 \text{ м}$$

Принимаем диаметр патрубка для ввода исходной смеси:

$$D_{исх} := 25 \text{ мм}$$

Для вывода кубового остатка:

$W_{куб} := 0.05$  м/с - скорость течения кубового остатка в патрубке

Объемный расход:

$$V_{куб} := \frac{W}{\rho_{Цгн}} = \frac{3600}{\rho_{Цгн}} = 6.433 \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$$

$$D_{куб} := \sqrt{\frac{V_{куб} \cdot 4}{\pi \cdot W_{куб}}} = 0.013 \text{ м}$$

Принимаем диаметр патрубка для вывода кубового остатка:

$$D_{исх} := 50 \text{ мм}$$

Для выхода паров из колонны:

$W_{пар} := 2$  м/с - скорость выхода паров в патрубке

Объемный расход:

$$V_{пар} := \frac{P}{\rho_{ув}} = \frac{3600}{\rho_{ув}} = 6.372 \times 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$$

$$D_{пар} := \sqrt{\frac{V_{пар} \cdot 4}{\pi \cdot W_{пар}}} = 0.064 \text{ м}$$

Принимаем диаметр патрубка для орошения колонны:

$$D_{\text{патр.}} := 15 \text{ мм}$$

По [4] подобрали фланцевые соединения для патрубков с привалочной поверхностью "шип паз" на условное давление  $P_y = 1$  МПа. Выбрали фланцы этого исполнения, т.к. в колонне находится взрывопожароопасная среда под давлением  $P_p = 0.6$  МПа.

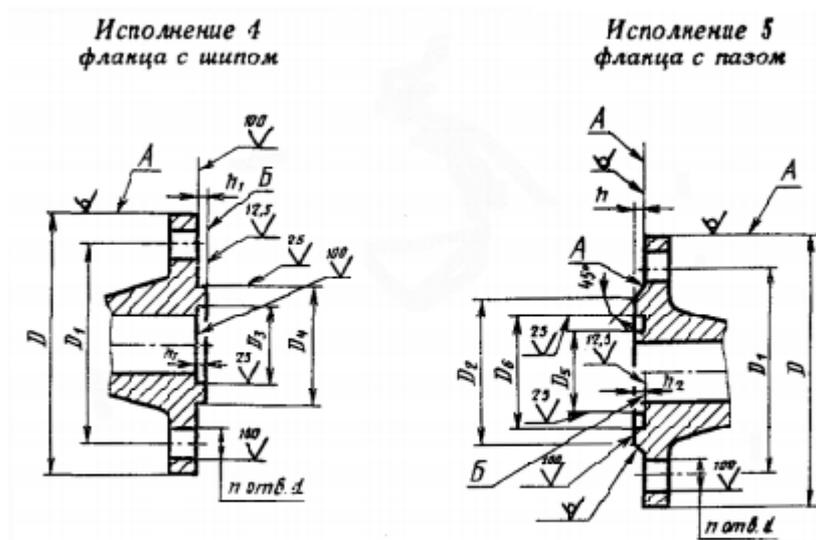


Рисунок 2.1 - Фланцы приварные встык с привалочной поверхностью "Шип-паз"

Таблица 2.1 - Параметры фланцевых соединений

| Проект условный<br>$D_p$ | $D$ | $D_1$ | $D_2$ | $D_3$ |       | $D_4$ |       | $D_5$ |       | $D_6$ |       | $d$ | $n$ | $h$ | $h_1$ |       | $h_2$ |       | $B$ | Номинальный диаметр болтов или шпилек |  |
|--------------------------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|-----|-----|-------|-------|-------|-------|-----|---------------------------------------|--|
|                          |     |       |       | Ряд 1 | Ряд 2 |     |     |     | Ряд 1 | Ряд 2 | Ряд 1 | Ряд 2 |     |                                       |  |
|                          |     |       |       | Ряд 1 | Ряд 2 |     |     |     | Ряд 1 | Ряд 2 | Ряд 1 | Ряд 2 |     |                                       |  |
| 15                       | 95  | 65    | 47    | 29    | 39    | 28    | 40    | 14    | 14    |       |       | 2   |     |     |       |       |       | 75    |     |                                       |  |
| 25                       | 115 | 85    | 68    | 43    | 57    | 42    | 58    |       |       | 4     | 4     |     | 4   |     | 3     |       |       | 90    | M12 | M12                                   |  |
| 50                       | 160 | 125   | 102   | 73    | 87    | 72    | 88    | 18    | 18    |       |       |     | 4   |     | 3     |       |       | 125   | M16 | M16                                   |  |
| 100                      | 215 | 180   | 158   | 129   | 149   | 128   | 150   |       |       |       |       |     | 3   |     | 4,5   |       | 3,5   |       |     |                                       |  |

## 2.3. Прочностной расчёт ректификационной колонны

Все рассчитываемые узлы ректификационной колонны (цилиндрическая обечайка, эллиптические крышка и днище, фланцевые соединения, опорная обечайка) изготовлены из стали 09Г2С.

Сталь 09Г2С конструкционная низколегированная для сварных конструкций. Выбрали эту сталь т.к. изготовленное из неё оборудование переносит повышенные нагрузки как силовые, так и механические, в том числе резкие перепады температуры. Допустимый диапазон от минус 70 до плюс 450.

Физические свойства стали 09Г2С достаточны для того, чтобы обеспечить прочность фасонного, сортового и полосового металлопроката при различных толщинах (от 10 до 100мм). При этом какой-либо дополнительной обработки не потребуется.

### 2.3.1. Расчёт толщины стенок

Целью расчёта толщины стенок цилиндрической обечайки и эллиптических крышки и днища, является проверка условий прочности. Расчёт ведётся согласно [6], а также в соответствии с рекомендациями, изложенными в [7] и пособии [8].

#### 2.3.1.1. Расчёт толщины стенки цилиндрической обечайки:

##### Исходные данные:

|                                 |                |
|---------------------------------|----------------|
| Внутренний диаметр, мм          | $D := 400$     |
| Высота ёмкости, мм              | $L := 13700$   |
| Высота цилиндрической части, мм | $H_K := 13500$ |
| Рабочее давление, МПа           | $P := 0.6$     |
| Температура среды, °С           | $t_{cp} := 80$ |
| Скорость коррозии, мм/год       | $\Pi := 0.1$   |
| Срок эксплуатации, лет          | $Y := 20$      |

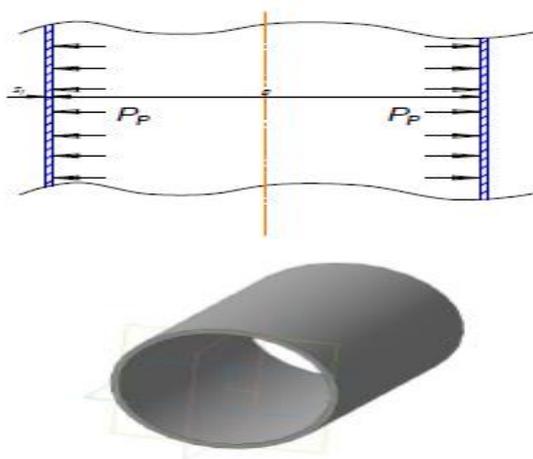


Рисунок 2.2. - Расчётная схема обечайки

Согласно таблице А.1 [6] и примечанию к ней:

$$x := (20 \ 100)^T$$

$$y := (196 \ 177)^T$$

$$\sigma_{tcp} := \text{Floor}(\text{linterp}(x, y, 80), 0.5) = 181.5 \text{ МПа}$$

Допускаемое напряжение для стали марки 09Г2С при 80 °С, МПа  $\sigma_{tcp} = 181.5$

Допускаемое напряжение для стали марки 09Г2С при нормальных условиях по таблице А.1 [6], МПа  $\sigma_{20} := 196$

Плотность воды, кг/м<sup>3</sup>  $\rho := 1000$

Коэффициент запаса прочности  $\eta := 1$

Ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>  $g := 9.81$

Расчётное значение предела текучести для стали марки 09Г2С при 20 °С по таблице Б.1 [6], МПа  $R_e := 300$

Коэффициент запаса прочности при гидравлическом испытании по таблице 1 [6];  $n_T := 1.1$

Расчетное значение внутреннего избыточного давления:

$$P_p := P + \frac{\rho \cdot g \cdot L}{10^9} = 0.734 \text{ МПа}$$

Допускаемое напряжение для стали 09Г2С при гидравлических испытаниях

$$\sigma_{и} := \text{Floor}\left(\frac{R_e}{1.1}, 0.5\right) \quad \sigma_{и} = 272.5 \text{ МПа}$$

Пробное давление при гидравлическом испытании внутри аппарата:

$$\sigma_{20} = 196 \text{ МПа} \quad \sigma_{д20} := \eta \cdot \sigma_{20} \quad \sigma_{д20} = 196 \text{ МПа}$$

$$P_{пр} := 1.25 \cdot P_p \cdot \frac{\sigma_{д20}}{\sigma_{tcp}} = 0.991 \text{ МПа}$$

Вид сварного шва и способ сварки:

Согласно [6] по таблице Д.1

Стыковой, выполняемый вручную с одной стороны. Длина контролируемых швов от общей длины составляет 100 %\*.

$$\phi_p := 0.9$$

Расчет толщины стенки при гидравлическом испытании и при рабочем давлении.

Расчет толщины стенки цилиндрической обечайки:

$$s_p := \max\left[\frac{P_p \cdot D}{(2 \cdot \phi_p \cdot \sigma_{tcp} - P_p)}, \frac{P_{пр} \cdot D}{(2 \cdot \phi_p \cdot \sigma_{и} - P_{пр})}\right] = 0.901 \text{ мм}$$

$$s_{\text{рцо}} := 0.9 \text{ мм}$$

Добавка на коррозию и на компенсацию минусового допуска:

$$c1 := Y \cdot \Pi = 2 \quad \text{мм} \quad c \text{ — сумма прибавок к расчетным толщинам стенок, мм;}$$

$$c2 := 0.8 \quad \text{мм} \quad c1 \text{ — прибавка для компенсации коррозии и}$$

$$c := c1 + c2 = 2.8 \quad \text{мм} \quad \text{эрозии, мм;}$$

$$S_{\text{ЦО}} := s_{\text{рцо}} + c = 3.7 \quad \text{мм} \quad c2 \text{ — прибавка для компенсации минусового допуска, мм;}$$

Принимаем исполнительную толщину стенки цилиндрической обечайки с учетом ряда стандартных толщин

$$s_1 := 5 \quad \text{мм}$$

Проверка на условие прочности

Допускаемое внутреннее избыточное давление:

- в рабочих условиях

$$P_{d1} := \frac{2 \cdot \sigma_{\text{tcp}} \cdot \phi_p \cdot (s_1 - c)}{D + (s_1 - c)} = 1.787 \text{ МПа}$$

$$U_{s1} := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } P \leq P_{d1} \\ \text{"Условия прочности НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$U_{s1} = \text{"Условие прочности выполняется"}$$

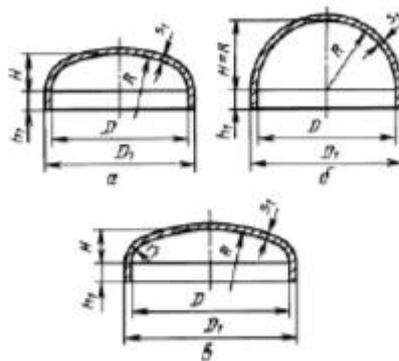
- в условиях испытаний

$$P_{d2} := \frac{2 \cdot \sigma_{\text{И}} \cdot \phi_p \cdot (s_1 - c)}{D + (s_1 - c)} = 2.683 \text{ МПа}$$

$$U_{s2} := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } P \leq P_{d2} \\ \text{"Условия прочности НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$U_{s2} = \text{"Условие прочности выполняется"}$$

### 2.3.1.2. Расчет толщины стенки стандартной эллиптической крышки:



a — эллиптическая донца; б — полусферическая донца; в — торисферическая донца

Примечание — Рисунок не определяет конструктивно донца и приведен только для указания необходимых расчетных размеров.

Рисунок - 2.3. Расчётная схема эллиптических крышек

Поскольку крышка эллиптическая, то, согласно [7], и рисунку 2.3, высота выпуклой части крышки без учета цилиндрической части будет равна:

$$H := 0.25D = 100 \text{ мм}$$

Проверка на условие применимости формул:

$$U_{sl} := \begin{cases} \text{"Условие применения формул выполняется"} & \text{if } 0.2 \leq \frac{H}{D} \leq 0.5 \\ \text{"Условия применения формул НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$U_{sl} = \text{"Условие применения формул выполняется"}$$

Радиус кривизны в вершине донца по внутренней поверхности:

$$R := \frac{D^2}{4H} = 400 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки:

Согласно [6], по таблице Д.1.

$\phi := 1$  - коэффициент прочности сварных швов для крышек изготовленных из одной заготовки

$$S_{pk} := \max \left[ \frac{P_p \cdot R}{(2 \cdot \phi \cdot \sigma_{tcp} - 0.5 P_p)}, \frac{P_{пр} \cdot R}{(2 \cdot \phi \cdot \sigma_{и} - 0.5 P_{пр})} \right] = 0.81 \text{ мм}$$

$$S_{pk} := 0.81 \text{ мм}$$

$$c1 := Y \cdot \Pi = 2 \text{ мм}$$

$$c2 := 0.8 \text{ мм}$$

$$c := c1 + c2 = 2.8 \quad \text{мм}$$

$$S_{\text{ЭК}} := S_{\text{РК}} + c = 3.61 \quad \text{мм}$$

Принимаем исполнительную толщину стенки эллиптического днища с учетом ряда стандартных толщин:

$$s_2 := 5 \quad \text{мм}$$

Допускаемое внутреннее избыточное давление:

- в рабочих условиях

$$P_{d3} := \frac{2 \cdot \sigma_{\text{tcp}} \cdot \phi_p \cdot (s_1 - c)}{D + (s_1 - c)} = 1.787 \quad \text{МПа}$$

$$U_{sl} := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } P \leq P_{d3} \\ \text{"Условия прочности НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

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

- в условиях испытаний

$$P_{d4} := \frac{2 \cdot \sigma_{\text{И}} \cdot \phi_p \cdot (s_1 - c)}{D + (s_1 - c)} = 2.683 \quad \text{МПа}$$

$$U_{sl} := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } P \leq P_{d4} \\ \text{"Условия прочности НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

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

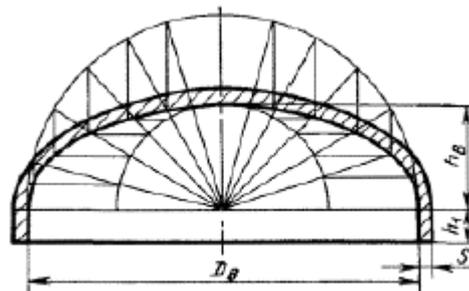


Рисунок 2.4 - Эллиптическое днище

Условное обозначение днища с внутренним диаметром  $D = 400$  мм, толщиной стенки  $s = 5$  мм и высотой выпуклой части крышки без учета цилиндрической части  $H = 100$  мм из стали марки 09Г2С выбираем из [9]. «Днище 400-5-100-09Г2С ГОСТ 6533-68»

## 2.3.2. Укрепление отверстий патрубков штуцеров

Целью расчёта укрепления отверстий патрубков штуцеров, является проверка условий необходимости дальнейшего укрепления отверстий. Расчет укрепления отверстий проводится в соответствии с требованиями [10].

### 2.3.2.1. Расчет укрепления отверстия в эллиптической крышке

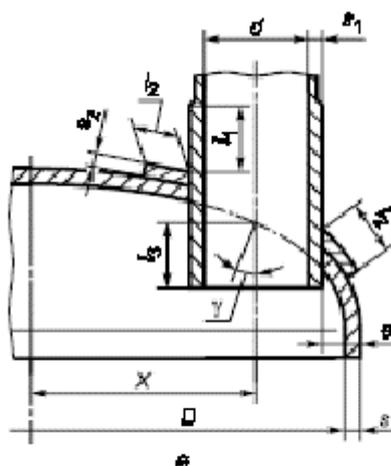


Рисунок 2.5. - Смещённый штуцер на выпуклой крышке

#### Исходные данные:

|   |                      |
|---|----------------------|
| Внутренний диаметр оболочки, мм   | $D := 400$           |
| Внутреннее давление на цилиндрическую обечайку, МПа                     | $P := 0.6$           |
| Расчётная температура, °C   | $t_p := 100$         |
| Исполнительная толщина стенки оболочки (эллиптическое днище), мм        | $s_2 := 5$           |
| Диаметр отверстия, мм   | $d_1 := 100$         |
| Толщина стенки (внешней) штуцера, мм                                    | $s_1 := s_2$         |
| Толщина стенки (внутренней) штуцера, мм                                 | $s_2 := 0$           |
| Длина внешней части штуцера, мм   | $l_1 := 200$         |
| Длина внутренней части штуцера, мм                                      | $l_2 := 0$           |
| Толщина накладного кольца, мм   | $s_3 := 0$           |
| Прибавка расчетной толщины стенки, мм                                   | $c := 2.8$           |
| Коэффициент прочности сварных швов                                      | $\phi := 1$          |
| Исполнительная ширина накладного кольца, мм                             | $l_3 := 0$           |
| Допускаемое напряжение для стали при 20 <sup>0</sup> C, МПа             | $\sigma_{20} := 196$ |
| Минимальное значение предела текучести стали при 20 <sup>0</sup> C, МПа | $R_e := 300$         |

|   |              |
|---|--------------|
| Поправочный коэффициент<br>для допускаемых напряжений сталей  | $\eta := 1$  |
| Коэффициент запаса прочности<br>при гидравлических испытаниях | $n_T := 1.1$ |
| Коэффициент для выпуклых днищ K1 [10]                         | $K_1 := 2$   |
| Расстояние от центра укрепления отверстия до<br>оси, мм       | $X := 0$     |

Допускаемое напряжение для материала при расчётной температуре:

Для стали 09Г2С при  $t_p=100\text{ }^\circ\text{C}$  согласно таблице А.3 [6].

$$\sigma_p := 177 \text{ МПа}$$

Допускаемое напряжение для материала накладного кольца при расчетной температуре:

$$\sigma_{p1} := 0 \text{ МПа}$$

Допускаемое напряжение для материала внешней части штуцера при расчетной температуре:

$$\sigma_{p2} := \sigma_p \text{ МПа}$$

Допускаемое напряжение для материала внутренней части штуцера при расчетной температуре:

$$\sigma_{p3} := 0 \text{ МПа}$$

Допускаемое напряжение для стали 09Г2С при нормальных условиях:

$$\sigma_{20} := \text{Floor}(\eta \cdot \sigma_{20}, 0.5) = 196 \text{ МПа}$$

Давление при испытании на прочность:

$$P_{\text{исп}} := 1.25 \cdot P \cdot \frac{\sigma_{20}}{\sigma_p} = 0.831 \text{ МПа}$$

Допускаемое напряжение для стали 09Г2С при гидравлических испытаниях:

$$\sigma_{\text{и}} := \text{Floor}\left(\frac{R_e}{n_T}, 0.5\right) = 272.5 \text{ МПа}$$

Расчётная толщина стенки оболочки:

$$s_{\text{рк}} := \max\left[\frac{P \cdot D}{2 \cdot \phi \cdot \sigma_p - P}, \frac{P_{\text{исп}} \cdot D}{(2 \cdot \phi \cdot \sigma_{\text{и}} - P_{\text{исп}})}\right] = 0.679 \text{ мм}$$

$$s_{\text{рк}} := 0.70 \text{ мм}$$

$$s_{\text{экк}} := s_{\text{рк}} + c = 3.5 \text{ мм}$$

Принимаем исполнительную толщину стенки эллиптической крышки с учетом ряда стандартных толщин:

$$s_{\text{ИК}} := 5 \quad \text{мм}$$

Расчетная толщина стенки штуцера:

$$s_{\text{рш}} := \max \left[ \frac{P \cdot (d_1 + 2 \cdot c)}{2 \cdot \sigma_p \cdot \phi - P}, \frac{P_{\text{исп}} \cdot (d_1 + 2 \cdot c)}{2 \cdot \sigma_{\text{И}} \cdot \phi - P_{\text{исп}}} \right] = 0.179 \quad \text{мм}$$

$$s_{\text{рш}} := 0.18 \quad \text{мм}$$

$$S_{\text{ЭКШ}} := s_{\text{рш}} + c = 2.98 \quad \text{мм}$$

Принимаем исполнительную толщину стенки штуцера с учетом ряда стандартных толщин:

$$s_{\text{ИШ}} := 5 \quad \text{мм}$$

Расчетный диаметр:

$$\text{где } H := 0.25 \cdot D = 100 \quad \text{мм}$$

$$D_p := \frac{D^2}{2 \cdot H} \cdot \sqrt{1 - 4 \cdot \left( \frac{D^2 - 4 \cdot H^2}{D^4} \right)} \cdot X^2 = 800 \quad \text{мм}$$

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

$$d_p := d_1 + 2 \cdot c = 105.6 \quad \text{мм}$$

Проверка условий применения формул для расчета укрепления отверстий:

$$\text{пров1} := \begin{cases} \text{"Отношение диаметров НЕ выполняется"} & \text{if } \left( \frac{d_p - 2 \cdot c}{D} > 0.6 \right) \\ \text{"Отношение толщины к диаметру НЕ выполняется"} & \text{if } \left( \frac{s_2 - c}{D} > 0.1 \right) \\ \text{"Условия применения формул выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\boxed{\text{пров1} = \text{"Условия применения формул выполняются"}}$$

Расчетный диаметр одиночного отверстия не требующего укрепления:

$$d_0 := 2 \cdot \left( \frac{s_2 - c}{s_{\text{рк}}} - 0.8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s_2 - c)} = 196.577 \quad \text{мм}$$

Проверка условий необходимости дальнейшего расчета укреплений отверстий:

$$\text{пров3} := \begin{cases} \text{"НЕ требуется укрепление отверстий"} & \text{if } d_0 \geq d_p \\ \text{"требуется укрепление отверстий"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

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

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

$$P_d := \frac{2 \cdot \sigma_p \cdot \phi \cdot (s_{\text{иш}} - c)}{d_1 + s_{\text{иш}} + c} = 7.224 \text{ МПа}$$

Проверка на условие прочности:

$$Usl := \begin{cases} \text{"Условие прочности и устойчивости выполняется"} & \text{if } P \leq P_d \\ \text{"Условия прочности НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl = \text{"Условие прочности и устойчивости выполняется"}$$

Отношения допускаемых напряжений:

- для внешней части штуцера

$$\chi_1 := \min \left( 1, \frac{\sigma_{p2}}{\sigma_p} \right) \quad \chi_1 = 1$$

- для внутренней части штуцера

$$\chi_2 := \min \left( 1, \frac{\sigma_{p3}}{\sigma_p} \right) \quad \chi_2 := 0$$

- для накладного кольца

$$\chi_3 := \min \left( 1, \frac{\sigma_{p1}}{\sigma_p} \right) \quad \chi_3 := 0$$

Расчетные длины штуцера:

$$l_{1p} := \min \left[ l_1, 1.25 \cdot \sqrt{(d_1 + 2 \cdot c) \cdot (s_1 - c)} \right] = 19.053 \text{ мм - для внешней части штуцера}$$

$$l_{2p} := \min \left[ l_2, \sqrt{D_p \cdot (s_2 + s_2 - c)} \right] = 0 \text{ мм - расчетная длина накладного кольца}$$

$$l_{3p} := \min \left[ l_3, 0.5 \cdot \sqrt{(d_1 + 2 \cdot c) \cdot (s_3 - 2 \cdot c)} \right] = 0 \text{ мм - для внутренней части штуцера}$$

Расчетная ширина зоны укрепления в обечайках и днищах при отсутствии торообразной вставки или вварного кольца:

$$l_p := \sqrt{D_p \cdot (s_2 - c)} = 41.952 \text{ мм}$$

Расчет диаметра отверстия не требующего дополнительного укрепления:

$$d_{op} := 0.4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s_2 - c)} = 16.781 \text{ мм}$$

Допускаемое внутреннее избыточное давление:

$$V := \min \left[ 1, \frac{1 + \frac{l_{1p} \cdot [(s_1 - c) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_3 - c - c) \cdot \chi_3]}{l_{1p} \cdot (s_1 - c)}}{1 + 0.5 \cdot \frac{d_p - d_{op}}{l_{1p}} + K_1 + \frac{d_1 + 2 \cdot c}{D_p} \cdot \frac{\phi \cdot l_{1p}}{\phi \cdot l_p}} \right] = 0.371$$

$$P_{ди} := \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s_1 - c) \cdot \phi \cdot \sigma_p \cdot V}{D_p + (s_1 - c) \cdot V} = 0.722 \text{ МПа}$$

Площадь необходимая для укрепления отверстия:

$$A_{r1} := 0.5 \cdot (d_p - d_{op}) \cdot s_{рк} = 31.087 \text{ мм}^2$$

Располагаемая площадь укрепления отверстия:

$$A_{p1} := l_{1p} \cdot (s_1 - s_{рш} - c) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_3 - c - c) \cdot \chi_3 + l_p \cdot (s_2 - s_{рк} - c) = 101.415$$

$$U_{sl} := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } A_{r1} \leq A_{p1} \\ \text{"Условия прочности НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

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

### 2.3.2.1. Расчет укрепления отверстия в цилиндрической обечайке

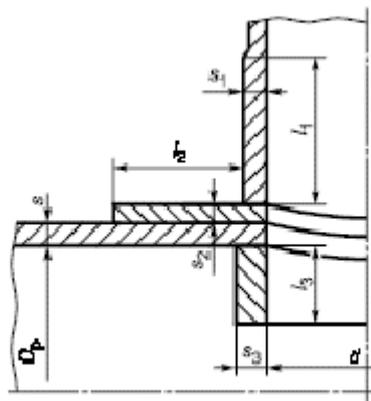


Рисунок 2.6. - Основная расчётная схема соединения штуцера со стенкой сосуда

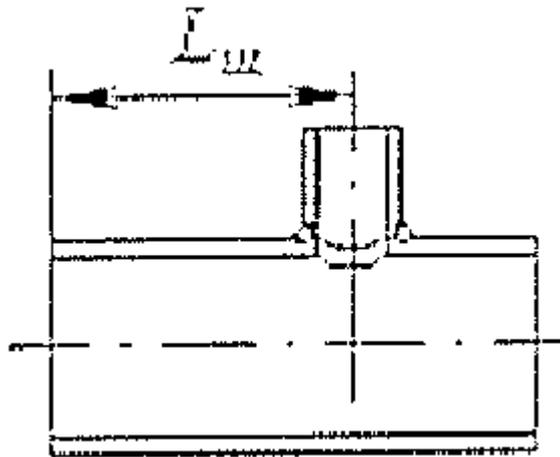


Рисунок 2.7. - Схема смещённого штуцера

**Исходные данные:**

|  |                      |
|--|----------------------|
| Внутренний диаметр оболочки, мм                                  | $D := 400$           |
| Внутреннее давление на цилиндрическую обечайку, МПа              | $P := 0.6$           |
| Расчётная температура, °C  | $t_p := 100$         |
| Исполнительная толщина стенки оболочки (эллиптическое днище), мм | $s_2 := 5$           |
| Диаметр отверстия, мм  | $d_1 := 50$          |
| Толщина стенки (внешней) штуцера, мм                             | $s_1 := s_2$         |
| Толщина стенки (внутренней) штуцера, мм                          | $s_2 := 0$           |
| Длина внешней части штуцера, мм                                  | $l_1 := 200$         |
| Длина внутренней части штуцера, мм                               | $l_2 := 0$           |
| Толщина накладного кольца, мм                                    | $s_3 := 0$           |
| Прибавка расчетной толщины стенки, мм                            | $c := 2.8$           |
| Коэффициент прочности сварных швов                               | $\phi := 1$          |
| Исполнительная ширина накладного кольца, мм                      | $l_3 := 0$           |
| Допускаемое напряжение для стали при 20°C, МПа                   | $\sigma_{20} := 196$ |
| Минимальное значение предела текучести стали при 20°C, МПа       | $R_e := 300$         |
| Поправочный коэффициент для допускаемых напряжений сталей        | $\eta := 1$          |
| Коэффициент запаса прочности при гидравлических испытаниях       | $n_T := 1.1$         |

Коэффициент для цилиндрической обечайки K1 [10]  $K_1 := 2$

Смещение штуцера, мм  $L_{ш} := 600$

Допускаемое напряжение для материала при расчётной температуре:

Для стали 09Г2С при  $t_p=100$  °С согласно таблице А.3 [6].

$$\sigma_p := 177 \text{ МПа}$$

Допускаемое напряжение для материала накладного кольца при расчетной температуре:

$$\sigma_{p1} := 0 \text{ МПа}$$

Допускаемое напряжение для материала внешней части штуцера при расчетной температуре:

$$\sigma_{p2} := \sigma_p \text{ МПа}$$

Допускаемое напряжение для материала внутренней части штуцера при расчетной температуре:

$$\sigma_{p3} := 0 \text{ МПа}$$

Допускаемое напряжение для стали 09Г2С при нормальных условиях:

$$\sigma_{20} := \text{Floor}(\eta \cdot \sigma_{20}, 0.5) = 196 \text{ МПа}$$

Давление при испытании на прочность:

$$P_{\text{исп}} := 1.25 \cdot P \cdot \frac{\sigma_{20}}{\sigma_p} = 0.831 \text{ МПа}$$

Допускаемое напряжение для стали 09Г2С при гидравлических испытаниях:

$$\sigma_{\text{И}} := \text{Floor}\left(\frac{R_e}{n_T}, 0.5\right) = 272.5 \text{ МПа}$$

Расчётная толщина стенки оболочки:

$$s_{\text{рцо}} := \max\left[\frac{P \cdot D}{2 \cdot \phi \cdot \sigma_p - P}, \frac{P_{\text{исп}} \cdot D}{(2 \cdot \phi \cdot \sigma_{\text{И}} - P_{\text{исп}})}\right] = 0.679 \text{ мм}$$

$$s_{\text{рцо}} := 0.70 \text{ мм}$$

$$s_{\text{экцо}} := s_{\text{рцо}} + c = 3.5 \text{ мм}$$

Принимаем исполнительную толщину стенки эллиптической крышки с учетом ряда стандартных толщин:

$$s_{\text{ицо}} := 5 \text{ мм}$$

Расчетный диаметр:

$$D_p := D = 400 \text{ мм}$$

Расчетный диаметр отверстия:

$$d_p := d_1 + 2 \cdot c = 55.6 \text{ мм}$$

Проверка условий применения формул для расчета укрепления отверстий:

$$\text{пров1} := \begin{cases} \text{"Отношение диаметров НЕ выполняется"} & \text{if } \left( \frac{d_p - 2 \cdot c}{D} > 0.6 \right) \\ \text{"Отношение толщины к диаметру НЕ выполняется"} & \text{if } \left( \frac{s_2 - c}{D} > 0.1 \right) \\ \text{"Условия применения формул выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\boxed{\text{пров1} = \text{"Условия применения формул выполняются"}}$$

Расчетный диаметр одиночного отверстия не требующего укрепления:

$$d_0 := 2 \cdot \left( \frac{s_1 - c}{s_{\text{пцо}}} - 0.8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s_1 - c)} = 139.001$$

Проверка условий необходимости дальнейшего расчета укреплений отверстий:

$$\text{пров3} := \begin{cases} \text{"НЕ требуется укрепление отверстий"} & \text{if } d_0 \geq d_p \\ \text{"требуется укрепление отверстий"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

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

Допускаемое давление для патрубка штуцера:

$$P_{\text{дцо}} := \frac{2 \cdot \sigma_p \cdot \phi \cdot (s_{\text{иш}} - c)}{d_1 + s_{\text{иш}} + c} = 13.474 \text{ МПа}$$

Проверка на условие прочности:

$$\text{Usl} := \begin{cases} \text{"Условие прочности и устойчивости выполняется"} & \text{if } P \leq P_{\text{дцо}} \\ \text{"Условия прочности НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\boxed{\text{Usl} = \text{"Условие прочности и устойчивости выполняется"}}$$

Отношения допускаемых напряжений:

- для внешней части штуцера

$$\chi_1 := \min \left( 1, \frac{\sigma_{p2}}{\sigma_p} \right) \quad \chi_1 = 1$$

- для внутренней части штуцера

$$\chi_2 := \min \left( 1, \frac{\sigma_{p3}}{\sigma_p} \right) \quad \chi_2 := 0$$

- для накладного кольца

$$\chi_3 := \min \left( 1, \frac{\sigma_{p1}}{\sigma_p} \right) \quad \chi_3 := 0$$

Расчетные длины штуцера:

$$l_{1p} := \min \left[ l_1, 1.25 \cdot \sqrt{(d_1 + 2 \cdot c) \cdot (s_1 - c)} \right] = 13.825 \quad \text{мм - для внешней части штуцера}$$

$$l_{2p} := \min \left[ l_2, \sqrt{D_p \cdot (s_2 + s_2 - c)} \right] = 0 \quad \text{мм - расчетная длина накладного кольца}$$

$$l_{3p} := \min \left[ l_3, 0.5 \cdot \sqrt{(d_1 + 2 \cdot c) \cdot (s_3 - 2 \cdot c)} \right] = 0 \quad \text{мм - для внутренней части штуцера}$$

Расчетная ширина зоны укрепления в обечайках и днищах при отсутствии торообразной вставки или вварного кольца:

$$l_p := \sqrt{D_p \cdot (s_1 - c)} = 29.665 \quad \text{мм}$$

Расчет диаметра отверстия не требующего дополнительного укрепления:

$$d_{op} := 0.4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s_1 - c)} = 11.866 \quad \text{мм}$$

Допускаемое внутреннее избыточное давление:

$$V := \min \left[ 1, \frac{1 + \frac{l_{1p} \cdot [(s_1 - c) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_3 - c - c) \cdot \chi_3]}{l_{1p} \cdot (s_1 - c)}}{1 + 0.5 \cdot \frac{d_p - d_{op}}{l_{1p}} + K_1 + \frac{d_1 + 2 \cdot c}{D_p} \cdot \frac{\phi \cdot l_{1p}}{\phi \cdot l_p}} \right] = 0.43$$

$$P_{ди} := \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s_1 - c) \cdot \phi \cdot \sigma_p \cdot V}{D_p + (s_1 - c) \cdot V} = 1.672 \quad \text{МПа}$$

Площадь необходимая для укрепления отверстия:

$$A_{r2} := 0.5 \cdot (d_p - d_{op}) \cdot s_{pco} = 15.307 \quad \text{мм}^2$$

Располагаемая площадь укрепления отверстия:

$$A_{p2} := l_{1p} \cdot (s_1 - s_{pш} - c) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_3 - c - c) \cdot \chi_3 + l_p \cdot (s_1 - s_{pco} - c) = 72.423 \quad \text{мм}^2$$

$$Usl := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } A_{r2} \leq A_{p2} \\ \text{"Условия прочности НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

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

### 2.3.3. Прочностной расчёт фланцевого соединения между двумя царгами

Целью механического расчёта фланцевого соединения, является проверка условий прочности и герметичности. Расчет на прочность и герметичность фланцевых соединений ведется согласно [11]. Исходные данные для расчёта взяты из [4].

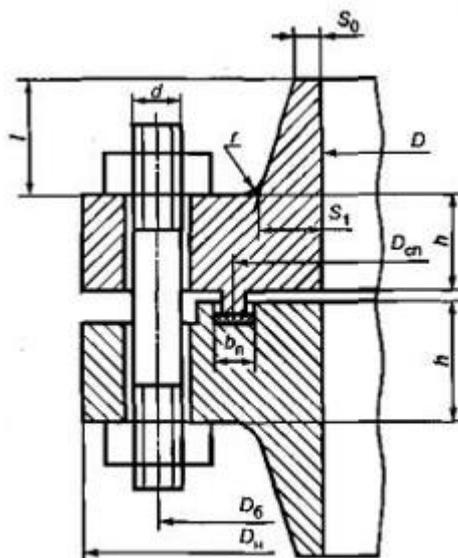


Рисунок 2.8 - Фланцевое соединение

#### Исходные данные:

Тип фланца: фланцевое соединение приварные встык

Тип уплотнительной поверхности: шип-паз

|  |                        |
|--|------------------------|
| Внутренний диаметр аппарата, мм  | $D := 400$             |
| Наружный диаметр фланца, мм  | $D_n := 535$           |
| Диаметр окружности расположения болтов, мм   | $D_b := 495$           |
| Расчётный диаметр прокладки, мм  | $D_{сп} := 444.5$      |
| Ширина прокладки, мм   | $b_{п} := 12.5$        |
| Ширина тарелки фланца, мм  | $h := 35$              |
| Толщина прокладки, мм  | $h_{п} := 2$           |
| Толщина втулки приварного встык фланца в месте приварки к обечайке (трубе), толщина обечайки плоского фланца, мм | $S_0 := 6$             |
| Толщина втулки приварного встык в месте присоединения к тарелке, мм  | $S_1 := 16$            |
| Длина конической части втулки, мм  | $l_{\text{кон}} := 30$ |
| Диаметр болтов, мм   | $d := 20$              |
| Число болтов, шт   | $n := 20$              |
| Расчётное давление, МПа  | $P := 0.6$             |
| Внешний изгибающий момент, МН*м  | $M := 0$               |

Осевая сила, МН  $F_w := 1.209 \cdot 10^4$   
 Суммарная прибавка к расчётной толщине, мм  $c_o := 0$   
 Рабочая температура, °C  $t := 100$   
 Поправочный коэффициент для допускаемых напряжений сталей  $\eta := 1$   
 Материал болтов - сталь 35  
 Материал прокладки Паронит ПОН по ГОСТ 481 при толщине не более 3 мм

Определение расчетных параметров.

Расчетные температуры.

Расчетная температура неизолированных плоских фланцев:

$$t_\phi := 0.96 \cdot t = 96 \quad ^\circ\text{C}$$

Расчетная температура болтов:

$$t_b := 0.85 \cdot t = 85 \quad ^\circ\text{C}$$

Допускаемые напряжения для болтов из стали 35 по [6]:

В рабочем состоянии

$$x := (20 \ 100)^T$$

$$y := (203.8 \ 196)^T$$

$$\sigma_{д,б} := \text{Floor}(\text{linterp}(x, y, t_b), 0.5) = 197 \quad \text{МПа}$$

$$\sigma_{д,б} = 197 \quad \text{МПа}$$

Модуль упругости для болтов при рабочей температуре, согласно таблице Ж.1 [11]:

$$E_b := 2.05 \cdot 10^5 \quad \text{МПа}$$

Допускаемое напряжение для болтов при 20 °C

$$\sigma_{20б} := 203.8 \quad \text{МПа}$$

Модуль упругости для болтов при температуре испытания 20 °C

$$E_{20б} := 2.1 \cdot 10^5 \quad \text{МПа}$$

Коэффициент линейного расширения для стали 35 при 20 - 100 °C согласно таблице Ж.2 [11]:

$$\alpha_b := 11.5 \cdot 10^{-6} \quad 1/\text{K}$$

Допускаемые напряжения для фланцев и обечаек стали 09Г2С из [6]:

$$x := (20 \ 100)^T$$

$$y := (196 \ 177)^T$$

$$\sigma := \text{Floor}(\text{linterp}(x, y, t_\phi), 0.5) = 177.5 \quad \text{МПа}$$

Так как фланцы изготавливается из листового проката:

$$\sigma_{д.ф} := \eta \cdot \sigma = 177.5 \quad \text{МПа}$$

Модуль упругости для стали 09Г2С при рабочей температуре согласно таблице В.1 [6]:

$$E := 2.05 \cdot 10^5 \quad \text{МПа}$$

Допускаемое напряжение для стали 09Г2С при 20 °С:

$$\sigma_{20} := 147 \quad \text{МПа} \quad \sigma_{д20} := \eta \cdot \sigma_{20} \quad \sigma_{д20} = 147 \quad \text{МПа}$$

Модуль упругости для сталь 09Г2С при температуре испытания 20 °С согласно таблице В.1 [6]:

$$E_{20} := 2.1 \cdot 10^5 \quad \text{МПа}$$

Коэффициент линейного расширения стали 09Г2С при  $t = 20 - 100$  °С согласно таблице Г.1 [6]:

$$\alpha_{ф} := 11.7 \cdot 10^{-6} \quad 1/\text{К}$$

Эффективная ширина плоской прокладки:

$$b_{п} = 12.5 \quad \text{мм}$$

$$\text{при } b_{п} \leq 15 \quad \text{мм}$$

$$b_0 := b_{п} = 12.5 \quad \text{мм}$$

Характеристики прокладки по таблице И.1 согласно [11]:

$$m := 2.5$$

$$q_{обж} := 20 \quad \text{МПа}$$

$$q_d := 130 \quad \text{МПа}$$

$$K_{обж} := 0.9$$

$$E_{п} := 2000 \quad \text{МПа}$$

Отсюда находим податливость прокладки:

$$y_{п} := \frac{h_{п} \cdot K_{обж}}{E_{п} \cdot \pi \cdot D_{сн} \cdot b_{п}} = 5.156 \times 10^{-8} \quad \text{мм/Н}$$

Усилие, необходимое для смятия прокладки при затяжке:

$$P_{обж} := 0.5\pi \cdot D_{сн} \cdot b_0 \cdot m \cdot |P| = 1.309 \times 10^4 \quad \text{Н}$$

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

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

$$R_{п} = 2.618 \times 10^4 \quad \text{Н}$$

Усилие в болтах фланцевого соединения при затяжке и в рабочих условиях:

Площадь поперечного сечений болтов по таблице Д.1 согласно [11]:

$$f_b := 225 \quad \text{мм}^2$$

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

$$A_b := n \cdot f_b = 4.5 \times 10^3 \quad \text{мм}^2$$

Равнодействующая нагрузка от давления:

$$Q_d := \frac{\pi}{4} \cdot (D_{\text{сп}})^2 \cdot P = 9.311 \times 10^4 \quad \text{Н}$$

Приведенная нагрузка, вызванная воздействием внешней силы и изгибающего момента:

$$Q_{FM} := \max \left( \left| F + \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{сп}}} \right|, \left| F - \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{сп}}} \right| \right) = 1.209 \times 10^4 \quad \text{Н}$$

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

$$L_{60} := h + h + h_{\text{г}} = 72 \quad \text{мм}$$

Эффективная длина болта (шпильки) при определении податливости:

$$L_6 := L_{60} + 0.28 \cdot d = 77.6 \quad \text{мм}$$

Податливость болтов:

$$y_b := \frac{L_6}{E_{206} \cdot A_b} = 8.212 \times 10^{-8} \quad \text{мм/Н}$$

Расчетные параметры фланцев:

- параметр длины обечайки

$$l_0 := \sqrt{D \cdot S_0} = 48.99 \quad \text{мм}$$

- отношение наружного диаметра тарелки фланца к внутреннему диаметру:

$$K := \frac{D_{\text{н}}}{D} = 1.337$$

- коэффициенты, зависящие от соотношения размеров тарелки фланца:

$$\beta_T := \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \log(K)) - 1}{(1.05 + 1.945 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} = 1.78$$

$$\beta_U := \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \log(K)) - 1}{1.36(K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = 7.513$$

$$\beta_Y := \frac{1}{(K - 1)} \cdot \left[ 0.69 + 5.72 \cdot \frac{K^2 \cdot \log(K)}{(K^2 - 1)} \right] = 6.898$$

$$\beta_Z := \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = 3.535$$

Коэффициенты  $\beta_F$ ,  $\beta_V$  и  $f$ , зависящие от соотношения размеров втулки фланца, для фланцевых соединений с приварными встык фланцами с конической втулкой определяют по графикам, приведенным на рисунках 2.9, 2.10, 2.11 в зависимости от отношений:

$$\beta := \frac{S_1}{S_0} = 2.667 \quad X := \frac{1}{\sqrt{D \cdot S_0}} = 0.612 \quad \frac{1}{l_0} = 0.612$$

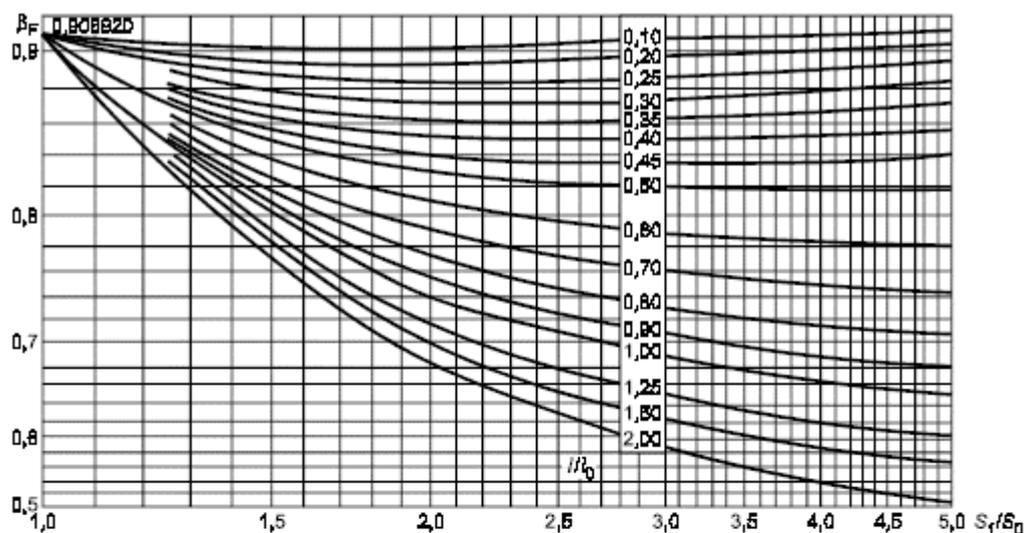


Рисунок 2.9. - Коэффициент  $\beta_F$

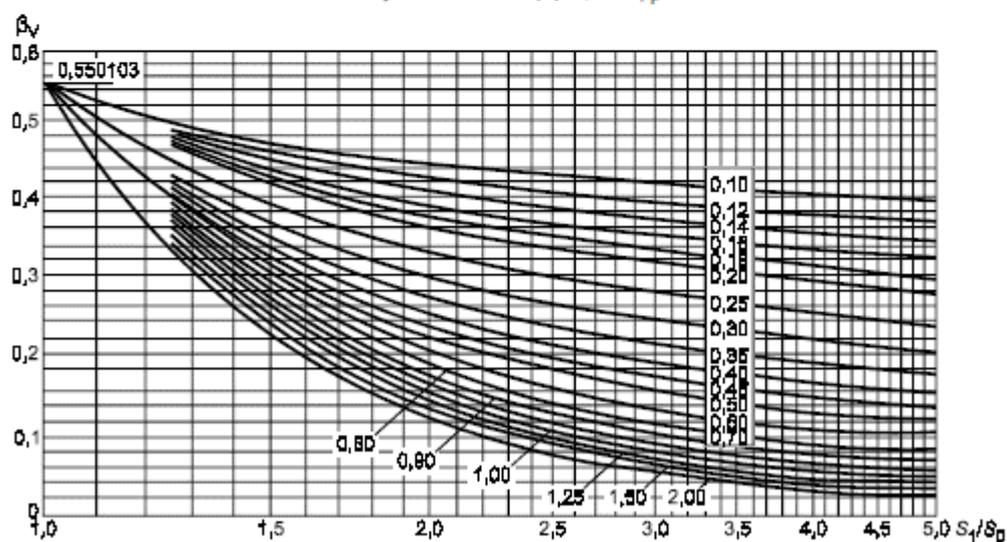


Рисунок 2.10. - Коэффициент  $\beta_V$

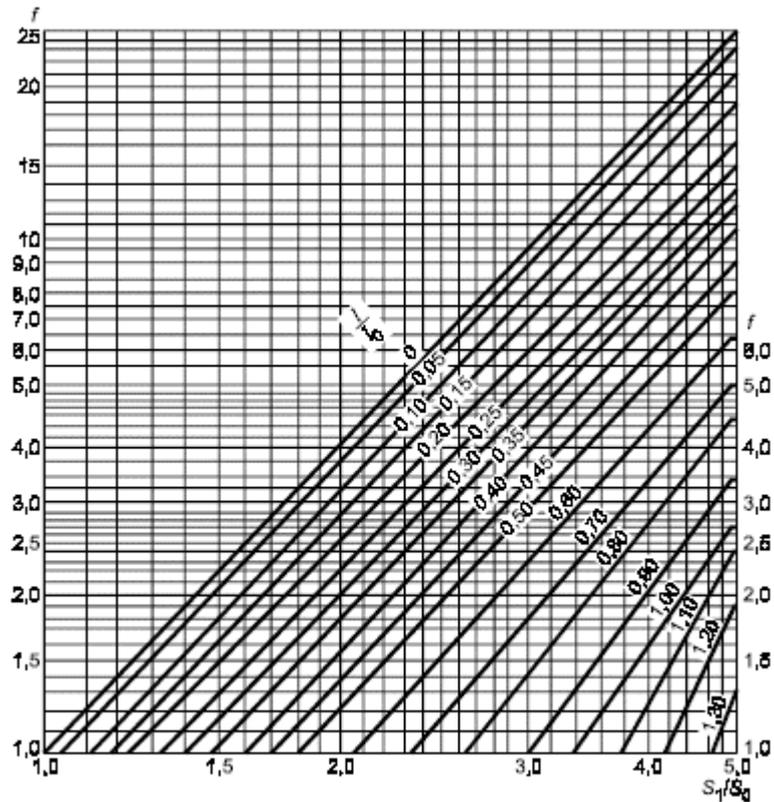


Рисунок 2.11. - Коэффициент  $f$

- коэффициенты для фланцевых соединений с приварными встык фланцами с конической втулкой

$$\beta_F := 0.74 \quad \beta_V := 0.125 \quad f := 1.5$$

- коэффициент  $\lambda$

$$\lambda := \frac{\beta_F \cdot h + l_0}{\beta_T \cdot l_0} + \frac{\beta_V \cdot h^3}{\beta_U \cdot l_0 \cdot (S_0)^2} = 1.263$$

Угловая податливость фланцев:

- при затяжке:

$$y_{\phi} := \frac{0.91 \cdot \beta_V}{E_{20} \cdot \lambda \cdot l_0 \cdot (S_1)^2} = 3.419 \times 10^{-11}$$

- нагруженного внешним изгибающим моментом:

$$y_{\phi H} := \left(\frac{\pi}{4}\right)^3 \cdot \frac{D_6}{E_{20} \cdot h^3 \cdot D_H} = 4.978 \times 10^{-11}$$

Коэффициент, учитывающий изгиб тарелки фланца между болтами (шпильками):

$$C_F := \max \left[ 1, \sqrt{\frac{\pi \cdot D_6}{n \cdot \left( 2 \cdot d + \frac{6 \cdot h}{m + 0.5} \right)}} \right] = 1$$

Приведенный диаметр фланца:

$$D_{пр} := D$$

Плечо действия усилий в болтах (шпильках) для приварных встык и плоских фланцев:

$$b := 0.5(D_6 - D_{сп}) = 25.25$$

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

$$e := 0.5 \cdot (D_{сп} - D - S_0) = 19.25$$

Эквивалентная толщина плоских фланцев:

$$S_3 := S_0$$

Коэффициент жесткости фланцевого соединения для приварных встык и плоских фланцев:

$$\gamma := \frac{1}{y_{п} + y_6 \cdot \frac{E_{206}}{E_6} + 2 \cdot b^2 \cdot y_{ф} \cdot \frac{E_{20}}{E}} = 5.545 \times 10^6$$

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

$$\alpha := 1 - \frac{y_{п} - 2 \cdot e \cdot y_{ф} \cdot b}{y_{п} + y_6 + 2 \cdot b^2 \cdot y_{ф}} = 0.897$$

Коэффициент жесткости фланцевого соединения, нагруженного внешним изгибающим моментом:

$$\alpha_M := \frac{y_6 + 2 \cdot y_{фн} \cdot b \cdot \left( b + e - \frac{e^2}{D_{сп}} \right)}{y_6 + y_{п} \cdot \left( \frac{D_6}{D_{сп}} \right)^2 + 2 \cdot y_{фн} \cdot b^2} = 0.916$$

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

$$Q_t := \gamma \cdot [2\alpha_{ф} \cdot h \cdot (t_{ф} - 20) - 2\alpha_6 \cdot h \cdot (t_6 - 20)] = 5.5 \times 10^4 \quad \text{Н}$$

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

$$P_{61} := \max \left[ \begin{array}{l} \alpha \cdot (Q_d + F) + R_{\pi} + \frac{4 \cdot \alpha_M \cdot |M|}{D_{\text{сп}}} \\ \alpha \cdot (Q_d + F) + R_{\pi} + \frac{4 \cdot \alpha_M \cdot |M|}{D_{\text{сп}}} - Q_t \end{array} \right] = 1.205 \times 10^5 \quad \text{Н}$$

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

$$P_{62} := \max(P_{\text{обж}}, 0.4 \cdot A_6 \cdot \sigma_{206}) = 3.668 \times 10^5 \quad \text{Н}$$

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

$$P_{6M} := \max(P_{61}, P_{62}) = 3.668 \times 10^5 \quad \text{Н}$$

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

$$P_{6p} := P_{6M} + (1 - \alpha) \cdot (Q_d + F) + Q_t + \frac{4 \cdot (1 - \alpha_M) \cdot |M|}{D_{\text{сп}}} = 4.327 \times 10^5 \quad \text{Н}$$

Проверка прочности болтов (шпилек) и прокладки.

Расчетные напряжения в болтах (шпильках):

- при затяжке

$$\sigma_{61} := \frac{P_{6M}}{A_6} = 81.52 \quad \text{МПа}$$

- в рабочих условиях

$$\sigma_{62} := \frac{P_{6p}}{A_6} = 96.16 \quad \text{МПа}$$

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

$$\text{Usl\_1} := \begin{cases} \text{"Условия прочности в при затяжке НЕ выполняются"} & \text{if } \sigma_{61} > \sigma_{206} \\ \text{"Условия прочности в рабочих условиях НЕ выполняются"} & \text{if } \sigma_{62} > \sigma_{д,6} \\ \text{"Условия прочности выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\boxed{\text{Usl\_1} = \text{"Условия прочности выполняются"}}$$

$$\sigma_{61} = 81.52 \quad \text{МПа} \quad \sigma_{206} = 203.8 \quad \text{МПа} \quad \sigma_{62} = 96.16 \quad \text{МПа} \quad \sigma_{д,6} = 197 \quad \text{МПа}$$

Удельное давление на прокладку:

$$q := \frac{\max(P_{6M}, P_{6p})}{\pi \cdot D_{\text{сп}} \cdot b_{\pi}} = 24.79 \quad \text{МПа}$$

Расчет фланцев на статическую прочность.

Расчетный изгибающий момент, действующий на приварной встык фланца при затяжке:

$$M_M := C_F \cdot P_{6p} \cdot b = 9.263 \times 10^6 \quad \text{Н} \cdot \text{мм}$$

Расчетный изгибающий момент, действующий на фланец в рабочих условиях:

$$M_p := C_F \cdot \max[P_{6p} \cdot b + (Q_d + Q_{FM}) \cdot e, |Q_d + Q_{FM}| \cdot e] = 1.295 \times 10^7 \quad \text{Н} \cdot \text{мм}$$

Расчетные напряжения во фланце при затяжке:

Меридиональные изгибные напряжения для приварных встык фланцев с конической втулкой:

$$\sigma_{0M} := \frac{M_M}{\lambda \cdot (S_1 - c_0)^2 \cdot D_{пр}} = 71.596 \quad \text{МПа}$$

Напряжения в тарелке приварного встык фланца в условиях затяжки:

- радиальное напряжение

$$\sigma_{RM} := \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + l_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot l_0 \cdot D} \cdot M_M = 25.483 \quad \text{МПа}$$

- окружное напряжение

$$\sigma_{TM} := \frac{\beta_Y \cdot M_M}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_{RM} = 40.312 \quad \text{МПа}$$

Расчетные напряжения во фланце в рабочих условиях:

Меридиональные изгибные напряжения для приварных встык фланцев с конической втулкой:

$$\sigma_{0p} := \frac{M_p}{\lambda \cdot (S_1 - c_0)^2 \cdot D_{пр}} = 100.107 \quad \text{МПа}$$

- максимальные меридиональные мембранные напряжения в обечайке плоского фланца:

$$\sigma_{0MP} := \max \left[ \frac{Q_d + F + \frac{4|M|}{D_{сп}}}{\pi \cdot (D + S_1) \cdot (S_1 - c_0)}, \frac{Q_d + F - \frac{4|M|}{D_{сп}}}{\pi \cdot (D + S_1) \cdot (S_1 - c_0)} \right] = 5.031 \quad \text{МПа}$$

Напряжения в тарелке приварного встык фланца или плоского фланца в рабочих условиях:

- радиальное напряжение

$$\sigma_{Rp} := \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + l_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot l_0 \cdot D} \cdot M_p = 35.63 \quad \text{МПа}$$

- окружное напряжение

$$\sigma_{Tp} := \frac{\beta_Y \cdot M_p}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_{Rp} = 56.365 \quad \text{МПа}$$

Проверка условий статической прочности фланцев.

$$\sigma_{Pmax} := \max \left( \left( \begin{array}{l} |\sigma_{0p} - \sigma_{0mp} + \sigma_{Tp}| \\ |\sigma_{0p} - \sigma_{0mp} + \sigma_{Rp}| \\ |\sigma_{0p} + \sigma_{0mp}| \end{array} \right) \right) = 151.441 \quad \text{МПа}$$

$$\sigma_{3max} := \max \left( |\sigma_{0m} + \sigma_{Rm}|, |\sigma_{0m} + \sigma_{Tm}| \right) = 111.908 \quad \text{МПа}$$

PR\_1 := "Условия статической прочности при затяжке и в рабочих условиях выполняются"

PR\_3 := "Условия статической прочности НЕ выполняются"

$K_T = 1.3$  при расчете с учетом стесненности температурных деформаций. При расчете без учета стесненности температурных деформаций  $K_T = 1$ .

$$K_T := 1.3$$

$$Usl_3 := \begin{cases} PR_1 & \text{if } \sigma_{3max} < K_T \cdot \sigma_{20} \wedge \sigma_{Pmax} < K_T \cdot \sigma_{д.ф} \\ PR_3 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$Usl_3 = \text{"Условия статической прочности при затяжке и в рабочих условиях выполняются"}$

Проверка углов поворота фланцев

Угол поворота приварного встык фланца, плоского фланца

$$\Theta := M_p \cdot y_\phi \cdot \frac{E_{20}}{E} \quad \Theta = 4.535 \times 10^{-4}$$

Допустимый угол поворота плоского фланца  $\Theta_d := 0.006$

$$Usl_P := \begin{cases} \text{"Условие при испытаниях НЕ выполняется"} & \text{if } \Theta > 1.3 \cdot \Theta_d \\ \text{"Условие в рабочих условиях НЕ выполняется"} & \text{if } \Theta > \Theta_d \\ \text{"Условие поворота плоского фланца выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$Usl_P = \text{"Условие поворота плоского фланца выполняется"}$

### 2.3.4. Расчет опорной обечайки

Целью расчёта опорной обечайки, является:

- выбор размеров площади опорной поверхности фундаментного кольца и проверку фундамента на напряжение сжатия, возникающие на опорной поверхности;
- определение толщины фундаментного кольца и других элементов опоры;
- расчет аппарата на устойчивость против опрокидывания (выбор числа и размеров фундаментных болтов);
- расчет сварного шва 2, соединяющего опорную часть 3 с аппаратом;
- проверку устойчивости цилиндрической формы стенки опорной части аппарата.

Расчет опорной обечайки ведется согласно [12].

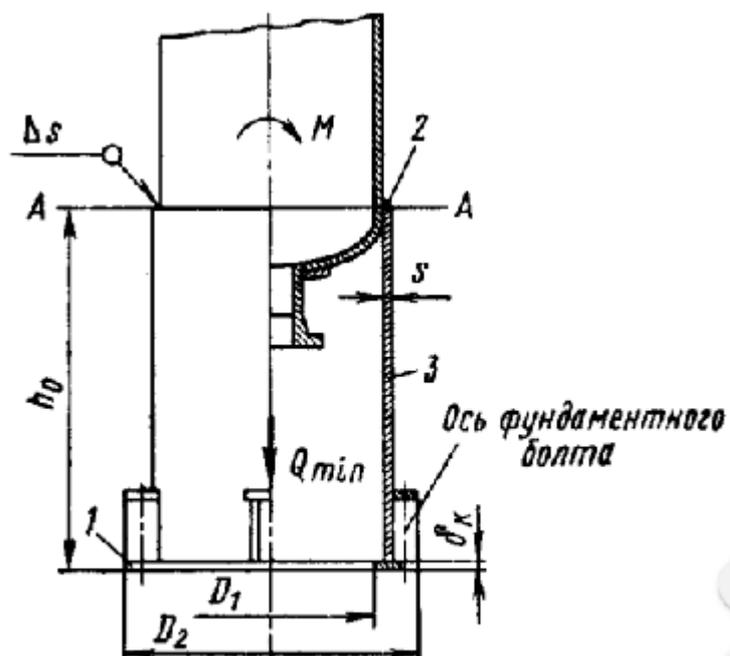


Рисунок 2.12. - Опорная обечайка

**Исходные данные:**

|   |                          |
|---|--------------------------|
| Внутренний диаметр колонны, м   | $D := 0.4$               |
| Высота ёмкости, м   | $L := 13.7$              |
| Высота цилиндрической части, м  | $H_K := 13.5$            |
| Плотность стали 09Г2С, кг/м <sup>3</sup>  | $\rho_{09Г2С} := 7850$   |
| Плотность воды, кг/м <sup>3</sup>   | $\rho_{Воды} := 1000$    |
| Изгибающий момент   | $M := 0$                 |
| Исполнительная толщина стенки цилиндрической обечайки, м  | $s_1 := 0.005$           |
| Исполнительная толщина стенки опорной обечайки принимаем равной толщине стенки цилиндрической обечайки, м | $s_{00} := s_1$          |
| Бетон класса: В10 (М150)  |                          |
| Допускаемое напряжения для бетона класса В10 (М150), МПа  | $\sigma_6 := 6$          |
| Материал болтов - сталь Ст3   |                          |
| Прибавка на атмосферную коррозию, м   | $c_a := 0.003$           |
| Ускорение свободного падения, м/с <sup>2</sup>  | $g := 9.8$               |
| Допускаемое напряжение для стали марки 09Г2С при 20 °С, МПа   | $\sigma_{20} := 196$     |
| Допускаемое напряжение для стали марки Ст3 при 20 °С, МПа   | $\sigma_{Ст3.20} := 140$ |

Определяем максимальное напряжение на опорной поверхности фундаментного кольца при максимальном весе  $Q_{\max}$ :

$$\sigma_{\max} := \frac{Q_{\max}}{F} + \frac{M}{W}$$

Отсюда находим:

$k_o := 0.143$  - определили графически для диаметра  $D = 400$  мм;

Наружный диаметр аппарата:

$$D_H := (D + 2 \cdot s_1) = 0.41 \quad \text{м}$$

Наружный диаметр опорной обечайки:

$$D_{oo} := D_H + 2 \cdot s_{oo} = 0.42 \quad \text{м}$$

Внутренний диаметр опорного фундаментного кольца:

$$D_1 := D_H \cdot (1 - 0.65 \cdot k_o) = 0.372 \quad \text{м}$$

Принимаем внутренний диаметр опорного фундаментного кольца:

$$D_1 := 0.400 \quad \text{м}$$

Наружный диаметр опорного фундаментного кольца:

$$D_2 := D_H \cdot (1 + 1.35 \cdot k_o) = 0.489 \quad \text{м}$$

Принимаем наружный диаметр опорного фундаментного кольца:

$$D_2 := 0.600 \quad \text{м}$$

Опорная площадь фундаментного кольца:

$$F := \left[ \frac{\pi}{4} \cdot (D_2^2 - D_1^2) \right] = 0.157 \quad \text{м}^2$$

Момент сопротивления изгибу опорной площади фундаментного кольца:

$$W := \left[ \frac{\pi}{32} \cdot \left( \frac{D_2^4 - D_1^4}{D_2} \right) \right] = 0.017 \quad \text{м}^3$$

$$D_{\text{ср}} := \frac{(D + D_H)}{2} = 0.405 \quad \text{м}$$

Объем занимаемый цилиндрической обечайкой:

$$V_{\text{цо}} := (\pi \cdot D_{\text{ср}} \cdot s_1 \cdot H_K) = 0.086 \quad \text{м}^3$$

Масса цилиндрической части:

$$G_{\text{цо}} := (V_{\text{цо}} \cdot \rho_{09Г2С}) = 674.184 \quad \text{кг}$$

Массу всего аппарата примем на 30% больше:

$$G_a := G_{\text{ЦО}} \cdot 1.3 = 876.439 \quad \text{кг}$$

Объем аппарата:

$$V_a := \left( \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot L \right) = 1.722 \quad \text{м}^3$$

Масса воды заполняемая аппарат:

$$G_{\text{ВОДЫ}} := V_a \cdot \rho_{\text{ВОДЫ}} = 1.722 \times 10^3 \quad \text{кг}$$

Масса заполненного аппарата:

$$G_{\text{за}} := G_a + G_{\text{ВОДЫ}} = 2.598 \times 10^3 \quad \text{кг}$$

Максимальный и минимальный вес:

$$Q_{\text{max}} := G_{\text{за}} \cdot g = 2.546 \times 10^4 \quad \text{Н} \quad Q_{\text{max}} := 0.0255 \quad \text{МН}$$

$$Q_{\text{min}} := G_a \cdot g = 8.589 \times 10^3 \quad \text{Н} \quad Q_{\text{min}} := 0.0086 \quad \text{МН}$$

Максимальное напряжение на опорной поверхности фундаментного кольца:

$$\sigma_{\text{max}} := \frac{Q_{\text{max}}}{F} + \frac{M}{W} = 0.162 \quad \text{МПа}$$

Толщина фундаментного кольца  $\delta_k$ , не укрепленного ребрами, рассчитывают из условия изгиба выступающей части кольца длиной  $b$  под действием напряжения  $\sigma_{\text{max}}$ :

Для колец без ребер  $\phi=0.5-1$ , принимаем  $\phi := 0.5$

$$b := \frac{D_2 - D_{\text{ОО}}}{2} = 0.09 \quad \text{м}$$

$$\delta_k := \phi \cdot b \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot \sigma_{\text{max}}}{\sigma_{\text{ст}3.20}}} = 2.654 \times 10^{-3} \quad \text{м}$$

Проверка на условие применимости формул:

$$Usl := \begin{cases} \text{"Условие применения значения } \delta_k \text{" if } \delta_k > s_{\text{ОО}} + 0.006 \\ \text{"Условия применения значения } \delta_k \text{ НЕ выполняется" otherwise} \end{cases}$$

$$Usl = \text{"Условия применения значения } \delta_k \text{ НЕ выполняется"}$$

Т.к. условие применения значения толщины фундаментного кольца не выполняется, то толщину фундаментного кольца берем:

$$\delta_{\text{кв}} := s_{\text{ОО}} + 0.006 = 0.011 \quad \text{м}$$

Принимаем исполнительную толщину фундаментного кольца равную:

$$\delta_{\text{ки}} := 0.020 \quad \text{м}$$

Минимальное напряжение на опорной поверхности фундаментного кольца при минимальном весе аппарата и соответствующем опрокидывающем моменте равно:

$$\sigma_{\min} := \frac{Q_{\min}}{F} + \frac{M}{W} = 0.055 \quad \text{МПа}$$

Т.к. минимальное напряжение положительное и аппарат будет устанавливаться в помещении, то следует предусмотреть болты для фиксации колонны:

Принимаем количество болтов, шт  $n := 6$

Определяем нагрузку на болт:

$$P_6 := \sigma_{\min} \cdot \frac{F}{n} = 1.433 \times 10^{-3}$$

Внутренний диаметр резьбы фундаментного болта:

$$d_0 := \sqrt{\frac{4 \cdot P_6}{\pi \cdot \sigma_{20}}} + c_a = 6.051 \times 10^{-3} \quad \text{м}$$

Принимаем внутренний диаметр резьбы фундаментного болта:

$$d_{00} := 0.012 \quad \text{м}$$

Определяем напряжение в сплошном сварном шве, крепящем корпус аппарата к цилиндрической опорной части:

$$\sigma_c := \frac{Q_{\max}}{f_c} + \frac{M_{\text{ш}}}{W_c}$$

Отсюда находим:

Площадь опасного сечения сварного шва:

$$f_c := (\pi \cdot D_H \cdot 0.7 \cdot s_{00}) = 4.508 \times 10^{-3} \quad \text{м}^2$$

Момент сопротивления сварного шва изгибу:

$$W_c := (0.8 \cdot 0.7 \cdot s_{00} \cdot D_H^2) = 4.707 \times 10^{-4} \quad \text{м}^3$$

Изгибающий момент  $M_{\text{ш}}$  принимаем равным 0, т.к. аппарат установлен в помещении:

$$M_{\text{ш}} := 0$$

Напряжение в сплошном сварном шве, крепящем корпус аппарата к цилиндрической опорной части:

$$\sigma_c := \left( \frac{Q_{\max}}{f_c} + \frac{M_{\text{ш}}}{W_c} \right) = 5.656 \quad \text{МПа}$$

Напряжение в сварном шве при работе на срез:

Коэффициент прочности сварного шва:  $\phi := 0.8$

$$\sigma_{\text{pc}} := 0.8 \cdot \phi \cdot \sigma_{20} = 125.44 \quad \text{МПа}$$

$$U_{sl} := \begin{cases} \text{"Условие прочности сварного шва выполняется"} & \text{if } \sigma_c \leq \sigma_{pc} \\ \text{"Условия прочности НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$U_{sl} = \text{"Условие прочности сварного шва выполняется"}$$

Так как колонна находится в помещении и проходит сквозь межэтажные перекрытия, то необходимо предусмотреть опорные лапы в верхней части колонны.

Производим расчет и подбор лап:

Принимаем количество лап, шт  $z := 4$

Находим нагрузку, приходящуюся на одну лапу:

$$G_{л} := \frac{Q_{\max}}{z} = 6.375 \times 10^{-3} \text{ МН}$$

По [13] подобрали опорные лапы

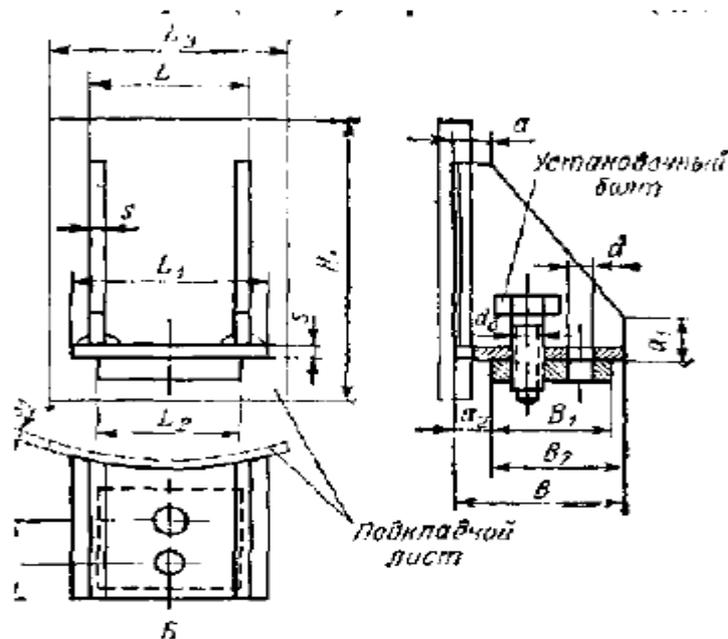


Рисунок 2.13 - Опорные лапы с подкладным листом

Таблица 2.2 - Параметры опорных лап

| $Q \cdot 10^3, \text{ Мн(тс)}$ | Тип опоры | L   | $L_1$ | $L_2$ | B          | $B_1$    | $B_2$    | b  | $b_1$    | H          | h  | s | a  | $a_1$    | $a_2$     | R  | d  | $d_0$ | Исполнение |      | Подкладной лист |       |       |
|--------------------------------|-----------|-----|-------|-------|------------|----------|----------|----|----------|------------|----|---|----|----------|-----------|----|----|-------|------------|------|-----------------|-------|-------|
|                                |           |     |       |       |            |          |          |    |          |            |    |   |    |          |           |    |    |       | A          | B    | $s_1$           | $L_3$ | $H_1$ |
|                                |           |     |       |       |            |          |          |    |          |            |    |   |    |          |           |    |    |       | Масса, кг  |      | мм              |       |       |
| 1,0                            | I/II      | 100 | 120   | 90    | 115<br>195 | 80<br>85 | 85<br>90 | 22 | 65<br>70 | 170<br>235 | 14 | 6 | 25 | 30<br>50 | 30<br>105 | 12 | 24 | M16   | 2,55       | 2,65 | 10;             | 150   | 250   |
|                                |           |     |       |       |            |          |          |    |          |            |    |   |    |          |           |    |    |       | 4,29       | 4,56 | 12              |       | 310   |

Условное обозначение опоры типа I, исполнения Б на нагрузку 0.01 МН, с подкладным листом толщиной 10 мм: «Опора ОВ-1-Б-1000-10 ОН 26-01-69-68»

### 2.3.5. Резюме по прочностному расчёту

В данном разделе подводится итог прочностного расчёта насадочной ректификационной колонны.

Были проведены:

1. Расчёт толщины стенки эллиптической крышки и цилиндрической обечайки, нагруженные внешним и внутренним избыточным давлением, исходя из условий прочности. В таблице 2.3 приведены результаты расчётов.

Таблица 2.3. – Результаты расчёта толщин стенок

| Параметр  | Обозначение |            | Значение |            | Единицы изм. |
|---|-------------|------------|----------|------------|--------------|
|   | Для ЦО      | Для Крышки | Для ЦО   | Для Крышки |              |
| Добавка на коррозию и на компенсацию минусового допуска   | с           |            | 2.8      |            | мм           |
| Максимальная исполнительная толщина стенки обечайки из условия прочности                              | Sэк         | Sэк        | 3.7      | 3.61       | мм           |
| Исполнительная толщину стенки гладкой цилиндрической обечайки из сортамента прокатных стальных листов | s1          | s2         | 5        |            | мм           |
| Допускаемое внутреннее избыточное давление на цилиндрическую обечайку при рабочих условиях            | Pd1         | Pd3        | 1.787    |            | МПа          |
| Допускаемое внутреннее избыточное давление на цилиндрическую обечайку при условиях испытания          | Pd2         | Pd4        | 2.683    |            | МПа          |
| Расчётное значение внутреннего избыточного давления   | Pp          |            | 0.734    |            | МПа          |
| Пробное давление при гидравлическом испытании внутри аппарата   | Pпр         |            | 0.991    |            | МПа          |

2. Расчет укрепления отверстия в эллиптической крышке и цилиндрической обечайке. В результате было выявлено, что расчётный диаметр отверстия не требующий дополнительного укрепления составляет 196.577 мм для крышки, и 139.001 мм для обечайки. Проверка условий необходимости дальнейшего укрепления отверстий показало, что укрепление не требуется.
3. Расчёт фланцевого соединения. Т.к. в колонне находится взрывопожароопасная среда под давлением были подобраны фланцевые соединения приварные встык с привалочной поверхностью шип-паз. Провели расчёт на прочность и герметичность. В таблице 2.4. приведены результаты расчётов.

Таблица 2.4. – Результаты расчёта фланцевого соединения

| Параметр  | Обозначение | Значение              | Единицы изм. |
|---|-------------|-----------------------|--------------|
| Усилие, необходимое для смятия прокладки при затяжке  | $R_{обж}$   | $1.309 \cdot 10^4$    | Н            |
| Нагрузка, вызванная стеснённой температурными деформаций, в соединениях с приварными встык и плоскими фланцами  | $Q_t$       | $5.5 \cdot 10^4$      | Н            |
| Угол поворота приварного встык фланца, плоского фланца (0,006- допустимый)  | $\theta$    | $4.535 \cdot 10^{-4}$ | -            |
| Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец в рабочих условиях:  | $M_p$       | $1.295 \cdot 10^7$    | Н*мм         |
| Расчётная нагрузка на болты (шпильки) при затяжке, необходимая для обеспечения в рабочих условиях давления на прокладку, достаточного для герметизации фланцевого соединения, | $R_{б1}$    | $1.205 \cdot 10^5$    | Н            |

4. Расчёт опорной обечайки, и подбор опорных лап. Полученные данные приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5. – Результаты расчёта опорной обечайки, и опорных лап

| Параметр  | Обозначение   | Значение              | Единицы изм.   |
|---|---------------|-----------------------|----------------|
| Размер площади опорной поверхности фундаментного кольца                                     | $F$           | 0.157                 | м <sup>2</sup> |
| Толщина фундаментного кольца  | $\delta_{к}$  | 0.020                 | м              |
| Количество фундаментных болтов  | $n$           | 6                     | шт             |
| Напряжение в сплошном сварном шве, крепящем корпус аппарата к цилиндрической опорной части: | $\sigma_{с}$  | 5.656                 | МПа            |
| Напряжение в сварном шве при работе на срез   | $\sigma_{рс}$ | 125.44                | МПа            |
| Нагрузка приходящаяся на одну лапу:   | $G_l$         | $6.375 \cdot 10^{-3}$ | МН             |

### 3. Расчёт сварного пластинчатого теплообменника Т-502

#### 3.1. Технологический расчёт теплообменника

**Задание на проектирование.** Рассчитать сварной пластинчатый теплообменник для нагрева циклогексана от начальной температуры  $T_{\text{нач}}=90$  °С до конечной температуры  $T_{\text{конеч}}=91.07$  °С. Давление циклогексана  $P_{\text{ЦГ}}=0.6$  МПа, массовый расход  $G_2=0.26$  кг/с. Нагрев происходит диатермическим маслом  $T_{\text{нач}}=180$  °С,  $T_{\text{конеч}}=101.4$  °С, и давлением  $P_{\text{М}}=0,2$  МПа. Расчет производим согласно [2].

#### Исходные данные:

180 °С -----> 101.4 °С Изменение температуры масла

91.07 °С <----- 90 °С Изменение температуры циклогексана

|  |                          |
|--|--------------------------|
| Начальная температура масла, °С        | $t_{1\text{Н}} := 180$   |
| Конечная температура масла, °С         | $t_{1\text{К}} := 101.4$ |
| Начальная температура циклогексана, °С | $t_{2\text{Н}} := 90$    |
| Конечная температура циклогексана, °С  | $t_{2\text{К}} := 91.07$ |
| Расход циклогексана, кг/с              | $G_2 := 0.26$            |

Находим среднюю температуру циклогексана:

$$t_2 := 0.5 \cdot (t_{2\text{Н}} + t_{2\text{К}}) = 90.535 \text{ °С}$$

Средняя разность температур:

$$\Delta t_{\text{ср}} := \frac{(t_{1\text{Н}} - t_{2\text{К}}) - (t_{1\text{К}} - t_{2\text{Н}})}{\ln \left[ \frac{(t_{1\text{Н}} - t_{2\text{К}})}{(t_{1\text{К}} - t_{2\text{Н}})} \right]} = 37.742 \text{ °С}$$

$$\Delta t_{\text{ср}} := 38 \text{ °С}$$

Средняя температура масла Mobiltherm 605:

$$t_1 := t_2 + \Delta t_{\text{ср}} = 128.535 \text{ °С}$$

Теплофизические свойства масла Mobiltherm 605:

|                               |                               |
|-------------------------------|-------------------------------|
| Плотность, кг/ м <sup>3</sup> | $\rho_1 := 782.5$             |
| Теплопроводность, Вт/м*К      | $\lambda_1 := 0.11$           |
| Теплоёмкость, Дж/кг*К         | $c_1 := 2420$                 |
| Динамическая вязкость, Па*с   | $\mu_1 := 1.65 \cdot 10^{-3}$ |

Теплофизические свойства циклогексана:

|                              |                               |
|------------------------------|-------------------------------|
| Плотность, кг/м <sup>3</sup> | $\rho_2 := 722.5$             |
| Теплопроводность, Вт/м*К     | $\lambda_2 := 0.1$            |
| Теплоёмкость, Дж/кг*К        | $c_2 := 2080$                 |
| Динамическая вязкость, Па*с  | $\mu_2 := 0.35 \cdot 10^{-3}$ |

Тепловая нагрузка:

$$Q := G_2 \cdot c_2 \cdot (t_{2K} - t_{2H}) = 578.656 \quad \text{Вт}$$

Принимаем тепловую нагрузку на 5% больше:

$$Q := Q \cdot 1.05 = 607.589 \quad \text{Вт}$$

Расход масла Mobiltherm 605:

$$G_1 := \frac{Q}{c_1 \cdot (t_{1H} - t_{1K})} = 3.194 \times 10^{-3} \quad \text{кг/с}$$

Коэффициент теплопередачи от жидкости к жидкости (углеводороды, масла):

$$K_{op} = 120 - 270 \quad \text{Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

Принимаем:

$$K_{op} := 120 \quad \text{Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

Находим ориентировочную поверхность теплоотдачи:

$$F_{op} := \frac{Q}{K_{op} \cdot \Delta t_{cp}} = 0.133 \quad \text{м}^2$$

Рассмотрим разборный пластинчатый теплообменник.

Техническая характеристика пластин:

|                                 |                            |
|---------------------------------|----------------------------|
| Эквивалентный диаметр канала, м | $d_3 := 9.8 \cdot 10^{-3}$ |
| Поперечное сечение канала, м    | $S := 10 \cdot 10^{-4}$    |
| Приведённая длина канала, м     | $L_{II} := 0.18$           |

Габаритные размеры пластин:

|            |                         |
|------------|-------------------------|
| Длина, м   | $a := 0.200$            |
| Ширина, м  | $b := 0.200$            |
| Толщина, м | $\delta_{ст} := 0.0008$ |

Количество каналов

|                         |            |
|-------------------------|------------|
| Каналы для масла        | $m_1 := 8$ |
| Каналы для циклогексана | $m_2 := 2$ |

Находим скорость циклогексана в двух каналах:

$$w_2 := \frac{G_2}{m_2 \cdot \rho_2 \cdot S} = 0.18 \text{ м/с}$$

Критерий Прандтля:

$$Pr_2 := \frac{\mu_2 \cdot c_2}{\lambda_2} = 7.28$$

Критерий Рейнольдса:

$$Re_2 := \frac{w_2 \cdot d_3 \cdot \rho_2}{\mu_2} = 3.64 \times 10^3$$

$Re_2 > 50$  т.е. режим турбулентный.

Коэффициент теплоотдачи от циклогексана к стенке при  $Re_2 > 50$

$$Nu_2 := \frac{\alpha_2 \cdot d_3}{\lambda_2} = 0.135 \cdot Re_2^{0.73} \cdot Pr_2^{0.43} \cdot (1)^{0.25} = 126.082$$

$\frac{Pr}{Pr_{ст}}$  := 1 т.к. температуры жидкости и стенки не сильно отличаются.

$$a_1 := 0.065$$

$$\alpha_2 := \left[ \frac{[a_1 \cdot Re_2^{0.73} \cdot Pr_2^{0.43} \cdot (1)^{0.25} \cdot \lambda_2]}{d_3} \right] = 619.452 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

Скорость масла в восьми каналах:

$$w_1 := \frac{G_1}{m_1 \cdot \rho_1 \cdot S} = 5.103 \times 10^{-4} \text{ м/с}$$

Критерий Прандтля:

$$Pr_1 := \frac{\mu_1 \cdot c_1}{\lambda_1} = 36.3$$

Критерий Рейнольдса:

$$Re_1 := \frac{w_1 \cdot d_3 \cdot \rho_1}{\mu_1} = 2.372$$

$Re_1 < 50$  т.е. режим ламинарный.

Коэффициент теплоотдачи от стенки к маслу:

$$Nu_1 := \frac{\alpha_1 \cdot d_3}{\lambda_1}$$

$$a_2 := 0.46$$

$$\alpha_1 := \left[ \frac{a_2 \cdot Re_1^{0.73} \cdot Pr_1^{0.43} \cdot (1)^{0.25} \cdot \lambda_1}{d_3} \right] = 45.441 \quad \text{Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

Принимаем:

Тепловая проводимость загрязнений со стороны циклогексана,  $\text{Вт/м}^2 \cdot \text{К}$   $r_1 := 5800$

Тепловая проводимость загрязнений со стороны масла,  $\text{Вт/м}^2 \cdot \text{К}$   $r_2 := 2900$

Теплопроводность стали 03X17H14M3,  $\text{Вт/м} \cdot \text{К}$   $\lambda_{ст} := 29.4$

Толщина гофрированной пластины, м  $\delta_{\text{гофр}} := 0.0008$

Общее термическое сопротивление:

$$R_{\text{ПТ}} := \frac{1}{r_1} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{1}{r_2} = 5.445 \times 10^{-4} \quad \text{м}^2 \cdot \text{К/Вт}$$

Коэффициент теплопередачи:

$$K := \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + R_{\text{ПТ}} + \frac{1}{\alpha_2}} = 41.382 \quad \text{Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

Расчётная поверхность теплопередачи:

$$F_p := \frac{Q}{K \cdot \Delta t_{\text{ср}}} = 0.386$$

Принимаем к установке разборный пластинчатый теплообменник типа ТПР, поверхность теплопередачи  $F=4.8 \text{ м}^2$ , поверхность пластины  $f=0.04 \text{ м}^2$ , количество пластин 80, масса аппарата 435 кг.

## 3.2. Конструктивный расчёт теплообменника

### 3.2.1. Расчет патрубков и подбор фланцев

Расчёт патрубков производим по [3].

|   |                        |
|---|------------------------|
| Расход масла, кг/ч                                | $F_1 := 867$           |
| Средняя плотность масла, кг/м <sup>3</sup>        | $\rho_{Mcp} := 782.58$ |
| Расход жидкого циклогексана, кг/ч                 | $F_2 := 940$           |
| Средняя плотность циклогексана, кг/м <sup>3</sup> | $\rho_{ЦГcp} := 722.6$ |
| Расход паров циклогексана, кг/ч                   | $F_3 := 470$           |
| Плотность пара циклогексана, кг/м <sup>3</sup>    | $\rho_{ЦГ} := 2.95$    |

Для входа и выхода масла.

Скорость течения масла в трубке, м/с  $W_{исх} := 0.2$

Объемный расход:

$$V_{исх} := \frac{F_1}{3600 \cdot \rho_{Mcp}} = 3.077 \times 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$$

$$D_{исх} := \sqrt{\frac{V_{исх} \cdot 4}{\pi \cdot W_{исх}}} = 0.044 \text{ м}$$

Принимаем диаметр патрубка для входа и выхода масла:

$$D_{входмасла} := 50 \text{ мм}$$

$$D_{выходмасла} := 50 \text{ мм}$$

Для входа циклогексана.

Скорость течения циклогексана в трубке, м/с  $W_{исх} := 0.2$

Объемный расход:

$$V_{исх} := \frac{F_2}{3600 \cdot \rho_{ЦГcp}} = 3.613 \times 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$$

$$D_{исх} := \sqrt{\frac{V_{исх} \cdot 4}{\pi \cdot W_{исх}}} = 0.048 \text{ м}$$

Принимаем диаметр патрубка для входа циклогексана:

$$D_{входЦГ} := 50 \text{ мм}$$

Для выхода паров циклогексана.

Скорость паров циклогексана в патрубке, м/с  $W_{\text{исхЦГ}} := 10$

Объемный расход:

$$V_{\text{исхЦГ}} := \frac{F_3}{3600 \cdot \rho_{\text{ЦГ}}} = 0.044 \quad \text{м}^3/\text{с}$$

$$D_{\text{исхЦГ}} := \sqrt{\frac{V_{\text{исхЦГ}} \cdot 4}{\pi \cdot W_{\text{исхЦГ}}}} = 0.075 \quad \text{м}$$

Принимаем диаметр патрубка для выхода паров циклогексана

$D_{\text{выходЦГ}} := 100 \quad \text{мм}$

По [4] подобрали фланцевые соединения для патрубков с привалочной поверхностью "шип паз" на условное давление  $P_y = 1.6$  МПа. Выбрали фланцы этого исполнения, т.к. в теплообменнике находится взрывопожароопасная среда под давлением  $P_{\text{шт}} = 0.6$  МПа,  $P_M = 0.2$  МПа.

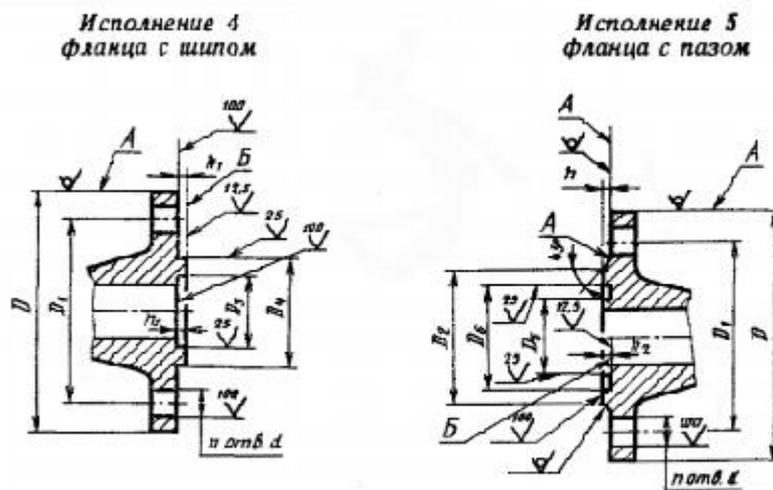


Рисунок 3.1 - Фланцы приварные встык с привалочной поверхностью "Шип-паз"

Таблица 3.1 - Параметры фланцевых соединений

| Прочность условный $D_y$ | $D$ | $D_1$ | $D_2$ | $D_3$ |       | $D_4$ |       | $D_5$ |       | $D_6$ |       | $d$   |       | $n$   |       | $h$ | $h_1$ |       | $h_2$ |   | $B$ | Номинальный диаметр болтов или шпилек |     |
|--------------------------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|-------|-------|-------|---|-----|---------------------------------------|-----|
|                          |     |       |       | Ряд 1 | Ряд 2 |     | Ряд 1 | Ряд 2 |       |   |     |                                       |     |
|                          |     |       |       | 50    | 160   | 125   | 102   | 73    | 87    | 72    | 88    |       |       | 4     | 4     |     | 3     | 4     | 4     | 3 |     | 3                                     | 125 |
| 100                      | 215 | 180   | 158   | 129   | 149   | 128   | 150   | 18    | 18    | 8     | 8     | 3     | 4,5   | 4     | 3,5   |     |       |       |       |   |     |                                       |     |

### 3.3. Прочностной расчёт теплообменника

Все рассчитываемые узлы сварного пластинчатого теплообменника (Крышки: Аа, Ва, Аб, Вб, С) изготовлены из стали 09Г2С.

Сталь 09Г2С конструкционная низколегированная для сварных конструкций. Выбрали эту сталь т.к. изготовленное из неё оборудование переносит повышенные нагрузки как силовые, так и механические, в том числе резкие перепады температуры. Допустимый диапазон от минус 70 до плюс 450 °С.

Физические свойства стали 09Г2С достаточны для того, чтобы обеспечить прочность фасонного, сортового и полосового металлопроката при различных толщинах (от 10 до 100мм). При этом какой-либо дополнительной обработки не потребуется.

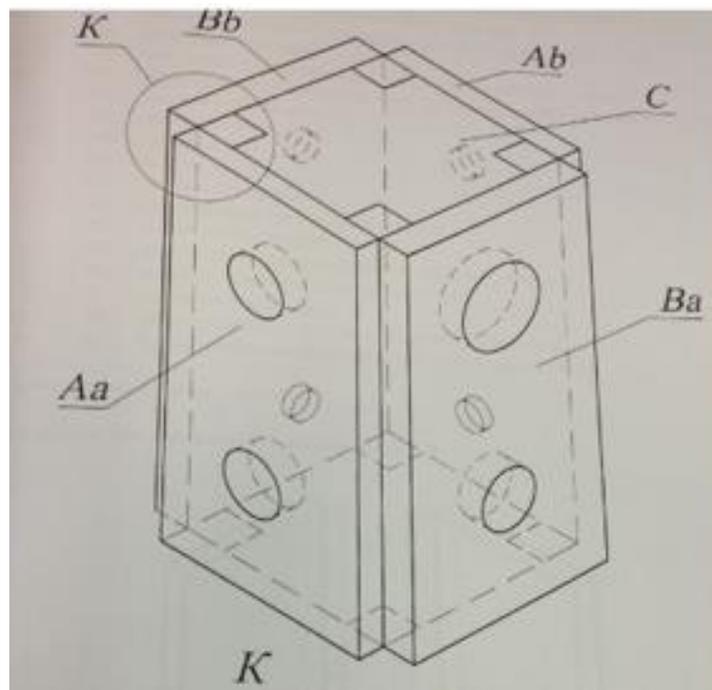


Рисунок 3.1 Схема рассчитываемого теплообменника

#### Исходные данные:

|  |                     |
|--|---------------------|
| Рабочее давление полость А, МПа  | $P_1 := 0.6$        |
| Рабочее давление полость В, МПа  | $P_2 := 0.2$        |
| Расчётное давление в рабочих условия полость А, МПа                              | $P_A := P_1 = 0.6$  |
| Расчётное давление в рабочих условия полость В, МПа                              | $P_B := P_2 = 0.2$  |
| Расчётная температура, °С  | $T := 250$          |
| Допускаемое напряжение для стали 09Г2С для рабочих условий, МПа                  | $\sigma_p := 145$   |
| Допускаемое напряжение для стали 09Г2С для условий гидравлических испытаний, МПа | $\sigma_{и} := 183$ |

|  |                          |
|--|--------------------------|
| Приведённый диаметр, мм                                    | $D_b := 510$             |
| Ширина прокладки, мм                                       | $b := 13$                |
| Длина крышки, мм   | $n := 468$               |
| Ширина крышки, мм  | $m := 240$               |
| Диаметр отверстия под штуцер полость А, мм                 | $d_1 := 60$              |
| Количество отверстий под штуцера                           | $N_1 := 2$               |
| Максимальный диаметр отверстия под штуцер полость В        | $d_2 := 108$             |
| Диаметр отверстия под штуцер полость В, мм                 | $d_3 := 60$              |
| Количество отверстий под штуцера                           | $N_{2,3} := 1$           |
| Диаметр отверстия под технологический штуцер полость А, мм | $d_{\text{технА}} := 32$ |
| Диаметр отверстия под технологический штуцер полость В, мм | $d_{\text{технВ}} := 32$ |
| Срок эксплуатации, лет                                     | $Y := 20$                |
| Скорость коррозии, мм/год                                  | $\Pi := 0.1$             |

Пробное давление при гидравлическом испытании:

Для полости А:

$$P_{иА} := 1.25 \cdot P_A \cdot \frac{\sigma_{и}}{\sigma_p} = 0.947 \text{ МПа}$$

Для полости В:

$$P_{иВ} := 1.25 \cdot P_B \cdot \frac{\sigma_{и}}{\sigma_p} = 0.316 \text{ МПа}$$

### 3.3.1. Расчёт прямоугольных боковых крышек:

#### 3.3.1.1. Расчёт крышек (без отверстий), панели полостей А, В:

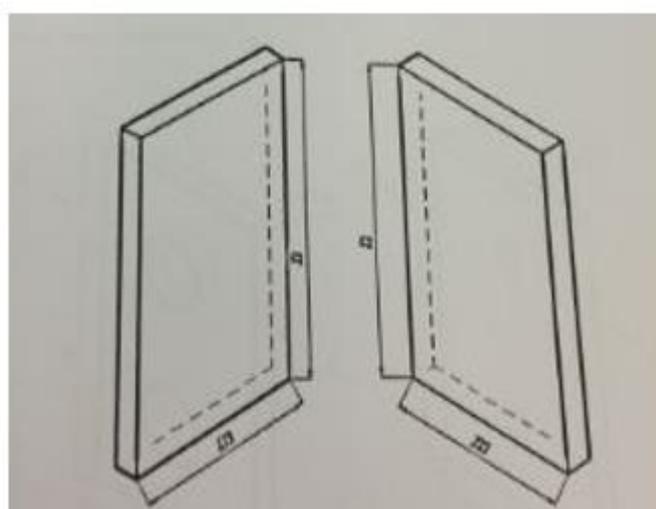


Рисунок 3.2 - Крышки без отверстий

Проводим расчет согласно [14].

Номинальная толщина прямоугольной крышки в рабочих условиях должна быть не менее определённой по формуле:

$$S_1 := S_{1R} + c$$

Добавка на коррозию и на компенсацию минусового допуска:

$$c_1 := Y \cdot \Pi = 2 \quad \text{мм}$$

$$c_2 := 0.8 \quad \text{мм}$$

$$c := c_1 + c_2 = 2.8 \quad \text{мм}$$

Откуда находим расчётную толщину прямоугольной крышки в рабочих условиях:

$$S_{1R} := K_m \cdot Y \cdot m \cdot \sqrt{\frac{P_A}{\sigma_p}}$$

Коэффициент  $K_m$  определяется по формуле:

$$K_m := \frac{0.5 \cdot D_b}{D_H} = 0.53 \quad \text{где} \quad D_H := n + b = 481 \quad \text{мм}$$

Коэффициент  $Y$  определяется по формуле:

$$Y := \frac{1.41}{\sqrt{1 + \left(\frac{m}{n}\right)^2}} = 1.255$$

Отсюда находим:

Для полости А:

$$S_{1RA} := K_m \cdot Y \cdot m \cdot \sqrt{\frac{P_A}{\sigma_p}} = 10.269 \quad \text{мм}$$

$$S_{1p} := S_{1RA} + c = 13.069 \quad \text{мм}$$

Для полости В

$$S_{1RB} := K_m \cdot Y \cdot m \cdot \sqrt{\frac{P_B}{\sigma_p}} = 5.929 \quad \text{мм}$$

$$S_{2p} := S_{1RB} + c = 8.729 \quad \text{мм}$$

Номинальная толщина прямоугольной крышки в условиях гидроиспытаний должна быть не менее:

Для полости А:

$$S_{2RA} := K_m \cdot Y \cdot m \cdot \sqrt{\frac{P_{иА}}{\sigma_{и}}} = 11.481 \quad \text{мм}$$

$$S_{1И} := S_{2РА} + c = 14.281 \quad \text{мм}$$

Для полости В:

$$S_{2RB} := K_m \cdot Y \cdot m \cdot \sqrt{\frac{P_{ИВ}}{\sigma_{И}}} = 6.628 \quad \text{мм}$$

$$S_{2И} := S_{2RB} + c = 9.428 \quad \text{мм}$$

Выбираем максимальные расчётные значения толщины прямоугольной крышки:

Для полости А:

$$S_A := \max(S_{1РА}, S_{1RB}) = 10.269 \quad \text{мм}$$

Для полости В:

$$S_B := \max(S_{2РА}, S_{2RB}) = 11.481 \quad \text{мм}$$

### 3.3.2. Расчёт боковых крышек панели Аа, Аб:

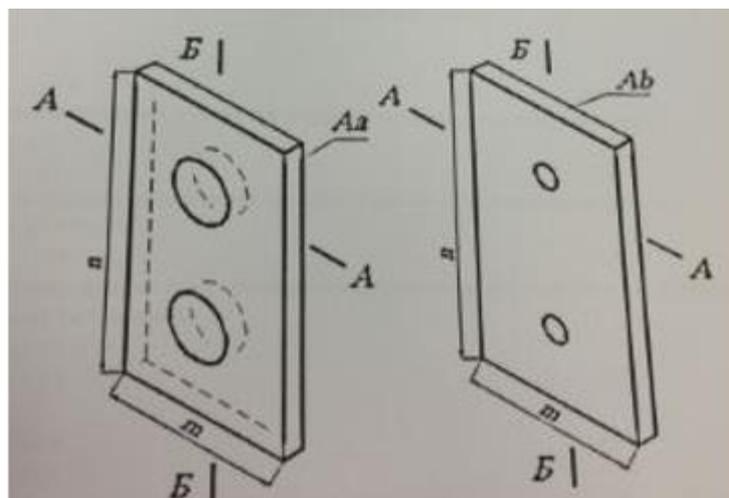


Рисунок 3.3 - Крышки с отверстиями панель Аа, Аб

Номинальная толщина прямоугольной крышки в рабочих условия и условиях гидроиспытаний должна быть не менее определенной по формулам п.3.1.1, п.3.1.2.

В сечении А-А, 1 отверстие.

Коэффициент ослабления:

Для панели Аа:

$$K_{o1Aa} := \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{d_1}{D_b} + \left(\frac{d_1}{D_b}\right)^2}} = 0.94$$

Для панели Ab:

$$K_{o1Ab} := \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{d_{\text{технА}}}{D_b} + \left(\frac{d_{\text{технА}}}{D_b}\right)^2}} = 0.968$$

Расчётная толщина крышки в сечении А-А, в рабочих условиях:

$$S_{ARAA} := \frac{S_A}{K_{o1Aa}} = 10.923 \text{ мм} \quad S_{BRAA} := \frac{S_A}{K_{o1Ab}} = 10.606 \text{ мм}$$

Расчётная толщина крышки в сечении А-А, в условиях гидравлических испытаний:

$$S_{1R} := S_{ARAA} + c = 13.723 \text{ мм} \quad S_{2R} := S_{BRAA} + c = 13.406 \text{ мм}$$

Номинальная толщина крышки в сечении А-А, в рабочих условиях должна быть не менее:

$$S_{AR2} := \frac{S_B}{K_{o1Aa}} = 12.212 \text{ мм} \quad S_{BR2} := \frac{S_B}{K_{o1Ab}} = 11.857 \text{ мм}$$

Номинальная толщина стенки боковой прямоугольной крышки в сечении А-А, в условиях гидравлических испытаний должна быть не менее:

$$S_{1I} := S_{AR2} + c = 15.012 \text{ мм} \quad S_{2I} := S_{BR2} + c = 14.657 \text{ мм}$$

В сечении Б-Б, 2 отверстия.

Коэффициент ослабления:

Для панели Aa:

$$K_{o2Aa} := \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{(d_1 + d_1)}{D_b} + \left(\frac{d_1 + d_1}{D_b}\right)^2}} = 0.88$$

Для панели Ab:

$$K_{o2Ab} := \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{(d_{\text{технА}} + d_{\text{технА}})}{D_b} + \left(\frac{d_{\text{технВ}} + d_{\text{технВ}}}{D_b}\right)^2}} = 0.936$$

Расчётная толщина крышки в сечении Б-Б, в рабочих условиях:

$$S_{ARBB} := \frac{S_A}{K_{o2Aa}} = 11.666 \text{ мм} \quad S_{BRBB} := \frac{S_A}{K_{o2Ab}} = 10.97 \text{ мм}$$

Номинальная толщина крышки в сечении Б-Б, в рабочих условиях должна быть не менее:

$$S_{1R} := S_{ARBB} + c = 14.466 \text{ мм} \quad S_{2R} := S_{BRBB} + c = 13.77 \text{ мм}$$

Расчётная толщина крышки в сечении Б-Б, в условиях гидравлических испытаний:

$$S_{AR2} := \frac{S_B}{K_{o2Aa}} = 13.043 \text{ мм} \quad S_{BR2} := \frac{S_B}{K_{o2Ab}} = 12.265 \text{ мм}$$

Номинальная толщина стенки боковой прямоугольной крышки в сечении А-А, в условиях гидравлических испытаний должна быть не менее:

$$S_{1I} := S_{AR2} + c = 15.012 \text{ мм} \quad S_{2I} := S_{BR2} + c = 14.657 \text{ мм}$$

Выбираем максимальные расчётные значения толщины прямоугольной крышки:

Для панели Аа расчётное:

$$S_{Aa} := \max(S_{ARAA}, S_{AR2}, S_{ARBB}, S_{AR2}) = 13.043 \text{ мм}$$

Для панели Ab расчётное:

$$S_{Ab} := \max(S_{BRAA}, S_{BR2}, S_{BRBB}, S_{BR2}) = 12.265 \text{ мм}$$

Для панели Аа номинальное:

$$S_{Aa} := \max(S_{1R}, S_{1I}, S_{1R}, S_{1I}) = 15.012 \text{ мм}$$

Для панели Ab номинальное:

$$S_{Ab} := \max(S_{2R}, S_{2I}, S_{2R}, S_{2I}) = 14.657 \text{ мм}$$

Принимаем исполнительную толщину стенок

Для крышки Аа

$$S_{Aa} := 40 \text{ мм}$$

Для крышки Ab:

$$S_{Ab} := 30 \text{ мм}$$

### 3.3.3. Расчёт крышек панель Ва, Вб

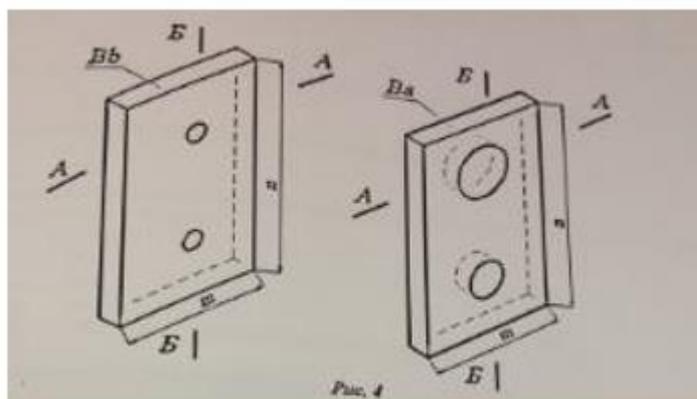


Рисунок 3.4 - Крышки с отверстиями панель Ва, Вб

Номинальная толщина прямоугольной крышки в рабочих условиях и условиях гидроиспытаний должна быть не менее определённой по формулам п 3.1.1, п 3.1.2.

В сечении А-А 1 отверстие.

Коэффициент ослабления:

Для панели Ва:

$$K_{o1Ba} := \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{d_2}{D_b} + \left(\frac{d_2}{D_b}\right)^2}} = 0.892$$

Для панели Вв:

$$K_{o1Bb} := \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{d_{\text{технА}}}{D_b} + \left(\frac{d_{\text{технА}}}{D_b}\right)^2}} = 0.968$$

Расчётная толщина крышки в сечении А-А, в рабочих условиях:

$$S_{ARBA} := \frac{S_A}{K_{o1Ba}} = 11.511 \text{ мм} \quad S_{BRBA} := \frac{S_A}{K_{o1Bb}} = 10.606 \text{ мм}$$

Номинальная толщина крышки в сечении А-А, в рабочих условиях:

$$S_{3R} := S_{ARBA} + c = 14.311 \text{ мм} \quad S_{4R} := S_{BRBA} + c = 13.406 \text{ мм}$$

Расчётная толщина крышки в сечении А-А, в условиях гидравлических испытаний:

$$S_{AR3} := \frac{S_B}{K_{o1Ba}} = 12.87 \text{ мм} \quad S_{BR3} := \frac{S_B}{K_{o1Bb}} = 11.857 \text{ мм}$$

Номинальная толщина крышки в сечении А-А, в условиях гидравлических испытаний:

$$S_{3I} := S_{AR3} + c = 15.67 \text{ мм} \quad S_{4I} := S_{BR3} + c = 14.657 \text{ мм}$$

В сечении Б-Б, 2 отверстия.

Коэффициент ослабления:

Для панели Ва:

$$K_{o2Ba} := \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{(d_2 + d_2)}{D_b} + \left(\frac{d_1 + d_1}{D_b}\right)^2}} = 0.822$$

Для панели Вв:

$$K_{o2Bb} := \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{(d_{\text{технА}} + d_{\text{технА}})}{D_b} + \left(\frac{d_{\text{технВ}} + d_{\text{технВ}}}{D_b}\right)^2}} = 0.936$$

Расчётная толщина крышки в сечении Б-Б, в рабочих условиях:

$$S_{2ARBB} := \frac{S_A}{K_{o2Ba}} = 12.488 \text{ мм} \quad S_{2BRBB} := \frac{S_A}{K_{o2Bb}} = 10.97 \text{ мм}$$

Номинальная толщина крышки в сечении Б-Б, в рабочих условиях должна быть не менее:

$$S_{4R} := S_{2ARBB} + c = 15.288 \text{ мм} \quad S_{5R} := S_{2BRBB} + c = 13.77 \text{ мм}$$

Расчётная толщина крышки в сечении Б-Б, в условиях гидравлических испытаний:

$$S_{2AR2} := \frac{S_B}{K_{o2Ba}} = 13.962 \text{ мм} \quad S_{2BR2} := \frac{S_B}{K_{o2Bb}} = 12.265 \text{ мм}$$

Номинальная толщина стенки боковой прямоугольной крышки в сечении А-А, в условиях гидравлических испытаний должна быть не менее:

$$S_{5L} := S_{2AR2} + c = 16.762 \text{ мм} \quad S_{6L} := S_{2BR2} + c = 15.065 \text{ мм}$$

Выбираем максимальные расчётные значения толщины прямоугольной крышки:

Для панели Ва расчётное:

$$S_{Ba} := \max(S_{ARBA}, S_{AR3}, S_{2ARBB}, S_{2AR2}) = 13.962 \text{ мм}$$

Для панели Bb расчётное:

$$S_{Bb} := \max(S_{BRBA}, S_{BR3}, S_{2BRBB}, S_{2BR2}) = 12.265 \text{ мм}$$

Для панели Va номинальное:

$$S_{Va} := \max(S_{3R}, S_{3L}, S_{4R}, S_{5L}) = 16.762$$

Для панели Vb номинальное:

$$S_{Vb} := \max(S_{4R}, S_{4L}, S_{5R}, S_{6L}) = 15.065$$

Принимаем исполнительную толщину стенок

Для крышки Va:

$$S_{Ba} := 40 \text{ мм}$$

Для крышки Vb:

$$S_{Bb} := 30 \text{ мм}$$

### 3.3.4. Расчёт шпилек теплообменного аппарата

Расчёт проводим согласно [11].

**Исходные данные:**

|  |                 |
|--|-----------------|
| Ширина прокладки, мм                     | $b_{\Pi} := 13$ |
| Длина крышки, мм                         | $n = 468$       |
| Ширина прокладки, мм                     | $m = 240$       |
| Удельное давление обжатие прокладки, МПа | $q_{обж} := 20$ |
| Допускаемое удельное давление, МПа       | $g := 130$      |

|   |                     |
|---|---------------------|
| Коэффициент обжатия прокладки   | $K_{обж} := 0.9$    |
| Прокладочный коэффициент  | $m_{п} := 2.5$      |
| Площадь поперечного сечения шпильки М20 по внутреннему диаметру резьбы, мм <sup>2</sup> | $f_6 := 225$        |
| Количество шпилек, шт   | $n := 16$           |
| Номинальное допустимое напряжение для шпилек в рабочих условиях, МПа                    | $\sigma_{ш} := 226$ |

Усилие необходимое для смятия прокладки при затяжке:

$$P_{обж} := 0.5 \cdot \pi \cdot D_{сп} \cdot b_0 \cdot q_{обж}$$

Из этого уравнения находим

$$D_{сп} := \frac{(m + b_{п}) \cdot 2 + (n + b_{п})^2}{\pi} = 467.279 \quad \text{мм}$$

Эффективная ширина прокладки:

$$b_0 := 3.8 \cdot \sqrt{b_{п}} = 13.701 \quad \text{мм}$$

Отсюда получаем значение усилия:

$$P_{обж} := 0.5 \cdot \pi \cdot D_{сп} \cdot b_0 \cdot q_{обж} = 2.011 \times 10^5 \quad \text{Н}$$

Равнодействующая нагрузка от давления:

$$\theta_{д} := 0.785 \cdot D_{сп}^2 \cdot P_{иА} = 1.622 \times 10^5 \quad \text{Н}$$

Для прямоугольной крышки значение площади равно:

$$F := (m + b_{п}) \cdot (n + b_{п}) = 1.217 \times 10^5 \quad \text{мм}^2$$

Расчётная нагрузка на шпильки при затяжке для обеспечения обжатия прокладки:

$$P_{62} := 0.4 \cdot A_6 \cdot \sigma_{ш}$$

Из этой формулы находим суммарную площадь сечения шпилек по внутреннему диаметру резьбы или нагруженному сечению наименьшего диаметра:

$$A_6 := n \cdot f_6 = 3.6 \times 10^3$$

Получаем

$$P_{62} := 0.4 \cdot A_6 \cdot \sigma_{ш} = 3.254 \times 10^5 \quad \text{Н}$$

$$P_{62} := \max(P_{обж}, 0.4 \cdot A_6 \cdot \sigma_{ш}) = 3.254 \times 10^5 \quad \text{Н}$$

Расчётные напряжения в шпильках при затяжке:

$$\sigma_{01} := \frac{P_{62}}{A_6} = 90.4 \quad \text{МПа}$$

Проверка условий прочности шпилек при затяжке:

$$Usl\_1 := \begin{cases} \text{"Условия прочности при затяжке НЕ выполняются"} & \text{if } \sigma_{01} > \sigma_{ш} \\ \text{"Условия прочности выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl\_1 = \text{"Условия прочности выполняются"}$$

### 3.3.5. Расчёт крышек на максимальные напряжения и максимальный прогиб

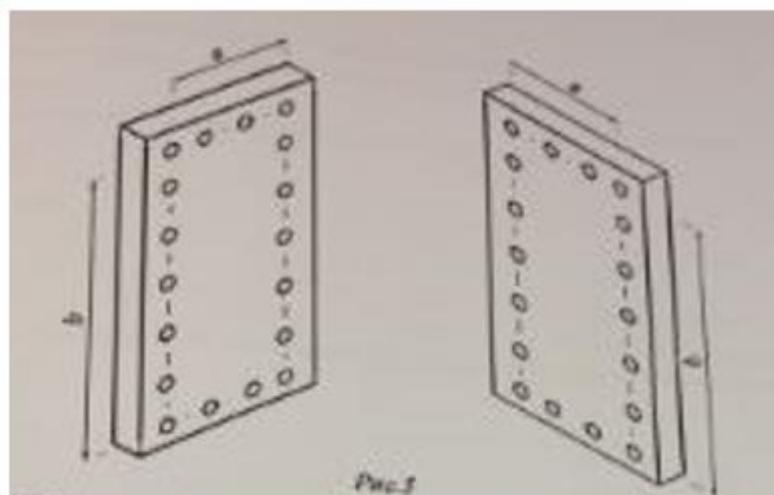


Рисунок 3.5. - Прямоугольные крышки

Проводим расчет согласно [16]. Коэффициенты:  $K_{\sigma 1}$ ,  $K_{\sigma 2}$ ,  $K_{\omega 1}$ ,  $K_{\omega 2}$ ,  $\nu$  взяты из [16]

#### Исходные данные:

|  |                   |
|--|-------------------|
| Расчётное давление в рабочих условия полость А, МПа                    | $p_A := 0.6$      |
| Расчётное давление в рабочих условия полость В, МПа                    | $p_B := 0.2$      |
| Расчётное давление в условиях гидравлического испытания полость А, МПа | $p_{1A} := 0.947$ |
| Расчётное давление в условиях гидравлического испытания полость В, МПа | $p_{1B} := 0.316$ |
| Расчётная температура, °С  | $T = 250$         |
| Расстояние по центрам шпилек (ширина), мм                              | $a := 282$        |
| Расстояние по центрам шпилек (длина), мм                               | $b := 510$        |
| Толщина крышки Аа с максимальным отверстием под штуцер, мм             | $h_{Aa} := 35$    |
| Максимальный диаметр отверстия под полость А, мм                       | $d_A := 60$       |
| Толщина крышки Ва с максимальным отверстием под штуцер, мм             | $h_{Ba} := 35$    |

|   |                                    |
|---|------------------------------------|
| Максимальный диаметр отверстия под штуцер полость В, мм                         | $d_B := 108$                       |
| Толщина крышки С, мм  | $h_C := 35$                        |
| Коэффициент напряжений для крышек с заделкой по краям                           | $K_{\sigma 1} := 0.495$            |
| Коэффициент прогиба для крышек с заделкой по краям.                             | $K_{\omega 1} := 0.0275$           |
| Коэффициент Пуансона  | $\nu := 0.3$                       |
| Модуль упругости для марки стали 09Г2С при 250°C, кгс/см <sup>2</sup>           | $E_{250} := 172600$                |
| Модуль продольной упругости для марки стали 09Г2С при 20°C, кгс/см <sup>2</sup> | $E_{20} := 195000$                 |
| Допустимое значение величины прогиба трубных решеток                            | $\omega := 0.7$                    |
| Коэффициент напряжений для крышек свободно опертой на болтах                    | $K_{\sigma 2} := 0.6006$           |
| Коэффициент прогиба для крышек свободно опертой на болтах                       | $K_{\omega 2} := 0.1085$           |
| Допустимый угол прогиба, град   | $\theta_D := 0.0060$               |
| Ширина и длина крышки С, мм   | $A := 318$                         |
| Коэффициент напряжений для крышки С   | $K_{\sigma C} := 0.308$            |
| Длина крышки, мм  | $\underline{\underline{n}} := 468$ |
| Ширина крышки, мм   | $\underline{\underline{m}} := 240$ |
| Отношение сторон  | $\frac{n}{m} = 1.95$               |

Расчёт максимальных напряжений и прогибов крышки:

Рассмотрим случай - заделка крышки по краям

Расчёт максимального напряжения в крышке в рабочих условиях:

Для полости А:

$$\sigma_{\max 1A} := K_{\sigma 1} \cdot \frac{p_A \cdot a^2}{h_{Aa}^2} = 19.281 \text{ МПа}$$

$$Usl := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } \sigma_{\max 1A} \leq \sigma_p \\ \text{"Условия прочности НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Usl = "Условие прочности выполняется"

Для полости В:

$$\sigma_{\max 1B} := K_{\sigma 1} \cdot \frac{p_B \cdot a^2}{h_{Ba}^2} = 6.427 \text{ МПа}$$

$$\underline{\underline{Usl}} := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } \sigma_{\max 1B} \leq \sigma_p \\ \text{"Условия прочности НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Usl = "Условие прочности выполняется"

Расчёт максимального напряжения в крышке в условиях гидравлических испытаний:

Для полости А:

$$\sigma_{\max 2A} := K_{\sigma 1} \cdot \frac{p_{IA} \cdot a^2}{h_{Aa}^2} = 30.431 \quad \text{МПа}$$

$$U_{sl} := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } \sigma_{\max 2A} \leq \sigma_H \\ \text{"Условия прочности НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Usl = "Условие прочности выполняется"

Для полости В:

$$\sigma_{\max 2B} := K_{\sigma 1} \cdot \frac{p_{IB} \cdot a^2}{h_{Ba}^2} = 10.154 \quad \text{МПа}$$

$$U_{sl} := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } \sigma_{\max 2B} \leq \sigma_H \\ \text{"Условия прочности НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Usl = "Условие прочности выполняется"

Расчёт максимального прогиба крышки в рабочих условиях:

Для полости А:

$$\omega_{\max 1A} := K_{\omega 1} \cdot \frac{p_A \cdot a^4}{E_{250} \cdot h_{Aa}^3} = 0.014 \quad \text{мм}$$

$$U_{sl} := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } \omega_{\max 1A} < \omega \\ \text{"Условия прочности НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Usl = "Условие прочности выполняется"

Для полости В:

$$\omega_{\max 1B} := K_{\omega 1} \cdot \frac{p_B \cdot a^4}{E_{250} \cdot h_{Ba}^3} = 4.7 \times 10^{-3} \quad \text{мм}$$

$$U_{sl} := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } \omega_{\max 1B} < \omega \\ \text{"Условия прочности НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Usl = "Условие прочности выполняется"

Расчёт максимального прогиба крышки в условиях гидравлического испытания:

Для полости А:

$$\omega_{\max 2A} := K_{\omega 1} \cdot \frac{p_{IA} \cdot a^4}{E_{20} \cdot h_{Aa}^3} = 0.02 \quad \text{мм}$$

$$U_{sl} := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } \omega_{\max 2A} \leq \omega \\ \text{"Условия прочности НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

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

Для полости В:

$$\omega_{\max 2B} := K_{\omega 1} \cdot \frac{p_{1B} \cdot a^4}{E_{20} \cdot h_{Ba}^3} = 6.573 \times 10^{-3} \quad \text{мм}$$

$$U_{sl} := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } \omega_{\max 2B} \leq \omega \\ \text{"Условия прочности НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

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

Расчёт максимальных напряжений и прогибов крышки:

Рассмотрим случай - крышка свободно оперта на болтах

Расчёт максимального напряжения в крышке в рабочих условиях:

Для полости А:

$$\sigma_{\max 3A} := K_{\sigma 2} \cdot \frac{p_A \cdot a^2}{h_{Aa}^2} = 23.394 \quad \text{МПа}$$

$$U_{sl} := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } \sigma_{\max 3A} \leq \sigma_p \\ \text{"Условия прочности НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

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

Для полости В:

$$\sigma_{\max 3B} := K_{\sigma 2} \cdot \frac{p_B \cdot a^2}{h_{Ba}^2} = 7.798 \quad \text{МПа}$$

$$U_{sl} := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } \sigma_{\max 3B} \leq \sigma_p \\ \text{"Условия прочности НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

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

Расчёт максимального напряжения в крышке в условиях гидравлических испытаний:

Для полости А:

$$\sigma_{\max 4A} := K_{\sigma 2} \cdot \frac{p_{1A} \cdot a^2}{h_{Aa}^2} = 36.923 \quad \text{МПа}$$

$$U_{sl} := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } \sigma_{\max 4A} \leq \sigma_{и} \\ \text{"Условия прочности НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

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

Для полости В:

$$\sigma_{\max 4B} := K_{\sigma 2} \cdot \frac{p_{1B} \cdot a^2}{h_{Ba}} = 12.321 \quad \text{МПа}$$

$$U_{sl} := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } \sigma_{\max 4B} \leq \sigma_{\text{л}} \\ \text{"Условия прочности НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Usl = "Условие прочности выполняется"

Расчёт максимального прогиба крышки в рабочих условиях:

Для полости А:

$$\omega_{\max 3A} := K_{\omega 2} \cdot \frac{p_A \cdot a^4}{E_{250} \cdot h_{Aa}^3} = 0.056 \quad \text{мм}$$

$$U_{sl} := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } \omega_{\max 3A} \leq \omega \\ \text{"Условия прочности НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Usl = "Условие прочности выполняется"

Для полости В:

$$\omega_{\max 3B} := K_{\omega 2} \cdot \frac{p_B \cdot a^4}{E_{250} \cdot h_{Ba}^3} = 0.019 \quad \text{мм}$$

$$U_{sl} := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } \omega_{\max 3B} \leq \omega \\ \text{"Условия прочности НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Usl = "Условие прочности выполняется"

Расчёт максимального прогиба крышки в условиях гидравлического испытания:

Для полости А:

$$\omega_{\max 4A} := K_{\omega 2} \cdot \frac{p_{1A} \cdot a^4}{E_{20} \cdot h_{Aa}^3} = 0.078 \quad \text{мм}$$

$$U_{sl} := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } \omega_{\max 4A} \leq \omega \\ \text{"Условия прочности НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Usl = "Условие прочности выполняется"

Для полости В:

$$\omega_{\max 4B} := K_{\omega 2} \cdot \frac{p_{1B} \cdot a^4}{E_{20} \cdot h_{Ba}^3} = 0.026 \quad \text{мм}$$

$$U_{sl} := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } \omega_{\max 4B} \leq \omega \\ \text{"Условия прочности НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Usl = "Условие прочности выполняется"

### 3.3.6. Расчёт крышек, панели Аа, Ва на максимальные напряжения и максимальный прогиб

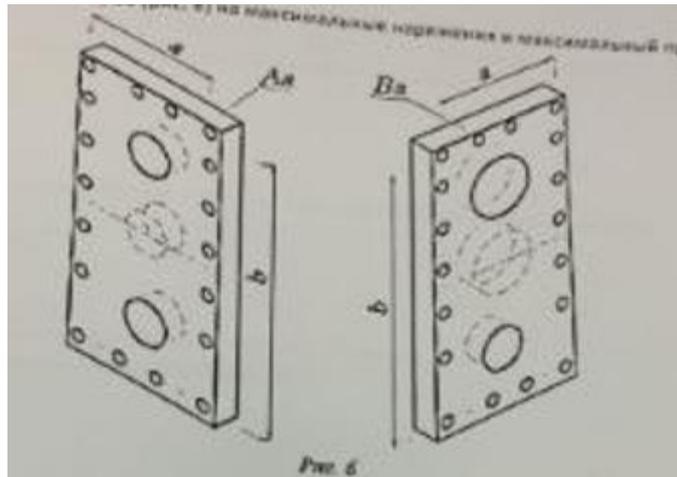


Рисунок 3.6 - Панели Аа, Ва.

Расчёт максимальных напряжений и прогибов крышки:

Рассматриваем случай - заделка крышки по краям.

Наибольшие напряжения и прогибы возникают в центре крышки.

Наиболее опасный вариант - Максимальное отверстие в зоне наибольших напряжений и прогибов.

Расчёт момента сопротивления в условиях ослабления отверстием:

W<sub>1</sub> момент сопротивления в условиях ослабления отверстием

Для полости А:

$$W_{1A} := \frac{(a - d_A) \cdot h_{Aa}^2}{6} = 4.532 \times 10^4 \text{ мм}^3$$

Для полости В:

$$W_{1B} := \frac{(a - d_B) \cdot h_{Ba}^2}{6} = 3.553 \times 10^4 \text{ мм}^3$$

Момент сопротивления в поперечном сечении крышки:

Для полости А:

$$W_A := \frac{a \cdot h_{Aa}^2}{6} = 5.758 \times 10^4 \text{ мм}^3$$

Для полости В:

$$W_B := \frac{a \cdot h_{Ba}^2}{6} = 5.758 \times 10^4 \text{ мм}^3$$

Расчёт максимального напряжения в крышке в рабочих условиях

Для полости A:

$$\sigma_{\max 3A} := K_{\sigma 1} \cdot \frac{p_A \cdot a^2}{h_{Aa}^2} = 19.281 \text{ МПа}$$

$$U_{sl} := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } \sigma_{\max 3A} \leq \sigma_p \\ \text{"Условия прочности НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Usl = "Условие прочности выполняется"

Для полости B:

$$\sigma_{\max 3B} := K_{\sigma 1} \cdot \frac{p_B \cdot a^2}{h_{Ba}^2} = 6.427 \text{ МПа}$$

$$U_{sl} := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } \sigma_{\max 3B} \leq \sigma_p \\ \text{"Условия прочности НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Usl = "Условие прочности выполняется"

Расчёт максимального напряжения в крышке в условиях гидравлических испытаний:

Для полости A:

$$\sigma_{\max 4A} := K_{\sigma 1} \cdot \frac{p_{1A} \cdot a^2}{h_{Aa}^2} = 30.431 \text{ МПа}$$

$$U_{sl} := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } \sigma_{\max 4A} \leq \sigma_{и} \\ \text{"Условия прочности НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Usl = "Условие прочности выполняется"

Для полости B:

$$\sigma_{\max 4B} := K_{\sigma 1} \cdot \frac{p_{1B} \cdot a^2}{h_{Ba}^2} = 10.154 \text{ МПа}$$

$$U_{sl} := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } \sigma_{\max 4B} \leq \sigma_{и} \\ \text{"Условия прочности НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Usl = "Условие прочности выполняется"

Расчёт максимального прогиба крышки в рабочих условиях:

Для полости A:

$$\omega_{\max 3A} := K_{\omega 1} \cdot \frac{p_A \cdot a^4}{E_{250} \cdot h_{Aa}^3} = 0.014 \text{ мм}$$

$$U_{sl} := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } \omega_{\max 3A} < \omega \\ \text{"Условия прочности НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Usl = "Условие прочности выполняется"

Для полости В:

$$\omega_{\max 3B} := K_{\omega 1} \cdot \frac{p_B \cdot a^4}{E_{250} \cdot h_{Ba}^3} = 4.7 \times 10^{-3} \quad \text{мм}$$

$$U_{sl} := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } \omega_{\max 3B} < \omega \\ \text{"Условия прочности НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$
$$U_{sl} = \text{"Условие прочности выполняется"}$$

Расчёт максимального прогиба крышки в условиях гидравлического испытания:

Для полости А:

$$\omega_{\max 4A} := K_{\omega 1} \cdot \frac{p_{1A} \cdot a^4}{E_{20} \cdot h_{Aa}^3} = 0.02 \quad \text{мм}$$

$$U_{sl} := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } \omega_{\max 4A} \leq \omega \\ \text{"Условия прочности НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$
$$U_{sl} = \text{"Условие прочности выполняется"}$$

Для полости В:

$$\omega_{\max 4B} := K_{\omega 1} \cdot \frac{p_{1B} \cdot a^4}{E_{20} \cdot h_{Ba}^3} = 6.573 \times 10^{-3} \quad \text{мм}$$

$$U_{sl} := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } \omega_{\max 4B} \leq \omega \\ \text{"Условия прочности НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$
$$U_{sl} = \text{"Условие прочности выполняется"}$$

Расчёт максимального напряжения в крышке в сечении, ослабленном отверстием:

Для полости А:

$$k_A := \frac{W_A}{W_{1A}} = 1.27$$

Для полости В:

$$k_B := \frac{W_B}{W_{1B}} = 1.621$$

Расчёт максимального напряжения в крышке в сечении, ослабленном отверстием в рабочих условиях:

Для полости А:

$$\sigma_{1A\max} := \sigma_{\max 3A} \cdot k_A = 24.491 \quad \text{МПа}$$

$$U_{sl} := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } \sigma_{1A\max} \leq \sigma_p \\ \text{"Условия прочности НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$
$$U_{sl} = \text{"Условие прочности выполняется"}$$

Для полости В:

$$\sigma_{1Bmax} := \sigma_{max3B} \cdot k_B = 10.416 \quad \text{МПа}$$

$$Usl := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } \sigma_{1Bmax} \leq \sigma_p \\ \text{"Условия прочности НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

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

Расчёт максимального напряжения в крышке в сечении, ослабленном отверстием в условиях гидравлических испытаний:

Для полости А:

$$\sigma_{2Amax} := \sigma_{max4A} \cdot k_A = 38.656 \quad \text{МПа}$$

$$Usl := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } \sigma_{2Amax} \leq \sigma_{и} \\ \text{"Условия прочности НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

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

Для полости В:

$$\sigma_{2Bmax} := \sigma_{max4B} \cdot k_B = 16.457 \quad \text{МПа}$$

$$Usl := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } \sigma_{2Bmax} \leq \sigma_{и} \\ \text{"Условия прочности НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

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

Расчёт максимального прогиба в крышке в сечении, ослабленном отверстием в рабочих условиях:

Для полости А:

$$\omega_{1Amax} := \omega_{max3A} \cdot k_A = 0.018 \quad \text{мм}$$

$$Usl := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } \omega_{1Amax} \leq \omega \\ \text{"Условия прочности НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

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

Для полости В:

$$\omega_{1Bmax} := \omega_{max3B} \cdot k_B = 7.618 \times 10^{-3} \quad \text{мм}$$

$$Usl := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } \omega_{1Bmax} \leq \omega \\ \text{"Условия прочности НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

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

Расчёт максимального прогиба в крышке в сечении, ослабленном отверстием в условиях гидравлических испытаний:

Для полости А:

$$\omega_{2Amax} := \omega_{max4A} \cdot k_A = 0.025 \quad \text{мм}$$

$$Usl := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } \omega_{2Amax} \leq \omega \\ \text{"Условия прочности НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

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

Для полости В:

$$\omega_{2Bmax} := \omega_{max4B} \cdot k_B = 0.011$$

$$U_{sl} := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } \omega_{2Bmax} \leq \omega \\ \text{"Условия прочности НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

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

### 3.3.7. Расчёт торцевой крышки С на максимальные напряжения

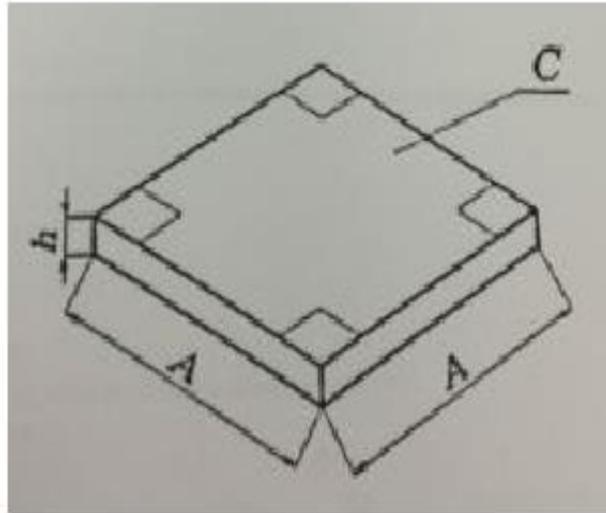


Рисунок 3.7 - Торцевая крышка С

#### Исходные данные:

Длина и ширина внутренней поверхности крышки, мм  $A := 305$

Исполнительная толщина крышки, мм  $h_C = 35$

Рабочее давление, МПа  $p_C := 0.6$

Пробное давление при гидравлическом испытании:

$$p_{1C} := 1.25 \cdot p_C \cdot \frac{\sigma_{и}}{\sigma_p} = 0.947 \text{ МПа}$$

Рассматриваем случай, когда плоская крышка, закреплена по контуру.

Максимальное напряжение в центре крышки.

Расчёт максимального напряжения в крышке в рабочих условиях:

Крышка С:

$$\sigma_{max5A} := K_{\sigma C} \cdot \frac{p_C \cdot A^2}{h_C^2} = 15.255 \text{ МПа}$$

$$U_{sl} := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } \sigma_{max5A} \leq \sigma_p \\ \text{"Условия прочности НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

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

Расчёт максимального напряжения в крышке в условиях гидравлических испытаний:

Крышка С:

$$\sigma_{\max 6A} := K_{\sigma C} \cdot \frac{p_{IC} \cdot A^2}{h_C^2} = 24.067 \quad \text{МПа}$$

$$U_{sl} := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } \sigma_{\max 6A} \leq \sigma_{н} \\ \text{"Условия прочности НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

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

### 3.3.8. Прочностной расчёт фланцевого соединения

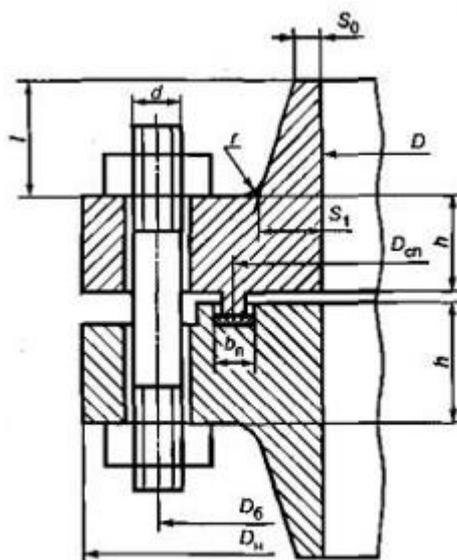


Рисунок 3.8 - Фланцевое соединение

#### Исходные данные:

Тип фланца: фланцевое соединение приварные встык

Тип уплотнительной поверхности: шип-паз

|  |                 |
|--|-----------------|
| Внутренний диаметр аппарата, мм  | $D := 100$      |
| Наружный диаметр фланца, мм  | $D_{н} := 215$  |
| Диаметр окружности расположения болтов, мм   | $D_{ш} := 180$  |
| Расчётный диаметр прокладки, мм  | $D_{сш} := 139$ |
| Ширина прокладки, мм   | $b_{ш} := 20$   |
| Ширина тарелки фланца, мм  | $h := 19$       |
| Толщина прокладки, мм  | $h_{п} := 2$    |
| Толщина втулки приварного встык фланца в месте приварки к обечайке (трубе), толщина обечайки плоского фланца, мм | $S_0 := 4$      |
| Толщина втулки приварного встык в месте присоединения к тарелке, мм  | $S_1 := 15$     |

|  |                         |
|--|-------------------------|
| Длина конической части втулки, мм                                    | $l := 23$               |
| Диаметр болтов, мм   | $d := 16$               |
| Число болтов, шт   | $n := 8$                |
| Расчётное давление, МПа  | $P := 0.6$              |
| Внешний изгибающий момент, МН*м                                      | $M := 0$                |
| Осевая сила, МН  | $F := 1.209 \cdot 10^4$ |
| Суммарная прибавка к расчётной толщине, мм                           | $c_o := 0$              |
| Рабочая температура, °C  | $t := 250$              |
| Поправочный коэффициент для допускаемых напряжений сталей            | $\eta := 1$             |
| Материал болтов - сталь 35   |                         |
| Материал прокладки Паронит ПОН по ГОСТ 481 при толщине не более 3 мм |                         |

Определение расчетных параметров.

Расчетные температуры.

Расчетная температура неизолированных плоских фланцев:

$$t_{\phi} := 0.96 \cdot t = 240 \quad ^{\circ}\text{C}$$

Расчетная температура болтов:

$$t_{\text{ш}} := 0.85 \cdot t = 212.5 \quad ^{\circ}\text{C}$$

Допускаемые напряжения для болтов из стали 35 по [6]:

В рабочем состоянии

$$x := (200 \quad 300)^{\text{T}}$$

$$y := (196 \quad 130.7)^{\text{T}}$$

$$\sigma_{\text{д.ш}} := \text{Floor}(\text{interp}(x, y, t_{\text{ш}}), 0.5) = 187.5 \quad \text{МПа}$$

$$\sigma_{\text{д.ш}} = 187.5 \quad \text{МПа}$$

Модуль упругости для болтов при рабочей температуре, согласно таблице Ж.1 [11]:

$$E_{\text{ш}} := 1.9 \cdot 10^5 \quad \text{МПа}$$

Допускаемое напряжение для шпилек при 20 °C

$$\sigma_{20\text{ш}} := 203.8 \quad \text{МПа}$$

Модуль упругости для шпилек при температуре испытания 20 °C

$$E_{20\text{ш}} := 2.1 \cdot 10^5 \quad \text{МПа}$$

Коэффициент линейного расширения для стали 35 при 20 - 100 °C согласно таблице Ж.2 [11]:

$$\alpha_{\text{ш}} := 13.1 \cdot 10^{-6} \quad 1/\text{K}$$

Эффективная ширина плоской прокладки:

$$b_{\text{п}} = 20 \text{ мм}$$

$$\text{при } b_{\text{п}} \leq 15 \text{ мм}$$

$$b_0 := 3.8 \cdot \sqrt{b_{\text{п}}} = 16.994 \text{ мм}$$

Характеристики прокладки по таблице И.1 согласно [11]:

$$m := 2.5$$

$$q_{\text{обж}} := 20 \text{ МПа}$$

$$q_d := 130 \text{ МПа}$$

$$K_{\text{обж}} := 0.9$$

$$E_{\text{п}} := 0.02 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Отсюда находим податливость прокладки:

$$y_{\text{п}} := \frac{h_{\text{п}} \cdot K_{\text{обж}}}{E_{\text{п}} \cdot \pi \cdot D_{\text{сп}} \cdot b_{\text{п}}} = 1.03 \times 10^{-7} \text{ мм/Н}$$

Усилие, необходимое для смятия прокладки при затяжке:

$$P_{\text{обж}} := 0.5 \pi \cdot D_{\text{сп}} \cdot b_0 \cdot m \cdot |P| = 5.566 \times 10^3 \text{ Н}$$

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

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

$$R_{\text{п}} = 1.113 \times 10^4 \text{ Н}$$

Усилие в болтах фланцевого соединения при затяжке и в рабочих условиях:

Площадь поперечного сечений болтов по таблице Д.1 согласно [11]:

$$f_{\text{ш}} := 144 \text{ мм}^2$$

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

$$A_{\text{ш}} := n \cdot f_{\text{ш}} = 1.152 \times 10^3 \text{ мм}^2$$

Равнодействующая нагрузка от давления:

$$Q_d := \frac{\pi}{4} \cdot (D_{\text{сп}})^2 \cdot P = 9.105 \times 10^3 \text{ Н}$$

Приведенная нагрузка, вызванная воздействием внешней силы и изгибающего момента:

$$Q_{\text{FM}} := \max \left( \left| F + \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{сп}}} \right|, \left| F - \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{сп}}} \right| \right) = 1.209 \times 10^4 \text{ Н}$$

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

$$L_{ш0} := h + h + h_{г} = 40 \quad \text{мм}$$

Эффективная длина болта (шпильки) при определении податливости:

$$L_{ш} := L_{ш0} + 0.28 \cdot d = 44.48 \quad \text{мм}$$

Податливость болтов:

$$y_{ш} := \frac{L_{ш}}{E_{20ш} \cdot A_{ш}} = 1.839 \times 10^{-7} \quad \text{мм/Н}$$

Расчетные параметры фланцев:

- параметр длины обечайки

$$l_0 := \sqrt{D \cdot S_0} = 20 \quad \text{мм}$$

- отношение наружного диаметра тарелки фланца к внутреннему диаметру:

$$K := \frac{D_n}{D} = 2.15$$

- коэффициенты, зависящие от соотношения размеров тарелки фланца:

$$\beta_T := \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \log(K)) - 1}{(1.05 + 1.945 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} = 1.452$$

$$\beta_U := \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \log(K)) - 1}{1.36(K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = 2.958$$

$$\beta_V := \frac{1}{(K - 1)} \cdot \left[ 0.69 + 5.72 \cdot \frac{K^2 \cdot \log(K)}{(K^2 - 1)} \right] = 2.71$$

$$\beta_Z := \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = 1.552$$

- коэффициенты для фланцевых соединений с приварными встык фланцами:

$$\beta_F := 0.66 \quad \beta_V := 0.1 \quad f := 1$$

- коэффициент  $\lambda$

$$\lambda := \frac{\beta_F \cdot h + l_0}{\beta_T \cdot l_0} + \frac{\beta_V \cdot h^3}{\beta_U \cdot l_0 \cdot (S_0)^2} = 1.845$$

Угловая податливость фланцев:

- при затяжке:

$$y_{\phi} := \frac{0.91 \cdot \beta_V}{E_{20} \cdot \lambda \cdot l_0 \cdot (S_1)^2} = 5.218 \times 10^{-11}$$

- нагруженного внешним изгибающим моментом:

$$y_{\Phi H} := \left(\frac{\pi}{4}\right)^3 \cdot \frac{D_{\text{ш}}}{E_{20} \cdot h^3 \cdot D_H} = 2.816 \times 10^{-10}$$

Коэффициент, учитывающий изгиб тарелки фланца между болтами (шпильками):

$$C_F := \max \left[ 1, \sqrt{\frac{\pi \cdot D_{\text{ш}}}{n \cdot \left( 2 \cdot d + \frac{6 \cdot h}{m + 0.5} \right)}} \right] = 1.005$$

Приведенный диаметр фланца:

$$D_{\text{пр}} := D$$

Плечо действия усилий в болтах (шпильках) для приварных встык и плоских фланцев:

$$b_{\text{ш}} := 0.5(D_{\text{ш}} - D_{\text{сп}}) = 20.5$$

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

$$e_{\text{ш}} := 0.5 \cdot (D_{\text{сп}} - D - S_0) = 17.5$$

Эквивалентная толщина плоских фланцев:

$$S_3 := S_0$$

Коэффициент жесткости фланцевого соединения для приварных встык и плоских фланцев:

$$\gamma := \frac{1}{y_{\text{п}} + y_{\text{ш}} \cdot \frac{E_{20\text{ш}}}{E_{\text{ш}}} + 2 \cdot b^2 \cdot y_{\Phi} \cdot \frac{E_{20}}{E}} = 2.789 \times 10^6$$

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

$$\alpha := 1 - \frac{y_{\text{п}} - 2 \cdot e \cdot y_{\Phi} \cdot b}{y_{\text{п}} + y_{\text{ш}} + 2 \cdot b^2 \cdot y_{\Phi}} = 0.802$$

Коэффициент жесткости фланцевого соединения, нагруженного внешним изгибающим моментом:

$$\alpha_M := \frac{y_{\text{ш}} + 2 \cdot y_{\Phi H} \cdot b \cdot \left( b + e - \frac{e^2}{D_{\text{сп}}} \right)}{y_{\text{ш}} + y_{\text{п}} \cdot \left( \frac{D_{\text{ш}}}{D_{\text{сп}}} \right)^2 + 2 \cdot y_{\Phi H} \cdot b^2} = 1.006$$

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

$$Q_t := \gamma \cdot [2\alpha_{\Phi} \cdot h \cdot (t_{\Phi} - 20) - 2\alpha_{\text{ш}} \cdot h \cdot (t_{\text{ш}} - 20)] = 3.817 \times 10^4 \text{ Н}$$

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

$$P_{ш1} := \max \left[ \begin{array}{l} \alpha \cdot (Q_d + F) + R_{п} + \frac{4 \cdot \alpha_M \cdot |M|}{D_{сп}} \\ \alpha \cdot (Q_d + F) + R_{п} + \frac{4 \cdot \alpha_M \cdot |M|}{D_{сп}} - Q_t \end{array} \right] = 2.812 \times 10^4 \quad \text{Н}$$

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

$$P_{ш2} := \max(P_{обж}, 0.4 \cdot A_{ш} \cdot \sigma_{20ш}) = 9.391 \times 10^4 \quad \text{Н}$$

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

$$P_{шм} := \max(P_{ш1}, P_{ш2}) = 9.391 \times 10^4 \quad \text{Н}$$

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

$$P_{шр} := P_{шм} + (1 - \alpha) \cdot (Q_d + F) + Q_t + \frac{4 \cdot (1 - \alpha_M) \cdot |M|}{D_{сп}} = 1.363 \times 10^5 \quad \text{Н}$$

Проверка прочности болтов (шпилек) и прокладки.

Расчетные напряжения в болтах (шпильках):

- при затяжке

$$\sigma_{ш1} := \frac{P_{шм}}{A_{ш}} = 81.52 \quad \text{МПа}$$

- в рабочих условиях

$$\sigma_{ш2} := \frac{P_{шр}}{A_{ш}} = 118.307 \quad \text{МПа}$$

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

Usl\_1 :=  $\left\{ \begin{array}{l} \text{"Условия прочности в при затяжке НЕ выполняются"} \text{ if } \sigma_{ш1} > \sigma_{20ш} \\ \text{"Условия прочности в рабочих условиях НЕ выполняются"} \text{ if } \sigma_{ш2} > \sigma_{дш} \\ \text{"Условия прочности выполняются"} \text{ otherwise} \end{array} \right.$

Usl\_1 = "Условия прочности выполняются"

$$\sigma_{ш1} = 81.52 \quad \text{МПа} \quad \sigma_{20ш} = 203.8 \quad \text{МПа} \quad \sigma_{ш2} = 118.307 \quad \text{МПа} \quad \sigma_{дш} = 187.5 \quad \text{МПа}$$

Удельное давление на прокладку:

$$q := \frac{\max(P_{\text{шм}}, P_{\text{шр}})}{\pi \cdot D_{\text{сп}} \cdot b_{\text{п}}} = 15.605 \quad \text{МПа}$$

Расчет фланцев на статическую прочность.

Расчетный изгибающий момент, действующий на приварной встык фланца при затяжке:

$$M_{\text{м}} := C_{\text{F}} \cdot P_{\text{шм}} \cdot b = 1.935 \times 10^6 \quad \text{Н} \cdot \text{мм}$$

Расчетный изгибающий момент, действующий на фланец в рабочих условиях:

$$M_{\text{р}} := C_{\text{F}} \cdot \max[P_{\text{шр}} \cdot b + (Q_{\text{д}} + Q_{\text{FM}}) \cdot e, |Q_{\text{д}} + Q_{\text{FM}}| \cdot e] = 3.18 \times 10^6 \quad \text{Н} \cdot \text{мм}$$

Расчетные напряжения во фланце при затяжке:

Меридиональные изгибные напряжения для приварных встык фланцев с конической втулкой:

$$\sigma_{0\text{м}} := \frac{M_{\text{м}}}{\lambda \cdot (S_1 - c_0)^2 \cdot D_{\text{пр}}} = 46.593 \quad \text{МПа}$$

Напряжения в тарелке приварного встык фланца в условиях затяжки:

- радиальное напряжение

$$\sigma_{\text{RM}} := \frac{1.33 \cdot \beta_{\text{F}} \cdot h + l_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot l_0 \cdot D} \cdot M_{\text{м}} = 53.257 \quad \text{МПа}$$

- окружное напряжение

$$\sigma_{\text{Тм}} := \frac{\beta_{\text{Y}} \cdot M_{\text{м}}}{h^2 \cdot D} - \beta_{\text{Z}} \cdot \sigma_{\text{RM}} = 62.566 \quad \text{МПа}$$

Расчетные напряжения во фланце в рабочих условиях:

Меридиональные изгибные напряжения для приварных встык фланцев с конической втулкой:

$$\sigma_{0\text{р}} := \frac{M_{\text{р}}}{\lambda \cdot (S_1 - c_0)^2 \cdot D_{\text{пр}}} = 76.596 \quad \text{МПа}$$

- максимальные меридиональные мембранные напряжения в обечайке плоского фланца:

$$\sigma_{0\text{мр}} := \max \left[ \frac{Q_{\text{д}} + F + \frac{4|M|}{D_{\text{сп}}}}{\pi \cdot (D + S_1) \cdot (S_1 - c_0)}, \frac{Q_{\text{д}} + F - \frac{4|M|}{D_{\text{сп}}}}{\pi \cdot (D + S_1) \cdot (S_1 - c_0)} \right] = 3.911 \quad \text{МПа}$$

Напряжения в тарелке приварного встык фланца или плоского фланца в рабочих условиях:

- радиальное напряжение

$$\sigma_{Rp} := \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + l_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot l_0 \cdot D} \cdot M_p = 87.551 \quad \text{МПа}$$

- окружное напряжение

$$\sigma_{Tp} := \frac{\beta_Y \cdot M_p}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_{Rp} = 102.854 \quad \text{МПа}$$

Проверка условий статической прочности фланцев.

$$\sigma_{Pmax} := \max \left( \left( \begin{array}{l} |\sigma_{0p} - \sigma_{0mp} + \sigma_{Tp}| \\ |\sigma_{0p} - \sigma_{0mp} + \sigma_{Rp}| \\ |\sigma_{0p} + \sigma_{0mp}| \end{array} \right) \right) = 175.539 \quad \text{МПа}$$

$$\sigma_{3max} := \max \left( |\sigma_{0m} + \sigma_{Rm}|, |\sigma_{0m} + \sigma_{Tm}| \right) = 109.159 \quad \text{МПа}$$

PR\_1 := "Условия статической прочности при затяжке и в рабочих условиях выполняются"

PR\_3 := "Условия статической прочности НЕ выполняются"

$K_T = 1.3$  при расчете с учетом стесненности температурных деформаций. При расчете без учета стесненности температурных деформаций  $K_T = 1$ .

$$K_T := 1.3$$

$$Usl_3 := \begin{cases} PR_1 & \text{if } \sigma_{3max} < K_T \cdot \sigma_{20} \wedge \sigma_{Pmax} < K_T \cdot \sigma_{д.ф} \\ PR_3 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Usl\_3 = "Условия статической прочности при затяжке и в рабочих условиях выполняются"

Проверка углов поворота фланцев

Угол поворота приварного встык фланца, плоского фланца

$$\Theta := M_p \cdot y_\phi \cdot \frac{E_{20}}{E} \quad \Theta = 1.98 \times 10^{-4}$$

Допустимый угол поворота плоского фланца  $\Theta_d := 0.006$

$$Usl_P := \begin{cases} \text{"Условие при испытаниях НЕ выполняется"} & \text{if } \Theta > 1.3 \cdot \Theta_d \\ \text{"Условие в рабочих условиях НЕ выполняется"} & \text{if } \Theta > \Theta_d \\ \text{"Условие поворота плоского фланца выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Usl\_P = "Условие поворота плоского фланца выполняется"

### 3.3.9 Резюме по прочностному расчёту

В данном разделе подводится итог прочностного расчёта сварного пластинчатого теплообменника.

Были проведены:

1. Расчёт толщин прямоугольных крышек Aa, Ab, Ba, Bb. Расчётные значения приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2. – Расчётные значения толщин стенок

| Значение       | Толщина крышек, мм |        |        |        |
|----------------|--------------------|--------|--------|--------|
|                | Aa                 | Ab     | Ba     | Bb     |
| Расчетное      | 13.043             | 12.265 | 13.962 | 12.265 |
| Номинальное    | 15.012             | 14.657 | 16.762 | 15.065 |
| Исполнительная | 40                 | 30     | 40     | 30     |

2. Расчёт шпилек теплообменного аппарата. Расчётные значения приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3. – Расчётные значения шпилек

| Параметр  | Обозначение   | Значение           | Единицы изм. |
|---|---------------|--------------------|--------------|
| Усилие, необходимое для смятия прокладки при затяжке                        | $R_{обж}$     | $2.011 \cdot 10^5$ | Н            |
| Эффективная ширина прокладки  | b0            | 13.701             | мм           |
| Расчётная нагрузка на шпильки при затяжке для обеспечения обжатия прокладки | P62           | $3.254 \cdot 10^5$ | Н            |
| Расчетное напряжение в шпильках при затяжке                                 | $\sigma_{o1}$ | 90.4               | МПа          |

3. Расчёт крышек Aa, Ab, Ba, Bb на максимальные напряжения и максимальный прогиб. Расчётные значения приведены в таблице 3.4, 3.5, 3.6.

Таблица 3.4. – Расчет максимальных напряжений и прогибов крышек Ab, Bb. (Заделка крышки по краям).

| Параметр  | Обозначение      |                  | Значение  |                     | Единицы изм. |
|---|------------------|------------------|-----------|---------------------|--------------|
|   | Полость А        | Полость В        | Полость А | Полость В           |              |
| Максимальное напряжение в крышке в рабочих условиях                   | $\sigma_{max1A}$ | $\sigma_{max1B}$ | 19.281    | 6.427               | МПа          |
| Максимальное напряжение в крышке в условиях гидравлических испытаний: | $\sigma_{max2A}$ | $\sigma_{max2B}$ | 30.431    | 10.154              | МПа          |
| Максимальный прогиб крышки в рабочих условиях                         | $\omega_{max1A}$ | $\omega_{max1B}$ | 0.014     | $4.7 \cdot 10^{-3}$ | мм           |
| Максимальный прогиб крышки в условиях гидравлических испытаний        | $\omega_{max2A}$ | $\omega_{max2B}$ | 0.02      | $6.5 \cdot 10^{-3}$ | мм           |

Таблица 3.5. – Расчет максимальных напряжений и прогибов крышек Ab, Bb. (крышка свободно оперта на болтах)

| Параметр  | Обозначение        |                    | Значение |         | Единицы изм. |
|---|--------------------|--------------------|----------|---------|--------------|
|   | Полость            | Полость            | Полость  | Полость |              |
|   | А                  | В                  | А        | В       |              |
| Максимальное напряжение в крышке в рабочих условиях                   | $\sigma_{\max 3A}$ | $\sigma_{\max 3B}$ | 23.394   | 7.798   | МПа          |
| Максимальное напряжение в крышке в условиях гидравлических испытаний: | $\sigma_{\max 4A}$ | $\sigma_{\max 4B}$ | 36.923   | 12.321  | МПа          |
| Максимальный прогиб крышки в рабочих условиях                         | $\omega_{\max 3A}$ | $\omega_{\max 3B}$ | 0.056    | 0.019   | мм           |
| Максимальный прогиб крышки в условиях гидравлических испытаний        | $\omega_{\max 4A}$ | $\omega_{\max 4B}$ | 0.078    | 0.026   | мм           |

Таблица 3.6. – Расчет максимальных напряжений и прогибов крышек Aa, Ba. (Заделка крышки по краям)

| Параметр   | Обозначение        |                    | Значение           |                     | Единицы изм.    |
|--|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|-----------------|
|  | Полость            | Полость            | Полость            | Полость             |                 |
|  | А                  | В                  | А                  | В                   |                 |
| Момент сопротивления в условиях ослабления отверстием  | W.1A               | W.1B               | $4.532 \cdot 10^4$ | $3.553 \cdot 10^4$  | мм <sup>3</sup> |
| Момент сопротивления в поперечном сечении крышки:  | W.A                | W.B                | $5.758 \cdot 10^4$ | $5.758 \cdot 10^4$  | мм <sup>3</sup> |
| Максимальное напряжение в крышке в рабочих условиях  | $\sigma_{\max 3A}$ | $\sigma_{\max 3B}$ | 19.281             | 6.427               | МПа             |
| Максимальное напряжение в крышке в условиях гидравлических испытаний                                   | $\sigma_{\max 4A}$ | $\sigma_{\max 4B}$ | 30.431             | 10.154              | МПа             |
| Максимальный прогиб крышки в рабочих условиях  | $\omega_{\max 3A}$ | $\omega_{\max 3B}$ | 0.014              | $4.7 \cdot 10^{-3}$ | мм              |
| Максимальный прогиб крышки в условиях гидравлических испытаний   | $\omega_{\max 4A}$ | $\omega_{\max 4B}$ | 0.02               | $6.5 \cdot 10^{-3}$ | мм              |
| Максимальное напряжение в крышке в сечении, ослабленном отверстием в рабочих условиях                  | $\sigma_{.1A\max}$ | $\sigma_{.1B\max}$ | 24.491             | 10.416              | МПа             |
| Максимальное напряжение в крышке в сечении, ослабленном отверстием в условиях гидравлических испытаний | $\sigma_{.2A\max}$ | $\sigma_{.2B\max}$ | 38.656             | 16.457              | МПа             |
| Максимальный прогиб в крышке в сечении, ослабленном отверстием в рабочих условиях                      | $\omega_{.1A\max}$ | $\omega_{.1B\max}$ | 0.018              | $7.6 \cdot 10^{-3}$ | мм              |
| Максимальный прогиб в крышке в сечении, ослабленном отверстием в условиях гидравлических испытаний     | $\omega_{.2A\max}$ | $\omega_{.2B\max}$ | 0.025              | 0.011               | мм              |

4. Расчёт фланцевого соединения. Т.к. в теплообменнике находится взрывопожароопасные среды под давлением были подобраны фланцевые соединения приварные встык с привалочной поверхностью шип-паз. Провели расчёт на прочность и герметичность. В таблице 3.7. приведены результаты расчётов.

Таблица 3.7. – Результаты расчёта фланцевого соединения

| Параметр  | Обозначение | Значение             | Единицы изм. |
|---|-------------|----------------------|--------------|
| Усилие, необходимое для смятия прокладки при затяжке  | $R_{обж}$   | $5.566 \cdot 10^3$   | Н            |
| Нагрузка, вызванная стесненностью температурных деформаций, в соединениях с приварными встык и плоскими фланцами:   | $Q.t$       | $3.817 \cdot 10^4$   | Н            |
| Угол поворота приварного встык фланца, плоского фланца (допустимый = 0.006)   | $\Theta$    | $1.98 \cdot 10^{-4}$ | -            |
| Расчетный изгибающий момент, действующий на фланец в рабочих условиях   | $M_p$       | $3.18 \cdot 10^6$    | Н*мм         |
| Расчетная нагрузка на болты (шпильки) при затяжке, необходимая для обеспечения в рабочих условиях давления на прокладку, достаточного для герметизации фланцевого соединения. | $P_{ш1}$    | $2.812 \cdot 10^4$   | Н            |

### 3.4. Гидравлический расчёт теплообменного аппарата

Расчет производим согласно [2].

#### Исходные данные:

Теплоноситель - циклогексан

|  |                            |
|--|----------------------------|
| Плотность, кг/м <sup>3</sup>                 | $\rho_2 = 722.5$           |
| Эквивалентный диаметр канала, м <sup>2</sup> | $d_3 = 9.8 \times 10^{-3}$ |
| Скорость циклогексана в двух каналах, м/с    | $w_2 = 0.18$               |
| Критерий Рейнольдса:                         | $Re_2 = 3.64 \times 10^3$  |
| Длина патрубков штуцера, м                   | $L_{\Pi} = 0.18$           |
| Диаметр штуцера, м                           | $d_{шт2} := 0.05$          |
| Коэффициент, зависящий от площади пластины   | $a_2 := 19.6$              |
|  | $x_2 := 10$                |

Коэффициент гидравлического сопротивления при турбулентном режиме:

$$\xi_2 := \frac{a_2}{Re_2^{0.25}} = 2.523$$

Скорость движение циклогексана в штуцерах:

$$w_{шт2} := \frac{G_2}{\rho_2 \cdot 0.785 \cdot d_{шт2}^2} = 0.183 \text{ м/с}$$

$w_{шт2} < 2.5$  м/с, поэтому гидравлическое сопротивление в штуцерах не учитываем.

Гидравлическое сопротивление теплообменного аппарата для циклогексана:

$$\Delta P_2 := x_2 \cdot \xi_2 \cdot \frac{L_{\Pi}}{d_3} \cdot \frac{\rho_2 \cdot w_2^2}{2} = 3.013 \times 10^4 \text{ Па}$$

Теплоноситель - масло

|  |                              |
|--|------------------------------|
| Плотность, кг/м <sup>3</sup>                 | $\rho_1 = 782.5$             |
| Эквивалентный диаметр канала, м <sup>2</sup> | $d_3 = 9.8 \times 10^{-3}$   |
| Скорость масла в восьми каналах, м/с         | $w_1 = 5.103 \times 10^{-4}$ |
| Критерий Рейнольдса:                         | $Re_1 = 2.372$               |

Длина патрубка штуцера, м  $L_{\Pi} = 0.18$

Диаметр штуцера, м  $d_{шт1} := 0.05$

Коэффициент, зависящий от площади пластины  $a_1 := 425$

Коэффициент  $x_1 := 5$

Коэффициент гидравлического сопротивления при ламинарном режиме:

$$\xi_1 := \frac{a_1}{Re_1} = 179.211$$

Скорость движение масла в штуцерах:

$$w_{шт1} := \frac{G_1}{\rho_1 \cdot 0.785 \cdot d_{шт1}^2} = 2.08 \times 10^{-3}$$

$w_{шт1} < 2.5$  м/с, поэтому гидравлическое сопротивление в штуцерах не учитываем

Гидравлическое сопротивление теплообменного аппарата для масла:

$$\Delta P_1 := x_1 \cdot \xi_1 \cdot \frac{L_{\Pi}}{d_3} \cdot \frac{\rho_1 \cdot w_1}{2} = 3.286 \times 10^3 \quad \text{Па}$$

Находим мощность насоса для перекачки масла:

$$N_1 := \frac{\frac{G_1}{\rho_1} \cdot \Delta P_1}{0.9} = 0.015 \quad \text{Вт}$$

Выбираем насос для циркуляции масла Piusi Viscomat 230/3 M Gear мощностью  $N=1250$  Вт.

## 4. Определение краевых углов смачивания поверхностей различной природы

### 4.1 Литературный обзор

Насадочные колонны являются одним из самых распространённых видов массообменных аппаратов.

Насадкой называют слой из контактных элементов определённой формы, обеспечивающей наличие в слое насадки каналов, по которым движутся участвующие в массообмене фазы.

Одна из фаз при движении по насадке растекается по поверхности контактных элементов, благодаря этому увеличивается площадь межфазной поверхности.

В насадочной колонне жидкость течет по элементу насадки главным образом в виде тонкой пленки, поэтому поверхностью контакта фаз является в основном смоченная поверхность насадки.

**Выбор насадок.** Для того чтобы насадка работала эффективно, она должна удовлетворять следующим основным требованиям:

- 1) обладать большой поверхностью в единице объема;
- 2) хорошо смачиваться орошающей жидкостью;
- 3) оказывать малое гидравлическое сопротивление газовому потоку;
- 4) равномерно распределять орошающую жидкость;
- 5) быть стойкой к химическому воздействию жидкости и газа, движущихся в колонне;
- 6) иметь малый удельный вес;
- 7) обладать высокой механической прочностью;
- 8) иметь невысокую стоимость.

Насадок, полностью удовлетворяющих всем указанным требованиям, не существует, так как, например, увеличение удельной поверхности насадки влечет за собой увеличение гидравлического сопротивления аппарата и снижение предельных нагрузок. В промышленности применяют разнообразные по форме и размерам насадки (рис. 4.1, 4.2), которые в той или иной мере удовлетворяют требованиям, являющимся основными при проведении конкретного процесса ректификации.

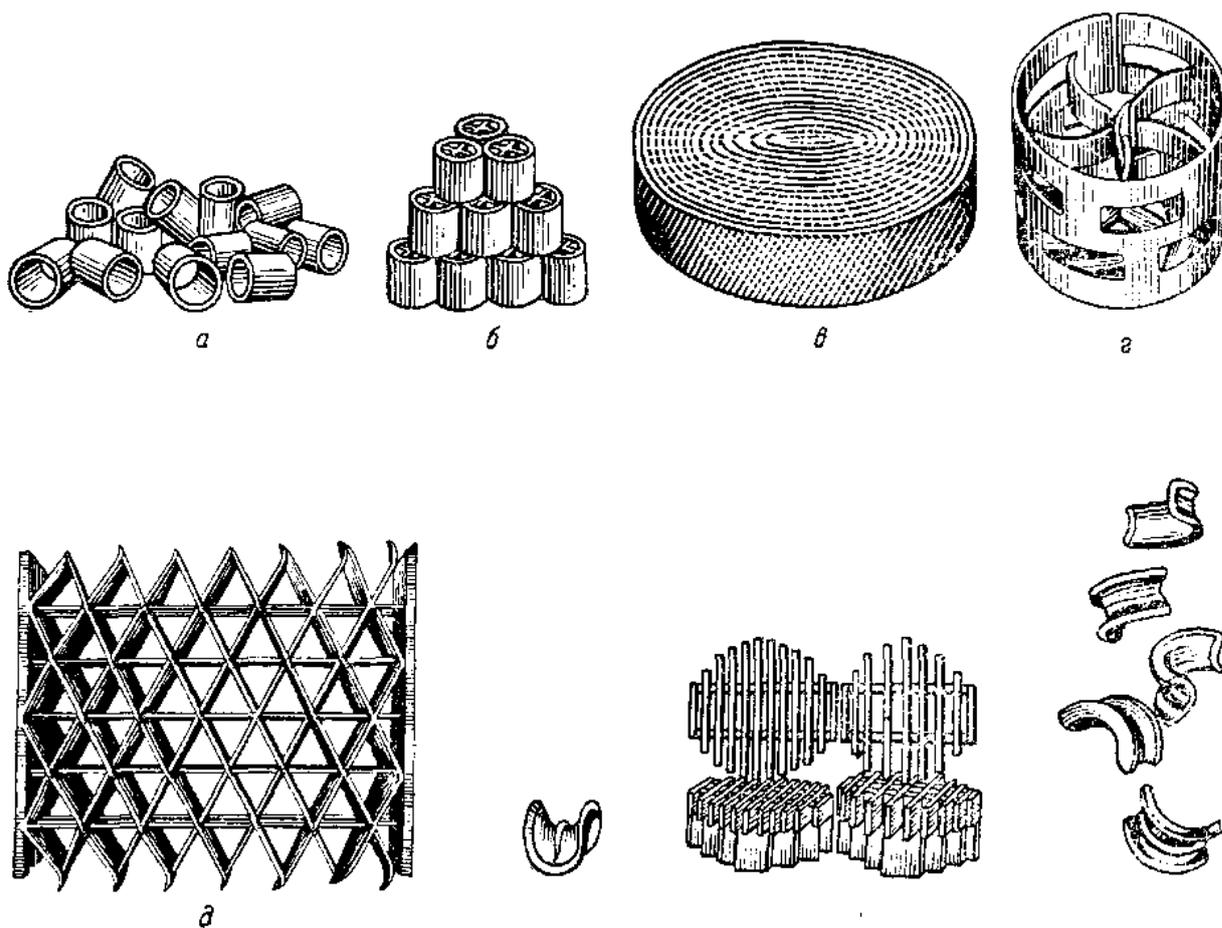


Рисунок 4.1. Типы насадок: а – кольца Рашига, беспорядочно уложенные (навалом); б – кольца с перегородками, правильно уложенные; в – насадка Гудлое; г – кольца Палля; д – насадка «Спрейпак»; е – седла Берля; ж – хордовая насадка; з – седла «Инталокс»

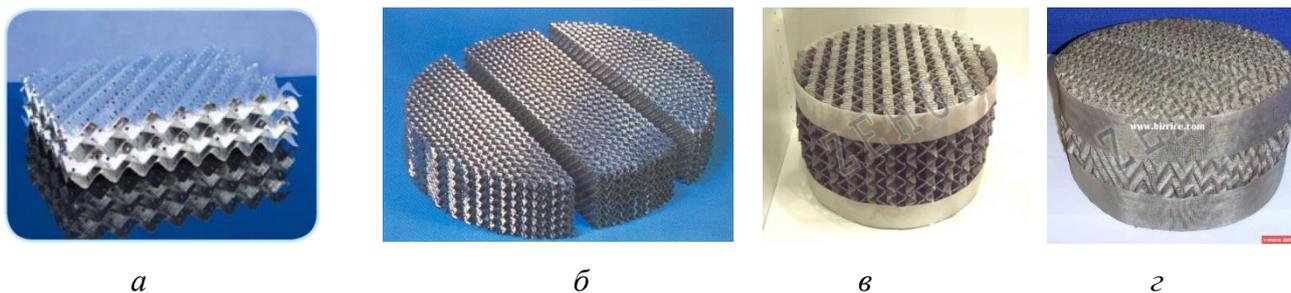


Рисунок 4.2. Насадки из стальных сеток и пластин: а – гофрированная насадка; б – насадка Зульцер; в – спирально-призматическая насадка Mellarak; г – сетчатая насадка VX

Насадки изготавливают из разнообразных материалов (керамика, фарфор, сталь, пластмассы и др.), выбор которых диктуется величиной удельной поверхности насадки, смачиваемостью и коррозионной стойкостью.

Основными достоинствами насадочных колонн являются простота устройства и низкое гидравлическое сопротивление. Недостатки: трудность отвода тепла и плохая смачиваемость насадки при низких плотностях орошения.

Смачивание представляет физико-химическое явление самопроизвольного увеличения площади контакта жидкости с поверхностью твёрдого тела под действием поверхностных (капиллярных) сил.

**Смачиванием** называется совокупность явлений на границе соприкосновения трёх фаз, одна из которых обычно является твёрдым телом и две другие – не смешиваемые жидкости или жидкость и газ. Смачиваемость твёрдых тел зависит от различных факторов, в первую очередь от их природы и геометрических свойств поверхности – шероховатости, формы и размеров частиц тела. С уменьшением размера частиц их смачиваемость водой ухудшается. Шероховатость уменьшает краевой угол смачивания гидрофильных тел, т.е. улучшает их смачиваемость водой, и, наоборот, увеличивает угол смачивания гидрофобных поверхностей.

Важнейшая особенность смачивания состоит в том, что оно определяется не столько индивидуальными свойствами жидкости и твёрдого тела, а их взаимодействием. Это взаимодействие количественно характеризуется величиной краевого угла смачивания (рис. 4.2), образующего на твёрдой поверхности вдоль линейной границы раздела твёрдое тело – жидкость – газ (воздух, жидкость) так называемый периметр смачивания.

**Краевой угол смачивания**, также угол смачивания, угол контакта (англ. Contact angle) – угол, который образуется между касательной, проведённой к поверхности фазы жидкость-газ и твёрдой поверхностью с вершиной, располагающейся в точке контакта трёх фаз, и условно измеряемый всегда внутри жидкой фазы [17]. Краевой угол смачивания обозначается  $\theta_c$ ;  $\gamma_{SL}$ ,  $\gamma_{LG}$ ,  $\gamma_{SG}$  – удельные свободные поверхностные энергии на границе раздела фаз: твёрдое тело-жидкость (SL), жидкость-газ (LG) и твёрдое тело-газ (SG).

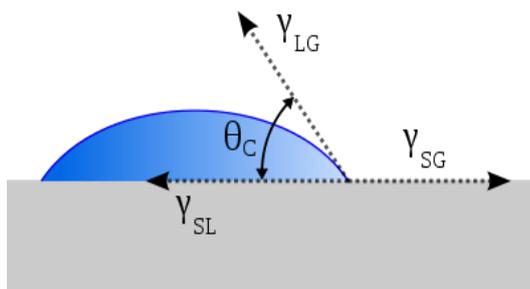


Рис.4.2. Краевой угол смачивания

Существует несколько методов измерения краевого угла смачивания. Одним из наиболее распространённых является метод сидячей капли. Сущность метода заключается в том, что каплю жидкости наносят на ровную горизонтальную твёрдую поверхность, проецируют на экран и по

профилю капли определяют краевой угол (рис. 4.3). Так как капля неравномерно растекается по поверхности подложки, рекомендуется произвести несколько замеров, поворачивая подложку с каплей. Полученные значения усредняются.

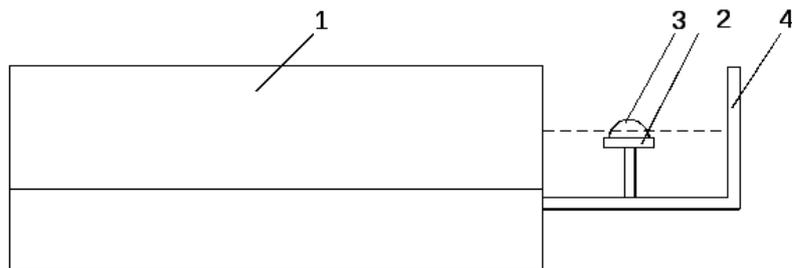


Рис. 4.3. Установка для измерения краевого угла смачивания:

1 – источник света; 2 – столик; 3 – капля жидкости на подложке; 4 – экран.

Измеряя величину угла, оценивают гидрофильность и гидрофобность поверхностей по отношению к различным жидкостям. Существует три случая взаимодействия жидкостей с поверхностью твердых тел:

- не смачивание, когда  $90^\circ < \theta_c < 180^\circ$ ;
- ограниченное смачивание, когда  $0^\circ < \theta_c < 90^\circ$ ;
- полное смачивание, когда капля растекается в тонкую пленку.

В первом случае поверхность по отношению к данной жидкости гидрофобна, а во втором – гидрофильна.

## 4.2. Экспериментальная часть

Целью научных исследований в магистерской диссертации является выдача рекомендаций по выбору типа насадки для ректификационной колонны для разделения бинарной смеси гексен-1–циклогексан на основании смачиваемости поверхности насадочных тел, изготовленных из различных материалов.

Смачиваемость насадки определялась жидкостями различной полярности. В качестве гидрофильной жидкости использовалась дистиллированная вода, а в качестве гидрофобной среды – циклогексан и гептан. Объектом исследования являются пластинки, изготовленные из фторопласта, полипропилена, стали, резины, керамики, керамического композиционного материала (ККМ) и графита.

Результаты эксперимента приведены в табл. 4.1–4.3.

Таблица 4.1 – Краевой угол смачивания поверхностей циклогексаном

| Поверхность  | Краевой угол смачивания, град |        |        |        |        |        |                  |
|--------------|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|------------------|
|              | опыт 1                        | опыт 2 | опыт 3 | опыт 4 | опыт 5 | опыт 6 | Среднее значение |
| Полипропилен | 6                             | 12     | 7      | 11     | 9      | 11     | 9                |
| Фторопласт   | 6                             | 21     | 6      | 17     | 5      | 16     | 12               |
| Сталь        | 5                             | 14     | 9      | 12     | 4      | 11     | 9                |
| Резина       | 3                             | 7      | 4      | 6      | 4      | 9      | 6                |
| Керамика     | 24                            | 20     | 18     | 21     | 15     | 19     | 20               |
| ККМ          | 4                             | 18     | 8      | 11     | 7      | 15     | 11               |
| Графит       | 7                             | 6      | 9      | 8      | 8      | 7      | 7                |

Таблица 4.2 – Краевой угол смачивания поверхностей гептаном

| Поверхность  | Краевой угол смачивания, град |        |        |        |        |        |                  |
|--------------|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|------------------|
|              | опыт 1                        | опыт 2 | опыт 3 | опыт 4 | опыт 5 | опыт 6 | Среднее значение |
| Полипропилен | 14                            | 11     | 9      | 13     | 6      | 10     | 11               |
| Фторопласт   | 6                             | 6      | 7      | 10     | 6      | 10     | 7                |
| Сталь        | 8                             | 5      | 13     | 6      | 10     | 8      | 8                |
| Резина       | 14                            | 6      | 10     | 9      | 12     | 6      | 10               |
| Керамика     | 19                            | 16     | 18     | 17     | 20     | 16     | 18               |
| ККМ          | 6                             | 3      | 7      | 6      | 9      | 6      | 6                |
| Графит       | 9                             | 7      | 7      | 7      | 9      | 5      | 7                |

Таблица 4.3 – Краевой угол смачивания поверхностей водой

| Поверхность  | Краевой угол смачивания, град |        |        |        |        |        |                  |
|--------------|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|------------------|
|              | опыт 1                        | опыт 2 | опыт 3 | опыт 4 | опыт 5 | опыт 6 | Среднее значение |
| Полипропилен | 24                            | 23     | 21     | 21     | 22     | 20     | 22               |
| Фторопласт   | 39                            | 37     | 35     | 32     | 36     | 30     | 35               |
| Сталь        | 27                            | 34     | 27     | 32     | 29     | 31     | 30               |
| Резина       | 34                            | 33     | 32     | 33     | 36     | 32     | 33               |
| Керамика     | 55                            | 65     | 55     | 63     | 54     | 63     | 59               |
| ККМ          | 34                            | 31     | 30     | 31     | 32     | 29     | 31               |
| Графит       | 48                            | 43     | 46     | 40     | 47     | 45     | 45               |

Полученные средние значения краевых углов смачивания жидкостями различной полярности сведены в табл. 4.4.

Таблица 4.4 – Краевой угол смачивания

| Поверхность  | Краевой угол смачивания, град |               |          |
|--------------|-------------------------------|---------------|----------|
|              | водой                         | циклогексаном | гептаном |
| Полипропилен | 22                            | 9             | 11       |
| Фторопласт   | 35                            | 12            | 7        |
| Сталь        | 30                            | 9             | 8        |
| Резина       | 33                            | 6             | 10       |
| Керамика     | 59                            | 20            | 18       |
| ККМ          | 31                            | 11            | 6        |
| Графит       | 45                            | 7             | 7        |

Анализ приведенных в табл. 4.4 данных показал, что лучшей смачиваемостью аполлярной средой обладает графит, у которого угол смачивания гептаном и циклогексаном составляет 7 °. Однако насадка, изготовленная из графита, обладает небольшой удельной поверхностью, малым объемом пор и повышенной хрупкостью.

Наибольший краевой угол смачивания аполярными средами наблюдается на поверхности из керамики, которая является основным материалом при изготовлении колец Рашига.

Угол смачивания полимерной и стальной поверхности циклогексаном находится в пределах 9–12 °, что несколько выше по сравнению с поверхностью из графита.

Однако керамические и полимерные кольца также имеют недостаток: малую удельную поверхность и малый объем пор. А рулонированная насадка, изготовленная из стальной сетки или стальных перфорированных листов, имеет очень высокую удельную поверхность, достигающую 64–750 м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>.

Таким образом, в качестве насадки в ректификационной колонне для разделения бинарной смеси гексен-1–циклогексан рекомендуется использовать рулонированную насадку, изготовленную из стальных перфорированных листов.

## **Выводы**

1. Исследован краевой угол смачивания поверхностей различной природы аполярными и полярными средами.
2. Выдана рекомендация по выбору материала насадки для разделения бинарной смеси гексен-1–циклогексан.

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА

### «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

|               |                           |
|---------------|---------------------------|
| <b>Группа</b> | <b>ФИО</b>                |
| 4КМ61         | Курмель Герман Валериевич |

|                            |   |                                  |   |
|----------------------------|---|----------------------------------|---|
| <b>Институт</b>            | - | <b>Кафедра</b>                   | - |
| <b>Уровень образования</b> | - | <b>Направление/специальность</b> | - |

|   |  |
|---|--|
| <b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>  |  |
| <p>1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения</p>   | <p><i>Узел разделения (со)мономера. Включает в себя: Ректификационная колонна, теплообменник. Область применения-химическая промышленность.</i></p>  |
| <b>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</b>   |  |
| <p><b>1. Производственная безопасность</b><br/>                 1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:<br/>                 физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой;<br/>                 действие фактора на организм человека;<br/>                 приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ);<br/>                 предлагаемые средства защиты;<br/>                 (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства).<br/>                 1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:<br/>                 механические опасности (источники, средства защиты);<br/>                 термические опасности (источники, средства защиты);<br/>                 электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты)</p> | <p><i>1.1. Выявление вредных факторов в производственном цехе при эксплуатации объекта исследования:<br/>                 - вредные факторы: повышенный уровень вибрации, повышенная температура воздуха рабочей зоны, повышенный уровень шума, микроклиматические условия, вещества, оказывающие токсическое и раздражающие влияние на человека.<br/>                 - физико-химическая природа вредности веществ и их связь с разрабатываемой темой;<br/>                 - действие вредных факторов на организм человека;<br/>                 - предлагаемые средства защиты от воздействия вредных факторов.</i></p> <p><i>1.2. Выявление опасных факторов в производственном цехе при эксплуатации объекта исследования:<br/>                 - электробезопасность (токоведущие части электрооборудования);<br/>                 - подвижные части производственного оборудования;<br/>                 -повышенная температура поверхности оборудования.</i></p> <p><i>Средства защиты: хлопчатобумажные костюмы, защитные очки, ботинки кожаные, перчатки, фильтрующие противогазы, каска, наушники.<br/>                 ГОСТ 12.2.003–91 ССБТ<br/>                 ГОСТ 12.1.012–90 ССБТ.<br/>                 СанПиН 2.2.4.548–96.<br/>                 ГОСТ 12.1.003–83 ССБТ.<br/>                 ГОСТ 12.2.007.0-75<br/>                 СанПиН 2.2.4.548-96<br/>                 СанПиН 2.2.4.1191-<br/>                 ГОСТ 12.1.007-76</i></p> |
| <p><b>2. Экологическая безопасность:</b><br/>                 защита селитебной зоны<br/>                 анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы);<br/>                 анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы);</p>  | <p><i>Вредные воздействия, которые возникают во эксплуатации оборудования</i></p>  |

|  |   |
|--|---|
| анализ воздействия объекта на литосферу (отходы);<br>разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды.  |   |
| <b>3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b><br>перечень возможных ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения;<br>выбор наиболее типичной ЧС;<br>разработка превентивных мер по предупреждению ЧС;<br>разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий. | - пожарная и взрывная опасность<br>- перечень возможных ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения- разгерметизация,пожар, взрыв.  |
| <b>4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b><br>специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;<br>организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.                             | - правовые нормы трудового законодательства, регулирующие соблюдение безопасности при работе в производственных помещениях (законы, организации и т.д.)<br><br>Конституции РФ;<br>ФЗ “Об обязательном социальном страховании от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний”;<br>ФЗ “О пожарной безопасности”;<br>ФЗ “О радиационной безопасности населения”;<br>Постановления Правительства РФ “О государственном надзоре и контроле за соблюдением законодательства РФ о труде и охране труда”, “О службе охраны труда”, “О Федеральной инспекции труда”. |

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

| Должность | ФИО             | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-----------|-----------------|------------------------|---------|------|
| профессор | Ахмеджанов Р. Р | д.б.н.                 |         |      |

Задание принял к исполнению студент:

| Группа | ФИО                       | Подпись | Дата |
|--------|---------------------------|---------|------|
| 4КМ61  | Курмель Герман Валериевич |         |      |

## 5. Социальная ответственность

### 5.1. Производственная безопасность

Производственная безопасность представляет собой систему организационных мероприятий и технических средств, уменьшающих вероятность воздействия на персонал опасных производственных факторов, вредных воздействий технологических процессов, энергии, средств, предметов, условий и режимов труда до приемлемого уровня.

Узел разделения (со)мономера предназначен для доочистки целевого продукта. Ректификация Гексен-1 ведется непрерывно в ректификационных колоннах в среде растворителя - циклогексана. [18]

Для анализа вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований необходимо выявить вредные и опасные производственные факторы. Выбор факторов производится с использованием ГОСТ 12.0.003-74 «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация». [19]

Выявленные факторы перечислены в таблице 5.1.

**Таблица 5.1. Вредные и опасные факторы.**

| Источник фактора   | Факторы (по ГОСТ 12.0.003-74)   |  | Нормативные документы   |
|--|---|--|---|
|  | вредные   | опасные  |   |
| 1. Ректификационная колонна<br>2. Теплообменник узла разделения (со)мономера.<br>3. Насосы узла разделения (со)мономера.<br>4. Освещение рабочей зоны. | 1. Повышенный уровень вибрации;<br>2. Повышенная температура воздуха рабочей зоны;<br>3. Повышенный уровень шума;<br>4. Вещества, оказывающие токсическое и раздражающие влияние на человека. | 1.Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека;<br>2.Подвижные части производственного оборудования;<br>3.Повышенная температура поверхности оборудования. | ГОСТ 12.2.003–91 ССБТ. Оборудование производственное. Общие требования безопасности. ГОСТ 12.1.012–90 ССБТ. Вибрационная болезнь. Общие требования. СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. ГОСТ 12.1.003–83 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности. ГОСТ 12.2.007.0-75 Система стандартов безопасности труда. Изделия электротехнические. Общие требования безопасности СанПиН 2.2.4.1191-03 устанавливает требования к электромагнитным полям для потребительской продукции; ГОСТ 12.1.007-76 устанавливает требования безопасности вредных веществ. |

## 5.2 Анализ вредных выявленных факторов при эксплуатации проектируемого оборудования

Производственное оборудование должно обеспечивать безопасность работающих при монтаже (демонтаже), вводе в эксплуатацию и эксплуатации как в случае автономного использования, так и в составе технологических комплексов при соблюдении требований (условий, правил), предусмотренных эксплуатационной документацией. [20]

### 5.2.1 Опасность поражения дыхательных путей и кожных покровов химическими реагентами

В технологическом процессе очистки товарного Гексен-1 применяются следующие вещества: Смесь Гексен-1-Циклогексан, гексен-1, циклогексан. В таблице 2 отражены ПДК и класс опасности веществ, участвующих в технологическом процессе.

Таблица 5.2. Таблица веществ.

| Наименование сырья, реагентов, продукции | Класс опасности | ПДК рабочей зоны, мг/м <sup>3</sup> | Формула                        |
|--|-----------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| Гексен-1                                 | 4               | 100                                 | C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> |
| Циклогексан                              | 4               | 80                                  | C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> |

Гексен-1, циклогексан оказывают вредное воздействие на организм человека при превышении ПДК в воздухе рабочей зоны.

Гексен-1 действует угнетающе на центральную нервную систему, раздражающе на слизистые оболочки глаз, дыхательных путей, вызывая сухость кожи, дерматиты. Действие обратимое. При вдыхании паров возможны кашель, головокружение, сонливость, потеря сознания, рвота. При попадании на кожу, в глаза вызывает покраснение. При остром отравлении в форме паров пострадавшего необходимо вынести на свежий воздух, обеспечить покой. При потере сознания дать вдохнуть нашатырный спирт. При тяжелых отравлениях, при резком ослаблении дыхания или его остановке немедленно начинать искусственное дыхание до восстановления самостоятельного дыхания. Во всех случаях отравления следует незамедлительно доставить пострадавшего в медицинское учреждение.

Циклогексан - токсичное вещество. Предельно допустимая концентрация циклогексана в воздухе рабочей зоны - 80 мг/м<sup>3</sup> по ГОСТ 12.1.005. По степени воздействия на организм циклогексан относится к веществам 4-го класса опасности по ГОСТ 12.1.007. При концентрациях, превышающих ПДК, циклогексан оказывает вредное действие на нервную систему. Циклогексан раздражает кожу. При частом соприкосновении рук с циклогексаном наблюдается сухость кожи, трещины, краснота, отечность.

## 5.2.2 Производственный шум и вибрация

Основными источниками шума в проектируемом цеху являются: электродвигатели насосного оборудования, вентиляционная система, кондиционеры, осветительные приборы. Воздействие производственной вибрации на человека вызывает изменения как физиологического, так и функционального состояния организма человека. Изменения в функциональном состоянии организма проявляются в повышении утомляемости, увеличении времени двигательной и зрительной реакции, нарушении вестибулярных реакций и координации движений. Все это ведет к снижению производительности труда. Изменения в физиологическом состоянии организма — в развитии нервных заболеваний, нарушении функций сердечно-сосудистой системы, нарушении функций опорно-двигательного аппарата, поражении мышечных тканей и суставов, нарушении функций органов внутренней секреции. Все это приводит к возникновению вибрационной болезни.

Согласно ГОСТ 12.1.003–2014 уровень звукового давления в данном производственном помещении не должен превышать 80 дБ, а ожидаемый уровень шума от вентиляционной системы здания не должны превышать допустимое значение звукового давления равному 85 дБ. [21]

Производственная вибрация может быть местной и общей. Местную вибрацию создают ручные машины ударного, ударно-вращательного действия. К источникам технологической вибрации в цехе относятся: электрические машины, оборудование, установки, насосы, вентиляторы и другие технологические агрегаты. Допустимые значения технологической вибрации рабочих мест составляют: виброскорость – 92 дБ; виброускорение – 58 дБ . [21]

## 5.2.3 Производственное освещение

Одним из обязательных условий безаварийной работы на химических предприятиях является непрерывное наблюдение за показаниями контрольно- измерительных приборов, за механизмами и аппаратурой, трубопроводами, что неосуществимо без правильного освещения.

Недостаточная или неправильная освещённость территории, дорог, установок, подходов к аппаратам и лестничным пролётам может привести к падениям работающих и к несчастным случаям. Естественное освещение создаётся в производственных помещениях через оконные и другие остеклённые проёмы. Искусственное освещение создаётся светильниками и может быть: общее, предназначенное для освещения всего рабочего помещения, местное, освещающее только рабочее место, и комбинированное, состоящее из общего и местного освещения.

В таблице 5.3 представлены нормы освещенности и класс зрительных работ для разных видов помещений цеха.

**Таблица 5.3. Нормы освещенности и класс зрительных работ для разных видов помещений цеха**

| <b>Вид производственных помещений</b>                          | <b>Класс зрительных работ</b> | <b>Нормы освещенности, лк</b> |
|--|-------------------------------|-------------------------------|
| Производственные помещения для постоянной работы на установках | Средней точности              | Не менее 300                  |
| Склады и кладовые помещения                                    | Очень малой точности          | Не менее 100                  |
| Гардероб, умывальные и ваннные комнаты, туалеты                | Малой точности                | Не менее 200                  |
| Операторские и помещения для точных измерений                  | Высокой точности              | Не менее 500                  |

В производственных помещениях химических заводов включается аварийное освещение на тот случай, если внезапно прекратится действие основного рабочего освещения. По своему назначению аварийное освещение подразделяется на два вида: для эвакуации людей из помещения и для продолжения работ. Аварийное освещение для эвакуации людей должно обеспечить освещённость на полу по линии основных проходов не менее 30 лк.

### 5.2.4 Микроклимат помещения

Вентиляция является важным средством создания оптимальных условий на химических производствах. Для производственных условий в большинстве случаев характерно суммарное действие климатических факторов помещения. Климатические условия производственных помещений складываются из температуры воздуха, его влажности и скорости движения воздуха.

Климатические условия оказывают значительное влияние на самочувствие человека, его работоспособность и здоровье. По тяжести работы, производимые зоне производственного помещения, относятся к работам средней тяжести. Оптимальные и допустимые значения характеристик микроклимата приведены в таблице 5.4 и таблице 5.6. [19]

**Таблица 5.4. Оптимальные параметры микроклимата.**

| <b>Период года</b>    | <b>Температура, С</b> | <b>Относительная влажность, %</b> | <b>Скорость движения воздуха, м/с</b> |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| Холодный и переходный | 22–24                 | 40–60                             | 0,1                                   |
| Теплый                | 23–25                 | 40–60                             | 0,1                                   |

**Таблица 5.5. Допустимые параметры микроклимата.**

| <b>Период года</b>    | <b>Температура, оС</b> | <b>Относительная влажность, %</b> | <b>Скорость движения воздуха, м/с</b> |
|-----------------------|------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| Холодный и переходный | 20,0–21,9              | 15–75                             | 0,1                                   |
| Теплый                | 20,0–21,9              | 15–75                             | 0,1                                   |

### **5.3 Анализ опасных выявленных факторов при эксплуатации проектируемого оборудования**

#### **5.3.1 Поражение электрическим током**

На проектируемом производстве предполагается использование сетей, напряжением 220 и 380 В. В качестве тоководов планируется применение проводов и кабелей с поливинилхлоридной или резиновой изоляцией. Проектируемый цех относится к первому классу электробезопасности (помещения без повышенной опасности), т.к. соблюдается условия: температура ниже 35 °С, влажность ниже 75 %, наличие заземления.

При сборке, настройке, подключении и эксплуатации разрабатываемого устройства возможно поражение электрическим током, что является опасным фактором. Для минимизации опасности удара электрическим током разработан ряд требований безопасности к электротехническим приборам, установленный ГОСТ 12.2.007.0-75 «Система стандартов безопасности труда. Изделия электротехнические». Общие требования безопасности. Данный ГОСТ устанавливает требования для изоляции, защитного заземления, органов управления, блокировки, оболочки, зажимов и выводных устройств, экранов и прочих средств защиты от опасного и вредного влияния электромагнитных полей, теплового, оптического и рентгеновского излучения, предупредительных знаков, надписей, сигнализаций. Также, для минимизации риска, следует соблюдать технику безопасности при работе с электроприборами. [20]

Особенно опасно прикосновение человека к токоведущим частям, находящимся под напряжением. [21]

Вследствие теплового воздействия электрического тока при непосредственном прикосновении человека к токоведущим частям и при воздействии электрической дуги возникают внешние местные поражения (ожоги). [21]

Ожоги могут быть поверхностные или глубокие, сопровождающиеся поражением не только кожных покровов, но и подкожной ткани, жира, глуболежащих мышц и кости.

Раны от ожогов заживают очень долго, а поражение 2/3 поверхности тела может привести к смертельному исходу. Возникают также механические повреждения — разрыв тканей и некоторых внутренних органов, это может быть следствием динамических перенапряжений при прохождении через тело человека электрического тока (практически — тока короткого замыкания) при случайном прикосновении одновременно к двум токоведущим шинам, напряжением выше 1000 В. [21]

Механическое повреждение может быть вызвано падением человека с высоты вследствие испуга при незначительном воздействии силы тока, практически безопасного, если не были выполнены меры безопасности при работе на высоте.

Наибольшую опасность при всех видах поражения представляет электроудар, когда при прохождении тока через тело человека поражается весь организм в целом, возникают судороги, расстройство дыхания, аритмия работы сердца. Степень опасности силы тока зависит от силы тока, проходящего через организм. Если сила тока, проходящего через организм 1,5 мА (при постоянном напряжении), то в месте контакта с токоведущими частями ощущается зуд и нагрев. Такую силу тока называют порогом ощущения. [21]

Увеличение силы тока до 10 мА при переменном и до 50 мА при постоянном напряжении вызывает у человека сильные боли в пальцах и кистях рук. При такой силе тока человек еще может самостоятельно оторваться от токоведущих частей. Такую силу тока называют условно безопасной. [21]

Дальнейшее увеличение от 10 мА до 100 мА при переменном и от 50 мА до 100 мА при постоянном напряжении вызывает очень сильные боли, руки парализуются, наступает паралич дыхания, самостоятельно оторваться от токоведущих частей невозможно. Сила тока при снижении сопротивления человеческого тела постоянно возрастает и при достижении 100 мА, как при переменном, так и при постоянном напряжении наступает клиническая смерть (отсутствие внешних признаков жизни). [21]

### **5.3.2 Подвижные части производственного оборудования.**

Движущиеся части производственного оборудования, являющиеся возможным источником травмоопасности, должны быть ограждены или расположены так, чтобы исключалась возможность прикосновения к ним работающего или использованы другие средства, предотвращающие травмирование. [19]

### **5.3.3 Повышенная температура поверхности оборудования.**

Теплоизоляционная конструкция должна обеспечивать нормативный уровень тепловых потерь оборудованием и трубопроводами, безопасную для человека температуру их наружных поверхностей, требуемые параметры теплоносителя при эксплуатации. [22]

Конструкции тепловой изоляции трубопроводов и оборудования должны отвечать требованиям:

- энергоэффективности - иметь оптимальное соотношение между стоимостью теплоизоляционной конструкции и стоимостью тепловых потерь через изоляцию в течение расчетного срока эксплуатации;
- эксплуатационной надежности и долговечности - выдерживать без снижения теплозащитных свойств и разрушения эксплуатационные, температурные, механические, химические и другие воздействия в течение расчетного срока эксплуатации;
- безопасности для окружающей среды и обслуживающего персонала при эксплуатации.

Материалы, используемые в теплоизоляционных конструкциях, не должны выделять в процессе эксплуатации вредные, пожароопасные и взрывоопасные, неприятно пахнущие вещества в количествах, превышающих предельно допустимые концентрации, а также болезнетворные бактерии, вирусы и грибки. [23]

## **5.4 Обоснование мероприятий по защите персонала от действия опасных и вредных факторов.**

Особое внимание на предприятиях и в организациях должно уделяться обоснованию мероприятий по безопасности и охране труда. В соответствии с международными стандартами необходимо вводить и поддерживать порядок непрерывного выявления опасных факторов, оценки риска и принятия мер для снижения уровня риска; разрабатывать профилактические и корректирующие мероприятия на основе результатов мониторинга условий труда.

### **5.4.1 Защита дыхательных путей и кожных покровов от воздействия химических реагентов**

Рабочий персонал, в зависимости от класса и вида работ, уровня и характера загрязнения воздуха, использования оборудования, где также возможен непосредственный контакт с опасными реагентами и продуктами производства, обеспечиваются средствами индивидуальной защиты. [24]

К средствам индивидуальной защиты (СИЗ) при работе с химическими веществами относятся: – спецодежда повседневного применения и спецодежда кратковременного использования (из нетканых материалов – комбинезоны и костюмы; из пленочных материалов и материалов с полимерным покрытием – полухалаты, полукombineзоны, фартуки, чехлы, бахилы и т.д.); – средства защиты органов дыхания – респираторы – ГОСТ 12.4.028–76 ; противогазы промышленные фильтрующие – ГОСТ 12.4.121-83 ; – спецобувь – ГОСТ 12.4.127–83 (основная дезактивируемая спецобувь, сапоги специальные резиновые формовые, защищающие от воды, нефтяных масел и механических воздействий – ГОСТ 12.4.072–79 ); – средства защиты глаз – ГОСТ 12.4.153–85 (защитные очки). – средства защиты рук – ГОСТ 12.4.010–75 (резиновые перчатки и хлопчатобумажные перчатки, рукавицы и т.д.) При работе с токсичными и вредными веществами запрещено допускать персонал к работе без спецодежды и защитных средств. [24]

#### **5.4.2 Защита от производственного шума и вибрации**

Главный способ защиты от вибрации и шума -ограничение времени воздействия этих факторов. Ограничение должно осуществляться путем установления для лиц опасных профессий внутрисменного режима труда, реализуемого в технологическом процессе. [25]

Основными мероприятиями по защите от шума является: – плавное соединение воздуховодов с вентиляционным агрегатом с помощью переходов и гибких вставок; – установка вентагрегатов в отдельных выгороженных помещениях – венткамерах, расположенных в удаленных от рабочих мест частях здания; – подбор диаметров воздуховодов по средним скоростям в магистральных воздуховодах для уменьшения сопротивления сети (4–8) м/с; – монтаж насосов и химического оборудования беспрокладочным методом с применением установочных винтов, удаляемых после подливки. Исключаются жёсткие связи между виброизолируемым агрегатом и строительными конструкциями. Питание к электродвигателям подведено гибкими кабелепроводами. [25]

Средства индивидуальной защиты от шума: – применение противошумных наушников, закрывающих ушную раковину снаружи; – применение противошумных вкладышей, перекрывающих наружный слуховой проход или прилегающие к нему; – противошумные шлемы и каски; – противошумные костюмы. [25]

Для устранения вибрации от устройств, их устанавливают на специальные платформы, снижающие уровень вибрации. Средствами индивидуальной защиты от вредного воздействия вибрации являются специальные перчатки, рукавицы, обувь. Рабочие места расположены вдали от источников вибрации. [25]

### 5.4.3 Поддержание микроклимата помещения

Мероприятия по нормализации параметров микроклимата:

- отведение тепла, исходящего от оборудования, установленного на открытых площадках;
- в цехе существуют места для отдыха рабочих;
- для предупреждения простудных заболеваний у входа в цех оборудованы тамбуры и защитные стенки, которые нужны для предохранения от сквозняков, воздушные тепловые завесы устанавливаются для защиты рабочих помещений от проникновения больших масс холодного воздуха;
- зимой температура поддерживается за счёт батарей центрального отопления. [26]

Таким образом, микроклимат в проектируемом цеху соответствует всем нормам согласно с ГОСТ 12.1.005-88 и СН 245-71.

### 5.4.4 Электробезопасность

Согласно требованиям, ГОСТ 12.2.003–91 ССБТ. Оборудование производственное. Общие требования безопасности:

Конструкция производственного оборудования, приводимого в действие электрической энергией, должна включать устройства (средства) для обеспечения электробезопасности.

Технические средства и способы обеспечения электробезопасности (например, ограждение, заземление, зануление, изоляция токоведущих частей, защитное отключение и др.) должны устанавливаться в стандартах и технических условиях на производственное оборудование конкретных групп, видов, моделей (марок) с учетом условий эксплуатации и характеристик источников электрической энергии.

Производственное оборудование должно быть выполнено так, чтобы исключить накопление зарядов статического электричества в количестве, представляющем опасность для работающего, и исключить возможность пожара и взрыва.

Мероприятия по обеспечению электробезопасности электроустановок заданного цеха:

- недоступность токоведущих частей аппаратуры (заключение токоведущих и электропоражающих частей);
- покрытие металлических поверхностей инструментов надежной изоляцией;
- заземление корпусов всех установок через нулевой провод;
- вывешивание плакатов, указывающих место работы;

– отключение напряжения с токоведущих частей, на которых или вблизи которых будет проводиться работа, и принятие мер по обеспечению невозможности подачи напряжения к месту работы.

В проектируемом цеху к индивидуальным средствам защиты от поражения электрическим током относятся: а) Основные – оперативные штанги и токоизмерительные клещи, диэлектрические перчатки, инструмент с изолирующими ручками и указателем напряжений;

б) Дополнительные – диэлектрические галоши, коврики. Как дополнительная изоляция используется спецодежда рабочего.

Соблюдение представленных требований позволяет не допускать несчастных случаев, связанных с поражением электрическим током, а также уменьшается вероятность преждевременного выхода оборудования из рабочего состояния. [26]

#### **5.4.5 Защита от подвижных частей производственного оборудования.**

Если функциональное назначение движущихся частей, представляющих опасность, не допускает использование ограждений или других средств, исключающих возможность прикасания работающих к движущимся частям, то конструкция производственного оборудования должна предусматривать сигнализацию, предупреждающую о пуске оборудования, а также использование сигнальных цветов и знаков безопасности. [26]

В непосредственной близости от движущихся частей, находящихся вне поля видимости оператора, должны быть установлены органы управления аварийным остановом (торможением), если в опасной зоне, создаваемой движущимися частями, могут находиться работающие. [26]

Конструкция зажимных, захватывающих, подъемных и загрузочных устройств или их приводов должна исключать возможность возникновения опасности при полном или частичном самопроизвольном прекращении подачи энергии, а также исключать самопроизвольное изменение состояния этих устройств при восстановлении подачи энергии. [26]

Элементы конструкции производственного оборудования не должны иметь острых углов, кромок, заусенцев и поверхностей с неровностями, представляющих опасность травмирования работающих, если их наличие не определяется функциональным назначением этих элементов. В последнем случае должны быть предусмотрены меры защиты работающих. [26]

Части производственного оборудования (в том числе трубопроводы гидро-, паро-, пневмосистем, предохранительные клапаны, кабели и др.), механическое повреждение которых может вызвать возникновение опасности, должны быть защищены ограждениями или расположены так, чтобы предотвратить их случайное повреждение работающими или средствами технического обслуживания. [26]

Конструкция производственного оборудования должна исключать самопроизвольное ослабление или разъединение креплений сборочных единиц и деталей, а также исключать перемещение подвижных частей за пределы, предусмотренные конструкцией, если это может повлечь за собой создание опасной ситуации. [26]

#### **5.4.6 Повышенная температура поверхности оборудования.**

При необходимости нахождения людей вблизи горячих частей оборудования должны быть приняты меры по их защите ожогов и действия высокой температуры (ограждение действующего оборудования, вентиляция, спецодежда и т.п.). [26]

Работы, при которых возможно бурное протекание химического процесса, разбрызгивание горячих или вредных веществ, а также работы под вакуумом должны выполняться в вытяжных шкафах на противнях или поддонах. При работе следует пользоваться специальными защитными очками, спецодеждой, фартуками и перчатками из материалов, стойких к воздействию вышеназванных веществ. [26]

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 °С должна быть не выше 45 °С. [26]

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 промышленных предприятий. Опознавательная окраска, предупреждающие знаки и маркировочные щитки.

Все горячие участки поверхностей оборудования и трубопроводов, находящиеся в зоне возможного попадания на них легковоспламеняющихся, горючих, взрывоопасных или вредных веществ, должны быть покрыты металлической обшивкой для предохранения тепловой изоляции от пропитывания этими веществами. [26]

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. [26]

## 5.5. Экологическая безопасность

### 5.5.1 Анализ влияния объекта исследования на атмосферу.

К газообразным отходам производства, загрязняющим окружающую среду, относятся пары реагентов и растворителей, участвующих в процессе ректификации. Для снижения вредного воздействия на окружающую среду производственный процесс ведется в закрытом помещении, оборудованном системой вентиляции. Для контроля содержания углеводородов и растворителей в отделении разделения установлен газоанализатор СВК-3М, заблокированный с аварийной вытяжной вентиляцией.

При эксплуатации производственного оборудования ректификации, нормальная воздушная среда в помещениях цеха обеспечивается системами отопления и вентиляции.

### 5.5.2 Анализ влияния объекта исследования на гидросферу.

В цехе предусмотрена ливневая и хоз-бытовая канализация. В нее поступают сточные воды от мытья полов в помещениях. Основным загрязнителем сточных вод являются следы масел, по содержанию не превышающие ПДК.

Средний объем стоков на перекачку составляет 20 м<sup>3</sup>/сутки. Охлаждение теплообменного оборудования производится от закрытой системы оборотного водоснабжения. Характеристика сточных вод приведена в таблице 5.6.

Таблица 5.6. Сточные воды.

| Наименование сбрасываемых сточных вод, отделение, аппарат  | Место сбрасывания                                   | Количество стоков, м <sup>3</sup> в сутки | Содержание контролируемых вредных веществ в сбросах (по компонентам), мг/дм <sup>3</sup> | Допускаемое количество сбрасываемых вредных веществ, кг в сутки |
|--|---|---|--|---|
| Стоки от промывки оборудования, смыва с полов, ливневые в случае превышения норм по содержанию вредных веществ | В химзагрязненную канализацию на локальную отчистку | 48-240                                    | Мин.масла -5<br>Взвешенные -35   | 0,24<br>1,7   |

### 5.5.3 Анализ влияния объекта исследования на литосферу

Во время ремонта или демонтажа оборудования происходит образование жидких отходов, характеристика которых представлена в таблице 5.7.

**Таблица 5.7. Характеристика твердых и жидких отходов.**

| Наименование отхода   | Место складирования, транспорт, тара  | Количество отходов, | Периодичность образования                      | Характеристика отходов          |  |                         |
|---|---|---------------------|--|---------------------------------|--|-------------------------|
|   |   |                     |  | Химический состав, влажность, % | Физические показатели, плотность, кг/м | Класс опасности отходов |
| Отходы смеси Гексен-1-циклогексан, образующиеся в результате чистки оборудования, отборе проб | Отходы смеси сливаются в металлические бочки и вывозятся на полигон токсичных отходов автомобильным транспортом | 15                  | Периодически при ремонте и чистке оборудования | Смесь гексен-1 и циклогексана   | Жидкость прозрачного цвета.            | 4                       |

### 5.6. Анализ «жизненного цикла» объекта исследования

В жизненный цикл любого изделия входят следующие этапы: разработка технических требований к создаваемому виду изделия; проектирование; подготовка и разработка технологических процессов; производство; монтаж; ввод в действие; эксплуатация; техническое обслуживание и ремонт; проведение испытаний и обследований; снятие с эксплуатации; утилизация после завершения использования продукции.

Оборудование будет изготавливаться из нержавеющей стали. По завершении срока службы изделия и оборудование из нержавейки проходит сортировку и сбор для отправки на вторичную переработку, что не сопряжено с какими-либо значительными экономическими вложениями и в полной мере является самоокупающимся мероприятием. Нержавейка не обладает риском изнашивания и остаётся составляющей устойчивой системы закрытого контура. Её переработка – на фоне ряда других технологически полученных материалов – происходит без такого побочного эффекта, как деградация, что означает полную сохранность всех изначальных характеристик, при

том, что получаемая из нержавеющей стали продукция проходит процесс удешевления. Прочность этого материала – это гарантия высоких гигиенических стандартов, что позволяет применение нержавеющей стали на предприятиях общепита. Выбор нержавеющей стали – это выбор продукта, который, благодаря повышенным механическим свойствам, может максимально содействовать охране природных ресурсов.

## **5.7. Обоснование мероприятий по защите окружающей среды.**

В рассматриваемой технологической цепочки в окружающую среду могут выделяться газообразный гексен-1, циклогексан, а также пролив этих веществ. Избыточные газы отправляются на очистку с целью возвращения их в технологический процесс.

Профилактическими мерами по предупреждению вредных выбросов являются:

- организация технологических процессов с минимальным использованием загрязняющих веществ;
- организация эффективной системы сорбционной очистки выходящих газов и сточных вод в местах специализированного выброса;
- надежная герметизация оборудования;
- повышение общей культуры производства, организация производства на замкнутый технологический цикл.

## **5.8. Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

### **5.8.1. Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований**

Отличительной особенностью производства Гексен-1 по пожарной и взрывопожарной безопасности связано с опасностями при работе с углеводородами и катализаторными комплексами, которые характеризуются повышенной способностью к воспламенению и детонации.

Основные опасности при работе с углеводородами: [1]

1. Возгорание оборудования, трубопроводов и арматуры, работающих с углеводородами;
2. Возгорание одежды и волосяных покровов обслуживающего персонала, находившегося в среде с повышенным содержанием углеводородов;
3. Взрыв углеводородов и других взрывоопасных примесей при их утечке из колонн, трубопроводов и др. оборудования при нарушении технологических параметров;

4. Загорание и взрыв баллонов, наполненных сжиженными углеводородами, при их разгерметизации.

Также при несоблюдении правил хранения и нарушений противопожарных норм возможны загорания смазочных масел и обтирочных материалов. [1]

Для предотвращения возможных ситуаций необходимо соблюдать меры пожарной безопасности: [1]

1. Запрещается курить и применять открытый огонь в отделении ректификации, а также в местах, где проходят трубопроводы и производятся работы с углеводородами. Курение разрешается только в специально отведенных и оборудованных местах, определенных приказом по предприятию.

2. В зданиях производства гексен-1 и в местах расположения баллонов со сжиженными углеводородами должны быть установлены ванны самопомощи, заполненные водой. Допускается устройство противопожарных душевых кабин с автоматической подачей воды при входе человека в кабину.

3. При загорании производственного оборудования необходимо прекратить поступление углеводородов в помещение. Обслуживающий персонал должен быть выведен в безопасную зону. Для тушения загоревшегося оборудования должны применяться негорючие в кислороде средства пожаротушения: вода, пена, водяной пар, двуокись углерода, инертные газы (азот, аргон), порошковые составы на основе карбоната натрия и т.д.

4. Загрязнение производственного оборудования, трубопроводов и установленной на них арматуры жировыми и другими горючими веществами не допускается. Грузоподъемные устройства должны быть оборудованы защитными приспособлениями, исключающими попадание масла на производственное оборудование и арматуру.

5. При эксплуатации производственного оборудования должна исключаться возможность утечки углеводородов.

6. В процессе эксплуатации оборудования необходимо следить за герметичностью аппаратов, машин и коммуникаций. При обнаружении утечек газообразных или жидких продуктов работа оборудования должна быть приостановлена и утечки ликвидированы. Определение мест утечек газа при помощи огня или тлеющих предметов запрещается.

8. Тепло- и звукоизоляция оборудования и трубопроводов должна выполняться из негоряемых или трудно сгораемых материалов.

7. В помещениях, где осуществляется периодический контроль за содержанием углеводородов в воздухе, при повышении концентрации паров гексен-1 в воздухе более 100 мг/м<sup>3</sup> должны быть немедленно приняты меры по нормализации состава воздуха, для предотвращения возникновения

повышенного содержания взрывопожароопасных газов и образование взрывопожароопасной среды.

9. Наружный отопитель арматуры должен производиться горячим воздухом, паром или горячей водой. Пользоваться для этой цели открытым огнем запрещается.

10. Использовать конструкции оборудования, пневмотранспортов и трубопроводов в качестве заземления при электросварочных работах не допускается.

11. Запрещается наполнять и опорожнять транспортные цистерны на площадках из асфальта и других органических покрытий. 12. Слив продуктов ректификации следует производить в специально отведенное для этого место, возле которого должен быть установлен предупреждающий знак безопасности с поясняющей надписью: "Место для слива продуктов ректификации. Опасно. Не курить!" Слив продуктов ректификации на грунт и асфальт запрещается.

13. Руки, а также одежда и обувь персонала, обслуживающего производственное оборудование, должны быть чистыми, без следов масла.

14. По окончании работ с углеводородами или в местах с их повышенным содержанием в окружающем воздухе запрещается в течение 30 минут приближаться к огню или раскаленным предметам и курить. Одежда, в которой производились работы, должна быть проветрена.

15. Ремонт оборудования разрешается производить только после тщательной продувки.

### **5.8.2. Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС**

Наиболее возможными для цеха ректификации гексен-1 являются источники чрезвычайных ситуаций антропогенного характера. В первую очередь это: [1]

- выделение продуктов ректификации при разгерметизации оборудования, что приводит к возникновению взрыва и пожара;
- выделение углеводородов, продуктов ректификации вызывает опасность удушья от недостатка кислорода;
- выделение углеводородов, продуктов ректификации может привести к отравлению персонала;
- замыкание электропроводки и силовых кабелей, что приводит к возникновению пожара.

В соответствии с этим принимаются меры, направленные на минимизацию вероятности возникновения и последствий ЧС на промышленных объектах, которые включают в себя: [1]

1. Разработку технических и организационных мероприятий, уменьшающих вероятность возникновения чрезвычайной ситуации (снабжение технологического оборудования средствами взрыво- и пожарозащиты, электро- и молниезащиты, локализации и тушения пожаров).

Формирование планов действия в чрезвычайных ситуациях. Подготовка персонала, служб гражданской обороны и населения к действиям при чрезвычайных ситуациях.

В случае возникновения чрезвычайной ситуации в действие вступает План Ликвидации Аварийной Ситуации (ПЛАС). Он предусматривает порядок действия при возникновении чрезвычайной ситуации. Согласно ПЛАС в цеху должен находиться аварийный запас средств защиты в шкафу. Шкаф должен быть окрашен в желтый цвет с надписью. Содержимое шкафа включает в себя шланговые противогазы ПТТ1 -1, промышленные фильтрующие противогазы ППФМ-92 с коробкой марки БКФ, самоспасатель ПДУ-3, респираторы, комплекты спецодежды, защитные очки, сапоги, перчатки и др.

**Таблица 5.8. Возможные производственные аварийные ситуации, способы их.**

| <b>Возможные производственные аварийные ситуации</b>                   | <b>Причины возникновения аварийных ситуаций</b>   | <b>Действия персонала по предупреждению и устранению аварийных ситуаций</b>   |
|--|---|---|
| Отключение электроэнергии  | Прекращение работы оборудования   | Разгрузить через аварийные клапана реакционную среду из аппарата. Произвести аварийную остановку блока ректификации в ручном режиме.  |
| Прекращение подачи охлаждающей воды                                    | Перегрев оборудования   | Произвести аварийную остановку блока ректификации в автоматическом режиме.  |
| Разгерметизация оборудования и коммуникаций в случае пожара или взрыва | Нарушение режима работы оборудования.<br>Аварийная остановка оборудования.  | Произвести аварийную остановку блока ректификации в автоматическом режиме. Принять исчерпывающие меры по локализации аварии. Оградить опасную зону и выставить посты. Прекратить все ремонтные, огневые и другие виды работ. Удалить в безопасное место лиц, не участвующих в ликвидации аварии. Оказать первую помощь пострадавшим. Приступить к ликвидации аварии и спасению людей  |
| Розлив продуктов ректификации (гексен-1-циклогексан)                   | Нарушение режима работы оборудования.<br>Разрушение производственного оборудования и резервуаров для хранения жидких продуктов разделения "физического взрыва" или аварии | Произвести аварийную остановку блока ректификации в автоматическом режиме. Разгрузить через аварийные клапана реакционную среду из аппарата. Принять исчерпывающие меры по локализации аварии. Оградить опасную зону и выставить посты. Прекратить все ремонтные, огневые и другие виды работ. Удалить в безопасное место лиц, не участвующих в ликвидации аварии. Оказать первую помощь пострадавшим. Приступить к ликвидации аварии и спасению людей. |

## 5.9. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Законодательство РФ об охране труда основывается на Конституции РФ и состоит из федерального закона, других федеральных законов и иных нормативных правовых актов субъектов РФ. Среди них можно выделить **федеральный закон “Об обязательном социальном страховании от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний”**. Для реализации этих законов приняты Постановления Правительства РФ “О государственном надзоре и контроле за соблюдением законодательства РФ о труде и охране труда”, “О службе охраны труда”, “О Федеральной инспекции труда” и др. [28]

Управление охраной труда осуществляет блок федеральных органов исполнительной власти, руководимый Министерством здравоохранения и социального развития Российской Федерации (Минздравсоцразвития). Оно осуществляет функции государственной политики и нормативно-правовому регулированию в сфере здравоохранения и социального развития, социального страхования, условий и охраны труда и т. д.

Функции по контролю и надзору, которые ранее осуществлялись Санэпиднадзором Минздрава России, **переданы Федеральной службе по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека (Роспотребнадзор)**.

Федеральная служба по труду и занятости (Роструд) осуществляет функции по надзору и контролю в сфере труда, а также государственный надзор и контроль за соблюдением, в частности, трудового законодательства и нормативных правовых актов, содержащих нормы трудового права; установленного порядка расследования и учета несчастных случаев на производстве.

Федеральное агентство по здравоохранению и социальному развитию (Росздрав) организует деятельность по установлению связи заболевания с профессией, государственной службы медико-социальной экспертизы и др.

Федеральная служба по надзору в сфере здравоохранения и социального развития (Росздравнадзор) осуществляет контроль за порядком организации осуществления медико-социальной экспертизы; порядком установления степени утраты профессиональной трудоспособности в результате несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний и др.

Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека (Роспотребнадзор) — государственный санитарно-эпидемиологический надзор за соблюдением санитарного законодательства; организует деятельность системы санитарно-эпидемиологической службы РФ.

**В федеральном законе “О пожарной безопасности” (1994)** определяются общие правовые, экономические и социальные основы обеспечения пожарной безопасности в России, дается

регулирование отношений между органами государственной власти, органами местного самоуправления, предприятиями, организациями, крестьянскими хозяйствами и иными юридическими лицами независимо от форм собственности. Федеральный закон “О промышленной безопасности опасных производственных объектов” (1997) определяет правовые, экономические и социальные основы обеспечения безопасной эксплуатации опасных производственных объектов и направлен на предупреждение аварий на опасных производственных объектах и обеспечение готовности организаций к локализации последствий аварий.

**Федеральный закон “О радиационной безопасности населения” (1995) характеризует правовые основы обеспечения радиационной безопасности населения в целях охраны его здоровья.**

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И  
РЕСУРСО- СБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

|        |                           |
|--------|---------------------------|
| Группа | ФИО                       |
| 4КМ61  | Курмель Герман Валериевич |

|                     |              |                           |  |
|---------------------|--------------|---------------------------|--|
| Школа               | ИШНПТ        | Отделение школы(НОЦ)      | Научно-образовательный центр<br>Н.М. Кижнера |
| Уровень образования | магистратура | Направление/специальность | МАХП   |

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

|  |   |
|--|---|
| 1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих | Затраты на материальные ресурсы – 1400 руб.;<br>Затраты на ПО – 190000 руб.;<br>Размер оклада руководителя – 31000 руб.;<br>Размер стипендии магистранта – 1750 руб.; |
| 2. Нормы и нормативы расходования ресурсов   | Срок выполнения проекта – 10 месяцев;<br>Дополнительная заработная плата – 12% от основной;<br>Районный коэффициент = 1,3;  |
| 3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования                                  | Ставка отчислений на социальные нужды – 27,1%   |

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

|  |   |
|--|---|
| 1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ  | Оценочная карта конкурентных технических решений  |
| 2. Разработка устава научно-технического проекта   | Определение целей и результатов проекта, заинтересованных сторон, участников                              |
| Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок | Построение календарного плана проекта, графика выполнения работ;<br>Расчет затрат на заработную плату, ПО |
| 4. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности  | Расчет интегральных показателей эффективности, оценка сравнительной эффективности проекта                 |

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

Карта сегментирования рынка услуг  
Оценочная карта конкурентных технических решений  
Диаграмма Исикавы  
Бланк оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации  
Перечень заинтересованных сторон проекта  
Цели и результаты проекта  
Рабочая группа проекта  
Ограничения и допущения проекта  
Календарный план работ проекта  
Расчет основной заработной платы  
Баланс рабочего времени  
Группировка затрат проекта по статьям  
Матрица ответственности  
Оценка характеристик вариантов исполнения проекта

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

**Задание выдал консультант:**

| Должность   | ФИО                         | Ученая степень,<br>звание | Подпись | Дата |
|-------------|-----------------------------|---------------------------|---------|------|
| Доцент ОСГН | Креницына<br>Зоя Васильевна | к.т.н., доцент            |         |      |

**Задание принял к исполнению студент:**

| Группа | ФИО                       | Подпись | Дата |
|--------|---------------------------|---------|------|
| 4КМ61  | Курмель Герман Валериевич |         |      |

## 6. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

### 6.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

В настоящее время в Российской Федерации, в том числе в Томской области, находятся производства полиэтилена высокого и низкого давления далее по тексту ПЭВД и ПЭНД. Для их синтеза используют (со)мономеры в том числе Гексен-1. Поэтому, производство этого вещества актуальна.

Продукт: Гексен-1

Целевой рынок: предприятия, выпускающие полиэтилен высокого давления (ПЭВД) и полиэтилен низкого давления (ПЭНД)

**Таблица 6.1. Производители ПЭВД и ПЭНД в России и странах СНГ**

| Производители ПЭВД   | Производители ПЭВД, ПЭНД                                       |
|--|--|
| ООО «Томскнефтехим» (г. Томск)                               | ОАО «Казаньоргсинтез» (г. Казань, Татарстан)                   |
| ОАО «Ангарский завод полимеров» (г. Ангарск, Иркутская обл.) | ОАО «Салаватнефтеоргсинтез» (г. Салават, Башкортостан)         |
| ОАО «НефтеХимСэвилен» (г. Казань, Татарстан)                 | ОАО «Уфаоргсинтез» (г. Уфа, Башкортостан)                      |
| ОАО «Полимир» (г. Новополоцк, Белоруссия)                    | «Шуртанский газохимический комплекс» (пос. Шуртан, Узбекистан) |
| ООО «Волжский Завод Полимеров» (г. Нижний Новгород)          |  |
| ЗАО АК «Химпэк» (г. Москва)                                  |  |

Опираясь на сегментирование, выявлено, что основными сегментами рынка (со)мономера гексен-1 являются химические производства, производящие ПЭВД и ПЭНД.

## 6.1.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Для внесения поправок в научное исследование чтобы лучше оказывать сопротивление конкурентам, необходимо найти и проанализировать сильные и слабые стороны разработок конкурентов.

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum V_i \cdot B_i, \quad (1)$$

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

$V_i$  – вес показателя (в долях единицы);

$B_i$  – балл  $i$ -го показателя.

**Таблица 6.2 -Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)**

| Критерии оценки   | Вес критерия | Баллы      |           |           | Конкурентоспособность |             |             |
|---|--------------|------------|-----------|-----------|-----------------------|-------------|-------------|
|   |              | $B_{\phi}$ | $B_{K1}$  | $B_{K2}$  | $K_{\phi}$            | $K_{K1}$    | $K_{K2}$    |
| 1   | 2            | 3          | 4         | 5         | 6                     | 7           | 8           |
| <b>Технические критерии оценки ресурсоэффективности</b> |              |            |           |           |                       |             |             |
| 1. Экологичность  | 0,12         | 3          | 4         | 5         | 0,35                  | 0,5         | 0,4         |
| 2. Удобство в эксплуатации                              | 0,12         | 4          | 3         | 5         | 0,2                   | 0,25        | 0,1         |
| 3. Безопасность   | 0,14         | 3          | 5         | 4         | 0,25                  | 0,2         | 0,15        |
| 4. Надежность   | 0,14         | 4          | 4         | 5         | 0,2                   | 0,2         | 0,2         |
| 5. Выход целевого продукта                              | 0,16         | 5          | 3         | 4         | 0,35                  | 0,45        | 0,40        |
| 6. Длительность процесса                                | 0,05         | 5          | 3         | 5         | 0,25                  | 0,25        | 0,2         |
| <b>Экономические критерии оценки эффективности</b>      |              |            |           |           |                       |             |             |
| 1. Конкурентоспособность продукта                       | 0,13         | 4          | 5         | 4         | 0,3                   | 0,25        | 0,1         |
| 2. Цена   | 0,14         | 4          | 2         | 4         | 0,45                  | 0,25        | 0,3         |
| <b>Итого</b>  | <b>1</b>     | <b>32</b>  | <b>29</b> | <b>36</b> | <b>2,35</b>           | <b>2,04</b> | <b>1,85</b> |

$K_1$  – Тримеризация этилена на модифицированном катализаторе.

$K_2$  – Термический крекинг парафинов.

Исходя из таблицы 6.2., разрабатываемая нами методика более конкурентоспособна, чем разработки конкурентов. Она более удобна и безопасна в эксплуатации. Также цены реагентов нашей методики более низки по сравнению с конкурентами.

### 6.1.3 Диаграмма Исикавы

Для выявления различных причинно-следственных связей был использован метод диаграмм Исикавы.

Диаграмма Исикавы — это способ позволяет графически изображать исследования и определения, с помощью которых можно выразить взаимосвязи между факторами и последствиями какого-нибудь проекта, ситуации, проблемы. С помощью данной диаграммы были рассмотрены все факторы данной работы.

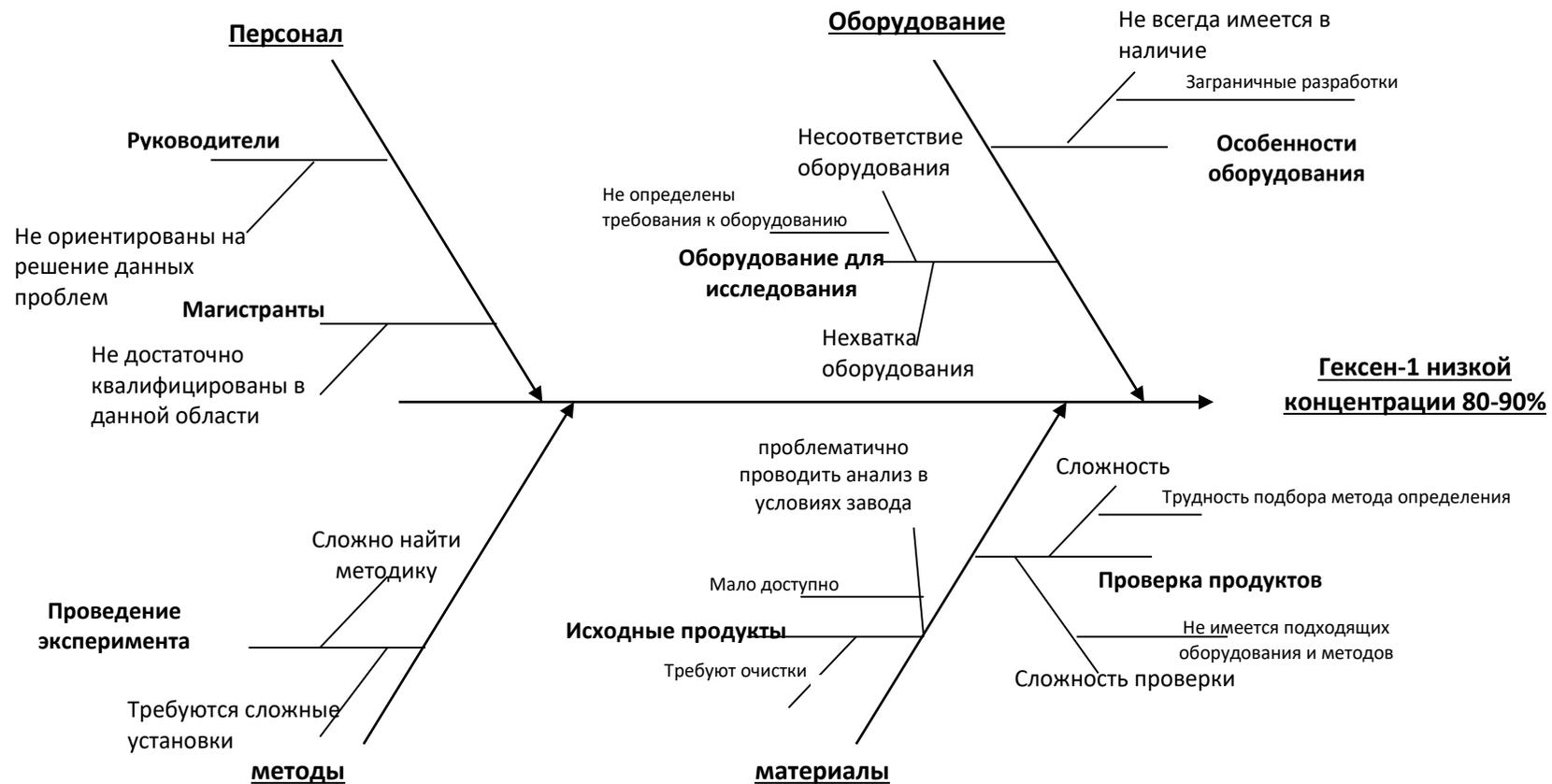


Рисунок 6.3.1 – Общий вид диаграммы Исикавы для получения гексен-1 низкого качества 80-90%.

### 6.1.4. Оценка готовности проекта к коммерциализации

На какой бы стадии жизненного цикла не находилась научная разработка полезно оценить степень ее готовности к коммерциализации и выяснить уровень собственных знаний для ее проведения. Для этого заполнили специальную таблицу, которая включает показатели о степени проработанности проекта с позиции коммерциализации и компетенциям разработчика научного проекта.

**Таблица 6.3. Оценка степени готовности научного проекта к коммерциализации**

| № п/п | Наименование  | Степень проработанности научного проекта | Уровень имеющихся знаний у разработчика |
|-------|---|--|---|
| 1.    | Определен имеющийся научно-технический задел                                      | 3  | 3                                       |
| 2.    | Определены перспективные направления коммерциализации научно-технического задела  | 4  | 2                                       |
| 3.    | Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке         | 3  | 3                                       |
| 4.    | Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок   | 5  | 4                                       |
| 5.    | Определены авторы и осуществлена охрана их прав                                   | 4  | 4                                       |
| 6.    | Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности                         | 3  | 2                                       |
| 7.    | Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта                                 | 4  | 4                                       |
| 8.    | Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки                        | 3  | 3                                       |
| 9.    | Определены пути продвижения научной разработки на рынок                           | 3  | 2                                       |
| 10.   | Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки                       | 5  | 5                                       |
| 11.   | Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок    | 4  | 4                                       |
| 12.   | Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот | 5  | 4                                       |
| 13.   | Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки            | 3  | 3                                       |
| 14.   | Имеется команда для коммерциализации научной разработки                           | 4  | 2                                       |
| 15.   | Проработан механизм реализации научного проекта                                   | 5  | 4                                       |
|       | <b>ИТОГО БАЛЛОВ</b>   | <b>58</b>                                | <b>53</b>                               |

Оценка готовности научного проекта к коммерциализации (или уровень имеющихся знаний у разработчика) равна

$$B_{\text{сум}} = \sum B_i$$

$$B_{\text{сум}}=53$$

Значение  $B_{\text{сум}}$  получилось 53, что говорит, что перспектива коммерциализация данной разработки выше среднего. Недостаток - не проработанность стратегии внедрения данной технологии на широкий рынок.

### 6.1.5. Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования

При коммерциализации научно-технических разработок продавец (а это, как правило, владелец соответствующих объектов интеллектуальной собственности), преследует вполне определенную цель, которая во многом зависит от того, куда в последующем он намерен направить (использовать, вложить) полученный коммерческий эффект. Это может быть получение средств для продолжения своих научных исследований и разработок (получение финансирования, оборудования, уникальных материалов, других научно-технических разработок и т.д.), одноразовое получение финансовых ресурсов для каких-либо целей или для накопления, обеспечение постоянного притока финансовых средств, а также их различные сочетания.

При этом время продвижения товара на рынок во многом зависит от правильности выбора метода коммерциализации.

**Таблица 6.4. Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования**

| Методы  | Актуальность   |
|---|--|
| 1. <i>Торговля патентными лицензиями</i> , т.е. передача третьим лицам права использования объектов интеллектуальной собственности на лицензионной основе. При этом в патентном законодательстве выделяющие виды лицензий: исключительные (простые), исключительные, полные лицензии, sublicензии, опционы. | Актуально, т.к. для повышения объемов производства (со)мономеров, можно использовать оборудованные производственные площадки других предприятий, и получать с этого определённую доплату |
| 2. <i>Передача ноу-хау</i> , т.е. предоставление владельцем ноу-хау возможности его использовать другим лицом, осуществляемое путем раскрытия ноу-хау.  | Не актуально   |

|  |  |
|--|--|
| 3. <i>Инжиниринг</i> как самостоятельный вид коммерческих операций предполагает предоставление на основе договора инжиниринга одной стороной, именуемой консультантом, другой стороне, именуемой заказчиком, комплекса или отдельных видов инженерно-технических услуг, связанных с проектированием, строительством и вводом объекта в эксплуатацию, с разработкой новых технологических процессов на предприятии заказчика, усовершенствованием имеющихся производственных процессов вплоть до внедрения изделия в производство и даже сбыта продукции. | Не актуально   |
| 4. <i>Франчайзинг</i> , т.е. передача или переуступка (на коммерческих условиях) разрешения продавать чьи-либо товары или оказывать услуги в некоторых областях.   | Не актуально   |
| 5. <i>Организация собственного предприятия.</i>  | Не актуально   |
| 6. <i>Передача интеллектуальной собственности</i> в уставной капитал предприятия.  | Актуально, т.к. установка опытная, и дальнейшее развитие в массовом производстве пойдёт только на пользу предприятия.  |
| 7. <i>Организация совместного предприятия</i> , т.е. объединение двух и более лиц для организации предприятия.   | Не актуально   |
| 8. <i>Организация совместных предприятий</i> , работающих по схеме «российское производство – зарубежное распространение».   | Актуально, т.к. производства ПЭВД и ПЭНД находятся по всему миру и сотрудничество с иностранными предприятиями поможет в развитии Российской химической промышленности |

## 6.2. Инициация проекта

Для определения нового проекта или новой фазы существующего выполняется группа процессов инициации. Инициация проекта определяет изначальные цели проекта или содержание работы. Также, в данном разделе определяются изначальные экономические – финансовые затраты. По данной работе также надо определить внутренние и внешние заинтересованные стороны проекта, которые влияют на общий результат научного проекта. Для этого научного проекта тоже имеются заинтересованные группы (таблица 6.2.1). Ниже указаны, изначальные цели и результат проекта (таблица 6.2.2), рабочая группа данного проекта (таблица 6.2.3) приведены ниже.

**1. Цели и результат проекта.** В данном разделе необходимо привести информацию о заинтересованных сторонах проекта, иерархии целей проекта и критериях достижения целей.

**Таблица 6.5. – Заинтересованные стороны проекта**

| <b>Заинтересованные стороны проекта</b> | <b>Ожидания заинтересованных сторон</b>   |
|---|---|
| Научный руководитель                    | Улучшение процесса очистки гексен-1 от растворителя, получение более высокого процента по качеству получаемого продукта |
| Магистрант                              |   |

**Таблица 6.6. – Цели и результат проекта**

|   |   |
|---|---|
| <b>Цели проекта:</b>                        | Разработка основного оборудования узла разделения (со)мономера от растворителя.                       |
| <b>Ожидаемые результаты проекта:</b>        | Улучшение качества выпускаемого продукта.   |
| <b>Критерии приемки результата проекта:</b> | Выполнение прочностных условий расчёта.   |
| <b>Требования к результату проекта:</b>     | <b>Требование:</b><br>Разработанное основное оборудование для разделения (со)мономера от растворителя |
|   | Высокий процент выхода целевого продукта (99,9%)  |

**2. Организационная структура проекта.** В данном этапе инициации проекта приведена вся рабочая группа данного проекта, определена роль каждого участника в данном проекте, а также прописаны функции, выполняемые каждым из участников и их трудозатраты в проекте.

**Таблица 6.7. – Рабочая группа проекта**

| <b>№п/п</b> | <b>Фамилия И.О. место работы, должность</b>  | <b>Функции в проекте</b>  | <b>Основные обязанности</b>   |
|-------------|--|---|---|
| 1           | Семакина Ольга Константиновна, к.х.н. доцент | Руководитель проекта  | Осуществляет детальное планирование проекта; информацию для создания и актуализации планов работ; контролирует сроки выполнения работ по проекту  |
| 2           | Курмель Герман Валериевич, магистр           | Исполнитель проекта   | Выполняет проект  |
| 3           | Креницына Зоя Васильевна                     | Консультант раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» | Оказание методической помощи при работе над разделом «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» в магистерской диссертации |

|   |                             |  |  |
|---|-----------------------------|--|--|
| 4 | Ахмеджанов Рафик Равильевич | Консультант раздела «Социальная ответственность» | Оказание методической помощи при работе над разделом «Социальная ответственность»                                |
| 5 | Игна Ольга Николаевна       | Консультант – лингвист                           | Оказание методической помощи при работе над переводом одной из глав магистерской диссертации на иностранный язык |

**3. Ограничения и допущения проекта.** Ограничения проекта – это все факторы, которые могут послужить ограничением степени свободы участников команды проекта, а также «границы проекта» - параметры проекта или его продукта, которые не будут реализованных в рамках данного проекта.

**Таблица 6.8 – Ограничения проекта**

| <b>Фактор</b>                                   | <b>Ограничения/ допущения</b> |
|---|-------------------------------|
| 1. Бюджет проекта                               | -                             |
| 1.1. Источник финансирования                    | -                             |
| 2. Сроки проекта:                               | 11.09.2017 – 4.06.2018        |
| 2.1. Дата утверждения плана управления проектом | 4.09.2017                     |
| 2.2. Дата завершения проекта                    | 4.06.2018                     |
| 3. Прочие ограничения и допущения*              | Не имеются                    |

Таким образом, мы определили в рамках инициации проекта изначальные цели и финансовые ресурсы, заинтересованные стороны проекта, действия которых направленные на достижение общего результата. Также провели анализ всех ограничительных факторов проекта.

### **6.3. Планирование управления научно-техническим проектом**

#### **6.3.1. Иерархическая структура работ проекта**

*Иерархическая структура работ* (ИСР) – детализация укрупненной структуры работ. Планирование научного проекта состоит из процессов определения цели работы, разработка последовательности действ и общего содержания работы требуемых для достижения определенных целей.

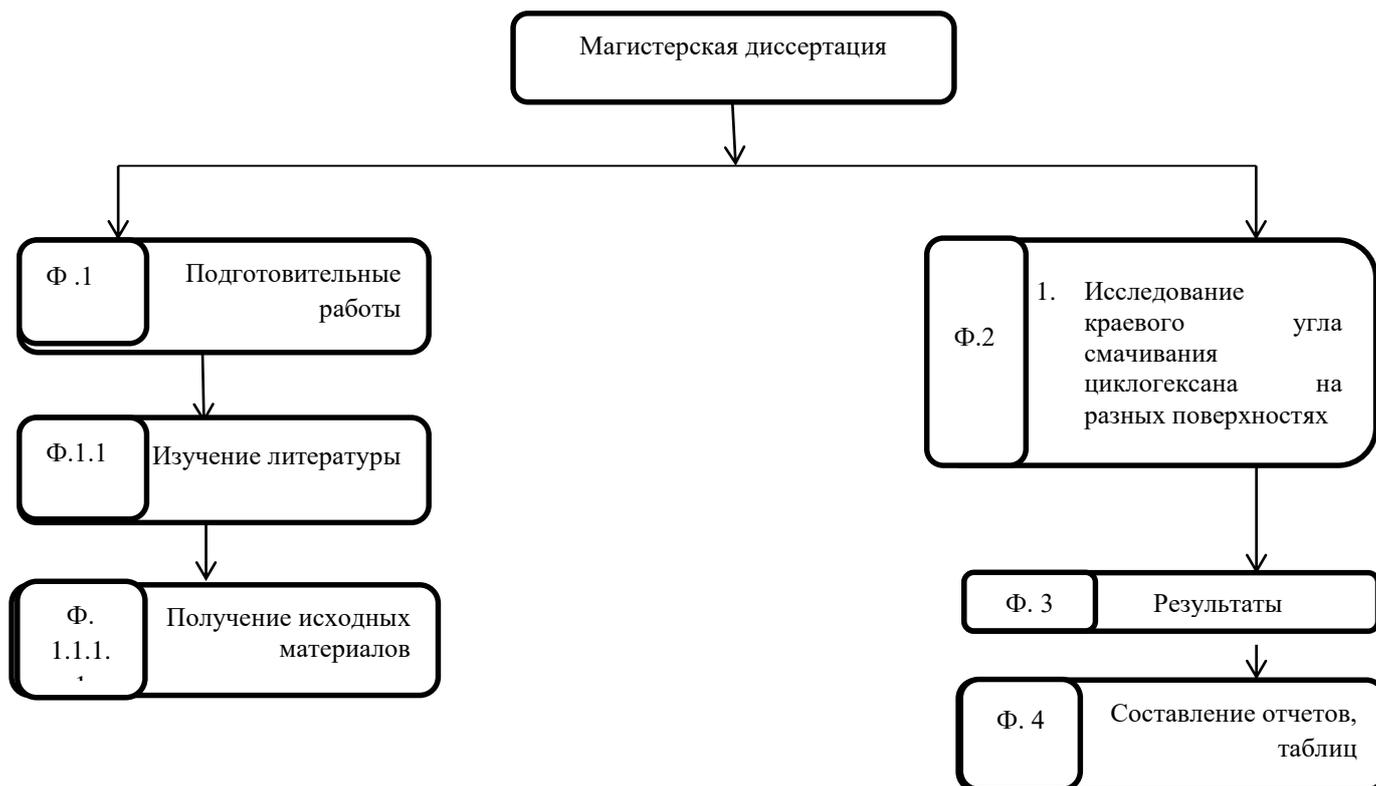


Рисунок 6.1 - Иерархическая структура работ по проекту

### 6.3.2. Контрольные события проекта

Таблица 6.9 – Контрольные события проекта

| № п/п | Контрольное событие  | Дата                  | Результат   |
|-------|--|-----------------------|---|
| 1     | Изучение литературных источников                                 | 20.10.2017-30.10.2017 | Составление литературного обзора  |
| 2     | Технологический, конструктивный, прочностной расчёт оборудования | 11.11.2017-19.03.2018 | Выполнение всех условий расчёта   |
| 3     | Создание чертежей  | 19.03.2018-30.05.2018 | Оформление чертежей   |
| 4     | Проведение исследований по краевому углу смачивания циклогексана | 24.05.2018-04.06.2018 | Написание методики выполненной работы и получение результатов опытной части |
| 5     | Работа над магистерской диссертацией                             | 01.05.2018-11.06.2018 | Написание магистерской диссертации  |

### 6.3.3. План проекта

Для планирования научного проекта необходимо построить календарный план проекта. Календарный план данного проекта отображен в таблице 6.10.

**Таблица 6.10 – Календарный план проекта**

| Код работы (из ИСР) | Название   | Длительность, дни | Дата начала работ | Дата окончания работ | Состав участников (ФИО ответственных исполнителей) |
|---------------------|--|-------------------|-------------------|----------------------|--|
| 1                   | Разработка технического задания на проектирование                | 5                 | 15.10.2017        | 20.10.17             | Семакина О.К.                                      |
| 2                   | Литературный обзор   | 10                | 20.10.17          | 30.10.17             | Курмель Г.В.                                       |
| 3                   | Технологический, конструктивный, прочностной расчёт оборудования | 128               | 11.11.2017        | 19.03.2018           | Курмель Г.В.                                       |
| 4                   | Создание чертежей  | 72                | 19.03.2018        | 30.05.2018           | Курмель Г.В.                                       |
| 5                   | Проведение исследований по краевому углу смачивания циклогексана | 3                 | 24.05.2018        | 27.05.2018           | Курмель Г.В.<br>Семакина О.К.                      |
| 6                   | Исследование свойств   | 5                 | 30.05.2018        | 04.06.2018           | Курмель Г.В.                                       |
| 7                   | Составление отчета   | 12                | 30.05.2018        | 11.06.2018           | Курмель Г.В.                                       |
|                     |  | 2                 | 09.06.2018        | 11.06.2018           | Семакина О.К.                                      |
| 8                   | Защита работы  | 1                 | 20.06.2018        | 20.06.2018           | Курмель Г.В.                                       |
| <b>Итого:</b>       |  | 238               |                   |                      |  |



### 6.3.4. Бюджет научного исследования

При планировании бюджета научного исследования должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов планируемых расходов, необходимых для его выполнения.

В этом разделе включены затраты необходимых для выполнения работы.

**Таблица 6.3.4.1. – Материальные затраты**

| Наименование                           | Единица измерения | Количество | Цена за ед., руб. | Затраты на материалы, (З <sub>м</sub> ), руб. |
|--|-------------------|------------|-------------------|---|
| Бумага                                 | пачка             | 1          | 250               | 250   |
| Картридж для принтера                  | шт                | 1          | 900               | 900   |
| Канцелярия (ручки, карандаши, линейка) | шт                | 5          | 50                | 250   |
| Итого                                  |                   |            |                   | 1400  |

В данную статью включаются все затраты, связанные с приобретением программного ПО. Определение стоимости оборудования производится по действующим прейскурантам. Стоимость оборудования, имеющегося у нас, учитываем в калькуляции в виде амортизационных отчислений.

**Таблица 6.3.4.2. - Расчет бюджета затрат на приобретение технического ПО для научных работ**

| №  | Наименование ПО | Кол-во единиц оборудования | Цена единицы ПО, руб. | Общая стоимость оборудования, руб. |
|----|-----------------|----------------------------|-----------------------|------------------------------------|
| 1. | Mathcad 17      | 1                          | 90000                 | 90000                              |
| 2. | Компас-3D       | 1                          | 100000                | 100000                             |
|    | Итого           |                            |                       | 190000                             |

Расчет амортизационных отчислений:

Затраты определяются в виде амортизации по формуле:

$$E_{\text{ам}} = \frac{\sum K_{\text{обі}} \cdot N_{\text{обі}} \cdot T_{\text{обі}}}{365 \cdot 100}$$

где  $K_{\text{обі}}$  – стоимость ед. прибора или оборудования, руб.;

$N_{\text{амі}}$  – норма амортизации прибора или оборудования, %;

$T_{\text{обі}}$  – время использования оборудования, дни.

**Таблица 6.3.4.3. – Расчет амортизационных отчислений**

| №     | Наименование оборудования | Цена единицы оборудования, Кобі, руб | Время использования, Тобі, дни | Норма амортизации, Намі, % | Сумма амортизационных отчислений, Еам, руб. |
|-------|---------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|----------------------------|---|
| 1     | Персональный компьютер    | 50000                                | 248                            | 10,4                       | 3550  |
| 2     | Принтер                   | 3000                                 | 5                              | 8,8                        | 4,3   |
| Итого |                           |                                      |                                |                            | 3554,3                                      |

**Основная заработная плата**

В данном заголовке включены основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, которые участвуют в выполнении работы по магистерской теме. Расходы по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы оплаты труда.

**Месячный должностной оклад работника**

$$Z_m = Z_b \cdot K_p$$

где  $Z_b$  – базовый оклад, руб.;

$K_p$  – районный коэффициент, равный 1,3.

Базовый оклад  $Z_b$  такого руководителя, как д.х.н. доцент, составляет 31000 руб. Рассчитываем месячный должностной оклад руководителя:

$$Z_m = 31000 \cdot 1,3 = 40300 \text{ руб.}$$

**Среднедневная ЗП руководителя:**

$$Z_{дн.} = 40300 \cdot 10,4 / 251 = 1669,8 \text{ руб.}$$

2) Базовая стипендия  $Z_b$  магистранта, составляет 1750 руб. Рассчитываем месячную стипендию магистранта:

$$Z_m = 1750 \cdot 1,3 = 2275 \text{ руб.}$$

**Среднедневная стипендия магистранта:**

$$Z_{дн.} = 2275 \cdot 10,4 / 188 = 125,9 \text{ руб.}$$

**Таблица 6.3.4.4. – Баланс рабочего времени**

| Показатели рабочего времени                       | Руководитель | Магистрант |
|---|--------------|------------|
| Число дней (календарное)                          | 365          | 365        |
| Число дней(нерабочих)                             |              |            |
| - выходные  | 52           | 52         |
| - праздничные дни                                 | 14           | 14         |
| Потери рабочего времени                           |              |            |
| - отпуск или невыходы по болезни                  | 48           | 48         |
| Действительный годовой фонд рабочего времени      | 251          | 251        |
| Действительное рабочее время реализуемого проекта | 10           | 233        |

**Таблица 6.3.4.5. – Расчет основной заработной платы**

| № п/п | Наименование этапов  | Исполнители по категориям | Трудо-емкость, чел.-дн. | Заработная плата, приходящаяся на один чел.-дн., тыс.руб. | Всего заработная плата по тарифу (окладам), тыс. руб. |
|-------|--|---------------------------|-------------------------|---|---|
| 1     | Разработка технического задания на проектирование                | Семакина О.К              | 5                       | 1,6698  | 8,349   |
| 2     | Литературный обзор   | Курмель Г.В.              | 10                      | 0,1259  | 1,259   |
| 3     | Технологический, конструктивный, прочностной расчёт оборудования | Курмель Г.В.              | 128                     | 0,1259  | 16,1152   |
| 4     | Создание чертежей  |                           | 72                      | 0,1259  | 9,0648  |
| 5     | Проведение исследований по краевому углу смачивания циклогексана | Курмель Г.В.              | 3                       | 0,1259  | 0,3777  |
|       |  | Семакина О.К              | 3                       | 1,6698  | 5,0094  |
| 6     | Исследование свойств   | Курмель Г.В.              | 5                       | 0,1259  | 8,349   |
| 7     | Составление отчета   | Курмель Г.В.              | 12                      | 0,1259  | 1,5108  |
|       |  | Семакина О.К              | 2                       | 1,6698  | 3,3396  |
| 8     | Защита работы  | Курмель Г.В.              | 1                       | 0,1259  | 0,1259  |
|       |  |                           |                         |   | Итого: 45,1514  |

**Таблица 6.3.4.6. – Расчёт основной заработной платы**

| Исполнители  | $Z_b$ , руб. | $k_{пр}$ | $k_d$ | $k_p$ | $Z_m$ , руб. | $F_d$ , раб.дн. | $Z_{дн}$ , руб. | $T_p$ , раб.дн. | $Z_{осн}$ , руб. |
|--------------|--------------|----------|-------|-------|--------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|
| Руководитель | 31000        | 0        | 0     | 1,3   | 40300        | 251             | 1669,8          | 10              | 16698            |
| Магистрант   | 1750         | 0        | 0     | 1,3   | 2275         | 251             | 125,9           | 233             | 29334,7          |

Дополнительная заработная плата рассчитывается исходя из 10-15% от основной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнении темы:

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}}$$

где  $Z_{\text{доп}}$  – дополнительная заработная плата, руб.;

$k_{\text{доп}}$  – коэффициент дополнительной зарплаты;

$Z_{\text{осн}}$  – основная заработная плата, руб.

Таблица 6.3.4.6. – Дополнительная заработная плата

| <b>Зарботная плата</b>  | <b>Руководитель</b> | <b>Магистрант</b> |
|-------------------------|---------------------|-------------------|
| Основная зарплата       | 16698               | 29334,7           |
| Дополнительная зарплата | 2003,76             |                   |
| Итого                   | 18701,76            | 29334,7           |

### 6.3.5. Накладные расходы

В эту статью включаются затраты на управление и хозяйственное обслуживание, которые могут быть отнесены непосредственно на конкретную тему.

А) Расход электроэнергии для персонального компьютера равен 0,16 кВт/ч

Длительность использования: 10 месяцев (компьютер работал в среднем 22 дня в месяц по 6 часов).

$$E = 10\text{мес} \cdot 22 \text{ дня} \cdot 6 \text{ часов} \cdot 0,16 = 211,84 \text{ кВт.}$$

Д) Освещение (4 лампы по 100 Вт)

10 месяцев \* 22 дня \* 8 часов

$$E = (10 \cdot 22 \cdot 8) \cdot 0,4 = 704 \text{ кВт.}$$

Общая сумма затрат на электроэнергию составляет, согласно действующему тарифу (5,10 руб. за 1 кВт/ч):

$$C_{\text{эл}} = (211,84 + 704) \cdot 5,10 = 4670,8 \text{ руб.}$$

В) Затраты на водоснабжение

Тариф на водоснабжение – 34,14 р на м<sup>3</sup>. Примерный расход воды за время исследований составляет – 2 м<sup>3</sup>.

Затраты на водоснабжение за весь период исследования составляет – 70 руб.

Вода использовалась для мытья химической посуды.

Итого расходы:

$$C_1 = C_{\text{в}} + C_{\text{эл}} = 70 + 4670,8 = 4740,8 \text{ руб.}$$

*Отчисления на социальные нужды*

Статья включает в себя отчисления во внебюджетные фонды.

$$C_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}})$$

где,  $k_{внеб}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

Отчисления на социальные нужды составляет 27,1%.

$$C_{внеб} = 0,271 \times (45151,4 + 2003,76) = 12779,05 \text{ руб.}$$

**Таблица 6.3.5. – Бюджет научного исследования**

| Наименование статьи   | Сумма, руб. | Структура затрат,<br>% |
|---|-------------|------------------------|
| 1. Материальные затраты НТИ                                     | 1400        | 0,6                    |
| 2. Затраты на приобретение технического ПО для научных работ    | 190000      | 74,2                   |
| 3. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы       | 45151,4     | 17,6                   |
| 4. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы | 2003,76     | 0,8                    |
| 5. Накладные расходы  | 17519,85    | 6,8                    |
| Итого:  | 256075,01   | 100                    |

Таким образом, сделав указанные расчеты, можно сделать следующий вывод, что данный исследовательский проект эффективен. Экономические затраты по расчетам считаются приемлемыми. Срок реализации данного проекта полностью совпадают.

### 6.3.6. Реестр рисков проекта

На пути реализации проекта могут возникнуть разного рода риски, представляющие опасность того, что поставленные цели проекта могут быть не достигнуты полностью или частично. Полностью избежать риска практически невозможно, но снизить их угрозу можно, уменьшая действие неблагоприятных факторов. Возможные риски представлены в таблице 6.3.6.

**Таблица 6.3.6. – Возможные риски проекта**

| № | Риск   | Вероятность наступления (1-5) | Влияние риска (1-5) | Уровень риска | Способы смягчения риска                       |
|---|--|-------------------------------|---------------------|---------------|---|
| 1 | Низкий выход целевого продукта                     | 4                             | 5                   | высокий       | Точное следование технологического регламента |
| 2 | Образование большого количества побочных продуктов | 3                             | 5                   | высокий       | Точное следование технологического регламента |

### 6.3.7 Определение ресурсной 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 показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более) вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}}$$

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).

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).

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i$$

где  $I_{pi}$  – интегральный показатель ресурсоэффективности для  $i$ -го варианта исполнения разработки;

$a_i$  – весовой коэффициент  $i$ -го варианта исполнения разработки;

$b_i^a, b_i^p$  – бальная оценка  $i$ -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

$n$  – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности приведен в форме таблицы (табл. 6.3.7.1).

**Таблица 6.3.7.1. - Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта**

| Критерии / Объект исследования    | Весовой коэффициент параметра | Исп. | Аналог 1 |
|-----------------------------------|-------------------------------|------|----------|
| 1. Качество выпускаемой продукции | 0,25                          | 5    | 4        |
| 2. Удобство в эксплуатации        | 0,25                          | 5    | 5        |
| 3. Производственная мощность      | 0,30                          | 4    | 4        |
| 4. Увеличение рабочих мест        | 0.20                          | 4    | 4        |
| ИТОГО                             | 1                             | 4,5  | 4,25     |

Таким образом, сравнение значений характеристик исполнения значений показало, что все варианты исполнения являются равнозначными с точки зрения финансовой и ресурсной эффективности.

## Заключение

В квалификационной работе был проведён расчёт насадочной колонны и произведен расчет насадочной ректификационной колонны и сварного пластинчатого теплообменника

Произведены основные расчеты двух аппаратов, такие как:

- Технологический расчёт;
- Определены толщины стенки цилиндрической обечайки и эллиптических крышек;
- Расчет фланцевого соединения;
- Расчет укрепления отверстий в цилиндрической обечайке и эллиптических днищах;
- Расчёт опорной обечайки и подбор опорных лап

В исследовательском разделе определены краевые углы смачивания поверхностей различной природы аполярными и полярными жидкостями. Предложена рулонированная насадка для ректификационной колонны из стальных перфорированных листов.

В разделе «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» был произведен расчет затрат на проведение исследований.

В разделе «Социальная ответственность», рассмотрена безопасность и экологичность нахождения сотрудников в цехе производства (co)мономера, а также разработаны мероприятия по предотвращению воздействия на здоровье опасных и вредных факторов для работников цеха и созданы безопасные условия труда для обслуживающего персонала.

## СПИСОК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

Курмель Герман Валериевич

| № | Наименование научного труда                  | Рукописн. или печ. | Издательство, журнал (номер, год)   | Номер стр. | Кол-во стр. | Фамилии соавторов                 |
|---|--|--------------------|---|------------|-------------|-----------------------------------|
| 1 | Модифицирование порошкообразных наполнителей | Печ.               | Труды XXI Международного научного симпозиума студентов и молодых ученых «Проблемы геологии и освоения недр». – Томск: Изд-во ТПУ, 2017. – Т. II | 394–396    |             | Колесников А.Е.,<br>Семакина О.К. |

## Список использованных источников

1. Временный технологический регламент Опытной установки «Гексен-1»
2. Дытнерский Ю. И. Процессы и аппараты химической технологии: Пособие по проектированию/ Ю. И. Дытнерский, Г. С. Борисов, В. П. Брыков. – М.: Химия, 1991. – 496 с.: ил.
3. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологию. – Л.: Химия, 1987. – 576 с.
4. ГОСТ 12815-80. Фланцы арматуры, соединительных частей и трубопроводов на Ру от 0,1 до 20,0 МПа (от 1 да 200 кгс/см<sup>2</sup>). Типы. Присоединительные размеры и размеры уплотнительных поверхностей.
5. ГОСТ 19281-2014. Прокат повышенной прочности. Общие технические условия
6. ГОСТ Р 52857.1-2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Общие требования. — Изд. официальное. — М.: Издательство стандартов, 2007.
7. ГОСТ Р 52857.2-2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет цилиндрических и конических обечаек, выпуклых и плоских днищ и крышек. — Изд. официальное. — М.: Издательство стандартов, 2007.
8. В.М.Беляев, В.М.Миронов В. В. Тихонов. Конструирование и расчёт элементов оборудования отрасли. Часть I. Аппараты с механическими перемешивающими. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 95 с.
9. ГОСТ 6533 – 78. Днища эллиптические отбортованные стальные для сосудов аппаратов и котлов. Основные размеры.
10. ГОСТ Р 52857.3 – 2007. Укрепление отверстий.
11. ГОСТ Р 52857.4 – 2007. Расчет фланцевых соединений.
12. О. К. Семакина. Машины и аппараты химических производств. Учеб. пособие /Том. политехн. ун-т. – Томск, 2003. – 118 с.
13. Лацинский А.А., Толчинский А.Р. Основы конструирования и расчёта химической аппаратуры: Справочник. Под ред. Н.Н. Логинова - Л.: Машиностроение, 1970. 752 с.
14. РД 10-249-98. Нормы расчета на прочность стационарных котлов и трубопроводов пара и горячей воды (с Изменением N 1)
15. ГОСТ Р 52857.7 – 2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Теплообменные аппараты
16. Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. Расчет на прочность деталей машин. Справочник. М, Машиностроение, 2001
17. Сумм Б.Д., Горюнов Ю.В. Физико-химические основы смачивания и растекания. – М.: Химия, 1976. – 232 с.

18. ГОСТ 12.0.003-74 Опасные и вредные производственные факторы. Классификация [Текст]. – Сб. Гостов. - М.: ИПК Издательство стандартов, 2002.- 4с.
19. ГОСТ 12.2.003–91 ССБТ. Оборудование производственное. Общие требования безопасности. [Текст]. – официальное издание М.: Стандартиформ, 1993- 15с.
20. ГОСТ 12.1.003-2014. Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. ШУМ. Общие требования безопасности.
21. СП 52.13330.2011 .Свод правил. Естественное и искусственное освещение.
22. ГОСТ 30494-2011.Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях. [Текст]. – Сб. Гостов. - М.: ИПК Издательство стандартов, 2013.- 14с.
23. ГОСТ 12.2.007.0-75 «Система стандартов безопасности труда. Изделия электротехнические» [Текст]. – официальное издание М.: Стандартиформ, 1978- 15с.
24. Инструкция по охране труда по электробезопасности.
25. СНИП 41-03-2003. Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов.
26. Санпин 2.6.1.07-03. Гигиенические требования к проектированию предприятий и установок атомной промышленности.
27. Макаров Г.В. Охрана труда в химической промышленности.- М.:Химия,1989-496с.
28. ГОСТ 12.1.005-88 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Determination of the contact angles of wetting surfaces of different nature

Студент

| Группа | ФИО                       | Подпись | Дата |
|--------|---------------------------|---------|------|
| 4КМ61  | Курмель Герман Валериевич |         |      |

Руководитель ВКР

| Должность | ФИО                                 | Ученая степень,<br>звание | Подпись | Дата |
|-----------|-------------------------------------|---------------------------|---------|------|
| Доцент    | Семакина<br>Константиновна<br>Ольга | к.т.н                     |         |      |

Консультант-лингвист Отделения иностранных языков ШБИП

| Должность | ФИО                   | Ученая степень,<br>звание | Подпись | Дата |
|-----------|-----------------------|---------------------------|---------|------|
| Доцент    | Игна Ольга Николаевна | к.п.н.                    |         |      |

## **4. Determination of the contact angles of wetting surfaces of different nature**

### **4.1 Literature review**

The packed columns are one of the most common types of mass exchange machines. A nozzle is a layer of contact elements of a certain shape that ensures the presence of channels in the nozzle layer along which the phases participating in the mass transfer move. One of the phases spreads over the surface of the contact elements during the movement along the nozzle, due to this the area of the interphase surface increases. In the packed column, the liquid flows through the packing element mainly in the form of a thin film, so the contact surface of the phases is basically the wetted surface of the packing. Selection of attachments. In order for the nozzle to work effectively, it must satisfy the following basic requirements:

- 1) to have a large surface in a unit of volume;
- 2) it is well wetted with a water spray;
- 3) provide low hydraulic resistance to the gas flow;
- 4) distribute the irrigating fluid evenly;
- 5) be resistant to the chemical effects of liquid and gas moving in the column;
- 6) have a low specific gravity;
- 7) have high mechanical strength;
- 8) have a low cost.

No nozzles completely satisfying all these requirements exist, since, for example, an increase in the specific surface area of the nozzle entails an increase in the hydraulic resistance of the apparatus and a decrease in the limiting loads. In industry, various nozzles are used in various shapes and sizes (Figures 4.1, 4.2), which to some extent satisfy the requirements that are fundamental for the particular rectification process.

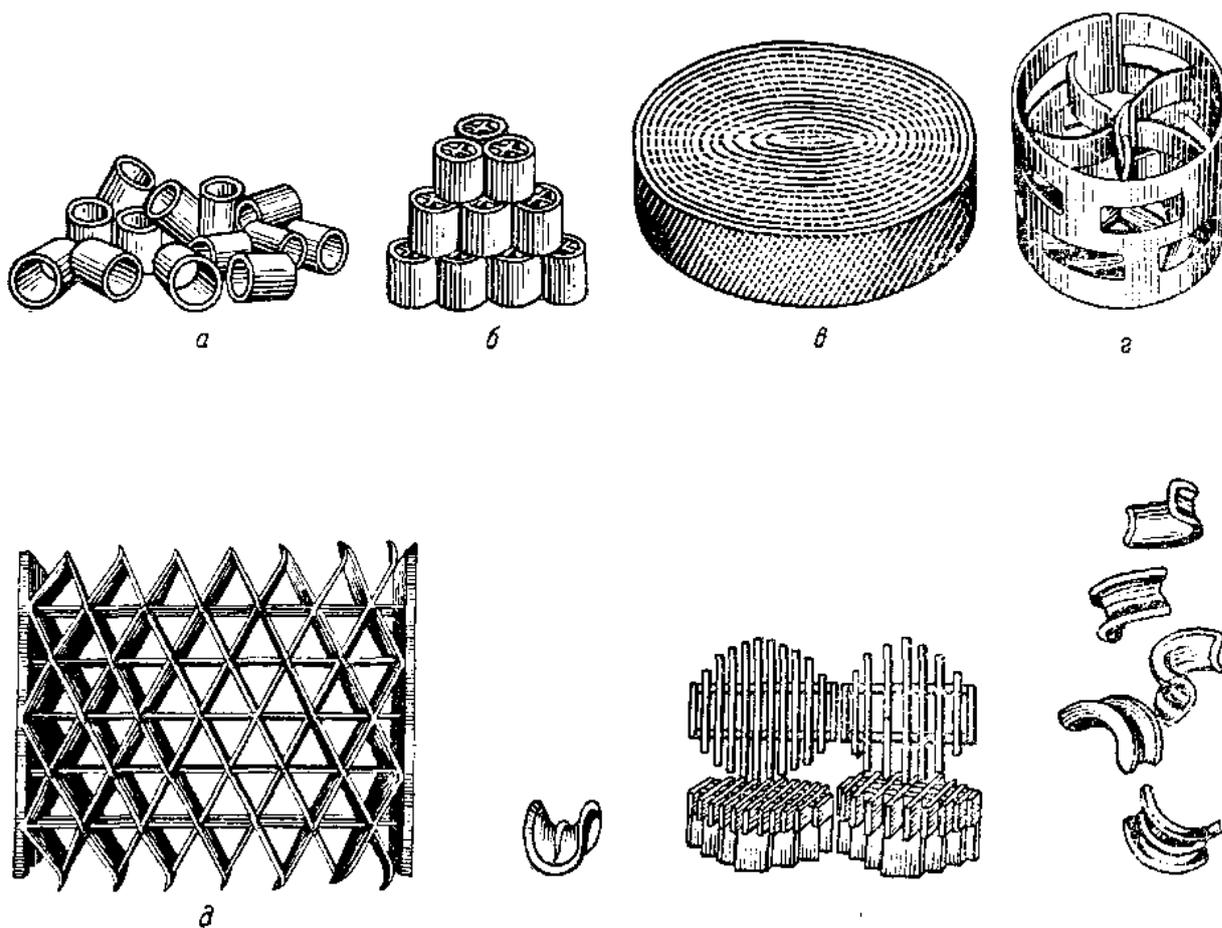


Figure 4.1. Types of nozzles: a - rings Rashig, randomly laid (in bulk); b - rings with partitions, properly laid; c - a nozzle Goodloo; d - rings of Pall; e - nozzle "Spraypack"; f - is Berl's saddle; g - chord nozzle; h - saddles "Intalox"

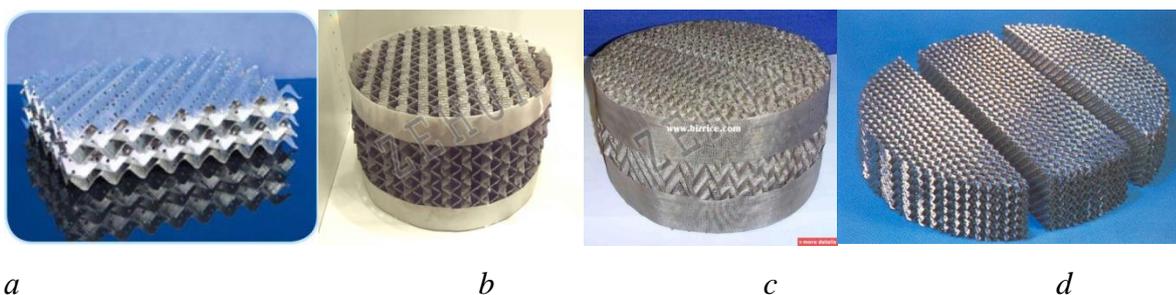


Figure 4.2. Nozzles made of steel nets and plates: a - corrugated nozzle; b - attachment of Sulzer; c - spiral-prismatic nozzle Mellapak; d - mesh attachment BX

The nozzles are made of a variety of materials (ceramics, porcelain, steel, plastics, etc.), the choice of which is dictated by the specific surface area of the nozzle, wettability and corrosion resistance. The main advantages of packed columns are the simplicity of the device and low hydraulic resistance. Disadvantages: difficulty in removing heat and poor

wettability of the nozzle at low irrigation densities. Wetting represents a physicochemical phenomenon of a spontaneous increase in the contact area of a liquid with the surface of a solid under the action of surface (capillary) forces.

**Wetting** is a set of phenomena at the interface of contact of three phases, one of which is usually a solid body and the other two are immiscible liquids or liquid and gas. Wettability of solids depends on various factors, primarily on their nature and geometric properties of the surface - roughness, shape and size of body particles. As the particle size decreases, their wettability deteriorates. The roughness reduces the contact angle of wetting of hydrophilic bodies, i.e. improves their wettability with water, and, conversely, increases the wetting angle of hydrophobic surfaces. The most important feature of wetting is that it is determined not so much by the individual properties of the liquid and solid, but by their interaction. This interaction is quantitatively characterized by the value of the contact angle of wetting (Figure 4.2), forming the so-called wetting perimeter on a solid surface along a linear solid-liquid-gas interface (air, liquid).

**The contact angle** is also the angle between the tangent drawn to the surface of the liquid-gas phase and a solid surface with a vertex located at the point of contact of the three phases and conditionally measured always inside the liquid phase [1]. The contact angle of wetting is denoted by  $\theta_c$ ;  $\gamma_{SL}$ ,  $\gamma_{LG}$ ,  $\gamma_{SG}$  are the specific free surface energies at the interface: solid-liquid (SL), liquid-gas (LG), and solid body-gas (SG).

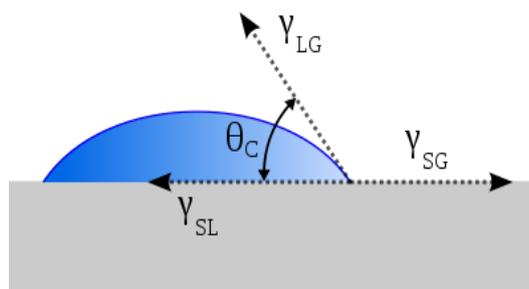


Fig.4.2. The contact angle of wetting

There are several methods for measuring the contact angle of wetting. One of the most common methods is the sedentary drop method. The essence of the method lies in the fact that a drop of liquid is applied to a flat horizontal solid surface, projected onto a screen, and

a contact angle is determined along the profile of the drop (Figure 4.3). Since the drop spreads unevenly over the surface of the substrate, it is recommended to make several measurements, turning the substrate with a drop. The values obtained are averaged.

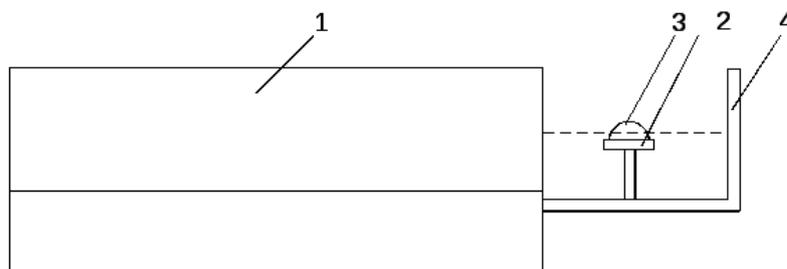


Fig. 4.3. Installation for measuring the contact angle of wetting: 1 - light source; 2 - a table; 3 - a drop of liquid on the substrate; 4 - the screen.

By measuring the angle, the hydrophilicity and hydrophobicity of the surfaces with respect to various liquids are evaluated. There are three cases of interaction of liquids with the surface of solids: - non-wetting, when  $90^\circ < \theta_c < 180^\circ$ ; - limited wetting when  $0^\circ < \theta_c < 90^\circ$ ; - complete wetting, when the droplet spreads into a thin film. In the first case, the surface with respect to the given liquid is hydrophobic, and in the second - hydrophilic.

## 4.2. Experimental part

The purpose of scientific research in the master's thesis is to give recommendations on the choice of the type of nozzle for the distillation column for the separation of a hexane-1-cyclohexane binary mixture based on the wettability of the surface of packing bodies made of various materials. The wettability of the nozzle was determined by liquids of different polarity. Distilled water was used as the hydrophilic liquid, and cyclohexane and heptane as the hydrophobic medium. The object of the study are plates made of fluoroplastic, polypropylene, steel, rubber, ceramics, ceramic composite material (CMC) and graphite. The results of the experiment are given in Table. 4.1-4.3.

Table 4.1 - Edge angle of surface wetting with cyclohexane

| Surface       | The contact angle of wetting, deg |        |        |        |        |        |               |
|---------------|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------|
|               | Exp. 1                            | Exp. 2 | Exp. 3 | Exp. 4 | Exp. 5 | Exp. 6 | Average value |
| polypropylene | 6                                 | 12     | 7      | 11     | 9      | 11     | 9             |
| fluoroplastic | 6                                 | 21     | 6      | 17     | 5      | 16     | 12            |
| steel         | 5                                 | 14     | 9      | 12     | 4      | 11     | 9             |
| rubber        | 3                                 | 7      | 4      | 6      | 4      | 9      | 6             |
| ceramics      | 24                                | 20     | 18     | 21     | 15     | 19     | 20            |
| CMC           | 4                                 | 18     | 8      | 11     | 7      | 15     | 11            |
| graphite      | 7                                 | 6      | 9      | 8      | 8      | 7      | 7             |

Table 4.2 - The contact angle of wetting of surfaces with heptane

| Surface       | The contact angle of wetting, deg |        |        |        |        |        |               |
|---------------|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------|
|               | Exp. 1                            | Exp. 2 | Exp. 3 | Exp. 4 | Exp. 5 | Exp. 6 | Average value |
| polypropylene | 14                                | 11     | 9      | 13     | 6      | 10     | 11            |
| fluoroplastic | 6                                 | 6      | 7      | 10     | 6      | 10     | 7             |
| steel         | 8                                 | 5      | 13     | 6      | 10     | 8      | 8             |
| rubber        | 14                                | 6      | 10     | 9      | 12     | 6      | 10            |
| ceramics      | 19                                | 16     | 18     | 17     | 20     | 16     | 18            |
| CMC           | 6                                 | 3      | 7      | 6      | 9      | 6      | 6             |
| graphite      | 9                                 | 7      | 7      | 7      | 9      | 5      | 7             |

Table 4.3 - Edge angle of wetting of surfaces with water

| Surface       | The contact angle of wetting, deg |        |        |        |        |        |               |
|---------------|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------|
|               | Exp. 1                            | Exp. 2 | Exp. 3 | Exp. 4 | Exp. 5 | Exp. 6 | Average value |
| polypropylene | 24                                | 23     | 21     | 21     | 22     | 20     | 22            |
| fluoroplastic | 39                                | 37     | 35     | 32     | 36     | 30     | 35            |
| steel         | 27                                | 34     | 27     | 32     | 29     | 31     | 30            |
| rubber        | 34                                | 33     | 32     | 33     | 36     | 32     | 33            |
| ceramics      | 55                                | 65     | 55     | 63     | 54     | 63     | 59            |
| CMC           | 34                                | 31     | 30     | 31     | 32     | 29     | 31            |
| graphite      | 48                                | 43     | 46     | 40     | 47     | 45     | 45            |

The average values obtained for the contact angles of liquids of different polarities are summarized in Table. 4.4.

Table 4.4 - The contact angle of wetting

| Surface       | The contact angle of wetting, deg |             |         |
|---------------|-----------------------------------|-------------|---------|
|               | water                             | cyclohexane | heptane |
| polypropylene | 22                                | 9           | 11      |
| fluoroplastic | 35                                | 12          | 7       |
| steel         | 30                                | 9           | 8       |
| rubber        | 33                                | 6           | 10      |
| ceramics      | 59                                | 20          | 18      |
| CMC           | 31                                | 11          | 6       |
| graphite      | 45                                | 7           | 7       |

The analysis given in tab. 4.4 of the data showed that graphite is the best wettable by the apolar medium, and the angle of wetting with heptane and cyclohexane is  $7^\circ$ . However, a nozzle made of graphite has a small specific surface, a small pore volume and increased brittleness.

The greatest contact angle of wetting with apolar media is observed on the surface of ceramics, which is the main material in the manufacture of Raschig rings.

The angle of wetting of the polymer and steel surfaces with cyclohexane is in the range of  $9-12^\circ$ , which is somewhat higher than the graphite surface.

However, ceramic and polymer rings also have a disadvantage: a small specific surface and a small pore volume. A rolled nozzle, made of steel mesh or steel perforated sheets, has a very high specific surface area, reaching  $64-750 \text{ m}^2 / \text{m}^3$ .

Thus, it is recommended to use steel mesh rolls as a packing in the distillation column to separate the hexane-1-cyclohexane binary mixture.

## **Conclusions**

1. The contact angle of wetting surfaces of different nature with apolar and polar media has been studied.

2. A recommendation was made on the choice of the packing material for the separation of a hexane-1-cyclohexane binary mixture.