

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

Институт _____ ИФВТ _____
Направление подготовки __ Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической
технологии, нефтехимии и биотехнологии _____
Кафедра _____ ОХХТ _____

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы				
Разработка основного технологического оборудования производства формалина с использованием Wolfram Mathematica				

УДК _661.727.023_

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4KM51	Кукарин Алексей Сергеевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Беляев Василий Михайлович	к.т.н., доцент		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Криницына Зоя Васильевна	к.э.н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Раденков Тимофей Александрович			

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Общей химии и химической технологии	Ан Владимир Вилорьевич	к.т.н., доцент		

Планируемые результаты освоения образовательной программы

Код результата	Результат освоения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС ВПО, критериев и/или заинтересованных сторон
<i>Профессиональные компетенции</i>		
P1	Применять глубокие, математические, естественнонаучные, социально-экономические и профессиональные знания в области энерго-и ресурсосберегающих процессов химической технологии, нефтехимии и биотехнологии в профессиональной деятельности	Требования ФГОС (ПК-1,3,14,17,18,26,27 ОК-1,3), Критерий 5 АИОР (п.1.1)
P2	Ставить и решать инновационные задачи производственного анализа, связанные с созданием и переработкой материалов с использованием моделирования объектов и процессов химической технологии, нефтехимии и биотехнологии с учетом минимизации антропогенного воздействия на окружающую среду.	Требования ФГОС (ПК-6,12,13 ОК-2), Критерий 5 АИОР (пп.1.2)
P3	Разрабатывать новые технологические процессы на основе математического моделирования, проектировать и использовать энерго-и ресурсосберегающее оборудование химической технологии, нефтехимии и биотехнологии	Требования ФГОС (ПК-8,11,19-25 ОК-4), Критерий 5 АИОР (п.1.3)
P4	Проводить теоретические и экспериментальные исследования в области разработки и оптимизации технологических процессов и систем с позиций энерго и ресурсосбережения	Требования ФГОС (4,5,7,8,9 ОК-4), Критерий 5 АИОР (п.1.4)

P5	Внедрять и эксплуатировать современное высокотехнологичное оборудование, обеспечивать его высокую эффективность, соблюдать правила охраны здоровья и безопасности труда на производстве, выполнять требования по защите окружающей среды.	Требования ФГОС (ПК-2,9,10,15,16, ОК-4,5), Критерий 5 АИОР (п.1.5)
P6	Демонстрировать глубокие знания социальных, этических и культурных аспектов инновационной профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-1,2,3), Критерий 5 АИОР (пп.2.4,2.5)
P7	Самостоятельно учиться и непрерывно повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-2,4), Критерий 5 АИОР (2.6)
P8	Активно владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в иноязычной среде, разрабатывать документацию, презентовать результаты профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-3), Критерий 5 АИОР (п.2.2)
P9	Эффективно работать индивидуально и в коллективе, демонстрировать ответственность за результаты работы и готовность следовать корпоративной культуре организации.	Требования ФГОС (ПК-26,27, ОК-4,5), Критерий 5 АИОР (пп.1.6, 2.3)

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

Институт _____ ИФВТ _____
Направление подготовки (специальность) __ Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии _____
Кафедра __ ОХХТ _____

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. Кафедрой

(Подпись) _____ (Дата) _____ АН В.В. _____
(Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

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

Студенту:

Группа	ФИО
4KM51	Кукарину Алексею Сергеевичу

Тема работы:

Разработка основного технологического оборудования производства формалина с использованием Wolfram Mathematica	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№10497/с дата 08.12.16

Срок сдачи студентом выполненной работы:	14.06.2017
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i>	Ректификационная установка непрерывного действия производства формалина. Разделяемая бинарная смесь – метанол – формальдегид. Производительность по питанию 700 т/сутки. Рабочее давление в колонне 0.04 МПа.
--	---

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i>	Цель – провести модернизацию ректификационной установки Реферат Введение 1.1 Литературный обзор 1.2 Интенсификация работы ректификационной колонны 1.3 Описание технологической схемы процесса 2. Технологический расчет 2.1. Исходные данные 2.2. Мат. баланс колонны и опр-ие рабочего флегмового числа 2.3. Расчет скорости пара и диаметра колонны 2.4. Гидравлический расчет насадки 2.5. Определение общей высоты насадки 2.6. Определение толщины тепловой изоляции 3. Конструктивно-механический расчет установки 3.1. Расчет толщины стенки цилиндрической обечайки 3.2. Расчет толщины стенки днища и крышки 4. Технологический расчет испарителя 4.1 Тепловой расчёт 4.2 Предварительный выбор теплообменника-испарителя 4.3 Поверочный расчет выбранного аппарата 5. Конструктивно-механический расчет испарителя 5.1 Расчёт обечайки 5.2 Подбор крышки и днища 5.3 Расчет развальцовочного соединения 5.4 Расчет толщины трубной решетки 6. Гидравлический расчет испарителя 7. Расчет толщины изоляции 8. Разработки в области защиты колонных аппаратов от превышения давления 9. Социальная ответственность 10. Финансовый менеджмент, ресурсоэф-сть и ресурсосбережение Заключение Список литературы
Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	Лист 1. Технологическая схема. (A1) Лист 2. Ректификационная колонна. Чертеж общего вида. (A0) Лист 3-4. Ректификационная колонна. Сборочные единицы. (A1) Лист 5. Испаритель. Чертеж общего вида. (A0) Лист 6. Техничко-экономические показатели. (A1)
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i>	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	к.т.н., доцент Криницына З.В.
Социальная ответственность	Ассистент кафедры ЭБЖ Раденков Т.А.
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Введение, Сопряжение оболочек, Интенсификация работы ректификационной колонны путём замены тарелок на регулярную насадку	

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

Задание выдал руководитель:

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

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4KM51	Кукарин Алексей Сергеевич		

Содержание

Введение.....	5-6
1.1 Литературный обзор.....	7-12
1.2 Интенсификация работы ректификационной колонны.....	12-18
1.3 Описание технологической схемы процесса.....	19-20
2. Технологический расчет.....	21
2.1. Исходные данные.....	21
2.2. Мат. баланс колонны и опре-ие рабочего флегмового числа....	21-30
2.3. Расчет скорости пара и диаметра колонны.....	30-31
2.4. Гидравлический расчет насадки.....	32-33
2.5. Определение общей высоты насадки.....	34-39
2.6. Определение толщины тепловой изоляции.....	39-40
3. Конструктивно-механический расчет установки.....	41
3.1. Расчет толщины стенки цилиндрической обечайки.....	41-44
3.2. Расчет толщины стенки днища и крышки.....	44-46
3.3. Расчёт диаметров штуцеров.....	46-48
3.4. Расчёт узла сопряжения оболочек.....	48-52
3.5 Расчёт цилиндрической опоры.....	52-53
3.6. Расчёт укрепления отверстий.....	53-58
3.7. Расчёт фланцевого соединения.....	59-69
3.8. Определение расчетных усилий для аппарата от ветровых нагрузок и сейсмических воздействий.....	69-86
3.9. Расчет аппарата на прочность и устойчивость.....	87-106
4. Технологический расчет испарителя.....	107
4.1 Тепловой расчёт.....	107-109
4.2 Предварительный выбор теплообменника-испарителя	110-111
4.3 Поверочный расчет выбранного аппарата.....	111-118
5. Конструктивно-механический расчет испарителя	119
5.1 Расчёт обечайки.....	119-123

5.2 Подбор крышки и днища	123-125
5.3 Расчет развальцовочного соединения	125-127
5.4 Расчет толщины трубной решетки	127-128
5.5 Расчет и подбор штуцеров и фланцев	128-131
5.6 Расчет опорных лап	131-132
6. Гидравлический расчет испарителя	133
6.1 Расчет потерь давления в трубном пространстве т/о.....	133-134
6.2 Расчет потерь давления в трубопроводе.....	134-136
7. Расчет толщины изоляции	136-137
8. Разработки в области защиты колонных аппаратов от превышения давления.....	137-140
9. Социальная ответственность	141
9.1 Техногенная безопасность	141-143
9.2 Анализ опасных производственных факторов и обоснование мероприятий по их устранению	144-152
9.3 Региональная безопасность	152-158
10. Финансовый менеджмент, ресурсоэф-сть и ресурсосбережение...	158-160
10.1 Анализ конкурентных технических решений	160-164
10.2 Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования.....	165-173
10.3 Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.....	173-174
Приложение А.....	175-176
Заключение.....	177
Публикации научных разработок.....	178
Список используемой литературы.....	179-181
Приложение Б.....	181-193

Реферат

Выпускная квалификационная работа содержит 193 стр., 37 рисунков, 27 таблиц, 31 источник, 2 приложения.

Ключевые слова: метанол, формальдегид, формалин, ректификация, ректификационная колонна, испаритель, диаметр, высота, толщина стенки, фланец, насадка, прочность, устойчивость

Объектом исследования является ректификационная установка непрерывного действия производства формалина.

Цель работы – произвести модернизацию установки формалина с использованием программы Wolfram Mathematica, рассмотреть вопросы социальной ответственности и произвести экономическую оценку данного проекта.

В процессе исследования проводились модернизация установки формалина с использованием программы Wolfram Mathematica, была произведена оценка опасных факторов производства, а также оценена экономическая эффективность работы

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: диаметр колонны $D=2800$ мм, высота колонны $H=52000$ мм, толщина стенки обечайки крышки и днища $s=10$ мм, толщина цилиндрической опоры $s_{оп}=14$ мм, насадка регулярная Sulzer Mellapak 170.

Введение

Ректификация – процесс разделения гомогенных смесей летучих жидкостей путём двустороннего массообмена и теплообмена между неравновесными жидкой и паровой фазами, имеющими различную температуру и движущимися противоположно друг другу.

Разделение осуществляется обычно в колонных аппаратах при многократном или непрерывном контакте фаз (рисунок 1). При каждом контакте из жидкости испаряется преимущественно низкокипящий компонент, которым обогащаются пары, а из паровой конденсируется преимущественно высокипящий компонент, переходящий в жидкость. В результате обмена компонентами между фазами в конечном счете пары представляют собой почти чистый низкокипящий компонент. Эти пары, выходящие из верхней части колонны, после их конденсации в отдельном аппарате дают дистиллят (верхний продукт) и флегму - жидкость, возвращающую для орошения колонны и взаимодействия с поднимающимися в колонне парами. Снизу удаляется жидкость, представляющая собой почти чистый высококипящий компонент - кубовый остаток (нижний продукт). Часть остатка испаряют в нижней части колонны для получения восходящего потока пара. [1]

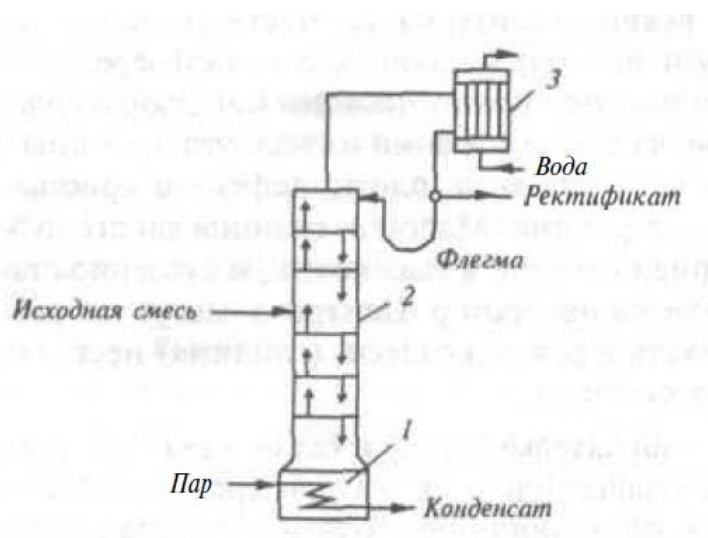


Рисунок 1. Схема процесса ректификации

Ректификация является одной из важнейших операций в современной химической и нефтехимической промышленности. И сегодня ректификация всё

сильнее расширяет свои возможности и появляется множество новых технологических и конструктивных решений. А модернизация и разработка нового оборудования с применением методов энерго- и ресурсосбережения является всё более актуальной задачей. И в частности исследования в области массообменных устройств ректификационных колонн, а точнее разных типов насадок, предоставляют всё больший интерес среди ученых и инженеров. И применение новых разновидностей этих насадочных устройств позволяет повысить эффективность процесса ректификации, производительность, и снизить эксплуатационные расходы.

Целью данной магистерской диссертации является модернизация ректификационной установки непрерывного действия производства формалина путём замены массообменного устройства одного типа на другой с использованием программы Wolfram Mathematica, с рассмотрением вопросов социальной ответственности и экономической оценки данной работы.

1.1 Литературный обзор

Достаточно высокая степень разделения однородных жидких смесей на компоненты может быть достигнута путем ректификации. Сущность процессов, из которых складывается ректификация, и получаемые при этом результаты можно проследить с помощью $t - x - y$ – диаграммы.

Нагрев исходную смесь состава x_1 до температуры кипения получим находящийся в равновесии с жидкостью пар (точка b). Отбор и конденсация этого пара дают жидкость состава x_2 обогащенную низкокипящим компонентом (в дальнейшем НК) ($x_2 > x_1$). Нагрев эту жидкость до температуры кипения t_2 , получим пар (точка d), конденсация которого дает жидкость с еще большим содержанием НК, имеющую состав x_3 , и т. д. Проводя таким образом последовательно ряд процессов испарения жидкости и конденсации паров, можно получить в итоге жидкость (дистиллят), представляющую собой практически чистый НК [1].

Аналогично, исходя из паровой фазы, соответствующей составу жидкости x_4 , путем проведения ряда последовательных процессов конденсации и испарения можно получить жидкость (остаток), состоящую почти целиком из высококипящего компонента (в дальнейшем ВК).

В простейшем виде процесс многократного испарения можно осуществить в многоступенчатой установке, в первой ступени которой испаряется исходная смесь. На вторую ступень поступает на испарение жидкость, оставшаяся после отделения паров в первой ступени, в третьей ступени испаряется жидкость, поступившая из второй ступени (после отбора из последней паров) и т. д. Аналогично может быть организован процесс многократной конденсации, при котором на каждую следующую ступень поступают для конденсации пары, оставшиеся после отделения от них жидкости (конденсата) в предыдущей ступени. [1]

При достаточно большом числе ступеней таким путем можно получить жидкую или паровую фазу с достаточно высокой концентрацией компонента, которым она обогащается. Однако выход этой фазы будет мал по отношению к

ее количеству в исходной смеси. Кроме того, описанные установки отличаются громоздкостью и большими потерями тепла в окружающую среду. [1]

Значительно более экономичное, полное и четкое разделение смесей на компоненты достигается в процессах ректификации, проводимых обычно в более компактных аппаратах - ректификационных колоннах.

При взаимодействии фаз между ними происходит массо- и теплообмен обусловленные стремлением системы к состоянию равновесия.

В результате каждого контакта компоненты перераспределяются между фазами: пар несколько обогащается НК, а жидкость — ВК

Многократное контактирование приводит к практически полному разделению исходной смеси. [1].

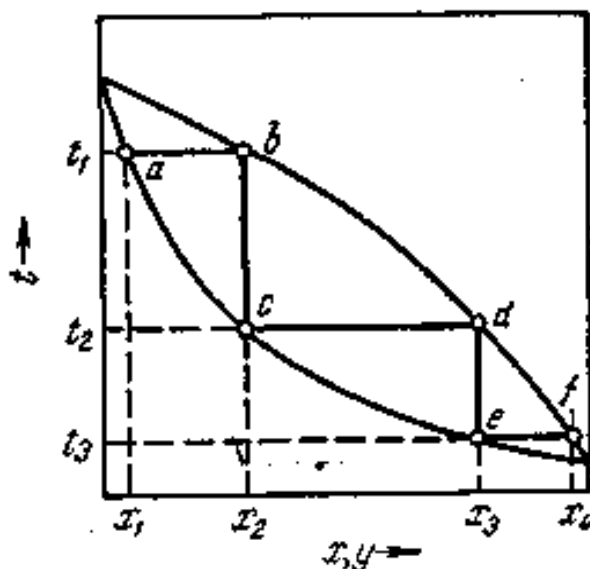


Рисунок 2- Изображение процесса разделения бинарной смеси путем ректификации на диаграмме $t-x-y$

Ректификацию проводят периодически или непрерывно при разных условиях: при атмосферном давлении, под вакуумом, под давлением выше атмосферного.

Важным аспектом ректификации также является и то, какой тип контактного массообменного устройства применяется в колонне, так как от этого зависит эффективность процесса ректификации. Существует два типа этих устройств: насадки и тарелки, соответственно колонны подразделяются на

насадочные и тарельчатые. В тарельчатых аппаратах контакт между жидкой и газовой фазами осуществляется при прохождении газа через слой жидкости на тарелке. В насадочных – в результате контакта фаз на поверхности инертных тел, то есть насадок. Выбор того или иного типа устройства зависит от свойств смеси, параметров в колонне (давление), нагрузками по газу и жидкости и т.д..

Тарелки классифицируются на некоторые большие группы:

1. По способу передачи жидкости.

Существуют тарелки провального типа и со специальными переточными устройствами.

2. По характеру диспергирования.

Подразделяют на тарелки барботажного и струйного типов. Тарелки, работающие в барботажном режиме делят на ситчатые, колпачковые, клапанные.

Насадки классифицируются на следующие группы:

1. Насыпная или нерегулярная (изготавливается из керамики, фарфора, стали, пластика).
2. Регулярная (изготавливается, в основном, из плетённой и вязанной металлической сетки, просечно-вытяжных листов, пластин и т. д.).

Направление движения потоков пара и жидкости в насыпной насадке и в некоторых видах регулярной это противоток. В противоточных насадочных колоннах насадка занимает всё поперечное сечение колонны, а пар и жидкость движутся навстречу друг другу.

В настоящее время особо актуальна задача по интенсификации процесса ректификации. Эта задача может быть решена путём модернизации настоящих колонн для повышения энерго- и ресурсоэффективности. Однако реконструкция таких аппаратов требует достаточно много финансов и времени. Для решения данных проблем существует практика замены тарелок в колоннах на регулярную насадку. Это позволяет значительно снизить гидравлическое сопротивление аппарата, увеличить производительность и эффективность разделения.

К насадкам предъявляются следующие требования

- большая удельная поверхность
- нечувствительность к загрязнениям и осадкам
- малое гидравлическое сопротивление
- простота изготовления
- малая стоимость

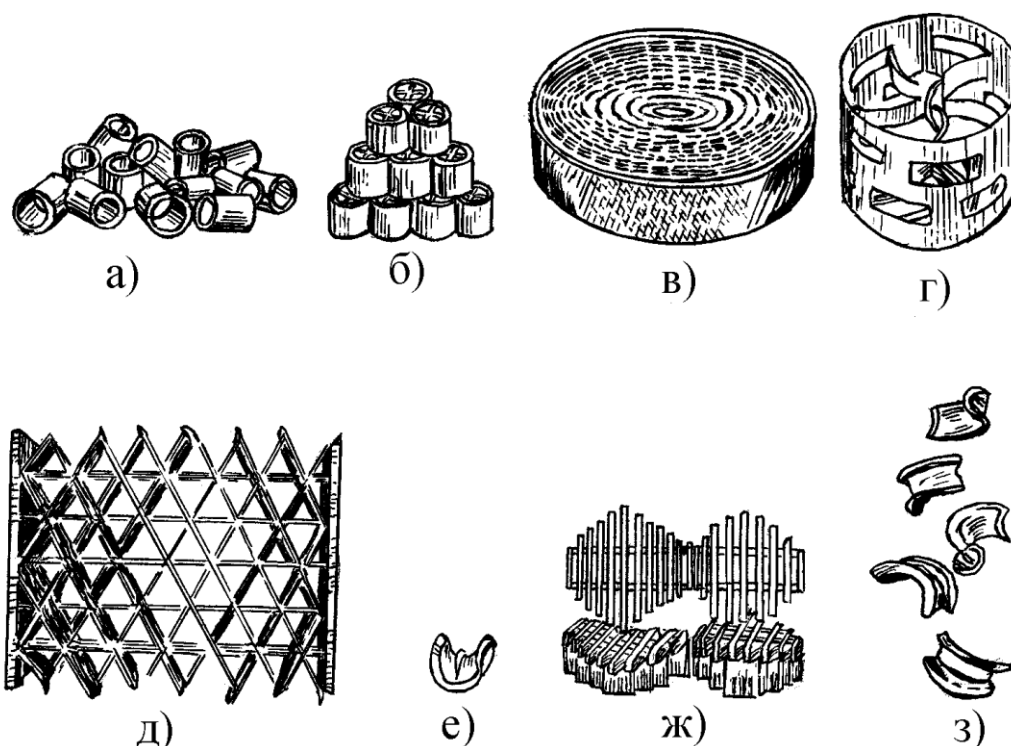


Рисунок 3. Типы насадок (а) кольца Рашига, беспорядочно уложенные (навалом); б) кольца с перегородками, правильно уложенные; в) насадка Гудлос; г) кольца Палля; д) насадка "Спрейпак"; е) седла Берля; ж) хордовая насадка; з) седла "Инталлокс").

Успешным примером модернизации путём полной замены тарелок на регулярную насадку может послужить вакуум колонна установки АВТ-2 предприятия «Орскнефтеоргсинтез» [2]. В результате получили, что КПД вырос до 0,85-0,9, расход водяного пара сокращён в два раза, температура нагрева сырья упала на 10-15°C, производительность по целевому продукту (масляному дистилляту) увеличилась на 22,5% масс. на нефть.

Затем на том же предприятии В 1993-1994 годах колонны К-2 ЭЛОУ-АВТ-3 и ЭЛОУ-АВТ были реконструированы на насадочные аппараты. Результатом стало увеличение разделительной способности колонны на 30%, КПД до 0,85 [2].

В работе Лаптевой Е.А. «Энергосбережение на технологической установке разделения этаноламинов» [3, стр. 35] предоставлена таблица сравнительных данных по внутренним устройствам ректификационных колонн, где показано в балловой системе от 1 до 5 эффективность каждого вида устройства в зависимости от различного рода параметров, где «1» - это «плохо», а «5» - «превосходно».

Таблица 1. Сравнительные данных по внутренним устройствам ректификационных колонн [2].

Свойства	Колпачковые тарелки	Ситчатые тарелки	Клапанные тарелки	Двухтопочные тарелки	Насыпные насадки	Регулярные насадки
1	2	3	4	5	6	7
Производительность по пару	3	4	4	5	5	5
Производительность по жидкости	4	4	4	5	5	5
Эффективность	4	3	4	3	4	5
Устойчивость	5	3	5	1	4	5
Перепад давления	2	3	3	3	4	5
Стоимость	3	5	4	5	2	4
Работа с загрязненными средами	3	3	3	4	2	1
Расчётная надёжность	4	4	3	2	3	3

То есть можно сделать вывод, что замена тарелок на регулярную насадку вполне оправдано и значительно увеличивает производительность при общем понижении энергозатрат. Практически по всем показателям регулярная насадка превосходит тарельчатые контактные устройства. Более того в стоимостном плане колонна с колпачковыми тарелками и насадочная с регулярной насадкой практически не отличаются. Но условием стабильной и эффективной работы насадки является незагрязнённость и высокая вязкость среды.

1.2 Интенсификация работы ректификационной колонны путём замены тарелок на регулярную насадку

Интенсификация работы ректификационных колонн является актуальной на сегодня задачей. С развитием технологий меняются и способы, и методы ректификации, так же как меняются типы сырья, производительность и прочее. Вследствие всех этих изменений, необходимо искать новые возможности в создании нового оборудования (колонн) или реконструкции уже имеющегося. На сегодняшний день всё чаще прибегают к замене тарелок на регулярные насадки, то есть переоборудовании тарельчатых колонн в насадочные. Насадочные колонны имеют ряд преимуществ перед тарельчатыми: более высокий КПД, производительность, более низкий перепад давлений по высоте аппарата, широкий диапазон нагрузок и прочее. Колонны такого рода позволяют более углубленно заниматься вопросами переработки нефти и нефтепродуктов, ресурсо- и энергосбережения.

В 1992 году была реконструирована первая масляная вакуумная колонна установки АВТ-2 «Орскнефтеоргсинтез». До реконструкции в колонне были смонтированы колпачковые тарелки, их разделительная способность в укрепляющей части колонны составляла лишь 5,6 теоретических тарелок (т.т.) со всеми вытекающими из этого последствиями. В результате реконструкции тарелки были заменены на 20 насадочных блоков, 17 из которых были расположены в укрепляющей части колонны [2].

Разделительная способность укрепляющей части колонны была повышена до 10,8 т.т, что позволило в 1,5-2,0 раза снизить степень налегания смежных масляных дистиллятов и получить более узкие 100-110°C масляные фракции вместо 140-150°C. Отбор масляных дистиллятов был повышен с 18,5 до 22,5% масс. на нефть. В результате промышленного обследования и последующего моделирования работы реконструированной вакуумной колонны установки АВТ-2 удалось также оценить паровые и жидкостные нагрузки и КПД на всех блоках насадки. Тепломассообменные КПД по высоте колонны оказались: 0,9 в конденсационной зоне, 0,94 в секции укрепления вакуумного соляра, 0,65 в секции укрепления веретенного дистиллята, 0,6 в секции укрепления машинного дистиллята и 0,4 в отгонной части колонны. Расход водяного пара был сокращен в два раза, температура нагрева сырья снижена на 10-15°C. [2].

На основе имеющихся данных и удачных применений данной технологии, было решено провести модернизацию оборудования, в частности ректификационной колонны по производству формалина, путём замены колпачковых тарелок на перекрестноточную регулярную насадку типа Sulzer Mellapak. Причём замену произвести таким образом, чтобы не менять конструктивных данных колонны, то есть её диаметр (2800 мм) и высоту (52000 мм).

Выберем насадку со следующими характеристиками: Mellapak 170 (удельная поверхности $\varepsilon=170 \text{ м}^3/\text{м}^3$, свободный объём насадки $a=0,95$), тип стали: нержавеющая. Область применения: основная химия и нефтехимия, процессы нефтепереработки. Диаметр и рабочие параметры колонны: D = от 80 до 17000 мм, давление: P = от вакуума до избыточного, нагрузка по жидкости: от 0.2 до $200 \text{ м}^3/\text{м}^2$. То есть данный тип насадки полностью удовлетворяет нашим требованиям.

В соответствии с вышеописанным произведем перерасчёт с целью изучения того, насколько можно изменить расход питания, не меняя габаритны размеры колонны. Расчёт произведем на базе Wolfram Mathematica.

Исходные данные:

$\rho_{ув}=1.179$; (*Плотность газа в верхней части колонны*)

$\rho_{ун}=1.135$; (*Плотность газа в нижней части колонны*)

$\rho_x=846.354$; (*Плотность жидкости, общая*)

$\mu_{хв}=0.2048$; (*Динамический коэффициент вязкости жидкости в верхней части колонны*)

$\mu_{хн}=0.1$; (*Динамический коэффициент вязкости жидкости в нижней части колонны*)

$\mu_{ув}=0.0028$; (*Динамический коэффициент вязкости газа в верхней части колонны*)

$\mu_{ун}=0.0026$; (*Динамический коэффициент вязкости газа в нижней части колонны*)

$\rho_{хв}=835.579$; (*Плотность жидкости в верхней части колонны*)

$\rho_{хн}=930.3$; (*Плотность жидкости в нижней части колонны*)

$a=170$;(*Удельная поверхность насадки*)

$\epsilon=0.95$;(*Свободный объём насадки*)

$g=9.81$;(*Коэффициент свободного падения*)

$G_f=8.1$;(*Расход питания*)

$X_p=0.97$;(*Содержание легколетучего компонента в дистилляте*)

$X_f=0.2724$;(*Содержание легколетучего компонента в питании*)

$X_w=0.07$;(*Содержание легколетучего компонента в кубовом остатке*)

Расчёт:

Расход кубового остатка:

$$G_w = G_f \cdot (X_p - X_f) / (X_p - X_w)$$

6.2784 кг/с

Расход дистиллята:

$$G_p = G_f - G_w$$

1.8216 кг/с

Флегмовое число:

$R=2.1$;

Средняя температура в колонне:

$$t_{cp}=53.75;$$

$$p_0=0.1033;$$

$$M_p=31.936; (*\text{Средняя молярная масса компонентов в колонне}*)$$

$$T_0=273;$$

$$P=0.04; (*\text{Рабочее давление в колонне}*)$$

Средний массовый поток пара в верхней части колонны:

$$G_B = G_p * (R + 1) * 31.358 / 32$$

$$5.53367 \text{ кг/с}$$

Средний массовый поток пара в нижней части колонны:

$$G_H = G_p * (R + 1) * 30.728 / 32$$

$$5.42249 \text{ кг/с}$$

Средняя массовая нагрузка (расход) по жидкости в верхней части колонны:

$$L_B = G_p * R * 31.358 / 32$$

$$3.74861 \text{ кг/с}$$

Средняя массовая нагрузка (расход) по жидкости в нижней части колонны:

$$L_H = (G_p * R * 30.326 / 32) + (G_f * 30.326 / 30.52)$$

$$11.6738 \text{ кг/с}$$

Предельная скорость пара в верхней части колонны:

$$\text{Solve}\left[\frac{W_{п1}^2 * a * \rho_{ув} * \mu_{хв}^{0.16}}{g * \epsilon^3 * \rho_{хв}} == 1.2 * \text{Exp}\left[-4 * \left(\frac{L_B}{G_B}\right)^{0.25} * \left(\frac{\rho_{ув}}{\rho_{хв}}\right)^{0.125}\right],\right. \\ \left. W_{п1}\right] \\ \{\{W_{п1} \rightarrow -3.31287\}, \{W_{п1} \rightarrow 3.31287\}\}$$

Предельная скорость пара в нижней части колонны:

$$\text{Solve}\left[\frac{W_{п2}^2 * a * \rho_{ун} * \mu_{хн}^{0.16}}{g * \epsilon^3 * \rho_{хн}} == 1.2 * \text{Exp}\left[-4 * \left(\frac{L_H}{G_H}\right)^{0.25} * \left(\frac{\rho_{ун}}{\rho_{хн}}\right)^{0.125}\right],\right. \\ \left. W_{п2}\right] \\ \{\{W_{п2} \rightarrow -2.94276\}, \{W_{п2} \rightarrow 2.94276\}\}$$

Примем рабочую скорость на 30 % ниже предельной:

$$W_{п1} = 3.1;$$

$$W_{п2} = 2.94;$$

$$W_{пв} = W_{п1} * 0.7$$

$$2.31 \text{ м/с}$$

$$W_{пн} = W_{п2} * 0.7$$

$$2.03 \text{ м/с}$$

Найдем среднюю скорость паров:

$$W_{срп} = \frac{W_{пв} + W_{пн}}{2}$$

$$2.17 \text{ м/с}$$

Ориентировочный диаметр колонны определяют из уравнения расхода (при увеличении расхода исходной смеси на 40%):

$$V = \frac{G_p * (R + 1) * 22.4 * (t_{ср} + 273) * p_0}{M_p * T_0 * P}$$

$$12.2427 \text{ м/с}$$

$$D_{сроб} = \sqrt{\frac{V}{0.785 * W_{срп}}}$$

|квadraticный корень

$$2.68085$$

Примем диаметр обечайки следующим:

$$D_{об} = 2.8$$

$$2.8 \text{ м}$$

Действительная скорость пара в колонне:

$$W_{п} = W_{срп} * (D_{сроб} / D_{об})^2$$

$$1.98925 \text{ м/с}$$

В результате перерасчёта получили, что при замене колпачковых тарелок на насадку без изменения габаритных размеров установки, расход питания увеличивается на 40 %, что в свою очередь повышает выход продукта также на 40 % от ранее заданного.

Также необходимо сравнить и саму насадку с тарелками для выявления преимуществ и недостатков одних перед другими для определения оптимального метода ректификации нашей смеси.

Одним из основных факторов при выборе метода ректификации является гидравлическое сопротивление колонны. Чем оно меньше, тем меньше необходимо энергоресурсов для его преодоления, чтобы обеспечить эффективную работу колонны. Итак, сравним гидравлическое сопротивление колонны по нашему процессу:

Полное гидравлическое сопротивление ректификационной колонны с колпачковыми тарелками:

$$\Delta p = \Delta p_v N_v + \Delta p_n N_n = 289,93 \cdot 40 + 364,43 \cdot 30 = 22530 \text{ Па.}$$

Полное гидравлическое сопротивление ректификационной колонны с насадкой:

$$\Delta p = \Delta p_v + \Delta p_n = 6537,85 + 1816,47 = 8354,33 \text{ Па.}$$

Как мы видим гидравлическое сопротивление колонны с насадкой в 3 раз меньше нежели с колонной с колпачковыми тарелками. Так как одним из основных условий выбора контактного устройства является именно низкое гидравлическое сопротивление, то выбор в пользу насадки очевиден.

Также немаловажный параметр – это эффективность контактных устройств. На рисунке 4 представлена зависимость КПД насадочного устройства от F-фактора [3].

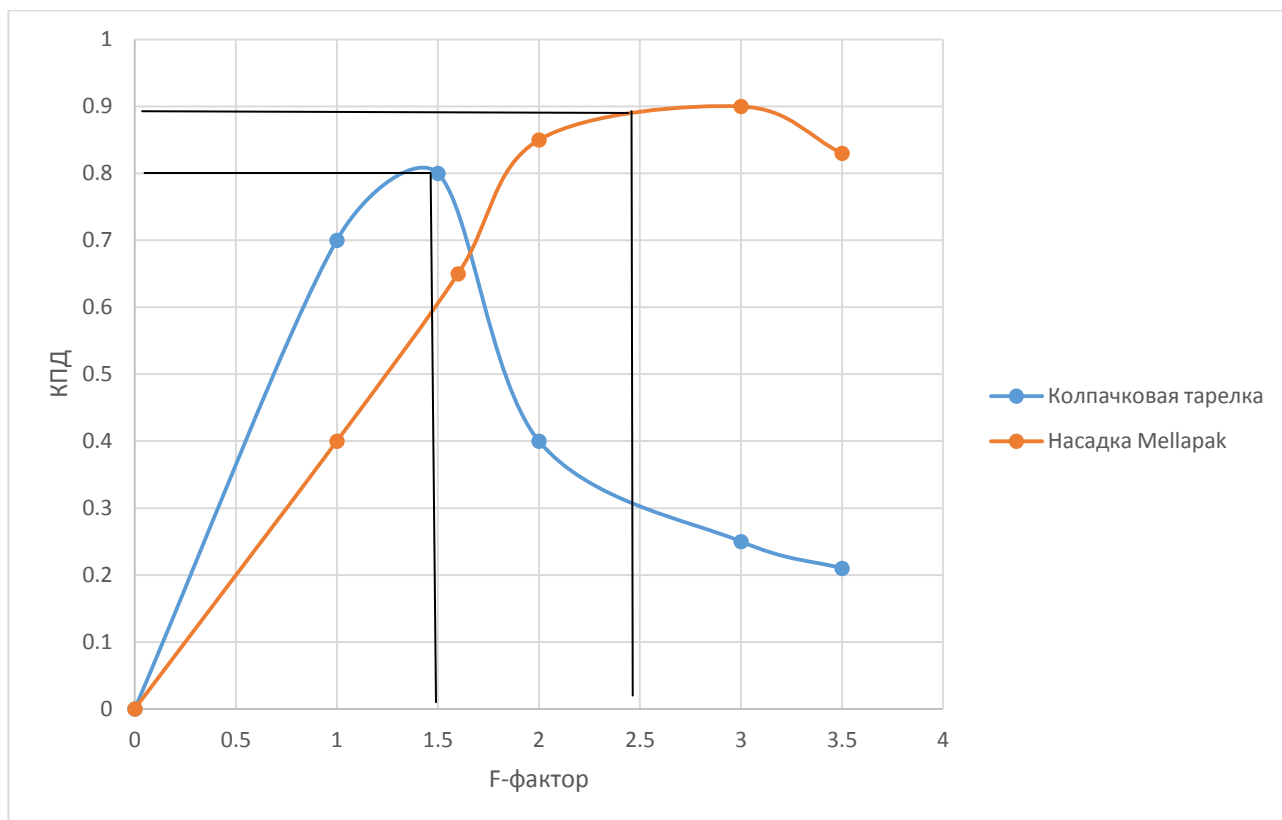


Рисунок 4. Эффективность массообменных устройств

F-фактор равен произведению скорости газа в колонне на корень из плотности газа, то есть:

- для колпачковой тарелки: $w = Wn\sqrt{\rho_{\text{ср.п}}} = 1.421\sqrt{1.157} = 1.5$

- для насадки Mellapak: $w = Wn\sqrt{\rho_{\text{ср.п}}} = 1.989\sqrt{1.157} = 2.5$

При этом КПД для тарелки равен 0.8, а для насадки – 0.9

То есть при одинаковых габаритах колонны эффективность у насадки выше по сравнению с колпачковой тарелкой, и при повышении F-фактора эффективность также увеличивается.

На основе полученных данных составим таблицу, куда сведём все параметры.

Таблица 2. Сравнительные характеристики по массообменным устройствам

	Колпачковая тарелка	Насадка Mellapak
1. Расход питания (кг/с)	5.787	8.1
2. КПД (%)	0.8	0.9

3. Гидравлическое сопротивление (Па)	22530	8354.33
4. Производительность по пару (кг/с)	3.75	5.45
5. Производительность по жидкости (кг/с)	5.37	7.71

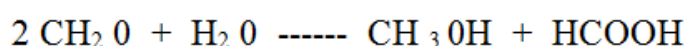
То есть можно наблюдать, что замена колпачковых тарелок на насадку вполне оправдана, и таким образом можно повысить значительно производительность колонны, её эффективность и снизить энергозатраты.

По всем показателям насадка превосходит тарелку, особенно по гидравлическому сопротивлению, производительности и КПД. И учитывая, что стоимость этих массообменных устройств практически одинакова, то выбор в пользу насадки в качестве массообменного устройства вполне очевиден.

1.3 Описание технологической схемы процесса

Формалин-«сырец» с содержанием метанола до 20 % и формальдегида не более 38 % из куба абсорбционной колонны поз.К1 насосами поз.Н1/1,2 подается на ректификацию, где отделяется метанол.

Ректификация метанольного формалина ведется в колонне поз.К2 под вакуумом. Проведение ректификации под вакуумом позволяет снизить температуру, что предотвращает повышение кислотности формалина за счет уменьшения протекания реакции Канницарро:



Вакуум в ректификационной колонне поз.К2 создается вакуум-насосом поз.Н4/1,2 и поддерживается в кубе (- 0,22 - - 0,41) кгс/см², (- 0,022 - - 0,041) МПа, а в верху колонны поз.К2 (- 0,39 - - 0,61) кгс/см², (- 0,039 - - 0,061) МПа.

Обогрев колонны поз.К32 осуществляется через кипятильник поз.Т33 паром давлением 2 кгс/см² (0,2 МПа). Температура формалина в кубе колонны поз.К2 поддерживается (85-95) С⁰, вверху колонны поз.К32 - (40-50) С⁰, в укрепляющей части (60-70) С⁰, в исчерпывающей - (70-80) С⁰.

Формалин-«сырец» из абсорбционной колонны поз.К1 расходом (10-20) м³/ч и некондиционный формалин расходом до 8 м³/ч, подаваемый насосом поз. Н2/1,3 поступает на 34,42,52 тарелки ректификационной колонны.

Пары метанола, формальдегида нагретые внизу колонны поднимаются вверх, а сверху (навстречу парам) подается почти чистый жидкий метанол. При соприкосновении поднимающихся паров со стекающей жидкостью происходит частичная конденсация формалина из формалина-«сырца» и частичное испарение метанола. Таким образом, стекающая жидкость обогащается формальдегидом, а поднимающиеся пары обогащаются метанолом, в результате чего выходящие из колонны пары представляют собой почти чистый метанол. Эти пары поступают в аппараты воздушного охлаждения поз.Х5/1,2, где охлаждаются до температуры не более 50 С⁰, конденсируются и отделяются в газоотделителе поз.Х6 от жидкости. Жидкий метанол сливается в емкость поз.Е4, а газовая фаза дополнительно охлаждается в теплообменнике поз.Т8 и

поступает в газоотделитель поз.Х7. Жидкая фаза после газоотделителя поз.Х7 сливается в поз.Е4, а не сконденсировавшиеся пары и инерты направляются к вакуум-насосу поз.Н6/1,2.

Выбросы от вакуум-насоса направляются в верхнюю часть абсорбционной колонны поз.К1, где отмываются водой от большей части метанола и вместе с выхлопными газами абсорбционной колонны поступают на сжигание.

Метанол из емкости поз.Е4 с содержанием формальдегида до 6 % и метанола не менее 92 % насосом поз.Н5/1,2, с расходом (5-15) м³/ч, подается в виде флегмы в колонну поз.К2, а избыток, с расходом до 6,5 м³/ч, направляется в процесс через смеситель поз.Х1 для получения метанол воздушной смеси.

Уровень в емкости поз.Е4 поддерживается (30-70) % отбором метанола, направляемого в испаритель поз.Х1.

Формалин из куба колонны поз.К2, содержащий метанола не более 8 % и формальдегида не более 50 % забирается насосом поз.Н4/1,2, охлаждается в холодильнике поз.Т9 до температуры (35-65) оС и откачивается в стандартизаторы поз.Е42/1-6.

Уровень в кубе колонны поз.К2 поддерживается (30-70) % отбором формалина в стандартизаторы поз.Е42.

В случае выхода из строя вакуум-насосов поз.Н6/1,2 ректификацию можно вести непродолжительное время под атмосферным давлением, но при этом возрастает кислотность формалина, температура в кубе колонны поз.К2 будет (95-110) °С, а вверху - (60-66) °С.

Емкости поз.Е4 и газоотделители поз.Х7 соединены с «азотным дыханием» давлением 0,3 кгс/см² (0,03 МПа).

2. Технологический расчет

2.1 Исходные данные

Заданный массовый расход питания: $G_F=700$ т/сут,

Содержание легколетучего компонента (метанол):

- в питании: $x_F=27.24\%$ (мас.),
- дистилляте: $x_D=97\%$ (мас.),
- кубовом остатке: $x_W=7\%$ (мас.).

Смесь поступает в колонну при температуре кипения. Давление в колонне 0.04 МПа.

Технологический расчет ректификационной колонны сводится к определению ее основных геометрических размеров — диаметра и высоты. Оба параметра в значительной мере определяются гидродинамическим режимом работы колонны, который, в свою очередь, зависит от скоростей и физических свойств фаз, а также от типа и размеров массообменных устройств.

2.2 Материальный баланс колонны и определение рабочего флегмового числа

Обозначим массовый расход дистиллята через G_D кг/с, кубового остатка -

- G_W кг/с, исходной смеси- G_F кг/с.

Из уравнений материального баланса ректификационной колонны непрерывного действия:

$$G_F = G_D + G_W; \quad [1, \text{стр.228}] \quad (1)$$

$$G_F x_F = G_D x_D + G_W x_W, \quad (2)$$

$$G_F = 700 \text{ т/сут} = 8.1 \text{ кг/с}$$

Откуда находим:

$$G_W = G_F(x_F - x_D)/(x_D - x_W) = 8.1(0.97 - 0.2724)/(0.97 - 0.07) = 6.278 \text{ кг/с}$$

$$G_P = G_F - G_W = 8.1 - 6.278 = 1.82 \text{ кг/с.}$$

Для дальнейших расчетов выразим концентрации питания, дистиллята и кубового остатка в мольных долях, (x_F — в питании, x_D — в дистилляте, x_W — в кубовом остатке).

Молярная масса метанола: $M_{\text{мет}}=32$ кг/моль; а формальдегида: $M_{\text{форм}}=30$ кг/моль

$$X_F = (x_F / M_{\text{мет}}) / (x_F / M_{\text{мет}} + (1 - x_F) / M_{\text{форм}}) \quad [1, \text{стр.228}] \quad (3)$$

$$X_F = (0,2724/32) / (0,2724/32 + (1 - 0,2724)/30) = 0,26 \text{ кмоль/кмоль смеси}$$

$$X_D = (0,97/32) / (0,97/32 + (1 - 0,97)/930) = 0,968 \text{ кмоль/кмоль смеси}$$

$$X_W = (0,07/32) / (0,07/32 + (1 - 0,07)/30) = 0,07 \text{ кмоль/кмоль смеси.}$$

Построение диаграмм.

Для идеальных смесей диаграммы можно построить путем расчета, исходя из значений давлений паров чистых компонентов $P_{Н.К}$ и $P_{В.К}$ при различных температурах. Для этого можно воспользоваться уравнением:

$$P_{\text{общ}} = P_{В.К} + P_{Н.К} = P_{Н.К}X + P_{В.К}(1-X) \quad [4, \text{стр. 326}] \quad (4)$$

Решив относительно X , получим:

$$X = (P_{\text{общ}} - P_{В.К}) / (P_{Н.К} - P_{В.К})$$

При этом $P_{\text{раб}}=0.04$ МПа

Таким образом, выбрав ряд температур (в пределах между температурами кипения чистых компонентов), можно вычислить состав жидкости, кипящей при данной температуре. Далее, определив парциальное давление НК по формуле:

$$p_{Н.К} = P_{Н.К}X \quad [4, \text{стр. 326}] \quad (5)$$

Находим состав паров:

$$Y = p_{Н.К} / P, \text{ где } P_{\text{общ}} = P_{\text{раб}} \cdot 10^6 / 133.3224 = 310 \text{ мм.рт.ст.}$$

Рассчитываем давление ($P_{Н.К}$) для метанола.

Интервал температур от $t_1=42$ °С до $t_2=72$ °С

1) Давление при температуре 42 °С

$$P_{Н.К.1} = 310 \text{ мм.рт.ст.}$$

2) Давление при температуре 45 °С

$$P_{Н.К.2} = 335 \text{ мм.рт.ст.}$$

3) Давление при температуре 50 °С

$$P_{Н.К.3} = 372 \text{ мм.рт.ст.}$$

4) Давление при температуре 53 °С

$$P_{Н.К.4} = 400 \text{ мм.рт.ст.}$$

5) Давление при температуре 55 °С

$$P_{H.K.5}=430 \text{ мм.рт.ст.}$$

6) Давление при температуре 61 °С

$$P_{H.K.6}=590 \text{ мм.рт.ст.}$$

7) Давление при температуре 63 °С

$$P_{H.K.7}=743 \text{ мм.рт.ст.}$$

8) Давление при температуре 68 °С

$$P_{H.K.8}=790 \text{ мм.рт.ст.}$$

9) Давление при температуре 70 °С

$$P_{H.K.9}=1234 \text{ мм.рт.ст.}$$

10) Давление при температуре 72 °С

$$P_{H.K.10}=1299 \text{ мм.рт.ст.}$$

Рассчитываем давление ($P_{в.к}$) для формальдегида.

Из экспериментальных данных о фазовом равновесии системы находятся константы А, В и С в уравнении Антуана, описывающего температурную зависимость давления паров некоторого гипотетического состояния формальдегида в чистом виде, но с учетом взаимодействия с водой. [5, стр. 62]

Полученное выражение имеет вид:

$$\lg P = A - B / (C + t), \quad (6)$$

где $A=7.934$, $B=1647.8$, $C=232$

1) Давление при температуре 42 °С

$$P_{B.K.1}=83 \text{ мм.рт.ст.}$$

2) Давление при температуре 45 °С

$$P_{B.K.2}=115 \text{ мм.рт.ст.}$$

3) Давление при температуре 50 °С

$$P_{B.K.3}=142 \text{ мм.рт.ст.}$$

4) Давление при температуре 53 °С

$$P_{B.K.4}=163 \text{ мм.рт.ст.}$$

5) Давление при температуре 55 °С

$$P_{B.K.5}=180 \text{ мм.рт.ст.}$$

6) Давление при температуре 61 °C

$$P_{B.K.6}=190 \text{ мм.рт.ст.}$$

7) Давление при температуре 63 °C

$$P_{B.K.7}=204.2 \text{ мм.рт.ст.}$$

8) Давление при температуре 68 °C

$$P_{B.K.8}=253.8 \text{ мм.рт.ст.}$$

9) Давление при температуре 70 °C

$$P_{B.K.9}=270 \text{ мм.рт.ст.}$$

10) Давление при температуре 72 °C

$$P_{B.K.10}=310 \text{ мм.рт.ст.}$$

Далее рассчитываем состав жидкости, в долях от ед.:

$$X_1=(P_{\text{общ}} - P_{B.K1})/(P_{H.K1} - P_{B.K1})=1$$

$$X_2=(P_{\text{общ}} - P_{B.K2})/(P_{H.K2} - P_{B.K2})=0.886$$

$$X_3=(P_{\text{общ}} - P_{B.K3})/(P_{H.K3} - P_{B.K3})=0.73$$

$$X_4=(P_{\text{общ}} - P_{B.K4})/(P_{H.K4} - P_{B.K4})=0.62$$

$$X_5=(P_{\text{общ}} - P_{B.K5})/(P_{H.K5} - P_{B.K5})=0.52$$

$$X_6=(P_{\text{общ}} - P_{B.K6})/(P_{H.K6} - P_{B.K6})=0.3$$

$$X_7=(P_{\text{общ}} - P_{B.K7})/(P_{H.K7} - P_{B.K7})=0.196$$

$$X_8=(P_{\text{общ}} - P_{B.K8})/(P_{H.K8} - P_{B.K8})=0.105$$

$$X_9=(P_{\text{общ}} - P_{B.K9})/(P_{H.K9} - P_{B.K9})=0.035$$

$$X_{10}=(P_{\text{общ}} - P_{B.K10})/(P_{H.K10} - P_{B.K10})=0$$

Находим состав паров, в долях от ед.:

$$Y_1=P_{H.K1}X_1/P_{\text{общ}}=1$$

$$Y_2=P_{H.K2}X_2/P_{\text{общ}}=0.958$$

$$Y_3=P_{H.K3}X_3/P_{\text{общ}}=0.877$$

$$Y_4=P_{H.K4}X_4/P_{\text{общ}}=0.8$$

$$Y_5=P_{H.K5}X_5/P_{\text{общ}}=0.721$$

$$Y_6=P_{H.K6}X_6/P_{\text{общ}}=0.571$$

$$Y_7=P_{H.K7}X_7/P_{\text{общ}}=0.52$$

$$Y_8=P_{H.K8}X_8/P_{\text{общ}}=0.267$$

$$Y_9 = P_{H.K9} X_9 / P_{общ} = 0.16$$

$$Y_{10} = P_{H.K10} X_{10} / P_{общ} = 0$$

Данные расчета сводятся в таблицу 3.

Таблица 3. Расчет равновесного состава жидкости и пара смеси метанол формальдегид.

t, °C	P _{н.к}	P _{в.к}	X	Y
	мм рт. ст.		мольные доли	
42	310	218	1	1
45	335	243	0,886	0,958
50	372	300.4	0,73	0,877
53	400	340	0,62	0,8
55	430	412	0,52	0,721
61	590	426	0,3	0,571
63	743	462	0,196	0,52
68	790	587	0,105	0,267
70	1234	705	0,035	0,16
72	1299	760	0	0

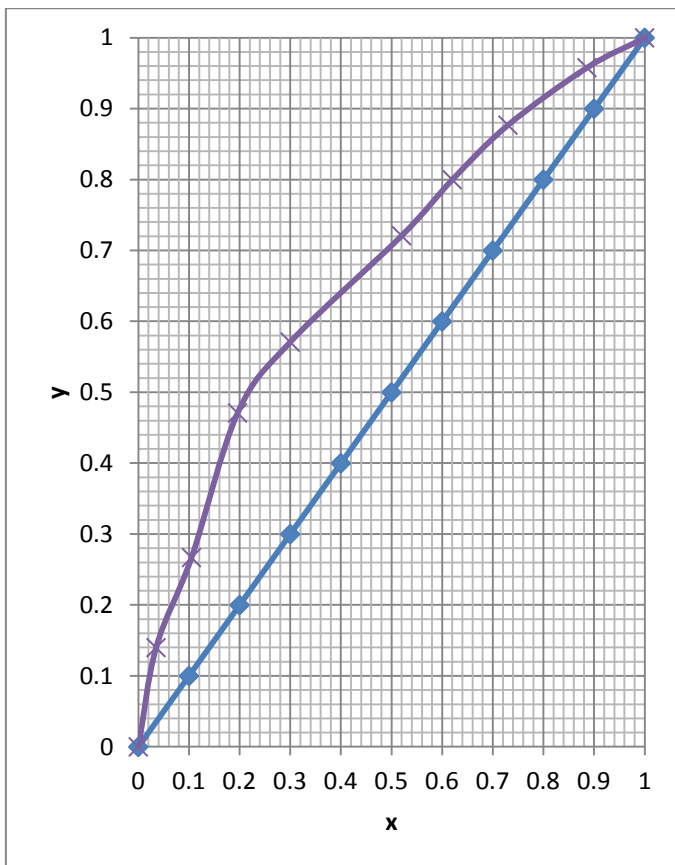


Рисунок 5. Кривая равновесия жидкости и пара для системы метанол – формальдегид.

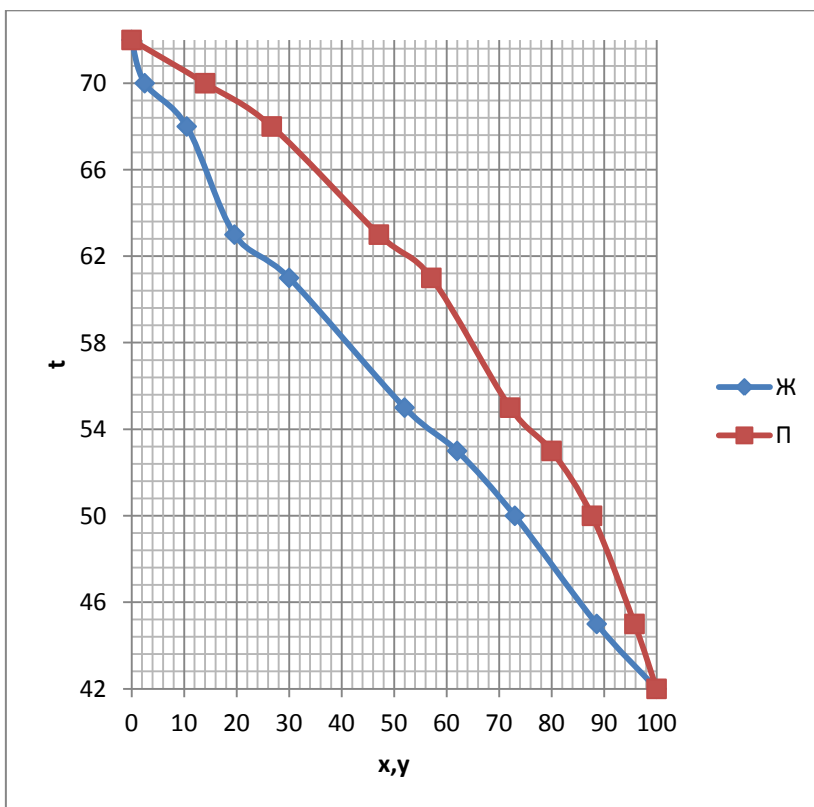


Рисунок 6. t-x,y диаграмма для системы метанол – формальдегид.

Таким образом:

$t_F=61.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (температура НК в питании) $Y_F=0.5$ (Мольная доля НК в питании)

$t_P=43\text{ }^{\circ}\text{C}$ (температура НК в дистилляте) $Y_P=0.968$ (Мольная доля НК в дистилляте)

$t_W=67.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (температура НК в кубовом остатке) $Y_W=0.066$ (Мольная доля НК в кубовом остатке)

Определяем минимальное флегмовое число по уравнению:

$$R_{\text{MIN}} = (X_D - Y_F^*) / (Y_F^* - X_F); \quad [1, \text{стр.228}] \quad (7)$$

где $Y_F^* = 0,55$ - мольная доля метанола в паре (рисунок 5),

$$R_{\text{MIN}} = (0.968 - 0.55) / (0.55 - 0.26) = 1.441$$

Задавшись различными значениями коэффициентов избытка флегмы β , определим соответствующие флегмовые числа. Графическим построением ступеней изменения концентраций между равновесной и рабочей линиям на диаграмме $Y-X$ находим N [1].

Результаты в таблице 4:

$$\beta = R / R_{\text{MIN}}. \text{ Следовательно, } R = \beta R_{\text{MIN}}$$

Таблица 4 – Результаты расчета

β	1,1	1,25	1,35	1,7	2,2	3,1	5,4
R	1,585	1,801	1,945	2,233	3,169	4,466	7,779
N	22	15	14	13	11	9	8
$N(R+1)$	56,862	47,613	41,227	42,028	45,862	49,193	70,234

По полученным значениям строим диаграмму равновесия между паром и жидкостью в координатах $y-x$ (здесь же строим и рабочие линии при R оптимальном) (рисунок 6), а также график зависимости $N(R+1) - R$ (рисунок 6) и по графику определяем оптимальное флегмовое число $R=2.1$

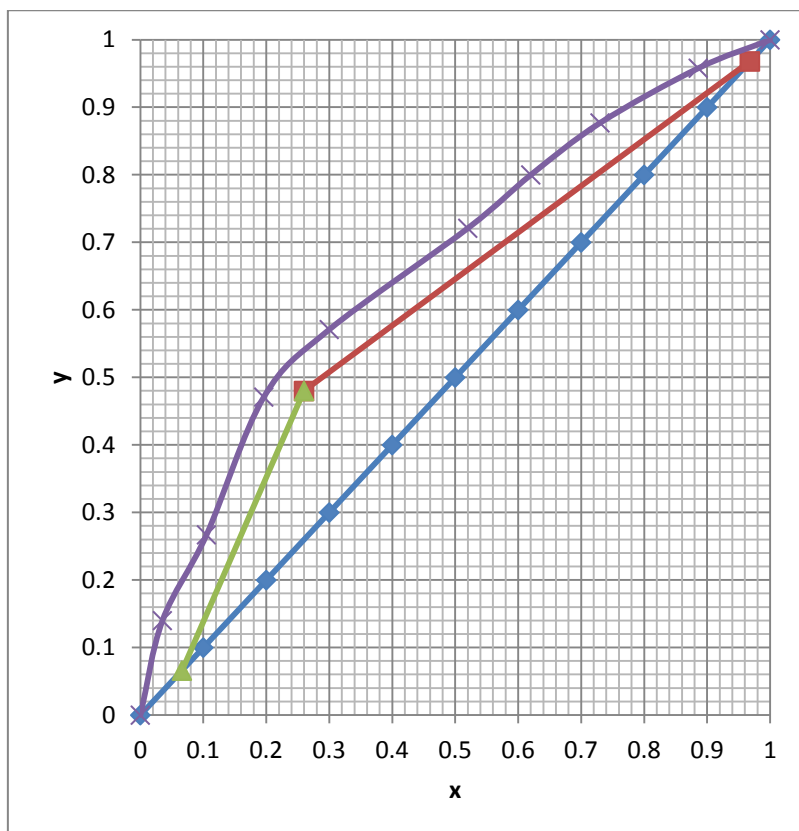


Рисунок 7 – x-y диаграмма при R оптимальном

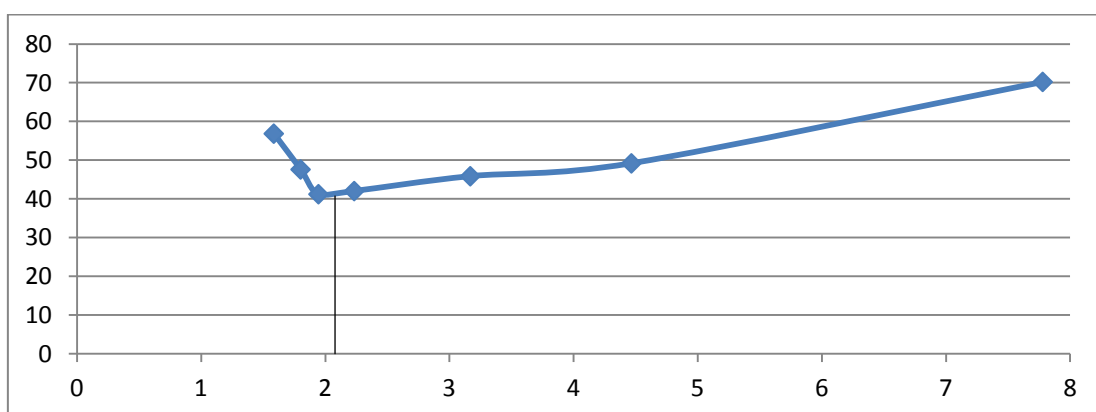


Рисунок 8 – Определение оптимального флегмового числа

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

$$L_B = G_p R M_B / M_D; \quad [1, \text{стр.229}] \quad (8)$$

$$L_H = G_p R M_H / M_D + G_F M_H / M_F, \quad (9)$$

где M_D и M_F — мольные массы дистиллята и исходной смеси; M_B и M_H — средние мольные массы жидкости в верхней и нижней частях колонны.

Средние молярные массы жидкости в верхней и нижней частях колонны соответственно равны:

$$\begin{aligned} M_B &= M_{\text{б}} X_{\text{ср. в}} + M_{\text{т}} (1 - X_{\text{ср. в}}); [3, \text{стр.230}] \\ M_H &= M_{\text{б}} X_{\text{ср. н}} + M_{\text{т}} (1 - X_{\text{ср. н}}); \end{aligned} \quad (10)$$

где $M_{\text{б}}$ и $M_{\text{т}}$ — молярные массы бензола и толуола; $X_{\text{ср. в}}$ и $X_{\text{ср. н}}$ — средний молярный состав жидкости соответственно в верхней и нижней частях колонны:

$$X_{\text{ср. в}} = (X_{\text{Р}} + X_{\text{F}})/2 = (0,968 + 0,26)/2 = 0,614 \text{ кмоль/кмоль смеси};$$

$$X_{\text{ср. н}} = (X_{\text{F}} + X_{\text{W}})/2 = (0,26 + 0,07)/2 = 0,163 \text{ кмоль/кмоль смеси}.$$

Тогда:

$$M_B = 32 \cdot 0,614 + 30 (1 - 0,614) = 31,228 \text{ кг/кмоль};$$

$$M_H = 32 \cdot 0,163 + 30 (1 - 0,163) = 30,326 \text{ кг/кмоль}.$$

Молярная масса исходной смеси:

$$M_{\text{F}} = 32 \cdot 0,26 + 30 (1 - 0,26) = 30,52 \text{ кг/кмоль}$$

Подставим рассчитанные величины в уравнения (8) и (9), получим:

$$L_B = 1,82 \cdot 3 \cdot 31,228/32 = 5,33 \text{ кг/с};$$

$$L_H = 1,82 \cdot 2 \cdot 30,326/32 + 8,1 \cdot 30,326/30,52 = 11,498 \text{ кг/с}$$

Средние массовые потоки пара в верхней G_B и нижней G_H частях колонны соответственно равны:

$$G_B = G_D (R+1) M'_{\text{в}} / M_D; [1, \text{стр.230}]$$

$$G_H = G_D (R+1) M'_{\text{н}} / M_D. \quad (11)$$

Здесь $M'_{\text{в}}$ и $M'_{\text{н}}$ — средние молярные массы паров в верхней и нижней частях колонны:

$$M'_{\text{в}} = M_{\text{б}} y_{\text{ср. в}} + M_{\text{т}} (1 - y_{\text{ср. в}});$$

$$M'_{\text{н}} = M_{\text{б}} y_{\text{ср. н}} + M_{\text{т}} (1 - y_{\text{ср. н}}); \quad (12)$$

$$y_{\text{ср. в}} = (y_{\text{Р}} + y_{\text{F}})/2 = (0,968 + 0,5)/2 = 0,734 \text{ кмоль/кмоль смеси};$$

$$y_{\text{ср. н}} = (y_{\text{W}} + y_{\text{F}})/2 = (0,5 + 0,066)/2 = 0,283 \text{ кмоль/кмоль смеси}.$$

$$M'_{\text{в}} = 32 \cdot 0,734 + 30 (1 - 0,734) = 31,458 \text{ кг/кмоль};$$

$$M'_{\text{н}} = 32 \cdot 0,283 + 30 (1 - 0,283) = 30,556 \text{ кг/кмоль}.$$

Подставив численные значения в уравнения (9), получим:

$$G_B = 1,82(2+1) 31,358/32 = 5,35 \text{ кг/с}$$

$$G_H = 1,82(2+1) 30,728/32 = 5,24 \text{ кг/с}$$

В результате вычислили средние массовые потоки пара в верхней G_B и нижней G_H частях колонны, мольный состав жидкости, а также построили соответствующие графики.

2.3 Расчет скорости пара и диаметра колонны

По каталогу для диаметра 2800 мм выбираем насадку Mellapak со следующими параметрами:

- Удельная поверхности: $\varepsilon=170 \text{ м}^3/\text{м}^3$
- Свободный объем насадки: $a=0,95$
- Тип стали: нержавеющая (12X18H10T)
- Высота одного слоя насадки: $z=3 \text{ м}$
- Гофрированный угол: 45°

Найдем плотности жидкости $\rho_{x \text{ в}}, \rho_{x \text{ н}}$ и пара $\rho_{y \text{ в}}, \rho_{y \text{ н}}$ в верхней и нижней частях колонны при средних температурах в них $t_{\text{в}}$ и $t_{\text{н}}$. Средние температуры паров определим по диаграмме $t-x, y$:

$$t_{\text{в}} = 52.25 \text{ }^\circ\text{C}; \quad t_{\text{н}} = 55.25 \text{ }^\circ\text{C}; \quad T_0 = 273 \text{ К.}$$

$$\rho_{y \text{ в}} = M'_{\text{в}} T_0 / (22,4(T_0 + t_{\text{в}})); \quad \rho_{y \text{ н}} = M'_{\text{н}} T_0 / (22,4(T_0 + t_{\text{н}})). \quad (13)$$

$$\rho_{y \text{ в}} = 31,458 \cdot 273 / (22,4 \cdot (273 + 52.25)) = 1,179 \text{ кг/м}^3$$

$$\rho_{y \text{ н}} = 30,556 \cdot 273 / (22,4 \cdot (273 + 55.25)) = 1,135 \text{ кг/м}^3$$

Принимаем среднюю плотность пара в колонне:

$$\rho_{\text{ср.п}} = (\rho_{y \text{ в}} + \rho_{y \text{ н}}) / 2 = (1,179 + 1,135) / 2 = 1,157 \text{ кг/м}^3$$

Плотности метанола и формальдегида при $t=43 \text{ }^\circ\text{C}$ $\rho_{\text{мет}}=768.6 \text{ кг/м}^3$, при $t=67.5 \text{ }^\circ\text{C}$ $\rho_{\text{форм}}=970 \text{ кг/м}^3$.

Средняя плотность жидкости в колонне:

$$\rho_{\text{ср.ж}} = \rho_{\text{мет}} X_{\text{ср. в}} + \rho_{\text{форм}}(1 - X_{\text{ср. в}}) = 768.6 \cdot 0.614 + 970 \cdot (1 - 0.614) = 846.354 \text{ кг/м}^3$$

Предельно допустимая скорость паров в верхней части колонны:

$$\text{Solve} \left[\frac{Wn1^2 \cdot a \cdot \rho_{y \text{ в}} \cdot \mu_{x \text{ в}}^{0.16}}{g \cdot \varepsilon^3 \cdot \rho_{x \text{ в}}} = 1.2 \cdot \text{Exp} \left[-4 \cdot \left(\frac{L_{\text{в}}}{G_{\text{в}}} \right)^{0.25} \cdot \left(\frac{\rho_{y \text{ в}}}{\rho_{x \text{ в}}} \right)^{0.125} \right], Wn1 \right] \quad (14)$$

, (14)

Предельно допустимая скорость паров в нижней части колонны:

$$\text{Solve}\left[\frac{W_{п2}^2 * a * \rho_{ун} * \mu_{хн}^{0.16}}{g * \epsilon^3 * \rho_{хн}} == 1.2 * \text{Exp}\left[-4 * \left(\frac{L_{н}}{G_{н}}\right)^{0.25} * \left(\frac{\rho_{ун}}{\rho_{хн}}\right)^{0.125}\right], W_{п2}\right]$$

[решить уравнения] [показательная функция]

$$\{\{W_{п2} \rightarrow -2.94276\}, \{W_{п2} \rightarrow 2.94276\}\}$$

Примем рабочую скорость на 30% ниже предельной:

$$W_{п1} = 3.1;$$

$$W_{п2} = 2.94;$$

$$W_{пв} = W_{п1} * 0.7$$

$$2.17 \text{ м / с}$$

$$W_{пн} = W_{п2} * 0.7$$

$$2.058 \text{ м / с}$$

Тогда средняя скорость пара:

$$W_{срп} = \frac{W_{пв} + W_{пн}}{2}$$

$$2.114 \text{ м / с}$$

Примем среднюю температуру в колонне: $t_{ср} = (t_{в} + t_{н})/2 = (52.25 + 55.25)/2 = 53.75^\circ\text{C}$.

Объёмный расход пара:

$$V = \frac{G_p * (R + 1) * 22.4 * (t_{ср} + 273) * p_0}{M_p * T_0 * P} \quad [1, \text{стр.353}] \quad (15)$$

$$V = 12,24 \text{ м}^3/\text{с}$$

где M_D - молярная масса дистиллята, равная:

$$M_p = X_p M_{мет} + (1 - X_p) M_{форм} = 0.968 \cdot 32 + (1 - 0.968) \cdot 30 = 31.936 \text{ кг/кмоль}$$

Диаметр ректификационной колонны определим из уравнения:

$$D_{ср06} = \sqrt{\frac{V}{0.785 * W_{срп}}} \quad [1, \text{стр.353}] \quad (16)$$

[квадратный корень]

$$D = 2,71613 \text{ м}$$

Рационально принять стандартный диаметр обечайки $D = 2,8 \text{ м}$.

При этом скорость пара в колонне будет равна:

$$W_{п} = W_{срп} * (D_{ср06} / D_0)^2 \quad [1, \text{стр.353}]$$

$$W_{п} = 1,98 \text{ м/с}$$

2.4 Гидравлический расчет насадки

Расчёт ведем в программе Wolfram Mathematica.

Гидравлическое сопротивление сухой (неорошаемой) насадки [4]:

$$\Delta P_c = \lambda * \frac{H}{dэ} * \frac{w^2 * \rho y}{2 * \epsilon^2}, \quad (17)$$

где λ - коэффициент сопротивления сухой неорошаемой насадки, зависит от режима движения газа в насадке.

Критерий Рейнольдса для газа в верхней и нижней частях колонны соответственно:

- Эквивалентный диаметр насадки:

$$dэ = \frac{4 * a}{\epsilon * 1000}$$

0.715789 м

- верх колонны:

$$Re_{ув} = \frac{Wn^2 * dэ * \rho_{ув}}{\epsilon * \mu_{ув}} \quad (18)$$

1255.44

- низ колонны:

$$Re_{ун} = \frac{Wn^2 * dэ * \rho_{ун}}{\epsilon * \mu_{ун}} \quad (19)$$

1301.56

$$Re_y = \frac{Re_{ув} + Re_{ун}}{2}$$

1278.5

Следовательно, режим движения турбулентный. Для турбулентного режима коэффициент сопротивления сухой насадки в виде регулярно уложенной насадки [3]:

$$\lambda = \frac{9.2}{Re_y^{0.375}} \quad (20)$$

0.62918

Гидравлическое сопротивление сухой (неорошаемой) насадки в верхней части колонны:

$$\Delta P_{св} = \lambda * \frac{H_{в}}{d_{э}} * \frac{W_{п}^2 * \rho_{ув}}{2 * \epsilon^2 * 10^{-2}}$$

6044.38 Па

Гидравлическое сопротивление сухой (неорошаемой) насадки в нижней части колонны:

$$\Delta P_{сн} = \lambda * \frac{H_{н}}{d_{э}} * \frac{W_{п}^2 * \rho_{ун}}{2 * \epsilon^2 * 10^{-2}}$$

1478.78 Па

Плотность орошения в верхней и нижней части колонны [4]:

$$U_{в} = \frac{L_{в}}{\rho_{хв} * 0.785 * D_{об} * 10^{-3}} \quad (21)$$

2.04106 м³/м²*с

$$U_{н} = \frac{L_{н}}{\rho_{хн} * 0.785 * D_{об} * 10^{-3}} \quad (22)$$

5.709 м³/м²*с

Гидравлическое сопротивление орошаемой насадки в верхней и нижней части колонны [3]:

$$\Delta P = \Delta P_{сух} * (1 + k * U), \quad (23)$$

где U - плотность орошения, м³/м²*с); k - опытный коэффициент (для правильно уложенных насадок k = 0,04).

$$k = 0.04;$$

$$\Delta P_{в} = \Delta P_{св} * (1 + k * U_{в})$$

6537.85 Па

$$\Delta P_{н} = \Delta P_{сн} * (1 + k * U_{н})$$

1816.47 Па

Общее гидравлическое сопротивление насадки:

$$\Delta P = \Delta P_{в} + \Delta P_{н} \quad (24)$$

8354.33 Па

2.5 Определение общей высоты насадки

Расчёт производим на базе Wolfram Mathematica.

Рассчитаем коэффициенты молекулярной диффузии в жидкой и паровой фазах

Коэффициенты диффузии в жидкости при 20 С [1] :

$$D_{x20} = \frac{10^{-6} \cdot \sqrt{\frac{1}{M_{\text{мет}}} + \frac{1}{M_{\text{форм}}}}}{A \cdot B \cdot \sqrt{\mu_x} \cdot \left(v_M^{\frac{1}{3}} + v_\Phi^{\frac{1}{3}} \right)^2}, \quad (25)$$

где А, В - коэффициенты, зависящие от свойств растворённого вещества и растворителя; v_M , v_Φ - мольные объёмы компонентов в жидком состоянии при температуре кипения; μ_x - вязкость жидкости [1];

$$v_M = \frac{M_{\text{мет}} \cdot 1000}{\rho_{\text{мет}}}$$

$$41.6341$$

$$v_\Phi = \frac{M_{\text{фор}} \cdot 1000}{\rho_{\text{фор}}}$$

$$\frac{3000}{97}$$

$$A = 1;$$

$$B = 1;$$

$$\rho_{20x} = 911;$$

$$D_{xв20} = \frac{10^{-6} \cdot \sqrt{\frac{1}{M_{\text{мет}}} + \frac{1}{M_{\text{фор}}}}}{A \cdot B \cdot \sqrt{\mu_{xв}} \cdot \left(v_M^{\frac{1}{3}} + v_\Phi^{\frac{1}{3}} \right)}$$

$$8.50223 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$$

$$D_{xн20} = \frac{10^{-6} \cdot \sqrt{\frac{1}{M_{\text{мет}}} + \frac{1}{M_{\text{фор}}}}}{A \cdot B \cdot \sqrt{\mu_{xн}} \cdot \left(v_M^{\frac{1}{3}} + v_\Phi^{\frac{1}{3}} \right)}$$

$$1.21674 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$$

Коэффициент диффузии в жидкости при средней температуре [1] :

$$D_x = D_{x20} \cdot (1 + b(t_{cp} - 20)) \quad (26)$$

Температурный коэффициент b равен :

$$b_v = 0.2 \cdot \frac{\sqrt{\mu_{xv}}}{\sqrt[3]{\sqrt{\rho_{20x}}}}$$

0.0290698

$$b_n = 0.2 \cdot \frac{\sqrt{\mu_{xn}}}{\sqrt[3]{\sqrt{\rho_{20x}}}}$$

0.0203131

Тогда:

$$D_{xv} = D_{xv20} \cdot (1 + b_v (t_{cp} - 20))$$

$$1.68438 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$$

$$D_{xn} = D_{xn20} \cdot (1 + b_n (t_{cp} - 20))$$

$$2.0509 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$$

Коэффициент диффузии в паровой фазе :

$$t_v = 52.25 \text{ C};$$

$$t_n = 55.25 \text{ C};$$

$$D_{ув} = \frac{4.22 \cdot 10^{-2} \cdot (t_v + 273)^{\frac{3}{2}}}{P \cdot 10^6 \cdot \left(\sigma_m^{\frac{1}{3}} + \sigma_\phi^{\frac{1}{3}} \right)^2} \cdot \sqrt{\frac{1}{M_{мет}} + \frac{1}{M_{фор}}}$$

$$0.0000360507 \text{ м}^2/\text{с}$$

$$D_{ун} = \frac{4.22 \cdot 10^{-2} \cdot (t_n + 273)^{\frac{3}{2}}}{P \cdot 10^6 \cdot \left(\sigma_m^{\frac{1}{3}} + \sigma_\phi^{\frac{1}{3}} \right)^2} \cdot \sqrt{\frac{1}{M_{мет}} + \frac{1}{M_{фор}}}$$

$$0.0000365506 \text{ м}^2/\text{с}$$

Критерий Прандля для жидкости:

$$Pr_{xv} = \mu_{xv} / (\rho_{xv} \cdot D_{xv})$$

$$1455.13$$

$$Pr_{xn} = \mu_{xn} / (\rho_{xn} \cdot D_{xn})$$

$$524.123$$

(27)

Критерий Прандля для пара:

$$Pr_{ув} = \mu_{ув} / (\rho_{ув} * D_{ув})$$

$$65.8766$$

$$Pr_{ун} = \mu_{ун} / (\rho_{ун} * D_{ун})$$

$$62.6734$$

(28)

Массовая плотность орошения:

$$L_{св} = \frac{L_B}{0.785 * Do_б^2}$$

(29)

$$0.609095$$

$$L_{сн} = \frac{L_H}{0.785 * Do_б^2}$$

$$1.89682$$

Приведённая толщина плёнки:

$$\delta_{вприв} = \left(\frac{\mu_{хв}^2}{\rho_{хв}^2 * g} \right)^{0.33}$$

(30)

$$0.00194857 \text{ м}$$

$$\delta_{нприв} = \left(\frac{\mu_{хн}^2}{\rho_{хн}^2 * g} \right)^{0.33}$$

$$0.00113099 \text{ м}$$

Критерий Рейнольдса:

$$Re_{хв} = \frac{4 * L_{св}}{a * \mu_{хв}}$$

$$0.0699787$$

$$Re_{хн} = \frac{4 * L_{сн}}{a * \mu_{хн}}$$

$$0.446309$$

(31)

Высота единицы переноса в жидкой фазе [1]:

$$h_x = 0,258 \Phi c Pr_x^{0,5} Z^{0,15},$$

(32)

где c и Φ — коэффициенты, определяемые из экспериментальных зависимостей, приведенных в справочной литературе; Z — высота слоя

насадки, которая из условия прочности опорной решетки и нижних слоев насадки, а также из условия равномерности распределения жидкости по насадке не должна превышать 3 м.

Высота единицы переноса в паровой фазе [1]:

$$h_y = \frac{0,0175 \psi \text{Pr}_y^{0,5} d^{1,24} Z^{0,33}}{(L_s f_1 f_2 f_3)^{0,6}}, \quad (33)$$

где y — коэффициент, определяемый из экспериментальных зависимостей, приведенных в справочной литературе; d — диаметр колонны, м.

$$f_1 = \mu_x^{0,16}; f_2 = (1000 / \rho_x)^{1,25}; f_3 = (72,8 \cdot 10^{-3})^{0,8} / \sigma, \quad (34)$$

где σ - поверхностное натяжение, Н/м.

$$\Phi = 0.1;$$

$$\psi = 10;$$

$$c = 0.3;$$

$$\sigma = 19.7 \cdot 10^{-3};$$

$$Z = 3; (*\text{высота насадки}*)$$

$$f1H = \mu_{xH}^{0.16}$$

$$0.691831$$

$$f2B = (1000 / \rho_{xB})^{1.25}$$

$$1.25174$$

$$f3 = (72.8 \cdot 10^{-3})^{0.8} / \sigma$$

$$6.24078$$

Высота единиц переноса в жидкой фазе для верха и низа колонны соответственно:

$$h_{xB} = 0.258 \cdot \Phi \cdot c \cdot \text{Pr}_{xB}^{0.5} \cdot Z^{0.15}$$

$$0.348145 \text{ м}$$

$$h_{xH} = 0.258 \cdot \Phi \cdot c \cdot \text{Pr}_{xH}^{0.5} \cdot Z^{0.15}$$

$$0.208942 \text{ м}$$

Высота единиц переноса в паровой фазе для верха и низа колонны соответственно:

$$h_{ув} = \frac{0.0175 * \psi * Pr_{ув}^{0.5} * Doб * Z^{0.33}}{(L_{св} * f1в * f2в * f3)^{0.6}}$$

2.61012 м

$$h_{ун} = \frac{0.0175 * \psi * Pr_{ун}^{0.5} * Doб * Z^{0.33}}{(L_{сн} * f1н * f2н * f3)^{0.6}}$$

1.49519 м

Число единиц переноса, определяемое из рисунка 3:

- для верхней части колонны:

$$nв = 9$$

- для нижней части колонны:

$$nн = 4$$

Тогда высота единиц переноса равна:

- для верхней части колонны:

$$mв = 0.673 (*\text{Усреднённое значение тангенса угла наклона касательной для верхней части колонны}*)$$

$$0.673$$

$$h_{оув} = h_{ув} + mв * Gв * h_{хв} / Lв$$

2.55599 м.

- для нижней части колонны:

$$mн = 2.01 (*\text{Усреднённое значение тангенса угла наклона касательной для нижней части колонны}*)$$

$$2.01$$

$$h_{оун} = h_{ун} + mн * Gн * h_{хн} / Lн$$

1.39027 м

Высота насадки в верхней части колонны :

$$Hв = h_{оув} * nв$$

23.6039 м

Высота насадки в нижней части колонны:

$$H_n = h_{оун} + n_n$$

5.76108 м

Общая высота насадки в колонне:

$$H_{обн} = H_v + H_n \quad (35)$$

29.365 м

Примем общую высоту насадки $H_{обн} = 30$ м. В целом получается 10 секций по 3 метра насадки на каждой, расположенных на 1000 мм каждая друг от друга. В общем, включая сюда ещё расстояние от нижней опорной тарелки до днища, равное 4 м, и расстояние от верхней насадки до крышки, тоже равное 4 м, получается высота примерно равная 52 метрам.

То есть общая высота колонны равна:

$$H_k = 30 + 10 \cdot 1 + 4 + 4 = 48 \text{ м.} \quad (36)$$

2.6 Определение толщины тепловой изоляции

Целью расчета тепловой изоляции является определение толщины слоя теплоизоляционного материала, покрывающего наружную поверхность ректификационной колонны с целью снижения тепловых потерь и обеспечения требований безопасности и охраны труда при обслуживании теплоиспользующих установок. С этой точки зрения температура поверхности слоя изоляции не должна превышать 45° . Расчет толщины теплоизоляционного слоя материала можно проводить по упрощенной схеме, используя следующее уравнение:

$$\delta_{из} = \frac{\lambda_{из} \cdot (t_{cm} - t_{из})}{\alpha_n \cdot (t_{из} - t_{окр})}; \quad [1, \text{стр.368}] \quad (37)$$

где $\lambda_{из}$ - коэффициент теплопроводности изоляционного слоя; t_{cm} - температура наружной стенки корпуса; $t_{из}$ - температура поверхности изоляционного слоя; α_n - коэффициент теплоотдачи, определяющий суммарную скорость переноса теплоты конвекцией и тепловым излучением.

$$\alpha_n = 9,3 + 0,058 \cdot t_{cm};$$

В качестве материала изоляции выбираем совелит с $\lambda_{из} = 0,098 \text{ Вт/м} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К}$

Температуру стенки t_{cm} - принимаем равной 110°C . Температуру

изоляционного слоя примем равной 10°C . [1] Температуру окружающей среды принимаем 0°C . (среднегодовая температура).

Тогда:

$$\alpha_H = 9,3 + 0,058 \cdot 10 = 9,88 \text{ Вт/м}^2\text{К}$$

$$\delta_{из} = \frac{0,098 \cdot (110 - 10)}{9,88 \cdot (10 - 0)} = 0,099 \text{ м} \approx 100 \text{ мм}$$

Принимаем толщину тепловой изоляции равной 100 мм.

3. Конструктивно-механический расчет установки

3.1 Расчет толщины стенки цилиндрической обечайки

Исходные данные:

$P_{\text{раб}}=0.04$ МПа – рабочее давление в аппарате

$H=52$ м – высота аппарата

$\rho=1000$ кг/м³ – плотность воды

$g=9.81$ м/с² – ускорение свободного падения

$P=0.1$ мм/год – скорость коррозии

$\tau=30$ лет – срок эксплуатации аппарата

$t_{\text{ст}}=110$ °С – температура стенки аппарата

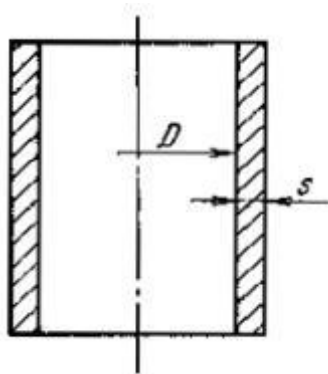


Рисунок 9. Цилиндрическая обечайка

Расчёт:

Расчет толщины стенки обечайки проводим по ГОСТ Р 52857.2-2007.[6]

Согласно ГОСТ Р 52857.1-2007 пункт 6.2 стр. 4, расчётное давление должно учитывать внутреннее давление, гидростатическое давление от среды, содержащейся в сосуде. То есть расчётное давление будет равно:

$$P_{\text{расч}}=P_{\text{раб}} + P_{\text{гид}}, \text{ где } P_{\text{гид}} - \text{гидростатическое давление среды.} \quad (38)$$

$$P_{\text{гид}}= \rho g H=0,52 \text{ МПа.}$$

$$P_{\text{расч}}=P_{\text{раб}} + P_{\text{гид}}= 0,04+0,52=0,56 \text{ МПа}$$

Согласно ГОСТ Р 52630 – 2012 пункт 8.11.3 стр. 38, пробное давление при гидравлическом испытании сосудов вычисляют по формуле:

$$P_{\text{исп}}=1,25 \cdot P_{\text{расч}} \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]_t} \quad (39)$$

Т.к. среда является агрессивной и токсичной, то принимаем материал стали 12Х18Н10Т.

Определим допускаемое напряжение при $t_{ст}=110^{\circ}\text{C}$.

Допускаемое напряжение определяем линейной интерполяцией из Таблицы А.3 ГОСТ Р 52857.1-2007 стр. 11., используя пункт 2 примечание этой таблицы [7]:

$$t := (100 \quad 150)^T$$

$$t_{ст} = 110^{\circ}\text{C}$$

$$\sigma := (174 \quad 168)^T$$

$$\sigma := \text{Floor}(\text{interp}(t, \sigma, t_{ст}), 0.5) = 172.5 \text{ МПа}$$

В соответствии с пунктом 3 приложения Таблицы А.3 ГОСТ Р 52857.1-2007 стр. 12 примем допускаемое напряжение $\sigma_{доп}$:

$$\sigma_{доп} := \sigma \cdot 0.83 = 143.175 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{доп} := \text{Floor}(\sigma_{доп}, 0.5) = 143 \text{ МПа}$$

Допускаемое напряжение для стали 12Х18Н10Т при температуре 20°C :
 $[\sigma]_{20}=184 \text{ МПа}$ (Таблица А.3 ГОСТ Р 52857.1-2007, стр.11).

Тогда давление гидроиспытания будет равно:

$$P_{исп} = 1,25 \cdot P_{расч} \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]_t} = 1,25 \cdot 0,56 \frac{184}{143} = 0,9 \text{ МПа}$$

Допускаемое напряжение для условий испытания определяем по формуле, согласно ГОСТ Р 52857.1-2007, стр.5:

$$[\sigma] = \eta \cdot \left(\frac{R_{p1,0/20}}{n_T} \right), \text{ где} \quad (40)$$

$\eta=1$ (в соответствии с ГОСТ Р 52857.1-2007 пункт 8.3 стр.6) Согласно таблице Б.7 примечания ГОСТ Р 52857.1-2007 стр. 16, для поковок из стали марки 12Х18Н10Т следует принять:

$$\frac{R_{p1,0/20}}{n_T} = \frac{R_{p1,0/20}}{1,2}, \text{ где } R_{p1,0/20} - \text{предел текучести стали, } n_T - \text{коэффициент запаса по}$$

пределу текучести ($n_T=1.2$).

Тогда:

$$[\sigma]_{\text{доп.и}} = \eta \cdot \left(\frac{R_{p1,0/20}}{n_T} \right) = 1 \cdot \frac{276}{1,2} = 230 \text{ МПа}$$

Согласно ГОСТ Р 52857.2-2007 пункт 5.3.1 стр.6, толщина стенки обечайки, нагруженной внутренним избыточным давлением определяется по формуле:

$$S_{\text{расч}} = \frac{D_B p}{2[\sigma] \varphi_{ш} - p} ; S_{\text{исп}} = S_{\text{расч}} + c, \text{ где} \quad (41)$$

c - прибавка к расчетной толщине на коррозию. $c = l \cdot \tau = 30 \cdot 0,1 = 3 \text{ мм} = 0,003 \text{ м}$;
 $\varphi_{ш} = 1$ (в соответствии с ГОСТ Р 52857.1-2007 приложения Д таблицы Д.1 стр.22). Тогда

Номинальную расчетную толщину стенки обечайки для данного отношения определяем по формуле:

$$s_{\text{расч.}} := \max \left(\frac{P_{\text{расч}} \cdot D}{2 \cdot \sigma_{\text{доп.}} \cdot \varphi - P_{\text{расч}}}, \frac{P_{\text{исп.}} \cdot D}{2 \cdot \sigma_{\text{доп.и}} \cdot \varphi - P_{\text{исп.}}} \right) = 5,493 \text{ мм} \quad (42)$$

$$S_{\text{исп}} = 5,493 + 3 = 8,493 \text{ мм}$$

Принимаем $S_{\text{исп}} = 10 \text{ мм}$.

Допускаемое внутреннее избыточное давление (ГОСТ Р 52857.2-2007 пункт 5.3.1 стр.6):

- для рабочих условий:

$$P_{\text{доп}} := \frac{2 \cdot \sigma_{\text{доп.}} \cdot \varphi \cdot (s_{\text{исп.}} - c)}{D + (s_{\text{исп.}} - c)} = 0,713 \text{ МПа} \quad (43)$$

- для условий испытания:

$$P_{\text{доп.и}} := \frac{2 \cdot \sigma_{\text{доп.и}} \cdot \varphi \cdot (s_{\text{исп.}} - c)}{D + (s_{\text{исп.}} - c)} = 1,147 \text{ МПа} \quad (44)$$

Для обечаек с диаметром больше 200 мм должно выполняться условие (в соответствии с ГОСТ Р 52857.2-2007 пункт 5.2 стр.5):

Условие применения расчётных формул:

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

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

Проверим выполнение условия прочности:

$$Us2 := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } P_{\text{расч}} \leq P_{\text{доп}} \\ \text{"Условие прочности НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$Us2 = \text{"Условие прочности выполняется"}$

$$Us3 := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } P_{\text{исп.}} \leq P_{\text{доп.}} \\ \text{"Условие прочности НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$Us3 = \text{"Условие прочности выполняется"}$

То есть при толщине стенки обечайки 10 мм прочность обеспечивается как в рабочих условиях, так и в условиях испытания.

3.2 Расчет толщины стенки днища и крышки

Наиболее рациональной формой крышек и днищ аппаратов является эллиптическая. Эллиптические днища и крышки изготавливаются из листового проката штамповкой и могут использоваться в аппаратах с избыточным давлением до 10 МПа.

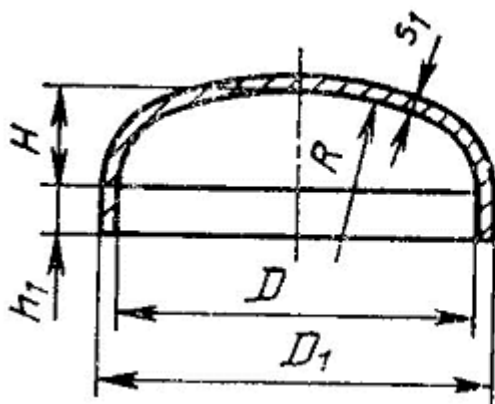


Рисунок 10. Эллиптическое днище

Толщина стенки днища определяется по формуле (ГОСТ Р 52857.2-2007 пункт 6.3 стр.14) [5]:

$$S_{исп} = \frac{R \cdot p}{2[\sigma]_{\varphi_{из}} - 0.5p}; S_{исп} = S_{расч} + c, \text{ где} \quad (45)$$

R – радиус кривизны в вершине днища. В данном случае R = D, так как высота эллиптического днища H=0,25D. (ГОСТ Р 52857.2-2007 пункт 6.3.1.3 стр.14)

Для днищ, изготовленных из целой заготовки (без сварочной операции), коэффициент $\varphi = 1$. (ГОСТ Р 52857.2-2007 пункт 6.3.1.5 стр.15)

Тогда:

$$s_{д.расч} := \max \left(\frac{P_{расч} \cdot R}{2 \cdot \sigma_{доп} \cdot \varphi - 0.5 P_{расч}}, \frac{P_{исп.} \cdot R}{2 \cdot \sigma_{доп.и} \cdot \varphi - 0.5 P_{исп.}} \right) = 5.488 \text{ мм} \quad (46)$$

$$S_{исп} = 5,488 + 3 = 8,488 \text{ мм}$$

Примем $S_{д.исп} = 10 \text{ мм}$.

Допускаемое внутреннее избыточное давление (ГОСТ Р 52857.2-2007 пункт 6.3.1 стр.14):

- для рабочих условий:

$$P_{д.доп} := \frac{2 \cdot \sigma_{доп.} \cdot \varphi \cdot (s_{д.исп} - c)}{R + (s_{д.исп} - c)} = 0.713 \text{ МПа} \quad (47)$$

- для условий испытания:

$$P_{д.доп.} := \frac{2 \cdot \sigma_{доп.и} \cdot \varphi \cdot (s_{д.исп} - c)}{R + (s_{д.исп} - c)} = 1.147 \text{ МПа} \quad (48)$$

Проверка условий применимости формул:

$$Us4 := \begin{cases} \text{"Условие применимости формул выполняется"} & \text{if } 0.002 \leq \frac{s_{д.исп} - c}{D} \leq 0.1 \\ \text{"Условие применимости формул НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Us4 = \text{"Условие применимости формул выполняется"}$$

$$Us4_2 := \begin{cases} \text{"Условие применимости формул выполняется"} & \text{if } 0.002 \leq \frac{H}{D} \leq 0.5 \\ \text{"Условие применимости формул НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$Us4_2 = \text{"Условие применимости формул выполняется"}$

Проверим выполнение условия прочности:

$$Us5 := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } P_{\text{расч}} \leq P_{\text{д.доп}} \\ \text{"Условие прочности НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$Us5 = \text{"Условие прочности выполняется"}$

$$Us6 := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } P_{\text{исп.}} \leq P_{\text{д.доп.}} \\ \text{"Условие прочности НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$Us6 = \text{"Условие прочности выполняется"}$

То есть при толщине стенки днища 10 мм прочность обеспечивается как в рабочих условиях, так и в условиях испытания.

Подбираем стандартные стальные отбортованные днище и крышку по ГОСТ 6533-78 таблица 2 стр.17:

Внутренний диаметр – $D=2800$ мм

Толщина стенки - $S_{\text{д.исп}} = 10$ мм

Длина цилиндрической отбортованной части днища – $h_1=60$ мм

Внутренняя поверхность – $F=9,03$ м²

Объем днища – $V=3229,8$ дм³

Масса – $m_{\text{д}}=714,8$ кг

3.3 Расчёт диаметров штуцеров

Подсоединение трубопроводов к сосудам и аппаратам осуществляется с помощью вводных труб или штуцеров. Исходя из условий ректификации, примем для аппарата штуцера с приварным плоским фланцем и тонкостенным патрубком.

Расчёт штуцеров сводится к определению диаметра штуцера по уравнению расхода:

$$d = \sqrt{4 \cdot G / \pi \cdot \rho \cdot w} \quad [4, \text{стр. 231}] \quad (49)$$

где w - скорость, для жидкости принимаем 1,5 м/с, для пара – 20 м/с [2].

Штуцер для ввода исходной смеси:

$$d_{\text{шт.исх}} := \sqrt{\frac{4 \cdot G_{\text{F}}}{\pi \cdot \rho_{\text{ср.ж}} \cdot w_{\text{ж}}}} = 0.07 \quad \text{мм}$$

По АТК 24.218.06-90 примем патрубок с условным проходом $D_y=65$ мм

Штуцер для ввода флегмы:

$$d_{\text{шт.фл}} := \sqrt{\frac{4 \cdot G_{\text{P}} \cdot R_{\text{опт}}}{\pi \cdot \rho_{\text{ср.ж}} \cdot w_{\text{ж}}}} = 0.048 \quad \text{мм}$$

По АТК 24.218.06-90 примем патрубок с условным проходом $D_y=65$ мм.

Штуцер для отвода кубового остатка:

$$d_{\text{шт.отвод.куб}} := \sqrt{\frac{4 \cdot G_{\text{W}} \cdot 2}{\pi \cdot \rho_{\text{ф}} \cdot w_{\text{ж}}}} = 0.081 \quad \text{мм}$$

По АТК 24.218.06-90 примем патрубок с условным проходом $D_y=100$ мм.

Штуцер для вывода паров дистиллята:

$$d_{\text{шт.дис}} := \sqrt{\frac{4 \cdot (R_{\text{опт}} + 1) \cdot G_{\text{P}}}{\pi \cdot \rho_{\text{ср.п}} \cdot w_{\text{п}}}} = 0.557$$

По АТК 24.218.06-90 примем патрубок с условным проходом $D_y=600$ мм.

Штуцер для ввода паров кубовой смеси:

$$G := G_{\text{W}} \cdot (R_{\text{опт}} + 1) = 19.467 \quad \text{кг/с}$$

$$V := \frac{G}{\rho_{\text{ср.п}}} = 16.826 \quad \text{м}^3/\text{с}$$

$$d_{\text{шт.ввод.куб}} := \sqrt{\frac{4 \cdot V}{\pi \cdot w_{\text{п}}}} = 1.035 \quad \text{мм}$$

По АТК 24.218.06-90 примем патрубок с условным проходом $D_y = 1000$ мм.

Для рассчитанных значений D_y патрубков принимаем стандартные размеры болтов и фланца, рекомендуемые по ГОСТ 12817-80. В качестве материала прокладок выберем асбестовый картон.

3.4 Расчёт узла сопряжения оболочек

Цель расчета: определить напряжение в сопряжении цилиндрической оболочки с эллиптическим днищем в условиях нагружения внутренним давлением.

Расчетная схема к определению краевых сил и моментов приведена на рисунке

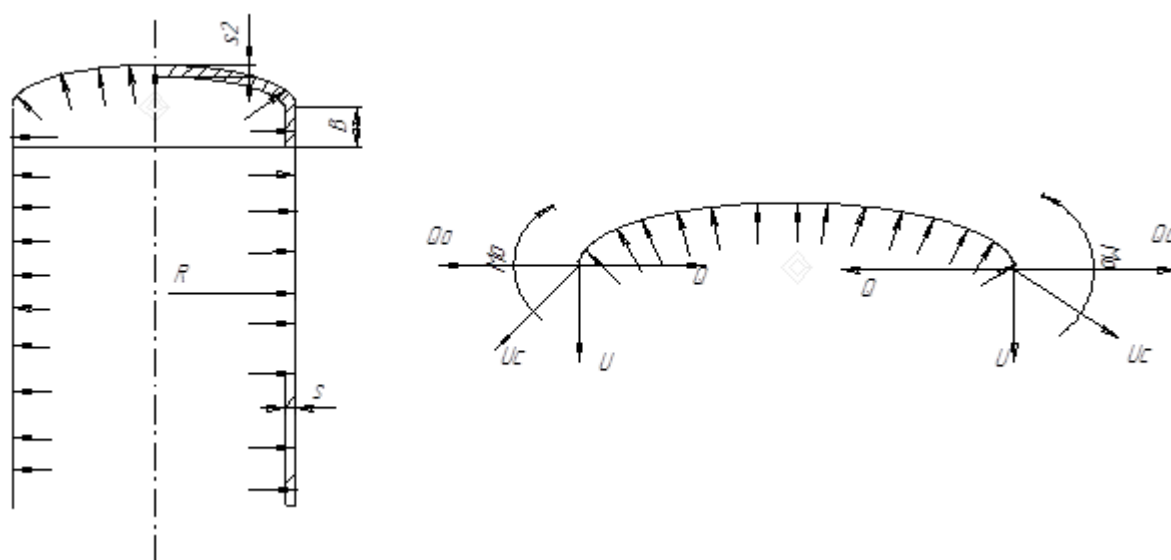


Рисунок 11. Схема сопрягаемых оболочек

Определим краевые силы и моменты из уравнения совместимости деформаций для места стыка обечайки с эллиптическим днищем

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{ц}} - \Delta Q_{0,\text{ц}} + \Delta M_{0,\text{ц}} &= \Delta P_{\text{э}} + \Delta Q_{0,\text{э}} + \Delta M_{0,\text{э}} \\ \theta P_{\text{ц}} - \theta Q_{0,\text{ц}} + \theta M_{0,\text{ц}} &= -\theta P_{\text{э}} - \theta Q_{0,\text{э}} - \theta M_{0,\text{э}} \end{aligned} \quad , \quad (50)$$

где $\Delta P_{\text{ц}}$, $\Delta Q_{0,\text{ц}}$, $\Delta M_{0,\text{ц}}$, $\theta P_{\text{ц}}$, $\theta Q_{0,\text{ц}}$, $\theta M_{0,\text{ц}}$ - соответственно радиальные и угловые перемещения края цилиндрической оболочки под действием нагрузок P , Q_0 , M_0 ; $\Delta P_{\text{э}}$, $\Delta Q_{0,\text{э}}$, $\Delta M_{0,\text{э}}$, $\theta P_{\text{э}}$, $\theta Q_{0,\text{э}}$, $\theta M_{0,\text{э}}$ - соответственно радиальные и угловые перемещения края эллиптической оболочки под действием нагрузок P , Q_0 , M_0 .

Подставляем в уравнение соответствующие значения деформаций [8, стр. 57]:

$$\begin{aligned}
& \frac{(2-\mu) \cdot (R_{\cdot})^2 \cdot P_{\text{расч}}}{2 \cdot E_{\cdot} \cdot 10^5 \cdot (s_{\cdot \text{исп.}} - c)} - \frac{2 \cdot \beta \cdot R_{\cdot}^2}{(s_{\cdot \text{исп.}} - c) \cdot E_{\cdot} \cdot 10^5} \cdot Q_0 + \frac{2 \cdot \beta^2 \cdot R_{\cdot}^2}{10^5 \cdot E_{\cdot} \cdot (s_{\cdot \text{исп.}} - c)} \cdot M_0 = \\
& = \frac{(a_{\cdot})^2 \cdot P_{\text{расч}}}{2 \cdot E_{\cdot} \cdot 10^5 \cdot (s_{\cdot \text{исп.э}} - c)} \cdot \left(2 - \mu - \frac{a_{\cdot}^2}{b_{\cdot}^2} \right) + \frac{2 \cdot \beta_{\cdot \text{э}} \cdot a_{\cdot}^2}{(s_{\cdot \text{исп.э}} - c) \cdot E_{\cdot} \cdot 10^5} \cdot Q_0 + \frac{2 \cdot \beta_{\cdot \text{э}}^2 \cdot a_{\cdot}^2}{E_{\cdot} \cdot 10^5 \cdot (s_{\cdot \text{исп.э}} - c)} \cdot M_0 \\
& 0 - \frac{2 \cdot \beta^2 \cdot R_{\cdot}^2}{(s_{\cdot \text{исп.}} - c) \cdot E_{\cdot} \cdot 10^5} \cdot Q_0 + \frac{4 \cdot \beta^3 \cdot R_{\cdot}^2}{E_{\cdot} \cdot 10^5 \cdot (s_{\cdot \text{исп.}} - c)} \cdot M_0 = \\
& = -0 + \frac{2 \cdot \beta_{\cdot \text{э}}^2 \cdot a_{\cdot}^2}{(s_{\cdot \text{исп.э}} - c) \cdot E_{\cdot} \cdot 10^5} \cdot Q_0 + \frac{4 \cdot \beta_{\cdot \text{э}}^3 \cdot a_{\cdot}^2}{E_{\cdot} \cdot 10^5 \cdot (s_{\cdot \text{исп.э}} - c)} \cdot M_0
\end{aligned}$$

где $\mu=0,3$ (Коэффициент Пуассона)

$$\beta := \frac{\sqrt[4]{3 \cdot (1 - \mu^2)}}{\sqrt{R_{\cdot} \cdot (s_{\cdot \text{исп.}} - c)}} = 0.013 \quad \beta_{\cdot \text{э}} := \beta \quad s_{\cdot \text{исп.э}} := s_{\cdot \text{исп.}}$$

$$a := R_{\cdot} \quad b := \frac{D}{4} = 700 \text{ мм}$$

$$\Delta P_{\cdot \text{ц}} := \frac{(2-\mu) \cdot (R_{\cdot})^2 \cdot P_{\text{расч}}}{2 \cdot E_{\cdot} \cdot 10^5 \cdot (s_{\cdot \text{исп.}} - c)} = 0.667$$

$$\Delta P_{\cdot \text{э}} := \frac{(a_{\cdot})^2 \cdot P_{\text{расч}}}{2 \cdot E_{\cdot} \cdot 10^5 \cdot (s_{\cdot \text{исп.э}} - c)} \cdot \left(2 - \mu - \frac{a_{\cdot}^2}{b_{\cdot}^2} \right) = -0.903$$

$$\Delta Q_{0, \cdot \text{ц}} := \frac{2 \cdot \beta \cdot R_{\cdot}^2}{(s_{\cdot \text{исп.}} - c) \cdot E_{\cdot} \cdot 10^5} \quad \Delta Q_{0, \cdot \text{э}} := \frac{2 \cdot \beta_{\cdot \text{э}} \cdot a_{\cdot}^2}{(s_{\cdot \text{исп.э}} - c) \cdot E_{\cdot} \cdot 10^5}$$

$$\Delta M_{0, \cdot \text{ц}} := \frac{2 \cdot \beta^2 \cdot R_{\cdot}^2}{10^5 \cdot E_{\cdot} \cdot (s_{\cdot \text{исп.}} - c)} \quad \Delta M_{0, \cdot \text{э}} := \frac{2 \cdot \beta_{\cdot \text{э}}^2 \cdot a_{\cdot}^2}{E_{\cdot} \cdot 10^5 \cdot (s_{\cdot \text{исп.э}} - c)}$$

$$\theta P_{\Pi} := 0$$

$$\theta P_{\Xi} := 0$$

$$\theta Q_{0,\Pi} := \frac{2 \cdot \beta^2 \cdot R_{\cdot}^2}{(s_{\cdot, \text{исп.}} - c) \cdot E_{\cdot} \cdot 10^5}$$

$$\theta Q_{0,\Xi} := \frac{2 \cdot \beta_{\Xi}^2 \cdot a^2}{(s_{\cdot, \text{исп.}\Xi} - c) \cdot E_{\cdot} \cdot 10^5}$$

$$\theta Q_{0,\Pi} := \frac{2 \cdot \beta^2 \cdot R_{\cdot}^2}{(s_{\cdot, \text{исп.}} - c) \cdot E_{\cdot} \cdot 10^5}$$

$$\theta Q_{0,\Xi} := \frac{2 \cdot \beta_{\Xi}^2 \cdot a^2}{(s_{\cdot, \text{исп.}\Xi} - c) \cdot E_{\cdot} \cdot 10^5}$$

$$\theta M_{0,\Pi} := \frac{4 \cdot \beta^3 \cdot R_{\cdot}^2}{E_{\cdot} \cdot 10^5 \cdot (s_{\cdot, \text{исп.}} - c)}$$

$$\theta M_{0,\Xi} := \frac{4 \cdot \beta_{\Xi}^3 \cdot a^2}{E_{\cdot} \cdot 10^5 \cdot (s_{\cdot, \text{исп.}\Xi} - c)}$$

$$Q_0 := 0 \quad M_{\cdot,0} := 0$$

Given

$$\Delta P_{\Pi} - \Delta Q_{0,\Pi} \cdot Q_0 + \Delta M_{0,\Pi} \cdot M_{\cdot,0} = \Delta P_{\Xi} + \Delta Q_{0,\Xi} \cdot Q_0 + \Delta M_{0,\Xi} \cdot M_{\cdot,0}$$

$$\theta P_{\Pi} - \theta Q_{0,\Pi} \cdot Q_0 + \theta M_{0,\Pi} \cdot M_{\cdot,0} = -\theta P_{\Xi} - \theta Q_{0,\Xi} \cdot Q_0 - \theta M_{0,\Xi} \cdot M_{\cdot,0}$$

$$V_{\cdot} := \text{Find}(Q_0, M_{\cdot,0}) = \begin{pmatrix} 21.564 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$Q_0 := V_{\cdot,0} = 21.564$$

$$M_{\cdot,0} := V_{\cdot,1} = 0$$

$$Q_0 = 21.564 \text{ МН/м}$$

$$M_{\cdot,0} = 0 \text{ Н·м}$$

Определим суммарные напряжения на краю эллиптического днища, меридиальное и кольцевое соответственно по формулам:

$$\sigma_{m\Xi} = \sigma_{P.m\Xi} + \sigma_{Q.0m\Xi} + \sigma_{M.0m\Xi}$$

$$\sigma_{t\Xi} = \sigma_{P.t\Xi} + \sigma_{Q.0t\Xi} + \sigma_{M.0t\Xi}$$

(51)

Где $\sigma_{P.m\Xi}$, $\sigma_{Q.0m\Xi}$, $\sigma_{M.0m\Xi}$ - соответственно меридиальные напряжения действующие от нагрузок P, Q0, M0; $\sigma_{P.t\Xi}$, $\sigma_{Q.0t\Xi}$, $\sigma_{M.0t\Xi}$ - соответственно кольцевые напряжения действующие от нагрузок P, Q0, M0.

$$\sigma_{m\Xi} := \frac{P_{\text{расч}} \cdot a}{2 \cdot (s_{\cdot, \text{исп.}\Xi} - c)} + 0 + \frac{6 \cdot M_{\cdot,0}}{(s_{\cdot, \text{исп.}\Xi} - c)^2} = 56 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{tэ} := \frac{P_{расч} \cdot a \cdot \left(2 - \frac{a^2}{b^2}\right)}{2 \cdot (s_{исп.э} - c)} + \frac{2 \cdot Q_0 \cdot \beta_э \cdot a}{s_{исп.э} - c} + \frac{2 \cdot M_{,0} \cdot \beta_э^2 \cdot a}{s_{исп.э} - c} + \frac{6 \cdot \mu \cdot M_{,0}}{(s_{исп.э} - c)^2} = -1.705 \times 10^{-13} \text{ МПа}$$

Определим суммарные напряжения на краю цилиндрической обечайки, меридиальное и кольцевые соответственно

$$\begin{aligned}\sigma_{m0} &= \sigma_{P.m0} + \sigma_{Q.0m0} + \sigma_{M.0m0} \\ \sigma_{t0} &= \sigma_{P.t0} + \sigma_{Q0.t0} + \sigma_{M.0t0}\end{aligned} \quad (52)$$

Где $\sigma_{P.m0}$, $\sigma_{Q.0m0}$, $\sigma_{M.0m0}$ - соответственно меридиальные напряжения действующие от нагрузок P, Q0, M0; $\sigma_{P.t0}$, $\sigma_{Q.0t0}$, $\sigma_{M.0t0}$ - соответственно кольцевые напряжения действующие от нагрузок P, Q0, M0.

$$\sigma_{m0} := \frac{P_{расч} \cdot R}{2 \cdot (s_{исп.э} - c)} + 0 + \frac{6 \cdot M_{,0}}{(s_{исп.э} - c)^2} = 112 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{t0} := \frac{P_{расч} \cdot R}{(s_{исп.э} - c)} - \frac{(2 \cdot Q_0) \cdot \beta \cdot R}{s_{исп.э} - c} + \frac{2 \cdot M_{,0} \cdot \beta^2 \cdot R}{s_{исп.э} - c} + \frac{6 \cdot \mu \cdot M_{,0}}{(s_{исп.э} - c)^2} = 3.411 \times 10^{-13} \text{ МПа}$$

Определим максимальное напряжение на краю эллиптического днища и цилиндрической обечайке соответственно

$$\begin{aligned}\sigma_{maxэ} &:= \max(\sigma_{mэ}, \sigma_{tэ}) \\ \sigma_{maxэ} &= 56\end{aligned}$$

Допускаемое напряжение на краю элемента:

$$\sigma_{кр} := 1.3 \cdot \sigma_{доп.} = 185.9$$

Такое увеличение $\sigma_{кр.}$ связано с локальным характером краевых напряжений, приводящих к образованию по линии искажения пластического шарнира, исключающего разрушения узла сопряжения.

Проверка условий:

$$Us7 := \begin{cases} \text{"Условие выполняется"} & \text{if } \sigma_{\max} < \sigma_{\text{кр}} \\ \text{"Условие НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Us7 = \text{"Условие выполняется"}$$

$$\sigma_{\max0} := \max(\sigma_{m0}, \sigma_{t0})$$

$$\sigma_{\max0} = 112$$

$$Us8 := \begin{cases} \text{"Условие выполняется"} & \text{if } \sigma_{\max0} < \sigma_{\text{кр}} \\ \text{"Условие НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Us8 = \text{"Условие выполняется"}$$

В результате расчёта получили, что прочность узла сопряжения оболочек обеспечена.

3.5 Расчет цилиндрической опоры

Установка химических аппаратов на фундаменты или специальные несущие конструкции осуществляется большей частью с помощью опор. Аппараты вертикального типа с соотношением $H/D > 5$, размещаемые на открытых площадках, оснащают так называемыми цилиндрическими опорами [15].

Так, $\frac{H}{D} = \frac{52}{2.8} = 18.6 > 5 \Rightarrow$ в качестве опоры для данного аппарата вертикального типа выберем цилиндрическую опору.

Ориентировочная масса аппарата.

Масса обечайки:

$$m_{об} = 0,785 \cdot (D_{нар}^2 - D_{вн}^2) \cdot H_{об} \cdot \rho, \quad (38)$$

где $D_n = 2.820$ м – наружный диаметр колонны;

$D_{вн} = 2.8$ м – внутренний диаметр колонны;

$H_{об} = 50.72$ м – высота цилиндрической части колонны;

$\rho = 7900$ кг/м³ – плотность стали;

$$m_{об} = 0,785 \cdot (2,820^2 - 2.8^2) \cdot 50.72 \cdot 7900 = 35354.3 \text{ кг};$$

Масса насадки:

$m = 349.7$ кг – масса одной насадки с опорной тарелкой;

$$m_{\text{общ.тар}} = m \cdot N = 349.7 \cdot 12 = 4196,4 \text{ кг}; \quad (39)$$

Общая масса колонны.

Принимаем, что масса вспомогательных устройств (штуцеров, измерительных приборов, люков и т.д.) составляет 10% от основной массы колонны, тогда

$$m_k = m_{\text{об}} + m_m + 2m_d = 1,1(35354,3 + 4196,4 + 2 \cdot 714,8) = 45078,33 \text{ кг}$$

Рассчитаем массу колонны заполненной водой при гидроиспытании.

Масса воды при гидроиспытании:

$$m_g = 1000 \cdot (0,785 \cdot D^2 \cdot H + 2 \cdot V_d) = 1000 \cdot (0,785 \cdot 2,8^2 \cdot 50,72 + 2 \cdot 3,2298) = 318610,8 \text{ кг};$$

Максимальный вес колонны:

$$m_{\text{max}} = m_k + m_g = 45078,33 + 318610,8 = 322689,13 \text{ кг} = 3,23 \text{ МН}; \quad (40)$$

Принимаем внутренний диаметр опорного кольца $D_1 = 2,65$ м, наружный диаметр опорного кольца $D_2 = 3$ м.

Площадь опорного кольца

$$A = 0,785(D_2^2 - D_1^2) = 0,785(3^2 - 2,65^2) = 1,758 \text{ м}^2$$

Удельная нагрузка опоры на фундамент:

$$\sigma = \frac{Q}{A} = \frac{3,23}{1,758} = 1,84 \text{ МПа} < [\sigma] = 15 \text{ МПа} - \text{для бетонного фундамента.} \quad (41)$$

Выбираем опору для вертикального цилиндрического аппарата - тип I по АТК 24.200.04-90.

3.6 Расчёт укрепления отверстий

Исходные данные:

Внутренний диаметр цилиндрической обечайки или выпуклого днища: $D_k = 2800$ мм;

Внутренний диаметр штуцера: $d_{\text{шт.ввод.куб.}} = 600$ мм;

Расчётное давление в аппарате: $P_{\text{расч.}} = 0,56$ МПа;

Расчётная температура стенки аппарата: $t_{\text{ст.}} = 110$ °С;

Материал корпуса аппарата, штуцера и накладного кольца: 12X18M10T;

Допускаемое напряжение для материала обечайки при расчётной температуре:

$$\sigma_{\text{доп.}} = 143 \text{ МПа};$$

Допускаемое напряжение для материала накладного кольца при расчётной температуре: $\sigma_{\text{доп.к}} = \sigma_{\text{доп.}}$

Допускаемое напряжение для материала внешней части штуцера при расчётной температуре: $\sigma_{\text{доп.внеш.к}} = \sigma_{\text{доп.}}$

Допускаемое напряжение для материала внутренней части штуцера при расчётной температуре: $\sigma_{\text{доп.вн.щ}} = \sigma_{\text{доп.}}$

Исполнительная длина внешней части штуцера: $l_1 = 300 \text{ мм}$

Исполнительная ширина накладного кольца: $l_2 = 100 \text{ мм}$

Исполнительная длина внутренней части штуцера: $l_3 = 15 \text{ мм}$

Исполнительная толщина накладного кольца: $S_{\text{расч.к}} = 10 \text{ мм}$

Толщина стенки штуцера:

- внутренней части: $S_1 = S_{\text{расч.к}}$

- внешней части: $S_2 = S_{\text{расч.к}}$

Расчёт укрепления отверстия в цилиндрической оболочке:

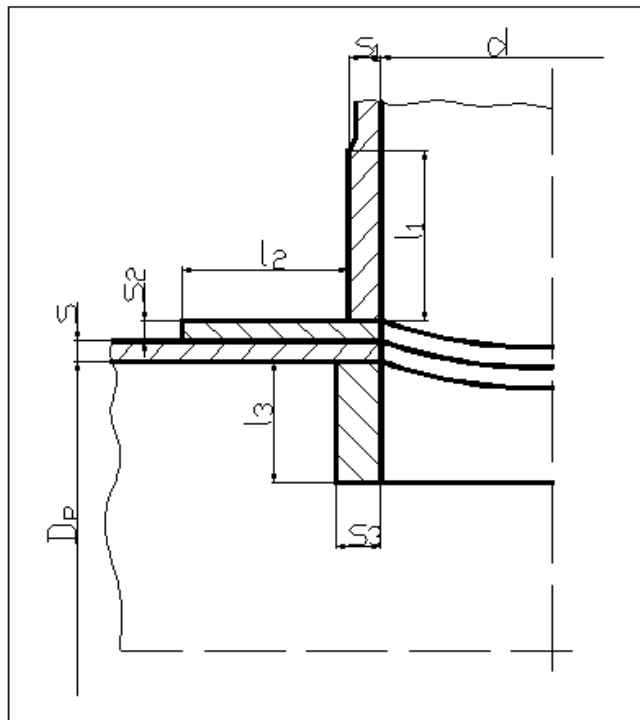


Рисунок 12. Конструкция укрепления отверстия избыточной толщиной стенки штуцера.

Расчёт:

Расчёт ведем по ГОСТ Р 52857.3-2007. [9]

Расчёт типа оболочки:

$$n := \begin{cases} \text{Цилиндрическая} \\ \text{Эллиптическая} \end{cases} \quad n = 1$$

$$Tip := \begin{cases} \text{"Цилиндрическая оболочка"} & \text{if } n = 1 \\ \text{"Эллиптическая"} & \text{if } n = 2 \end{cases}$$

Расчётный диаметр оболочки:

$$D_p := \begin{cases} D_p \leftarrow D_K & \text{if } n = 1 \\ D_p \leftarrow \frac{D_K^2}{2 \cdot H_D} \cdot \sqrt{1 - 4 \cdot \frac{D_K^2 - 4 \cdot H_D^2}{D_K^4} \cdot x_p^2} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Tip = \text{"Цилиндрическая оболочка"}$$

$$D_p = 2.8 \times 10^3 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия в стенке обечайки:

$$d_p := \begin{cases} d_p \leftarrow d_{\text{ш.ввод.куб}} + 2 \cdot c & \text{if } n = 1 \\ d_p \leftarrow \frac{d_{\text{ш.ввод.куб}} + 2 \cdot c}{\sqrt{1 - \left(\frac{2 \cdot x_p}{D_p} \right)^2}} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$d_p = 606 \text{ мм}$$

(53)

Проверка условий применения формул для расчёта укрепления отверстий:

$$\begin{aligned}
 Usl_3 := & \left| \begin{array}{l} \text{if } n = 1 \\ \quad \left| \begin{array}{l} \text{"Отношение диаметров НЕ выполняется"} \text{ if } \frac{d_p - 2 \cdot c}{D_K} > 1.0 \\ \text{"Отношение толщины к диаметру НЕ выполняется"} \text{ if } \frac{s_{расч.} - c}{D_K} > 0.1 \end{array} \right. \\ \text{"Условие применения формул выполняется"} \text{ otherwise} \\ \text{if } n = 2 \\ \quad \left| \begin{array}{l} \text{"Отношение диаметров НЕ выполняется"} \text{ if } \frac{d_p - 2 \cdot c}{D_K} > 0.6 \\ \text{"Отношение толщины к диаметру НЕ выполняется"} \text{ if } \frac{s_{расч.} - c}{D_K} > 0.1 \end{array} \right. \\ \text{"Условие применения формул выполняется"} \text{ otherwise} \end{array} \right.
 \end{aligned}$$

Tip = "Цилиндрическая оболочка"

Usl₃ = "Условие применения формул выполняется"

В соответствии с ГОСТ Р 52857.3-2007 пункт 5.1.3 стр. 6

Расчётная толщина стенки корпуса:

$$s_{p.c} := \left| \begin{array}{l} s_{p.c} \leftarrow \frac{P_{расч} \cdot D_p}{2 \cdot \varphi \cdot \sigma_{доп.} - P_{расч}} \text{ if } n = 1 \\ s_{p.c} \leftarrow \frac{P_{расч} \cdot D_p}{4 \cdot \varphi \cdot \sigma_{доп.} - P_{расч}} \text{ otherwise} \end{array} \right.$$

$$s_{p.c} = 5.493 \text{ мм}$$

(54)

Расчётная толщина стенки штуцера:

$$s_{p.щ} := \frac{P_{расч} \cdot (d_{щ.ввод.куб} + 2 \cdot c)}{2 \cdot \varphi \cdot \sigma_{доп.к} - P_{расч}} = 1.189 \text{ мм}$$

(55)

В соответствии с ГОСТ Р 52857.3-2007 пункт 5.1.4 стр. 6

Расчётные длины штуцеров:

$$l_{1p} := \min \left[l_1, \sqrt{(d_{щ.ввод.куб} + 2 \cdot c) \cdot (s_1 - c)} \right] = 65.131 \text{ мм}$$

(56)

$$l_{3p} := \min \left[l_3, 0.5 \sqrt{(d_{\text{ш.ввод.куб}} + 2 \cdot c) \cdot (s_2 - 2c)} \right] = 15 \text{ мм} \quad (57)$$

Расчётная ширина накладного кольца:

$$l_{2p} := \min \left[l_2, \sqrt{D_p \cdot (s_3 + s_{\text{расч.}} - 2c)} \right] = 100 \text{ мм} \quad (58)$$

Расчётная ширина зоны укрепления в обечайках и днищах при отсутствии торообразной вставки или приварного кольца:

$$l_p := \sqrt{D_p \cdot (s_{\text{расч.}} - c)} = 140 \text{ мм} \quad (59)$$

Отношение допускаемых напряжений:

для внешней части штуцера:

$$\chi_1 := \min \left(1, \frac{\sigma_{\text{доп.внеш.ш}}}{\sigma_{\text{доп.}}} \right) = 1 \quad (60)$$

для накладного кольца:

$$\chi_2 := \min \left(1, \frac{\sigma_{\text{доп.к}}}{\sigma_{\text{доп.}}} \right) = 1 \quad (61)$$

для внутренней части штуцера:

$$\chi_3 := \min \left(1, \frac{\sigma_{\text{доп.вн.ш}}}{\sigma_{\text{доп.}}} \right) = 1 \quad (62)$$

В соответствии с ГОСТ Р 52857.3-2007 пункт 5.2.1 стр. 7

Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующий дополнительного укрепления:

$$d_{\text{ор}} := 0.4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s_{\text{расч.}} - c)} = 56 \text{ мм} \quad (63)$$

Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующий дополнительного укрепления при наличии избыточной толщины стенки сосуда:

$$d_o := 2 \cdot \left[\frac{(s_{\text{расч.}} - c)}{s_{p.c}} - 0.8 \right] \cdot \sqrt{D_p \cdot (s_{\text{расч.}} - c)} = 132.8 \text{ мм} \quad (64)$$

Проверка необходимости укрепления отверстия:

$$\text{Prov}_1 := \begin{cases} \text{"Необходимо укрепление отверстия"} & \text{if } d_o < d_{\text{ш.ввод.куб}} \\ \text{"Укрепление отверстия не требуется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Tip = "Цилиндрическая оболочка"

Prov₁ = "Необходимо укрепление отверстия"

Проверка условия укрепления одиночного отверстия:

$$\begin{aligned}
A_1 &:= l_{1n} \cdot (s_1 - s_{n.ш} - c) \cdot \chi_1 = 378.481 \text{ мм}^2 \\
A_2 &:= l_{2v} \cdot s_2 \cdot \chi_2 = 1 \times 10^3 \text{ мм}^2 \\
A_3 &:= l_{3v} \cdot (s_3 - c) \cdot \chi_3 = 105 \text{ мм}^2 \\
A_{p.c} &:= l_p \cdot (s_{расч.} - s_{p.c} - c) = 210.942 \text{ мм}^2 \\
A_p &:= 0.5 \cdot (d_p - d_{op}) \cdot s_{p.c} = 1.511 \times 10^3 \text{ мм}^2 \\
Sum &:= A_1 \cdot \chi_1 + A_2 \cdot \chi_2 + A_3 \cdot \chi_3 + A_{p.c} = 1.694 \times 10^3 \text{ мм}^2
\end{aligned}
\tag{65}$$

$$Prov_2 := \begin{cases} \text{"Условие укрепления отверстия выполняется"} & \text{if } Sum \geq A_p \\ \text{"Условие укрепления отверстия НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Tip = "Цилиндрическая оболочка"

Prov₂ = "Условие укрепления отверстия выполняется"

В результате расчёта получили, что штуцер диаметром 600 мм необходимо укрепить с помощью утолщения стенки штуцера. Проведя аналогичный расчёт для диаметра штуцера 500 мм выяснилось, что и его необходимо укрепить путём утолщения стенки штуцера. Штуцер диаметром 1000 мм необходимо укрепить с помощью накладного листа. Для диаметра штуцера 65 мм укрепление отверстия не требуется.

3.7 Расчёт фланцевого соединения

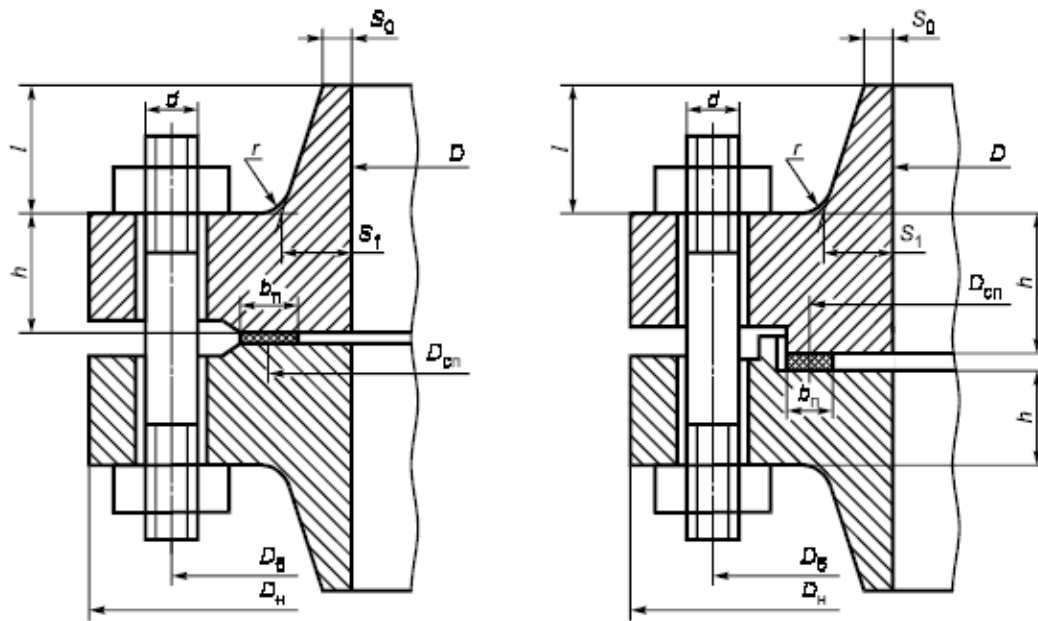


Рисунок 13. Фланцевое соединение

Исходные данные:

$D_{у.шт}=600$ мм – внутренний диаметр штуцера

$D_н=780$ мм – наружный диаметр фланца

$D_б=725$ мм – диаметр болтовой окружности фланца

$D_{сп}=640$ мм – расчётный диаметр прокладки

$b_n=25$ мм – ширина прокладки

$P_{расч}=0,56$ МПа – расчётное давление в аппарате

$M=0$ Н*мм – внешний изгибающий момент

$F=0$ Н – внешняя осевая сила

$c=3$ мм – прибавка на коррозию и эрозию

$t_{ст}=110$ °С – расчётная температура стенки аппарата

$h=31$ мм – толщина тарелки фланца

$h_n=2$ мм – толщина прокладки

$S_{исп}=10$ мм – толщина стенки аппарата

$d=30$ мм – наружный диаметр болта

$n=20$ – число болтов

$S_1=38$ мм - толщина втулки приварного встык фланца в месте присоединения к тарелке

Материал обечаек и фланцев - сталь 12X18H10T

Материал болтов - сталь 35X

Материал прокладки – асбестовый картон.

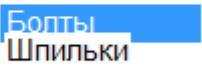
Фланцы плоские, неизолированные

Фланцы с гладкой уплотнительной поверхностью рекомендуется применять для условных давлений среды до 1,6 МПа

Расчёт:

Расчёт ведём по ГОСТ Р 52857.4—2007. [11]

Выбор крепежных элементов:

$bs :=$  $bs = 1$

Определение расчётных параметров с помощью ГОСТ Р 52857.1—2007 [7]:

Расчетные температуры

расчетная температура неизолированных плоских фланцев $t_\phi = 0,96 t$

$$t_\phi := 0.96 \cdot t_{ст} \quad t_\phi = 105.6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

расчетная температура болтов

$$t_b := 0.85 \cdot t_{ст} \quad t_b = 93.5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Допускаемые напряжения для болтов из стали 35X

В рабочем состоянии

$$t := \begin{pmatrix} 100 \\ 200 \end{pmatrix} \quad \sigma := \begin{pmatrix} 230 \\ 225 \end{pmatrix}$$

$$\sigma_{д.б} := \text{Floor}(\text{interp}(t, \sigma, t_b), 0.5)$$

$$\sigma_{д.б} = 230 \text{ МПа}$$

Модуль упругости для болтов при рабочей температуре

$$E_b := 2.14 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

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

$$\sigma_{20б} := 230 \text{ МПа}$$

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

$$E_{206} := 2.18 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Коэффициент линейного расширения стали 35Х при $t = 20-100 \text{ }^{\circ}\text{C}$

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

Допускаемые напряжения для фланцев и обечаек стали 12Х18Н10Т

$$\sigma_{\text{доп.}} := 14 \text{ МПа}$$

Так как фланцы изготавливается из листового проката $\eta := 1$

$$\sigma_{\text{д.ф}} := \eta \cdot \sigma_{\text{д.ф}} = 143 \text{ МПа}$$

Модуль упругости для стали 12Х18Н10Т при рабочей температуре

$$E := 1.998 \text{ МПа}$$

Допускаемое напряжение для стали 12Х18Н10Т при $t = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$$\sigma_{20} := 184 \text{ МПа} \quad \sigma_{\text{д}20} := \eta \cdot \sigma_{20} \quad \sigma_{\text{д}20} = 184 \text{ МПа}$$

Модуль упругости для стали 12Х18Н10Т при температуре испытания $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$

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

Коэффициент линейного расширения стали 12Х18Н10Т при $t = 20-100 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$$\alpha_{\phi} := 16.6 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$$

$$b_{\Pi} := 25 \text{ мм}$$

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

$$b_0 = 19 \text{ мм}$$

(66)

Характеристика прокладки по таблице 4.6 [4, стр. 231]

$$m := 2.5$$

$$q_{\text{обж}} := 20 \text{ МПа}$$

$$q_d := 130 \text{ МПа}$$

$$K_{\text{обж}} := 0.9$$

$$E_{\Pi} := 200 \text{ МПа}$$

Усилие, необходимое для смятия прокладки при затяжке,

$$P_{\text{обж}} := 0.5 \pi \cdot D_{\text{сп}} \cdot b_0 \cdot m \cdot |P_{\text{расч}}| \quad P_{\text{обж}} = 2.674 \times 10^4 \text{ Н}$$

(67)

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

$$R_{\Pi} := \begin{cases} \pi \cdot D_{\text{сп}} \cdot b_0 \cdot m \cdot P_{\text{расч}} & \text{if } P_{\text{расч}} \geq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (68)$$

$$R_{\Pi} = 5.348 \times 10^4 \text{ Н}$$

Площадь поперечного сечений болтов (шпилек) по таблице 4.3 [4, стр. 219]

$$f_{\text{б}} := 430 \text{ мм}^2$$

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

$$A_{\text{б}} := n \cdot f_{\text{б}} \quad A_{\text{б}} = 8.6 \times 10^3 \text{ мм}^2$$

Равнодействующая нагрузка от давления

$$Q_{\text{д}} := \frac{\pi}{4} \cdot (D_{\text{сп}})^2 \cdot P_{\text{расч}} \quad Q_{\text{д}} = 1.802 \times 10^5 \text{ Н}$$

Приведенная нагрузка, вызванная воздействием внешней силы и изгибающего момента,

$$Q_{\text{FM}} := \max \left(\left| F + \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{сп}}} \right|, \left| F - \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{сп}}} \right| \right) \quad Q_{\text{FM}} = 0 \text{ Н}$$

Податливость прокладки

$$y_{\Pi} := \frac{h_{\Pi} \cdot K_{\text{обж}}}{E_{\Pi} \cdot \pi \cdot D_{\text{сп}} \cdot b_{\Pi}} \quad y_{\Pi} = 1.79 \times 10^{-7} \text{ мм/Н} \quad (69)$$

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

$$L_{\text{б0}} := 202 \text{ мм}$$

Эффективная длина болта (шпильки) при определении податливости

$$L_{\text{б}} := \begin{cases} L_{\text{б0}} + 0.28 \cdot d & \text{if } bs = 1 \\ L_{\text{б0}} + 0.56 \cdot d & \text{if } bs = 2 \end{cases} \quad L_{\text{б}} = 210.4 \text{ мм}$$

Податливость болтов

$$y_{\text{б}} := \frac{L_{\text{б}}}{E_{206} \cdot A_{\text{б}}} \quad y_{\text{б}} = 1.122 \times 10^{-7} \text{ мм/Н} \quad (70)$$

Расчетные параметры фланцев:

- параметр длины обечайки

$$l_0 := \sqrt{D_{\text{у.шт.ввод.куб}} \cdot s_{\text{.исп}}} \quad l_0 = 77.46 \quad \text{мм} \quad (71)$$

- отношение наружного диаметра тарелки фланца к внутреннему диаметру

$$K := \frac{D_{\text{н}}}{D_{\text{у.шт.ввод.куб}}} \quad K = 1.3$$

- коэффициенты, зависящие от соотношения размеров тарелки фланца,

$$\beta_T := \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \log(K)) - 1}{(1.05 + 1.945 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} \quad \beta_T = 1.796 \quad (72)$$

$$\beta_U := \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \log(K)) - 1}{1.36 \cdot (K^2 - 1) \cdot (K - 1)} \quad \beta_U = 8.299$$

$$\beta_Y := \frac{1}{(K - 1)} \cdot \left[0.69 + 5.72 \cdot \frac{K^2 \cdot \log(K)}{(K^2 - 1)} \right] \quad \beta_Y = 7.621$$

$$\beta_Z := \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} \quad \beta_Z = 3.899$$

- коэффициенты для фланцевых соединений с приварными встык фланцами с прямой втулкой, плоскими фланцами и свободными фланцами

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

- коэффициент λ

$$\lambda := \frac{\beta_F \cdot h + l_0}{\beta_T \cdot l_0} + \frac{\beta_V \cdot h^3}{\beta_U \cdot l_0 \cdot (s_{\text{.исп}})^2} \quad \lambda = 1.015 \quad (73)$$

Угловая податливость фланца при затяжке

$$y_{\phi} := \frac{0.91 \cdot \beta_V}{E_{20} \cdot \lambda \cdot l_0 \cdot (S1)^2} \quad y_{\phi} = 2.205 \times 10^{-11}$$

Угловая податливость фланца, нагруженного внешним изгибающим моментом.

$$y_{\phi H} := \left(\frac{\pi}{4} \right)^3 \cdot \frac{D_6}{E_{20} \cdot h^3 \cdot D_H} \quad y_{\phi H} = 7.558 \times 10^{-11}$$

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

$$C_F := \max \left[1, \sqrt{\frac{\pi \cdot D_6}{n \cdot \left(2 \cdot d + \frac{6 \cdot h}{m + 0.5} \right)}} \right] \quad C_F = 1 \quad (74)$$

Приведенный диаметр плоского фланца $D_{\text{пр}} := D_{\text{у.шт.ввод.куб}}$

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

$$b := 0.5 \cdot (D_6 - D_{\text{сп}}) \quad b = 42.5 \quad (75)$$

Плечо усилия от действия давления на фланец для всех типов фланцев

$$e := 0.5 \cdot (D_{\text{сп}} - D_{\text{у.шт.ввод.куб}} \cdot e = 15) \quad (76)$$

Эквивалентная толщина плоских фланцев

$$S_{\text{э}} := s_{\text{исп}}$$

Коэффициент жесткости фланцевого соединения для приварных встык и плоских фланцев

$$\gamma := \frac{1}{y_{\text{п}} + y_6 \cdot \frac{E_{206}}{E_6} + 2 \cdot b^2 \cdot y_{\phi} \cdot \frac{E_{20}}{E}} \quad \gamma = 125.399 \quad (77)$$

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

$$\alpha := 1 - \frac{y_{\text{п}} - 2 \cdot e \cdot y_{\phi} \cdot b}{y_{\text{п}} + y_6 + 2 \cdot b^2 \cdot y_{\phi}} \quad \alpha = 0.593 \quad (78)$$

Коэффициент жесткости фланцевого соединения, нагруженного внешним изгибающим моментом

$$\alpha_M := \frac{y_6 + 2 \cdot y_{\Phi H} \cdot b \cdot \left(b + e - \frac{e^2}{D_{\text{сп}}} \right)}{y_6 + y_{\Pi} \cdot \left(\frac{D_6}{D_{\text{сп}}} \right)^2 + 2 \cdot y_{\Phi H} \cdot b^2} \quad \alpha_M = 0.779 \quad (79)$$

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

$$Q_t := \gamma \cdot [2\alpha_{\Phi} \cdot h \cdot (t_{\Phi} - 20) - 2\alpha_6 \cdot h \cdot (t_6 - 20)] \quad Q_t = 3.39 \quad \text{Н} \quad (80)$$

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

$$P_{61} := \max \left[\begin{array}{l} \alpha \cdot (Q_d + F) + R_{\Pi} + \frac{4 \cdot \alpha_M \cdot |M|}{D_{\text{сп}}} \\ \alpha \cdot (Q_d + F) + R_{\Pi} + \frac{4 \cdot \alpha_M \cdot |M|}{D_{\text{сп}}} - Q_t \end{array} \right] \quad (81)$$

$$P_{61} = 1.603 \times 10^5 \quad \text{Н}$$

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

$$P_{62} := \max(P_{\text{обж}}, 0.4 \cdot A_6 \cdot \sigma_{206}) \quad (82)$$

$$P_{\text{обж}} = 2.674 \times 10^4 \quad \text{Н} \quad P_{62} = 7.912 \times 10^5 \quad \text{Н}$$

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

$$P_{6M} := \max(P_{61}, P_{62}) \quad P_{6M} = 7.912 \times 10^5 \quad \text{Н} \quad (83)$$

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

$$P_{6p} := P_{6M} + (1 - \alpha) \cdot (Q_d + F) + Q_t + \frac{4 \cdot (1 - \alpha_M) \cdot |M|}{D_{\text{сп}}} \quad (84)$$

$$P_{6p} = 8.645 \times 10^5 \quad \text{Н}$$

Проверка прочности болтов (шпилек) и прокладки

Расчетные напряжения в болтах (шпильках)

- при затяжке

$$\sigma_{61} := \frac{P_{6M}}{A_6} \quad \sigma_{61} = 92 \quad \text{МПа}$$

- в рабочих условиях

$$\sigma_{62} := \frac{P_{6p}}{A_6} \quad \sigma_{62} = 100.524 \quad \text{МПа}$$

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

$$Usl_1 := \begin{cases} \text{"Условия прочности в при затяжке НЕ выполняются"} & \text{if } \sigma_{61} > \sigma_{206} \\ \text{"Условия прочности в рабочих условиях НЕ выполняются"} & \text{if } \sigma_{62} > \sigma_{д.6} \\ \text{"Условия прочности выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_1 = \text{"Условия прочности выполняются"}$$

$$\sigma_{61} = 92 \quad \text{МПа} \quad \sigma_{206} = 230 \quad \text{МПа} \quad \sigma_{62} = 100.524 \quad \text{МПа} \quad \sigma_{д.6} = 230 \quad \text{МПа}$$

Удельное давление на прокладку

$$q := \frac{\max(P_{6M}, P_{6p})}{\pi \cdot D_{сп} \cdot b_{п}} \quad q = 17.199 \quad \text{МПа}$$

(85)

Условие прочности прокладки (проверяется для мягких прокладок)

$$Usl_2 := \begin{cases} \text{"Условие прочности прокладки НЕ выполняется"} & \text{if } q > q_d \\ \text{"Условие прочности прокладки выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_2 = \text{"Условие прочности прокладки выполняется"}$$

Расчет фланцев на статическую прочность

Расчетный изгибающий момент, действующий на приварной встык фланц или плоский фланец при затяжке,

$$M_M := C_F \cdot P_{6M} \cdot b \quad M_M = 3.363 \times 10^7 \quad \text{Н*мм}$$

$$M_p = 3.944 \times 10^7 \quad \text{Н*мм}$$

Расчетный изгибающий момент, действующий на фланец в рабочих условиях

$$M_p := C_F \cdot \max[P_{6p} \cdot b + (Q_d + Q_{FM}) \cdot e, |Q_d + Q_{FM}| \cdot e]$$

(86)

Расчетные напряжения во фланце при затяжке:

- меридиональное изгибное напряжение во втулке приварного встык фланца, обечайке плоского фланца

$$\sigma_{0M} := \frac{M_M}{\lambda \cdot (S1 - c)^2 \cdot D_{пр}} \quad \sigma_{0M} = 45.093 \text{ МПа} \quad (87)$$

- напряжения в тарелке приварного встык фланца или плоского фланца в условиях затяжки:

- радиальное напряжение

$$\sigma_{RM} := \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + l_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot l_0 \cdot D_{у.шт.ввод.куб}} \cdot M_M \quad \sigma_{RM} = 85.322 \text{ МПа} \quad (88)$$

- окружное напряжение

$$\sigma_{TM} := \frac{\beta_Y \cdot M_M}{h^2 \cdot D_{у.шт.ввод.куб}} - \beta_Z \cdot \sigma_{RM} \quad \sigma_{TM} = 111.813 \text{ МПа} \quad (89)$$

Расчетные напряжения во фланце в рабочих условиях:

- меридиональные изгибные напряжения для приварных встык фланцев с прямой втулкой и плоских фланцев

$$\sigma_{0p} := \frac{M_p}{\lambda \cdot (S1 - c)^2 \cdot D_{пр}} \quad \sigma_{0p} = 52.894 \text{ МПа} \quad (90)$$

- максимальные меридиональные мембранные напряжения в обечайке плоского фланца

$$\sigma_{0mp} := \max \left[\frac{Q_d + F + \frac{4|M|}{D_{сп}}}{\pi \cdot (D_{у.шт.ввод.куб} + S1) \cdot (S1 - c)}, \frac{Q_d + F - \frac{4|M|}{D_{сп}}}{\pi \cdot (D_{у.шт.ввод.куб} + S1) \cdot (S1 - c)} \right] \quad (100)$$

$$\sigma_{0mp} = 2.568 \text{ МПа}$$

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

- радиальное напряжение

$$\sigma_{Rp} := \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + l_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot l_0 \cdot D_{у.шт.ввод.куб}} \cdot M_p \quad \sigma_{Rp} = 100.084 \text{ МПа} \quad (101)$$

- окружное напряжение

$$\sigma_{Tp} := \frac{\beta_Y \cdot M_p}{h^2 \cdot D_{y.шт.ввод.куб}} - \beta_Z \cdot \sigma_{Rp} \quad \sigma_{Tp} = 131.158 \text{ МПа} \quad (102)$$

Проверка условий статической прочности фланцев

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

$$\sigma_{3max} := \max(|\sigma_{0M} + \sigma_{RM}|, |\sigma_{0M} + \sigma_{TM}|) \quad (103)$$

PR_1 := "Условия статической прочности при затяжке и в рабочих условиях выполняются"

PR_3 := "Условия статической прочности НЕ выполняются"

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

KT := 1.3

Usl_3 := $\begin{cases} \text{PR}_1 & \text{if } \sigma_{3max} < K_T \cdot \sigma_{20} \wedge \sigma_{Pmax} < K_T \cdot \sigma_{д.ф} \\ \text{PR}_3 & \text{otherwise} \end{cases}$

Usl_3 = "Условия статической прочности при затяжке и в рабочих условиях выполняются"

$\sigma_{3max} = 156.906 \text{ МПа}$ $K_T \cdot \sigma_{20} = 239.2 \text{ МПа}$

$\sigma_{Pmax} = 181.484 \text{ МПа}$ $K_T \cdot \sigma_{д.ф} = 185.9 \text{ МПа}$

Проверка углов поворота фланцев

Угол поворота приварного встык фланца, плоского фланца

$$\Theta := M_p \cdot y_{\phi} \cdot \frac{E_{20}}{E \cdot 10^5} \quad \Theta = 8.707 \times 10^{-4}$$

(104)

Допустимый угол поворота плоского фланца $\Theta_{д} := 0.013$

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

Usl_P = "Условие поворота плоского фланца выполняется"

В результате расчёта выяснили, что герметичность фланцевого соединения соблюдается, и обеспечивается прочность.

3.8 Определение расчетных усилий для аппарата от ветровых нагрузок и сейсмических воздействий

Расчёт ведём по ГОСТ Р 51273 – 99 [9]

Расчёт производим с помощью программы, разработанной ТПУ в автоматизированной среде Mathcad 15.

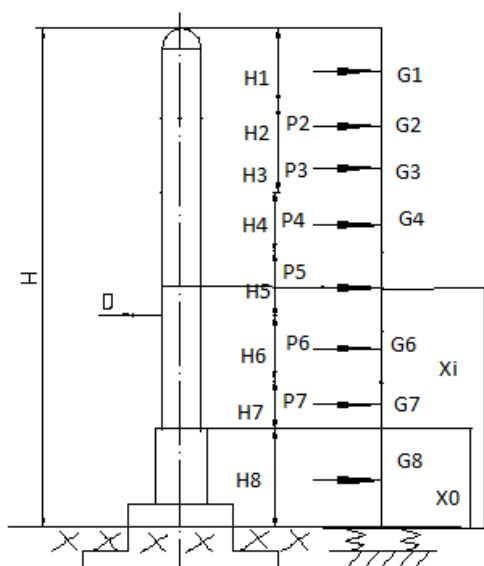


Рисунок 14. Расчётная схема аппарата

Необходимо рассчитать ректификационную колонну на устойчивость от действия ветровой нагрузки и собственного веса по следующим исходным данным:

Высота колонны: $H_k := 52 \text{ м}$
 Район установки - III: $q_0 := 450 \text{ Н/м}^2$
 Высота установки площадки обслуживания - 48м;
 Диаметр верхней части колонны: $D_1 := 2.8 \text{ м}$
 Диаметр нижней части колонны: $D_2 := 2.8 \text{ м}$
 Диаметр опора: $D_3 := 2.8 \text{ м}$

Изоляция в колонны:

Высота: $H_{\text{и}} := 52$ м

Удельный вес: $\gamma_{\text{и}} := 4000$ Н/м³

Температура в нижней части колонны: $T_2 := 55.25$ °C

Температура в верхней части колонны: $T_1 := 52.25$ °C

Число тарелок: $n_{\text{т}} := 12$ +

Материал колонны - сталь 12X18H10T;

Материал опоры - сталь Ст20

Толщина:

Стенки в верхней части колонны: $S_1 := 0.01$ м

Стенки в нижней части колонны: $S_2 := 0.01$ м

Стенки опоры: $S_0 := 0.014$ м

Изоляции: $S_{\text{и}} := 0.1$ м

Модуль упругости материала колонны: $E := 2 \cdot 10^{11}$ Па

Площадь внутренней поверхности эллиптического днища: $F_{\text{д}} := 9.2$ м²

Объем эллиптического днища: $V_{\text{д}} := 3.366$ м³

Вес люка: $G_{\text{л}} := 120$ кг

Скорение свободного падения: $g := 9.81$ м/с²

Определение ветровой нагрузки:

Сначала разбиваем аппарат на участки. Согласно рекомендациям ГОСТ Р 51273 – 99, получим:

Высота участка № 1: $H_1 := 10$ м

Высота участка № 2: $H_2 := 6$ м

Высота участка № 3: $H_3 := 7$ м

Высота участка № 4: $H_4 := 7$ м

Высота участка № 5: $H_5 := 7$ м

Высота участка № 6: $H_6 := 7$ м

Высота участка № 7: $H_7 := 8$ м

Высота участка № 8: $H_8 := 2$ м

Высоту опоры принимаем равной 2 м.

В середине каждого участка прикладываем ветровую нагрузку на расстоянии от фундамента:

Участок № 1: $x_1 := 49$ м

Участок № 2: $x_2 := 41$ м

Участок № 3: $x_3 := 34.5$ м

Участок № 4: $x_4 := 27.5$ м

Участок № 5: $x_5 := 20.5$ м

Участок № 6: $x_6 := 13.5$ м

Участок № 7: $x_7 := 6$ м

Участок № 8: $x_8 := 1$ м

Количество тарелок на каждом участке:

Участок № 1: $n_1 := 2$

Участок № 2: $n_2 := 2$

Участок № 3: $n_3 := 1$

Участок № 4: $n_4 := 1$

Участок № 5: $n_5 := 1$

Участок № 6: $n_6 := 1$

Участок № 7: $n_7 := 2$

Участок № 8: $n_8 := 0$

Ширина площадки 1 м

Высота: $h_{пл.} = 1$ м

Наружный диаметр площадки получается: $D_{н.пл.} = 4.8$ м

Расчет ведется для трех состояний аппарата, кроме того, в дальнейших расчетах необходимо будет знать вес каждого участка. Так как максимальный вес аппарата будет при гидроиспытании, то проведём расчёт для этого состояния. Чаще всего вес по высоте колонны распределен равномерно (наличие паровых и сепарационных пространств, изоляции на отдельных частях, площадок обслуживания, змеевиков и т. д.), и, чтобы с достаточной точностью просчитать вес каждого участка, можно воспользоваться следующими практическими рекомендациями:

1) вес:

1 м³ стальных площадок - 100 кг;

1 погонного метра ограждения лестниц - 15 кг;

1 погонного метра лестниц - 37 кг;

1 м² опорных тарелок, включая жидкость на ней и насадку,

$$G_{\text{т.1 кв}}^2 = 595.7 \text{ кг}$$

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

2) удельный вес:

$$\text{стали: } \gamma_{\text{ст}} = 7900 \text{ кг/м}^3$$

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

Расчет для условий гидроиспытаний

Расчет проводим на условие гидроиспытаний колонны, когда вес ее максимален и включает в себя вес всего аппарата и вес воды при гидроиспытании. Вес колонны будет складываться из веса каждого участка.

Определение веса участков

Первый участок включает в себя обечайку, крышку, тарелки, площадку обслуживания и воду при гидроиспытании.

Определим вес для каждой составляющей:

Вес обечайки, Н:

$$G_{o1} := 10 \cdot \pi \cdot D_1 \cdot S_1 \cdot H_1 \cdot \gamma_{\text{ст}} \quad G_{o1} = 69492.0295$$

Вес крышки, Н:

$$G_{k1} := 10 \cdot F_d \cdot S_1 \cdot \gamma_{\text{ст}} \quad G_{k1} = 7268$$

Вес тарелок, Н:

$$G_{\text{т1}} := 10 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_1^2 \cdot G_{\text{т.1 кв.м}} \cdot n_1 \quad G_{\text{т1}} = 110041.0685$$

Вес площадки, Н:

$$G_{пл1} := \frac{\pi}{4} \cdot (D_{н.пл}^2 - D_1^2) \cdot h_{пл} \cdot 1000 \quad G_{пл1} = 11938.0521$$

Вес воды, Н:

$$G_{в1} := 10 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_1^2 \cdot H_1 \cdot \gamma_{в} \quad G_{в1} = 615752.1601$$

Тогда вес первого участка, Н:

$$G_{Г1} := G_{о1} + G_{к1} + G_{т1} + G_{пл1} + G_{в1} \quad G_{Г1} = 814491.3102$$

Второй участок включает в себя обечайку, тарелки, изоляцию, смотровую площадку и воду при гидроиспытании.

Определим вес для каждой составляющей:

Вес обечайки, Н:

$$G_{о2} := 10 \cdot \pi \cdot D_1 \cdot S_1 \cdot H_2 \cdot \gamma_{ст} \quad G_{о2} = 41695.2177$$

Вес тарелок, Н:

$$G_{т2} := 10 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_1^2 \cdot G_{т.1кв.м} \cdot n_2 \quad G_{т2} = 73360.7124$$

Вес изоляции, Н:

$$G_{и2} := \pi \cdot D_2 \cdot S_{и} \cdot H_2 \cdot \gamma_{и} \quad G_{и2} = 21111.5026$$

Вес площадки, Н:

$$G_{пл2} := \frac{\pi}{4} \cdot (D_{н.пл}^2 - D_1^2) \cdot h_{пл} \cdot 1000 \quad G_{пл2} = 11938.0521$$

Вес воды, Н:

$$G_{в2} := 10 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_1^2 \cdot H_2 \cdot \gamma_{в} \quad G_{в2} = 369451.2961$$

Тогда вес второго участка, Н:

$$G_{Г2} := G_{о2} + G_{т2} + G_{в2} + G_{пл2} + G_{и2} \quad G_{Г2} = 517556.7808$$

Третий участок включает в себя обечайку, тарелки, изоляцию, смотровую площадку и воду при гидроиспытании.

Определим вес для каждой составляющей:

Вес обечайки, Н:

$$G_{о3} := 10 \cdot \pi \cdot D_2 \cdot S_2 \cdot H_3 \cdot \gamma_{ст} \quad G_{о3} = 48644.4206$$

Вес тарелок, Н:

$$G_{т3} := 10 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_2^2 \cdot G_{т.1кв.м} \cdot n_3 \quad G_{т3} = 73360.7124$$

Вес изоляции, Н:

$$G_{ИЗ} := \pi \cdot D_2 \cdot S_{И} \cdot H_3 \cdot \gamma_{И} \quad G_{ИЗ} = 24630.0864$$

Вес площадки, Н:

$$G_{ПЛЗ} := \frac{\pi}{4} \cdot (D_{н.пл}^2 - D_1^2) \cdot h_{пл} \cdot 1000 \quad G_{ПЛЗ} = 11938.0521$$

Вес воды, Н:

$$G_{ВЗ} := 10 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_2^2 \cdot H_3 \cdot \gamma_{В} \quad G_{ВЗ} = 431026.5121$$

Тогда вес третьего участка, Н:

$$G_{ГЗ} := G_{ОЗ} + G_{ТЗ} + G_{ВЗ} + G_{ИЗ} + G_{ПЛЗ} \quad G_{ГЗ} = 589599.7836$$

Четвёртый участок включает в себя обечайку, тарелки, изоляцию, смотровую площадку и воду при гидроиспытании.

Определим вес для каждой составляющей:

Вес обечайки, Н:

$$G_{О4} := 10 \cdot \pi \cdot D_2 \cdot S_2 \cdot H_4 \cdot \gamma_{СТ} \quad G_{О4} = 48644.4206$$

Вес тарелок, Н:

$$G_{Т4} := 10 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_2^2 \cdot G_{Т.1КВ.М} \cdot n_4 \quad G_{Т4} = 36680.3562$$

Вес изоляции, Н:

$$G_{И4} := \pi \cdot D_2 \cdot S_{И} \cdot H_4 \cdot \gamma_{И} \quad G_{И4} = 24630.0864$$

Вес площадки, Н:

$$G_{ПЛ4} := \frac{\pi}{4} \cdot (D_{н.пл}^2 - D_1^2) \cdot h_{пл} \cdot 1000 \quad G_{ПЛ4} = 11938.0521$$

Вес воды, Н:

$$G_{В4} := 10 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_2^2 \cdot H_4 \cdot \gamma_{В} \quad G_{В4} = 431026.5121$$

Тогда вес четвёртого участка, Н:

$$G_{Г4} := G_{О4} + G_{Т4} + G_{В4} + G_{И4} + G_{ПЛ4} \quad G_{Г4} = 552919.4274$$

Пятый участок включает в себя обечайку, тарелки, изоляцию, смотровую площадку и воду при гидроиспытании.

Определим вес для каждой составляющей:

Вес обечайки, Н:

$$G_{О5} := 10 \cdot \pi \cdot D_2 \cdot S_2 \cdot H_5 \cdot \gamma_{СТ} \quad G_{О5} = 48644.4206$$

Вес тарелок, Н:

$$G_{Т5} := 10 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_2^2 \cdot G_{Т.1КВ.М} \cdot n_5 \quad G_{Т5} = 36680.3562$$

Вес изоляции, Н:

$$G_{и5} := \pi \cdot D_2 \cdot S_{и} \cdot H_5 \cdot \gamma_{и} \quad G_{и5} = 24630.0864$$

Вес площадки, Н:

$$G_{пл5} := \frac{\pi}{4} \cdot (D_{н.пл}^2 - D_1^2) \cdot h_{пл} \cdot 1000 \quad G_{пл5} = 11938.0521$$

Вес воды, Н:

$$G_{в5} := 10 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_2^2 \cdot H_5 \cdot \gamma_{в} \quad G_{в5} = 431026.5121$$

Тогда вес пятого участка, Н:

$$G_{г5} := G_{о5} + G_{т5} + G_{в5} + G_{и5} + G_{пл5} \quad G_{г5} = 552919.4274$$

Шестой участок включает в себя обечайку, тарелки, изоляцию, смотровую площадку и воду при гидроиспытании.

Определим вес для каждой составляющей:

Вес обечайки, Н:

$$G_{о6} := 10 \cdot \pi \cdot D_2 \cdot S_2 \cdot H_6 \cdot \gamma_{ст} \quad G_{о6} = 48644.4206$$

Вес тарелок, Н:

$$G_{т6} := 10 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_2^2 \cdot G_{т.1кв.м} \cdot n_6 \quad G_{т6} = 36680.3562$$

Вес изоляции, Н:

$$G_{и6} := \pi \cdot D_2 \cdot S_{и} \cdot H_6 \cdot \gamma_{и} \quad G_{и6} = 24630.0864$$

Вес площадки, Н:

$$G_{пл6} := \frac{\pi}{4} \cdot (D_{н.пл}^2 - D_1^2) \cdot h_{пл} \cdot 1000 \quad G_{пл6} = 11938.0521$$

Вес воды, Н:

$$G_{в6} := 10 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_2^2 \cdot H_6 \cdot \gamma_{в} \quad G_{в6} = 431026.5121$$

Тогда вес шестого участка, Н:

$$G_{г6} := G_{о6} + G_{т6} + G_{в6} + G_{и6} + G_{пл6} \quad G_{г6} = 552919.4274$$

Седьмой участок включает в себя обечайку, крышку, тарелки, изоляции, крышки и воду при гидроиспытании.

Определим вес для каждой составляющей:

Вес обечайки, Н:

$$G_{о7} := 10 \cdot \pi \cdot D_2 \cdot S_2 \cdot H_7 \cdot \gamma_{ст} \quad G_{о7} = 55593.6236$$

Вес тарелок, Н:

$$G_{Г7} := 10 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_2^2 \cdot G_{Г.1КВ.М} \cdot n_7 \quad G_{Г7} = 73360.7124$$

Вес изоляции, Н:

$$G_{И7} := \pi \cdot D_2 \cdot S_{И} \cdot H_7 \cdot \gamma_{И} \quad G_{И7} = 28148.6702$$

Вес площадки, Н:

$$G_{Пл7} := \frac{\pi}{4} \cdot (D_{Н.Пл}^2 - D_1^2) \cdot h_{Пл} \cdot 1000 \quad G_{Пл7} = 11938.0521$$

Вес воды, Н:

$$G_{В7} := 10 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_2^2 \cdot H_7 \cdot \gamma_{В} \quad G_{В7} = 492601.7281$$

Вес крышки, Н:

$$G_{К7} := 10 \cdot F_{д} \cdot S_1 \cdot \gamma_{ст} \quad G_{К7} = 7268$$

Тогда вес седьмого участка, Н:

$$G_{Г7} := G_{О7} + G_{Г7} + G_{И7} + G_{В7} + G_{К7} + G_{Пл7} \quad G_{Г7} = 668910.7863$$

Восьмой участок включает в себя только опорную обечайку.

Определим вес для каждой составляющей:

Вес опорной обечайки, Н:

$$G_{О8} := 10 \cdot \pi \cdot D_2 \cdot S_0 \cdot H_8 \cdot \gamma_{ст} \quad G_{О8} = 48644.4206$$

Тогда вес восьмого участка, Н:

$$G_{Г8} := G_{О8} \quad G_{Г8} = 48644.4206$$

Таким образом, вес аппарата при гидроиспытании, Н:

$$G_{Г.мах} := G_{Г1} + G_{Г2} + G_{Г3} + G_{Г4} + G_{Г5} + G_{Г6} + G_{Г7} + G_{Г8} \quad G_{Г.мах} = 4297961.3637$$

Определение моментов инерции:

Момент инерции верхней части колонны, м⁴:

$$I_1 := \frac{\pi}{8} \cdot (D_1 + S_1 - c)^3 \cdot (S_1 - c) \quad I_1 = 0.0608$$

Момент инерции нижней части колонны, м⁴:

$$I_2 := \frac{\pi}{8} \cdot (D_2 + S_2 - c)^3 \cdot (S_2 - c) \quad I_2 = 0.0608$$

Момент инерции опорной обечайки колонны, м⁴:

$$I_3 := \frac{\pi}{8} \cdot (D_3 + S_0 - c)^3 \cdot (S_0 - c) \quad I_3 = 0.0959$$

Определение статической составляющей

Коэффициент определим с помощью модуля расчета. Здесь:

$$x := \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \end{pmatrix} \quad \underline{H} := \begin{pmatrix} H_1 \\ H_2 \\ H_3 \\ H_4 \\ H_5 \\ H_6 \\ H_7 \\ H_8 \end{pmatrix} \quad G_r := \begin{pmatrix} G_{r1} \\ G_{r2} \\ G_{r3} \\ G_{r4} \\ G_{r5} \\ G_{r6} \\ G_{r7} \\ G_{r8} \end{pmatrix} \quad i := 0..last(x)$$

Высота расчетного сечения аппарата до поверхности земли:

$$x_0 := \begin{pmatrix} 48 \\ 40.2 \\ 34.4 \\ 27.6 \\ 20.8 \\ 12.6 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Площадь обслуживающих площадок на участках - n, м²:

$$\underline{A} := \begin{pmatrix} 5.2 \\ 5.2 \\ 5.2 \\ 5.2 \\ 5.2 \\ 5.2 \\ 5.2 \\ 5.2 \end{pmatrix} \quad A_{j,0} := A_j \quad A_j = \begin{pmatrix} 5.2 \\ 5.2 \\ 5.2 \\ 5.2 \\ 5.2 \\ 5.2 \\ 5.2 \\ 5.2 \end{pmatrix} \quad j := 0..7$$

Высота обслуживающих площадок от поверхности земли, м. :

$$x_j := \begin{pmatrix} 47.4 \\ 41.6 \\ 35.8 \\ 30 \\ 24.2 \\ 18.4 \\ 12.6 \\ 0 \end{pmatrix} \quad x_{j,0} := x_j$$

Тогда:

$$\Theta_i := \begin{cases} \left(\frac{x_i}{10} \right)^{0.32} & \text{if } x_i > 10 \\ 1 & \text{if } x_i \leq 10 \end{cases} \quad \Theta_{j,0} := \Theta_j \quad \Theta_j = \begin{pmatrix} 1.6629 \\ 1.5707 \\ 1.4863 \\ 1.3822 \\ 1.2582 \\ 1.1008 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Для круглых аппаратов: $K=0.7$

Статическая составляющая не зависит от веса аппарата, а зависит от высоты над поверхностью земли.

Нормативное значение статической составляющей, Н/м^2 :

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

$$q_i =$$

523.8094
494.7678
468.1798
435.4086
396.3435
346.7507
315
315

Наружный диаметр по участкам составит, м:

$$D_{H1} := D_1 + 2 \cdot S_1 + 2 \cdot S_H \quad D_{H1} = 3.02$$

$$D_{H2} := D_1 + 2 \cdot S_1 + 2 \cdot S_H \quad D_{H2} = 3.02$$

$$D_{H3} := D_2 + 2 \cdot S_2 + 2 \cdot S_H \quad D_{H3} = 3.02$$

$$D_{H4} := D_2 + 2 \cdot S_2 + 2 \cdot S_H \quad D_{H4} = 3.02$$

$$D_{H5} := D_2 + 2 \cdot S_2 + 2 \cdot S_H \quad D_{H5} = 3.02$$

$$D_{H6} := D_2 + 2 \cdot S_2 + 2 \cdot S_H \quad D_{H6} = 3.02$$

$$D_{H7} := D_2 + 2 \cdot S_2 + 2 \cdot S_H \quad D_{H7} = 3.02$$

$$D_{H8} := D_2 + 2 \cdot S_0 \quad D_{H8} = 2.828$$

Представим:

$$D_H := \begin{pmatrix} D_{H1} \\ D_{H2} \\ D_{H3} \\ D_{H4} \\ D_{H5} \\ D_{H6} \\ D_{H7} \\ D_{H8} \end{pmatrix}$$

Тогда статическая составляющая ветровой нагрузки на каждом участке будет равна, Н:

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

$$P_{st_i} =$$

15819.0443
8965.1917
9897.3208
9204.5381
8378.7025
7330.31
7610.4
1781.64

Определение динамической составляющей ветровой нагрузки

Определим коэффициенты:

Высоты переменных сечений, м:

$$h_1=0 \text{ м}, h_2=0 \text{ м}, h_3=0 \text{ м}$$

1) Безразмерный коэффициент Δ

$$\Delta := \frac{1}{3} + \frac{I_1}{I_2} \cdot \frac{h_2}{h_1} \cdot \left[\frac{1}{3} \cdot \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^2 + \frac{h_2}{h_1} + 1 \right] \quad \Delta = 0.3333$$

2) Безразмерный коэффициент μ :

$$\mu := \frac{I_1}{I_3} \cdot \frac{h_3}{h_1} \cdot \left(\frac{h_3}{h_2} + 1 \right) \quad \mu = 0$$

3) Безразмерный коэффициент λ :

$$\lambda := \frac{I_1}{I_3} \cdot \frac{h_3}{h_1} \cdot \left[\frac{1}{3} \cdot \left(\frac{h_3}{h_1} \right)^2 + \frac{h_3}{h_1} + 1 \right] = 0$$

4) Безразмерный коэффициент γ

$$\gamma := 2 \cdot \Delta \cdot \left(\frac{h_1}{H_k} \right)^3 \quad \gamma = 0$$

5) с помощью модуля определения коэффициентов b_i , b_k

$$r := \frac{x}{H_k}$$

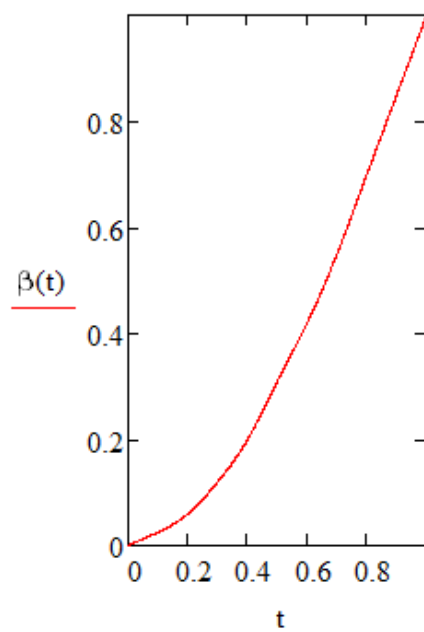
$$r = \begin{pmatrix} 0.9423 \\ 0.7885 \\ 0.6635 \\ 0.5288 \\ 0.3942 \\ 0.2596 \\ 0.1154 \\ 0.0192 \end{pmatrix}$$

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

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

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

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



$$\beta(r) = \begin{pmatrix} 0.9131 \\ 0.6824 \\ 0.4994 \\ 0.3416 \\ 0.1945 \\ 0.0933 \\ 0.0292 \\ 0.0051 \end{pmatrix} \quad \beta := \beta(r)$$

$$\beta = \begin{pmatrix} 0.9131 \\ 0.6824 \\ 0.4994 \\ 0.3416 \\ 0.1945 \\ 0.0933 \\ 0.0292 \\ 0.0051 \end{pmatrix}$$

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

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

Для определения данных коэффициентов необходимо вычислить период собственных колебаний аппарата. Так как обычно не имеется данных о размерах фундамента (бетонной подушке) для аппарата, то период собственных колебаний для аппарата переменного сечения можно подсчитать:

$$T_r := 2 \cdot \pi \cdot H_k \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{\text{last}(x)} [G_{r_i} \cdot (\alpha_i)^2]}{g \cdot \frac{H_k}{2 \cdot E \cdot I_1} \cdot \gamma}} \quad T_r = 0$$

Определение коэффициентов для расчета динамической составляющей:

$$1) \quad \varepsilon := \frac{T_r \cdot \sqrt{q_0}}{840} \quad \varepsilon = 0$$

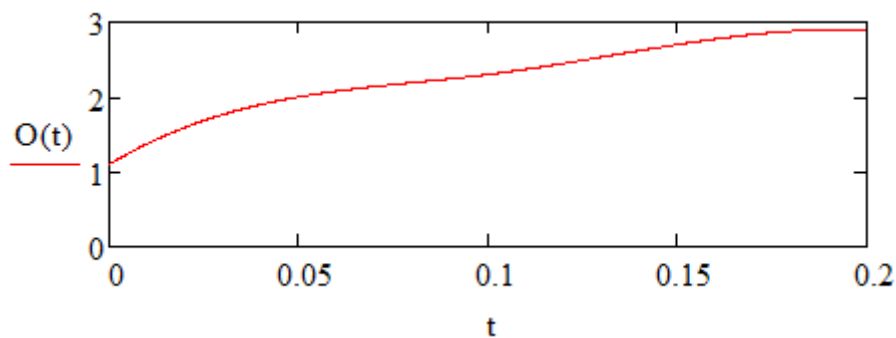
2) с помощью модуля определения коэффициента динамичности при ветровой нагрузке x :

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

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

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

$$O(t) := \text{interp}(ww, xx, y, t)$$



$$O(\varepsilon) = 1.1$$

$$\xi := O(\varepsilon)$$

$$\xi = 1.1$$

3) по таблице 3:

$$\nu := 0.7$$

4) коэффициент пульсации скоростного напора для середины участка определяем с помощью модуля определения коэффициента пульсации скоростного напора $m_{k,j}$ для середины k -того участка на высоте x_k и j -той площадки на высоте x_j :

$$m_i := \begin{cases} 0.6 \cdot \left(\frac{x_i}{10}\right)^{-0.16} & \text{if } x_i > 10 \\ 0.6 & \text{if } x_i \leq 10 \end{cases}$$

$$m_i =$$

0.4653
0.4787
0.4922
0.5103
0.5349
0.5719
0.6
0.6

Приведенное относительное ускорение центра тяжести i-го участка:

$$\eta_{\Gamma_i} := \alpha_i \cdot \frac{\sum_{i=0}^{\text{last}(x)} (\alpha_i \cdot m_i \cdot P_{st_i})}{\sum_{i=0}^{\text{last}(x)} [(\alpha_i)^2 \cdot G_{\Gamma_i}]}$$

$$\eta_{\Gamma_i} =$$

0
0
0
0
0
0
0
0

Динамическая составляющая ветровой нагрузки на i-м участке, Н:

$$P_{\Gamma.dyn_i} := \nu \cdot G_{\Gamma_i} \cdot \xi \cdot \eta_{\Gamma_i}$$

$$P_{\Gamma.dyn_i} =$$

0
0
0
0
0
0
0
0

Ветровая нагрузка в условиях гидроиспытаний

Ветровая нагрузка на i-м участке, Н:

$$P_{r_i} := P_{st_i} + P_{r.dyn_i}$$

$$P_{r_i} =$$

15819.0443
8965.1917
9897.3208
9204.5381
8378.7025
7330.31
7610.4
1781.64

Изгибающий момент в расчетном сечении на высоте x_0 от действия ветровой нагрузки, $N^*_{м}$:

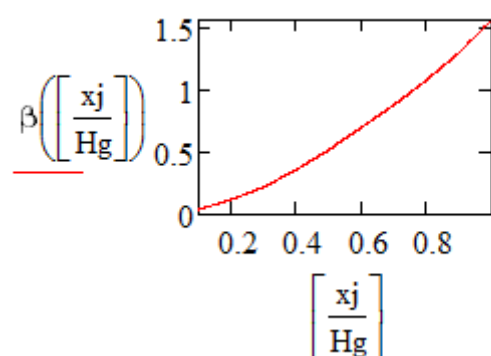
Коэффициент пульсации скоростного напора для середины участка определяем с помощью модуля определения коэффициента пульсации скоростного напора j -й площадки на высоте x_{jj} :

$$m_j := \begin{cases} 0.6 \cdot \left(\frac{x_{jj}}{10} \right)^{-0.16} & \text{if } x_{jj} > 10 \\ 0.6 & \text{if } x_{jj} \leq 10 \end{cases}$$

$$m_{j,0} := m_j \quad m_j = \begin{pmatrix} 0.4678 \\ 0.4776 \\ 0.4892 \\ 0.5033 \\ 0.5209 \\ 0.5442 \\ 0.5782 \\ 0.6 \end{pmatrix} \quad \left[\frac{x_j}{H} \right] := \frac{x}{H_k} \quad \left[\frac{x_j}{H} \right] = \begin{pmatrix} 0.9423 \\ 0.7885 \\ 0.6635 \\ 0.5288 \\ 0.3942 \\ 0.2596 \\ 0.1154 \\ 0.0192 \end{pmatrix}$$

Коэффициент x_j в зависимости от $\left[\frac{x_j}{H} \right]$ определяют по расчетному модулю:

$$\begin{aligned}
 xx &:= (0.1 \ 0.2 \ 0.3 \ 0.4 \ 0.5 \ 0.6 \ 0.7 \ 0.8 \ 0.9 \ 1)^T \\
 xjgr &:= (0.04 \ 0.12 \ 0.22 \ 0.36 \ 0.52 \ 0.7 \ 0.88 \ 1.08 \ 1.3 \ 1.56)^T \\
 ww &:= \text{cspline}(xx, xjgr) \\
 \beta\left(\left[\frac{xj}{Hg}\right]\right) &:= \text{linterp}\left(xx, xjgr, \left[\frac{xj}{Hg}\right]\right)
 \end{aligned}$$



$$\beta\left(\left[\frac{xj}{H}\right]\right) = \begin{pmatrix} 1.41 \\ 1.0569 \\ 0.8142 \\ 0.5719 \\ 0.3519 \\ 0.1796 \\ 0.0523 \\ -0.0246 \end{pmatrix} \quad \chi_j := \beta\left(\left[\frac{xj}{H}\right]\right) \quad \chi_j = \begin{pmatrix} 1.41 \\ 1.0569 \\ 0.8142 \\ 0.5719 \\ 0.3519 \\ 0.1796 \\ 0.0523 \\ -0.0246 \end{pmatrix}$$

$$M_{vj} := 0.85 \cdot q_0 \cdot \Theta_j \cdot (x_{vj} - x_0) \cdot (1 + \xi \cdot \chi_j \cdot m_j) A_j$$

$$M_{vj} = \begin{pmatrix} 179617.4021 \\ 179617.4021 \\ 179617.4021 \\ 179617.4021 \\ 179617.4021 \\ 179617.4021 \\ 179617.4021 \\ 179617.4021 \end{pmatrix} \quad x_i = \begin{array}{|c|} \hline 49 \\ \hline 41 \\ \hline 34.5 \\ \hline 27.5 \\ \hline 20.5 \\ \hline 13.5 \\ \hline 6 \\ \hline 1 \\ \hline \end{array}$$

Изгибающий момент в расчетном сечении на высоте x_0 , Н*м:

$n := 0..7$

$$M_{v1_n} := \sum_{i=0}^n \left[P_{r_i} \cdot (x_i - x_{0_i}) \right] + \sum_{j=0}^{\text{last}(x)} M_{vj_j}$$

$M_{v1_i} =$

1452758.2608
1459930.4142
1460920.1463
1459999.6924
1457486.0817
1464083.3607
1494524.9607
1494524.9607

В результате расчёта определили расчётные усилия для аппарата от действия ветровых и сейсмических нагрузок для условий гидроиспытания, которые в дальнейшем будут использованы для расчёта аппарата на прочность и устойчивость.

3.9 Расчет аппарата на прочность и устойчивость

Расчёт ведем по ГОСТ Р 51274 – 99 [11]

Расчетные сечения:

При расчете колонного аппарата устанавливаются следующие основные расчетные сечения:

- поперечные сечения корпуса колонны, переменные по толщине стенки или по диаметру; для аппаратов постоянного сечения (по диаметру и толщине стенки) только в месте присоединения опорной обечайки (Рисунок 15, сечение В – В);
- поперечное сечение в месте присоединения опорной обечайки к корпусу колонны (Рисунок 16, сечение Г – Г);
- поперечное сечение опорной обечайки в местах расположения отверстий (Рисунок 16, сечение Д – Д);
- поперечное сечение в месте присоединения опорного кольца (Рисунок 16, сечение Е –Е).

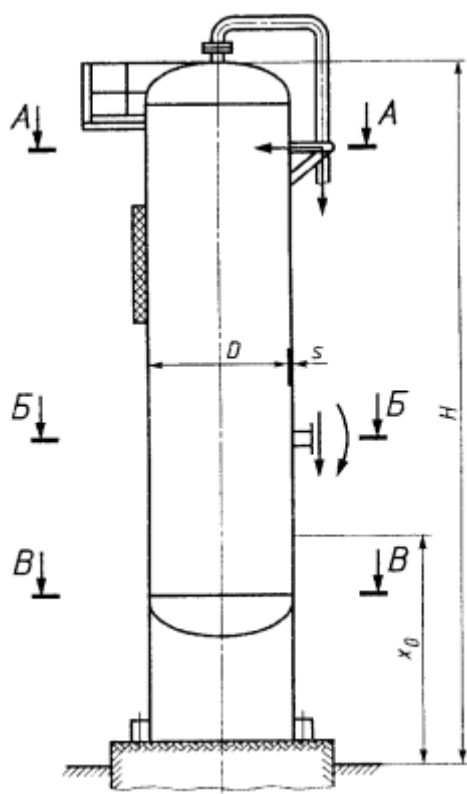


Рисунок 15. Расчётные сечения корпуса аппарата

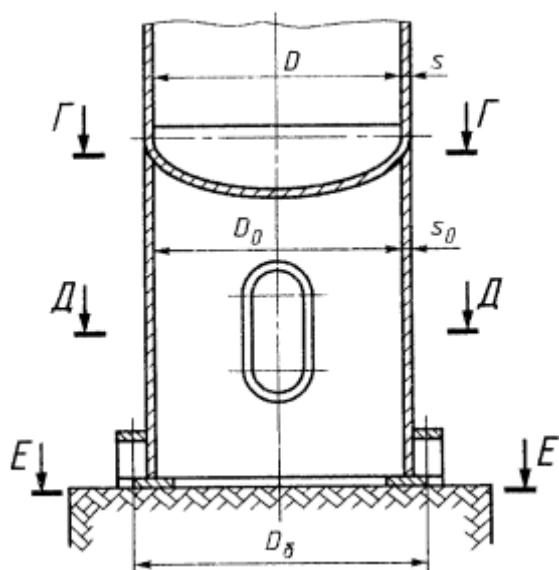


Рисунок 16. Расчётные сечения цилиндрической опорной обечайки

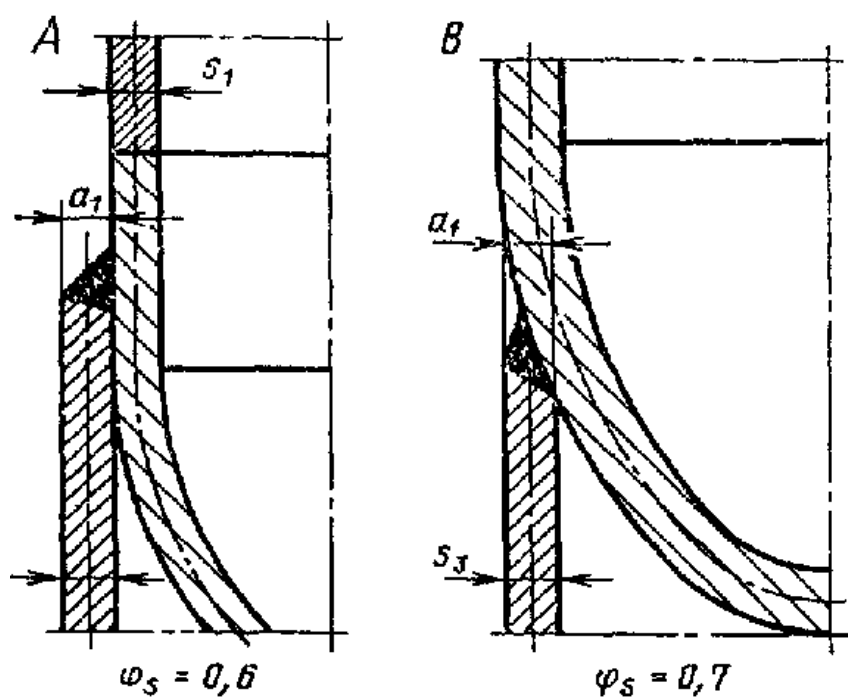


Рисунок 17. Узлы соединения опорной обечайки с корпусом колонны

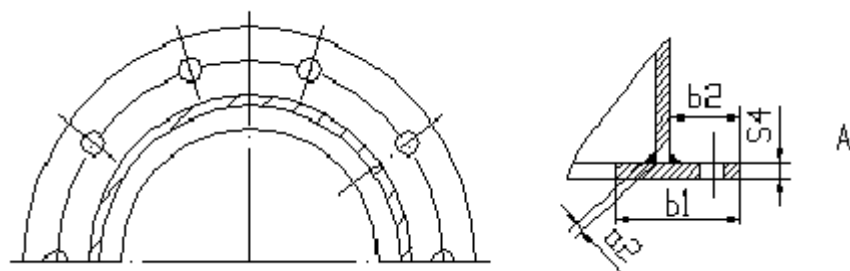


Рисунок 18. Исполнение опорного узла. Тип А

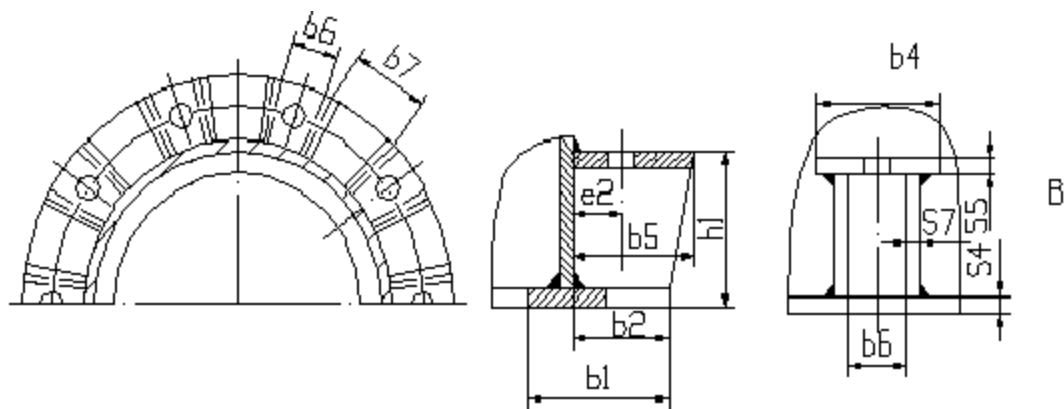


Рисунок 19. Исполнение опорного узла. Тип В

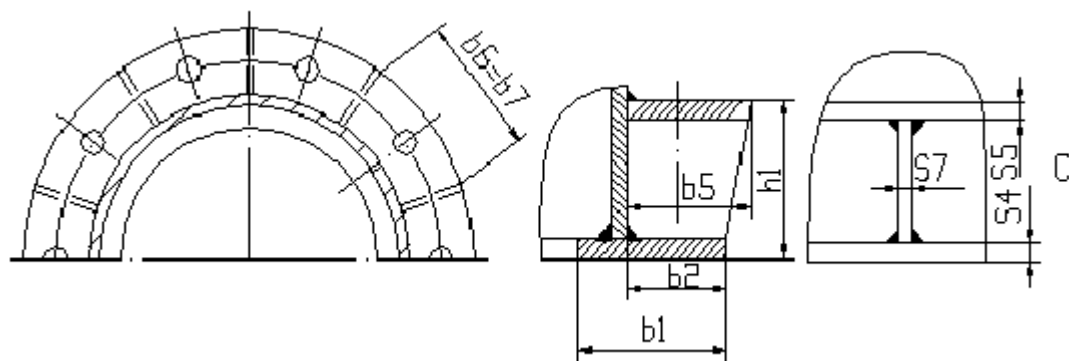


Рисунок 20. Исполнение опорного узла. Тип С

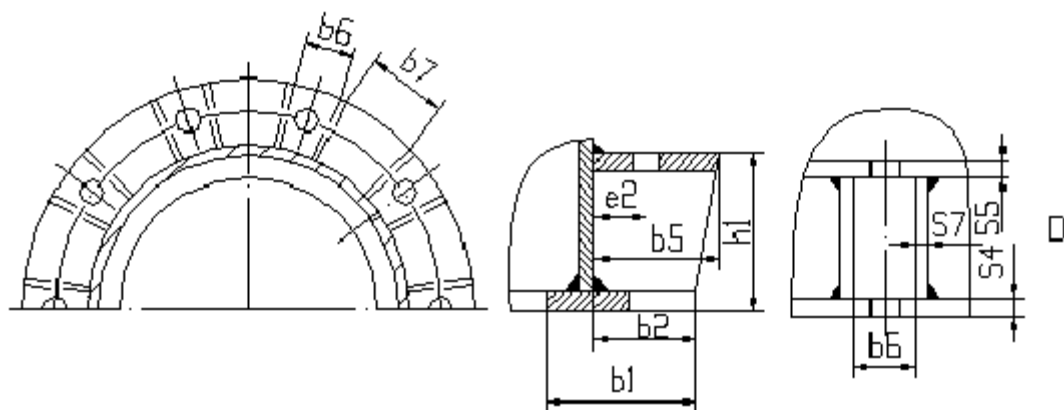


Рисунок 21. Исполнение опорного узла. Тип D

Исходные данные:

- Внутреннее избыточное давление на высоте X_0 , Па: $p := 0.56 \cdot 10^6$
- Допускаемое напряжение для корпуса колонны, Па: $\sigma_{дК} := 143 \cdot 10^6$
- Допускаемое напряжение для опорной обечайки, Па: $\sigma_{д0} := 184 \cdot 10^6$
- Допускаемое напряжение в анкерных болтах, Па: $\sigma_{дВ} := 120 \cdot 10^6$
- Допускаемое напряжение бетона на сжатие, Па: $\sigma_{дбет} := 30 \cdot 10^6$
- Толщина сварного шва приведена на рисунке 13, м.: $a_1 := 0.01$
- Толщина сварного шва в месте приварки опорной обечайки к нижнему кольцу, приведена на рисунке 13, м.: $a_2 := 0.01$
- Исполнительная толщина стенки опорной обечайки, м.: $s_3 := 0.014$

Исполнительная толщина стенки самой нижней обечайки колонны , м.: $s_{ho} := 0.01$

Сумма всех прибавок к расчетным толщинам, м.: $\sum c := 0.003$

Начальный внутренний диаметр анкерных болтов, м.: $d_{2H} := 0.0292$

Диаметр колонны в сечении соединения с опорной обечайкой, м.: $D_K := 2.8$

Диаметр опорной обечайки, м.: $D_{op} := 2.8$

Ширина верхнего опорного элемента (рисунок 19), м.: $b_5 := 0.15$

Минимальное расстояние между двумя смежными ребрами (рисунок 19), м.: $b_6 := 0.45$

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

Расстояние между анкерным болтом и опорной обечайкой (Рисунок 19), м.: $e_2 := 0.075$

Число анкерных болтов , м.: $n := 12$

Высота опорного узла (Рисунок 19) , м.: $h_1 := 0.25$

Площадь поперечного сечения анкерного болта , м².: $A_{\sigma} := 0.001$

Внутренний диаметр опорной обечайки, м.: $D_3 := 2.8$

Диаметр окружности анкерных болтов, м.: $D_4 := 2.6$

Ширин нижнего опорного кольца, м.: $b_1 := 0.25$

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

Выбираем соединение корпуса с опорной обечайкой как на рисунке 13. При этом коэффициент сварного шва: $\phi_{sw} := 0.7$

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

Тип исполнения опорного узла (рисунки 18-21): A,B,C,D ; соответственно 1, 2, 3 или 4: $tisp := 4$

Приведенная длина $l_{пр}$ принимают $l_{пр} := 1$

Длина l по расчетной схеме 1., м: $\sum l := 1.8$

Количество расчетных сечений - $Ri := 8$

$i := 0.. Ri - 1$

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

- в условиях испытания: $M_{G2}=0$

Изгибающий момент в расчетном сечении x_0 от действия ветровой нагрузки, $H^*_{м.}$:

$$M_{v2} = \begin{pmatrix} 1453000 \\ 1460000 \\ 1461000 \\ 1460000 \\ 1457000 \\ 1464000 \\ 1495000 \\ 1495000 \end{pmatrix}$$

Осевое сжимающее усилие, Н:

- в условиях испытания $G_{г. max} = 4.298 \times 10^6$

Расчет для условий испытания

Сочетание нагрузок:

- давление, МПа: $p_2=0.9$
- осевое сжимающее усилие, Н: $F_2=G_{г. max}$
- расчётный изгибающий момент, $H^*_{м.}$:

$$M_{2_i} := (M_{G2} + 0.6 \cdot M_{v2_i})$$

$$M_{2_i} = \begin{pmatrix} 871800 \\ 876000 \\ 876600 \\ 876000 \\ 874200 \\ 878400 \\ 897000 \\ 897000 \end{pmatrix}$$

Проверка прочности

Корпус колонного аппарата

Расчет напряжений для условий испытания:

Продольные напряжения для расчетных сечений σ_x , Па:

$$\sigma_{x2_i} := \frac{p2 \cdot (D_{1_i} + s_{1_i})}{4 \cdot (s_{1_i} - c)} - \frac{F_2}{\pi \cdot D_{1_i} \cdot (s_{1_i} - c)} + \frac{4 \cdot M_{2_i}}{\pi \cdot (D_{1_i})^2 \cdot (s_{1_i} - c)}$$

$$\sigma_{x2_i} =$$

$8.412 \cdot 10^7$
$8.402 \cdot 10^7$
$8.401 \cdot 10^7$
$8.402 \cdot 10^7$
$8.406 \cdot 10^7$
$8.396 \cdot 10^7$
$8.353 \cdot 10^7$
$8.353 \cdot 10^7$

Кольцевые напряжения для расчетных сечений σ_y , Па:

$$\sigma_{y_i} := \frac{p2 \cdot (D_{1_i} - s_{1_i})}{2 \cdot (s_{1_i} - c)} \quad \sigma_{y_i} =$$

179.357
179.357
179.357
179.357
179.357
179.357
179.357
179.357

Эквивалентные напряжения для расчетных сечений, Па:

коэффициент прочности кольцевого сварного шва:

$$\phi_{T_i} := \begin{cases} 1 & \text{if } \sigma_{x1_i} < 0 \\ 1 \end{cases}$$

коэффициент прочности продольного сварного шва:

$$\phi_{P_i} := \begin{cases} 1 & \text{if } \sigma_{x1_i} < 0 \\ 1 \end{cases}$$

$$\sigma_{E2_i} := \sqrt{\left(\sigma_{x2_i} \right)^2 - \sigma_{x2_i} \cdot \sigma_{y_i} \cdot \frac{\phi_{T_i}}{\phi_{P_i}} + \left(\sigma_{y_i} \cdot \frac{\phi_{T_i}}{\phi_{P_i}} \right)^2}$$

$$\sigma_{E2_i} =$$

8.412·10 ⁷
8.402·10 ⁷
8.401·10 ⁷
8.402·10 ⁷
8.406·10 ⁷
8.396·10 ⁷
8.353·10 ⁷
8.353·10 ⁷

Проверка условий прочности для расчетных сечений:

$$\max\left(\left|\sigma_{x2_i}\right| \sigma_{E2_i}\right) = \sigma_{дК} \cdot \phi_{T_i} =$$

1.43·10 ⁸
1.43·10 ⁸
1.43·10 ⁸
1.43·10 ⁸
1.43·10 ⁸
1.43·10 ⁸
1.43·10 ⁸
1.43·10 ⁸

$$\max\left(\left|\sigma_{x2_i}\right| \sigma_{E2_i}\right) \leq \sigma_{дК} \cdot \phi_{T_i}$$

1
1
1
1
1
1
1
1

$$I := \begin{cases} \text{"Условие прочности не выполняется"} \\ \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } \max(\sigma_{x2}, \sigma_{E2}) \leq \min(\sigma_{дК} \cdot \phi_T) \end{cases}$$

I = "Условие прочности выполняется"

spr1 := "Проверка устойчивости необходима"

spr2 := "Проверка устойчивости не требуется"

$$I := \begin{cases} \text{spr1} \\ \text{spr2} & \text{if } s_3 \leq s_{HO} \end{cases}$$

I = "Проверка устойчивости необходима"

Проверка устойчивости

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

$$F_{\text{д}} := \frac{F_{\text{дП}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{F_{\text{дП}}}{F_{\text{дЕ}}}\right)^2}},$$

где допускаемое осевое сжимающее усилие $F_{\text{дП}}$ из условия прочности

$$F_{\text{дП}} := \pi \cdot (D_3 + s_3 - c) \cdot (s_3 - c) \cdot \sigma_{\text{д0}} \quad F_{\text{дП}} = 1.787 \times 10^7 \quad \text{Па}$$

а допускаемое осевое сжимающее усилие в пределах упругости $F_{\text{дЕ}}$ из условия устойчивости

$$F_{\text{дЕ}} := \min((F_{\text{дЕ1}} \quad F_{\text{дЕ2}}))$$

Где допускаемое осевое сжимающее усилие $F_{\text{дЕ1}}$ определяют из условия местной устойчивости в пределах упругости по формуле:

$$n_y = 2.4$$

$$F_{\text{дЕ1}} := \frac{310 \cdot 10^{-6} \cdot E}{n_y} \cdot D_3^2 \cdot \left[\frac{100 \cdot (s_3 - c)}{D_3} \right]^{2.5} \quad F_{\text{дЕ1}} = 1.959 \times 10^7 \quad \text{Па}$$

Гибкость λ определяют по формуле:

$$\lambda := \frac{2.85 \cdot l_{\text{пр}}}{D_1 + s_3 - c}$$

а допускаемое осевое сжимающее усилие $F_{\text{дЕ2}}$ - из условия общей устойчивости в пределах упругости по формуле

$$F_{\text{дЕ2}} := \frac{\pi \cdot (D_1 + s_3 - c) \cdot (s_3 - c) \cdot E}{n_y} \cdot \left(\frac{\pi}{\lambda} \right)^2 \quad F_{\text{дЕ2}} = 6.218 \times 10^{11} \quad \text{Па}$$

$$F_{дЕ} := \begin{cases} \min((F_{дЕ1} \ F_{дЕ2})) \\ F_{дЕ1} \text{ if } \frac{1}{D_{ор}} < 10 \end{cases}$$

$$F_{дЕ} = 1.959 \times 10^7$$

$$F_{д1} := \frac{F_{дП}}{\sqrt{1 + \left(\frac{F_{дП}}{F_{дЕ}}\right)^2}} \quad F_{д1} = 1.32 \times 10^7 \text{ Па}$$

Допускаемый изгибающий момент можно определять по формуле

- коэффициент ϕ_3 определяем по графику: $\phi_3=0.88$

$$n_v=2.4$$

$$M_{д1} := \frac{\pi}{4} \cdot D_3 \cdot (D_3 + s_3 - c) \cdot (s_3 - c) \cdot \sigma_{д0} \cdot \phi_3 \quad M_{д1} = 1.101 \times 10^7 \text{ Н}$$

$$F_1 = 3.224 \times 10^6$$

$$\frac{F_1}{F_{д1}} + \frac{M_1}{M_{д1}} \leq 1.0 =$$

	0
0	1
1	1
2	1
3	1
4	1
5	...

$spr1 :=$ "Условие устойчивости не выполняется."

$spr2 :=$ "Условие устойчивости выполняется для всех расчетных сечений."

$$I := \begin{cases} spr1 \\ spr2 \text{ if } \frac{F_1}{F_{д1}} + \frac{\min(M_1)}{M_{д1}} \leq 1.0 \end{cases}$$

$I =$ "Условие устойчивости выполняется для всех расчетных сечений."

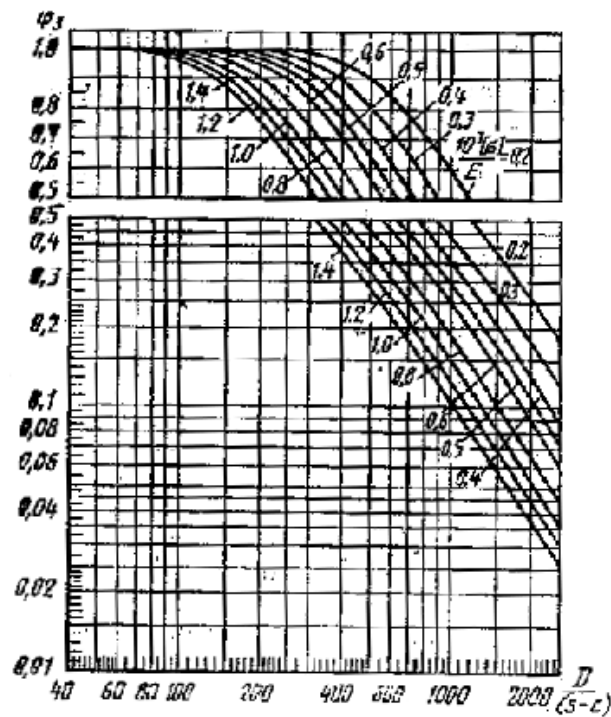


Рисунок 22. Определение коэффициента ϕ_3

Расчет опорной обечайки

Проверку прочности сварного шва, соединяющего корпус колонны с опорной обечайкой для условий испытания следует проводить по формуле:

$$\sigma_{\text{ш}} := \frac{1}{\pi \cdot D_3 \cdot a_1} \cdot \left(\frac{4 \cdot M_{23}}{D_3} + F_2 \right) \quad \sigma_{\text{ш}} = 8.727 \times 10^7$$

$$\phi_s \cdot \min((\sigma_{\text{д0}} \quad \sigma_{\text{дК}})) = 1.001 \times 10^8$$

$$\frac{1}{\pi \cdot D_3 \cdot a_1} \cdot \left(\frac{4 \cdot M_{13}}{D_3} + F_1 \right) \leq \phi_s \cdot \min((\sigma_{\text{д0}} \quad \sigma_{\text{дК}})) = 1$$

$\text{spr1} := \text{"Условие прочности не выполняется"}$

$\text{spr2} := \text{"Условие прочности выполняется"}$

$$I := \begin{cases} \text{spr1} \\ \text{spr2} \text{ if } \frac{1}{\pi \cdot D_3 \cdot a_1} \cdot \left(\frac{4 \cdot M_{13}}{D_3} + F_2 \right) \leq \phi_s \cdot \min((\sigma_{\text{д0}} \quad \sigma_{\text{дК}})) \end{cases}$$

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

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

$$F_{д} := \frac{F_{дП}}{\sqrt{1 + \left(\frac{F_{дП}}{F_{дЕ}}\right)^2}}$$

где допускаемое осевое сжимающее усилие $F_{дП}$ из условия прочности

$$F_{дП} := \pi \cdot (D_3 + s_3 - c) \cdot (s_3 - c) \cdot \sigma_{д0} \quad F_{дП} = 1.787 \times 10^7 \text{ Па}$$

а допускаемое осевое сжимающее усилие в пределах упругости $F_{дЕ}$ из условия устойчивости

$$F_{дЕ} := \min((F_{дЕ1} \quad F_{дЕ2}))$$

Где в формуле допускаемое осевое сжимающее усилие $F_{дЕ1}$ определяют из условия местной устойчивости в пределах упругости по формуле

$n_y = 1.8$ - для условия испытания

$$F_{дЕ1} := \frac{310 \cdot 10^{-6} \cdot E}{n_y} \cdot D_3^2 \cdot \left[\frac{100 \cdot (s_3 - c)}{D_3} \right]^{2.5} \quad F_{дЕ1} = 2.612 \times 10^7 \text{ Па}$$

Гибкость λ определяют по формуле:

$$\lambda := \frac{2.85 \cdot l_{пр}}{D_1 + s_3 - c}$$

а допускаемое осевое сжимающее усилие $F_{дЕ2}$ - из условия общей устойчивости в пределах упругости по формуле:

$$F_{дЕ2} := \frac{\pi \cdot (D_1 + s_3 - c) \cdot (s_3 - c) \cdot E}{n_y} \cdot \left(\frac{\pi}{\lambda} \right)^2 \quad F_{дЕ2} = 6.218 \times 10^{11} \text{ Па}$$

$$F_{дЕ} := \begin{cases} \min((F_{дЕ1} \ F_{дЕ2})) \\ F_{дЕ1} \text{ if } \frac{1}{D_{ор}} < 10 \end{cases}$$

$$F_{дЕ} = 2.612 \times 10^7$$

$$F_{д2} := \frac{F_{дП}}{\sqrt{1 + \left(\frac{F_{дП}}{F_{дЕ}}\right)^2}} \quad F_{д2} = 1.475 \times 10^7 \text{ Па}$$

Допускаемый изгибающий момент следует рассчитывать по формуле:

$$M_{д} := \frac{M_{дП}}{\sqrt{1 + \left(\frac{M_{дП}}{M_{дЕ}}\right)^2}}$$

где допускаемый изгибающий момент из условия прочности рассчитывают по формуле

$$M_{дП} := \frac{\pi}{4} \cdot D_3 \cdot (D_3 + s_3 - c) \cdot (s_3 - c) \cdot \sigma_{д} \quad M_{дП} := \frac{D_3}{4} \cdot F_{дП}$$

$$M_{дП} = 1.251 \times 10^7 \text{ Н·м}$$

а допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости - по формуле

$n_y = 1.1$ - для условий испытания

$$M_{дЕ} := \frac{89 \cdot 10^{-6} \cdot E}{n_y} \cdot D_1^3 \cdot \left[\frac{100 \cdot (s_{15} - c)}{D_3} \right]^{2.5} \quad M_{дЕ} := \frac{D_3}{3.5} \cdot F_{дЕ}$$

$$M_{дЕ} = 2.09 \times 10^7$$

$$M_{д2} := \frac{M_{дП}}{\sqrt{1 + \left(\frac{M_{дП}}{M_{дЕ}}\right)^2}} \quad M_{д2} = 1.073 \times 10^7 \text{ Н}$$

Условие устойчивости опорной обечайки в зоне отверстия для условий испытания:

Ψ_1 , Ψ_2 , Ψ_3 - коэффициенты, определяемые соответственно по черт. 4,4 и 6.

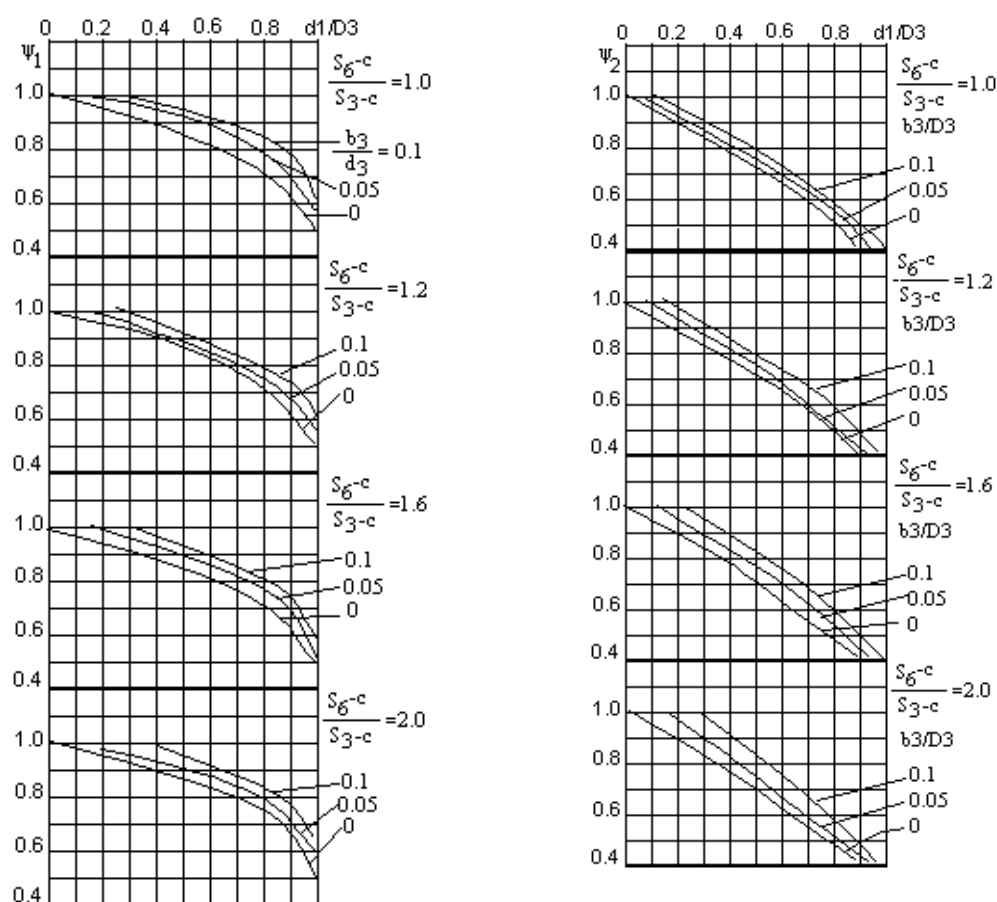


Рисунок 23. Определение коэффициентов Ψ_1 , Ψ_2

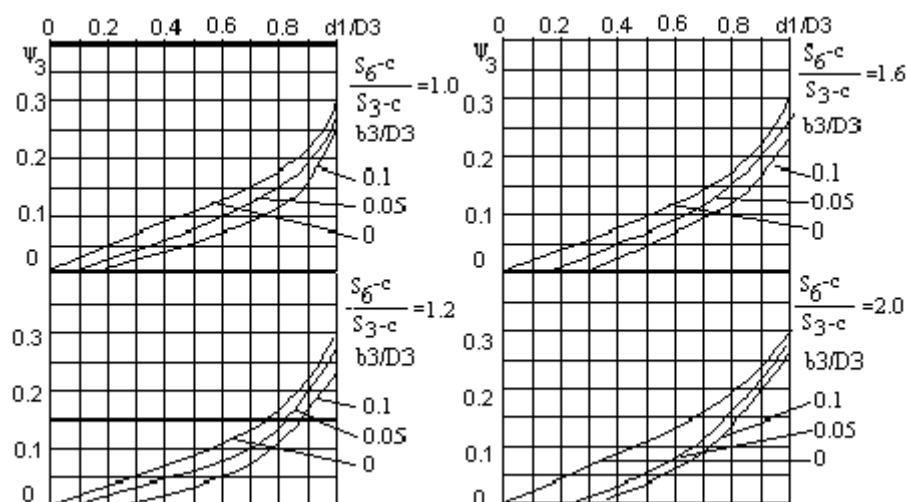


Рисунок 24. Определение коэффициента Ψ_3

$$\Psi_1=1, \Psi_2=0.91, \Psi_3=0.25$$

$$M_{25} := 4.847 \cdot 10^4$$

$$\frac{F_2}{\Psi_1 \cdot F_{д2}} + \frac{M_{25} + F_2 \cdot \Psi_3 \cdot D_3}{\Psi_2 \cdot M_{д2}} = 0.901$$

$$\frac{F_2}{\Psi_1 \cdot F_{д2}} + \frac{M_{25} + F_2 \cdot \Psi_3 \cdot D_3}{\Psi_2 \cdot M_{д2}} \leq 1.0 = 1$$

$$M_2 = \begin{pmatrix} 8.718 \times 10^5 \\ 8.76 \times 10^5 \\ 8.766 \times 10^5 \\ 8.76 \times 10^5 \\ 8.742 \times 10^5 \\ 4.847 \times 10^4 \\ 8.97 \times 10^5 \\ 8.97 \times 10^5 \end{pmatrix}$$

spr1 := "Условие устойчивости опорной обечайки не выполняется"

spr2 := "Условие устойчивости опорной обечайки выполняется"

$$I := \begin{cases} \text{spr1} \\ \text{spr2} \text{ if } \frac{F_2}{\Psi_1 \cdot F_{д2}} + \frac{M_{25} + F_2 \cdot \Psi_3 \cdot D_3}{\Psi_2 \cdot M_{д2}} \leq 1.0 \end{cases}$$

I = "Условие устойчивости опорной обечайки выполняется"

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

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

где ψ_1, ψ_2, ψ_3 - коэффициенты, определяемые соответственно по графикам 2 и 3.

Если кольцевой шов находится вне зоны отверстий, то коэффициенты

$$\psi_1 := 1.0 \quad \psi_2 := 1.0 \quad \psi_3 := 0.$$

- в условиях испытания

$$\sigma_{x5} := \frac{1}{\pi \cdot D_3 \cdot (s_3 - c)} \cdot \left[\frac{4 \cdot (M_{25} + F_2 \cdot \psi_3 \cdot D_3)}{\psi_2 \cdot D_3} - \frac{F_2}{\psi_1} \right] \quad \sigma_x = -6.569 \times 10^7 \text{ Па}$$

$$\phi_{T5} := 1$$

$$\phi_{T_5} \cdot \sigma_{д0} = 1.84 \times 10^8 \text{ Па}$$

$$\frac{1}{\pi \cdot D_3 \cdot (s_3 - c)} \cdot \left[\frac{4 \cdot (M_{2_5} + F_2 \cdot \psi_3 \cdot D_3)}{\psi_2 \cdot D_3} - \frac{F_2}{\psi_1} \right] \leq \phi_{T_5} \cdot \sigma_{д0} = 1$$

spr1 := "Условие не выполняется"

spr2 := "Условие выполняется"

$$I := \begin{cases} \text{spr1} \\ \text{spr2} \text{ if } \frac{1}{\pi \cdot D_3 \cdot (s_3 - c)} \cdot \left[\frac{4 \cdot (M_{2_5} + F_2 \cdot \psi_3 \cdot D_3)}{\psi_2 \cdot D_3} - \frac{F_2}{\psi_1} \right] \leq \phi_{T_5} \cdot \sigma_{д0} \end{cases}$$

I = "Условие выполняется"

Расчет нижнего опорного узла

Ширина опорного кольца b_1 и b_2 .

$$b_{1R} := \frac{1}{\pi \cdot D_4 \cdot \sigma_{дбет}} \cdot \left(\frac{4 \cdot M_{2_5}}{D_4} + F_1 \right) \quad b_{1R} = 0.013 \text{ м.}$$

$$b_1 := \begin{cases} \text{"Ширина } b_1 \text{ не достаточна, измените ее в исходных данных"} \\ b_1 \text{ if } b_{1R} \leq b_1 \end{cases}$$

$$b_1 = 0.25$$

Выступающая ширина нижнего опорного кольца b_2 :

$$b_2 := \text{round} \left[\left[\frac{(2 \cdot d_{2H} + 0.03) + \frac{2}{3} \cdot b_1}{2} \right], 3 \right]$$

$$b_2 = 0.128$$

Напряжение сжатия в бетоне следует рассчитывать по формуле:

$$\sigma_{бет} := \sigma_{дбет} \cdot \frac{b_{1R}}{b_1} \quad \sigma_{бет} = 1.615 \times 10^6 \text{ Па}$$

Условие прочности сварного шва:

$\text{spr1} := \text{"Условие прочности сварного шва не выполняется"}$

$\text{spr2} := \text{"Условие прочности сварного шва выполняется"}$

$\text{spr3} := \text{"Проверку на прочность сварного шва для этого исполнения проводить не следует"}$

$$I := \begin{cases} \text{spr1} \\ \text{spr2} & \text{if } \max \left[\frac{1}{\pi \cdot D_3 \cdot 2 \cdot a_2} \cdot \left(\frac{4 \cdot M_1}{D_3} - F_1 \right) \right] \leq 0.6 \cdot \sigma_{d0} \wedge \text{tisp} = 1 \\ \text{spr3} & \text{if } \text{tisp} = 2 \vee \text{tisp} = 3 \vee \text{tisp} = 4 \end{cases}$$

$I = \text{"Проверку на прочность сварного шва для этого исполнения проводить не следует"}$

Толщина нижнего опорного кольца.

$$\chi_1 := \begin{cases} 1 & \text{if } \text{tisp} = 1 \\ \frac{\left[1 + 1.81 \cdot \left(\frac{b_2}{b_7} \right)^3 \right]^2}{\left[1 + 2.97 \cdot \left(\frac{b_2}{b_7} \right)^3 \right]} & \text{if } \text{tisp} = 2 \vee \text{tisp} = 3 \vee \text{tisp} = 4 \end{cases}$$

$$\chi_1 = 0.991$$

$$s_4 := \max \left(\left(\chi_1 \cdot b_2 \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot \sigma_{\text{бет}}}{\sigma_{d0}}} + c \quad 1.5 \cdot s_3 \right) \right) \quad s_4 = 0.024 \text{ м.}$$

Примем толщину нижнего опорного кольца $s_4 := 0.026$ м, что должно удовлетворять условию:

$$s_4 \geq \max \left(\left(\chi_1 \cdot b_2 \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot \sigma_{\text{бет}}}{\sigma_{d0}}} + c \quad 1.5 \cdot s_3 \right) \right) = 1$$

$\text{spr1} := \text{"Условие не выполняется"}$

$\text{spr2} := \text{"Условие выполняется"}$

$\text{spr3} := \text{"Условие не выполняется, примените конструкцию опорного узла исполнения С или D"}$

$$I := \begin{cases} \text{spr1} \\ \text{spr2} & \text{if } s_4 \geq \max \left(\left(\chi_1 \cdot b_2 \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot \sigma_{\text{бет}}}{\sigma_{d0}}} + c \quad 1.5 \cdot s_3 \right) \right) \\ \text{spr3} & \text{if } s_4 > 2 \cdot s_3 \end{cases}$$

$I = \text{"Условие выполняется"}$

Толщина верхнего опорного элемента - кольца:
 где χ_2 - коэффициент.

$$\chi_2 := \sqrt{\frac{3 \cdot \left(\frac{b_5}{b_6}\right)}{\left(\frac{b_5}{b_6}\right)^2 - \frac{e_1}{1 - \frac{e_1}{b_6}}}} \quad \chi_2 = 2.953$$

$$s_5 := \max\left(\left(\chi_2 \cdot \sqrt{\frac{A_{\sigma} \cdot \sigma_{дВ}}{\sigma_{д0}}} + c \cdot 1.5 \cdot s_3\right)\right) \quad s_5 = 0.078$$

Принимаем $s_5 := 0.08$

Толщина ребра.

$$\chi_3 := \begin{cases} 2 & \text{if } tisp = 2 \vee tisp = 4 \\ \text{"Считать не надо"} & \text{if } tisp = 1 \\ 1 & \text{if } tisp = 3 \end{cases}$$

$$\chi_3 = 2$$

spr1 := "Считать не надо, ребро отсутствует"

$$s_7 := \begin{cases} spr1 & \text{if } tisp = 1 \\ \max\left(\left(\frac{A_{\sigma} \cdot \sigma_{дВ}}{\chi_3 \cdot b_2 \cdot \sigma_{д0}} + c \cdot 0.4 \cdot s_4\right)\right) & \text{if } tisp = 2 \vee tisp = 3 \vee tisp = 4 \end{cases}$$

$s_7 = 0.01 \text{ м.}$

Нагрузки стенки опорной обечайки от верхнего опорного элемента - кольца.

Местное напряжение изгиба следует рассчитывать по формуле:

где $\chi_4 := 0.0106$ - коэффициент, определяемый по графику 4.

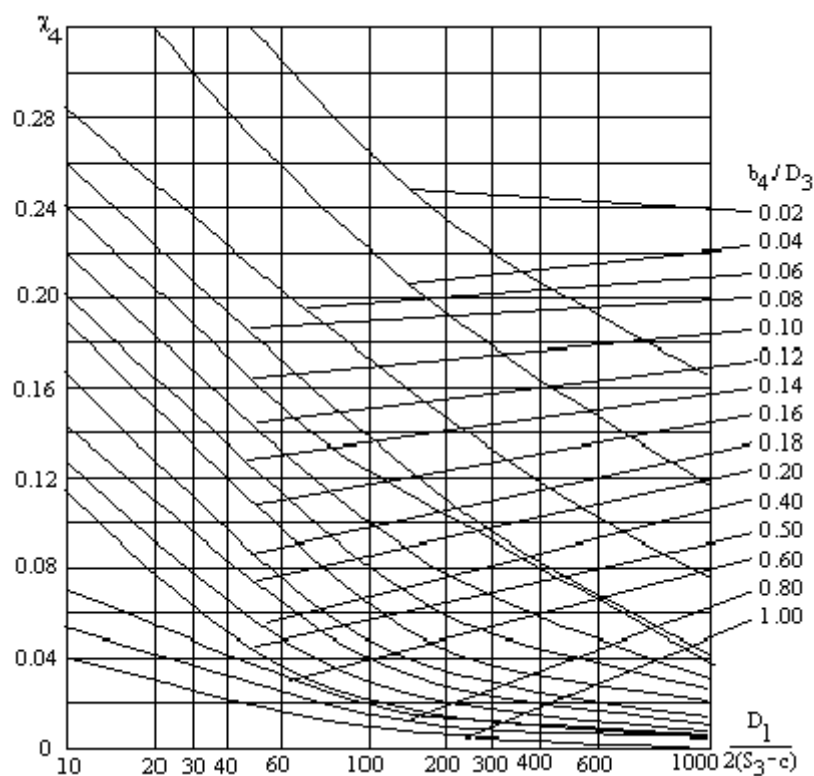


Рисунок 25. Определение коэффициента χ_4

$$\sigma_{1x} := \frac{6 \cdot \chi_4 \cdot A_{\sigma} \cdot \sigma_{dB} \cdot e_2}{(s_3 - c)^2 \cdot h_1} \quad \sigma_{1x} = 1.892 \times 10^7 \text{ Па}$$

$\sigma_{дп}$ - предельное напряжение изгиба определяется по формуле:

K_{21} - для условий испытания $K_{21} := 1$

$K_{20} := 1.5$

$n_T := 1.1$ при условиях испытания

$$v := \frac{K_{21}}{n_T} \cdot \frac{1}{\sigma_{д0} \cdot \phi_0} \cdot \frac{1}{3.14 \cdot D_3 \cdot (s_3 - c)} \cdot \left[\left(\frac{4 \cdot M_{25}}{D_3} \right) - F_2 \right] \quad v = -0.325$$

$$\sigma_{дп} := \frac{K_{20} \cdot \sigma_{д0} \cdot n_T}{K_{21}} \quad \sigma_{дп} = 3.036 \times 10^8 \text{ Па}$$

Проверку следует проводить по формуле: $\sigma_{1x} \leq \sigma_{дп} = 1$,

$spr1 :=$ "Условие не выполняется"

$spr2 :=$ "Условие выполняется"

$I := \begin{cases} spr1 \\ spr2 \text{ if } \sigma_{1x} \leq \sigma_{дп} \end{cases}$

I = "Условие выполняется"

Высота нижнего опорного узла исполнений C и D.

Высоту h_1 опорного узла при выполнении условия $b_2 := b_5$, следует определять по формуле

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

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

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

$$h_1 > \frac{D_4 \cdot e_2 \cdot b_1}{2 \cdot (s_5 - c) \cdot b_5} \cdot \frac{\sigma_{\text{бет}}}{\sigma_{\text{д0}}} \cdot \left(\frac{1}{\chi_5} + \frac{6.58}{n^2 \cdot \chi_6} \cdot \frac{D_4}{b_5} \right) = 1 \quad h_1 = 0.25$$

$\text{spr1} := \text{"Условие не выполняется"}$

$\text{spr2} := \text{"Условие выполняется"}$

$$I := \begin{cases} \text{spr1} \\ \text{spr2} \text{ if } h_1 > \frac{D_4 \cdot e_2 \cdot b_1}{2 \cdot (s_5 - c) \cdot b_5} \cdot \frac{\sigma_{\text{бет}}}{\sigma_{\text{д0}}} \cdot \left(\frac{1}{\chi_5} + \frac{6.58}{n^2 \cdot \chi_6} \cdot \frac{D_4}{b_5} \right) \end{cases}$$

I = "Условие выполняется"

Расчет анкерных болтов

Число анкерных болтов n устанавливают конструктивно, при этом

$n=4,6,8,10,12,16$...далее кратно 4.

$$M_{25} = 4.847 \cdot 10^4$$

$$d_2 := \begin{cases} 100 \cdot \left(\chi_8 \cdot \sqrt{\frac{|M_{25} - 0.44 \cdot F_2 \cdot D_4|}{n \cdot \sigma_{dB} \cdot D_4}} + c \right) \\ 23.2 \text{ if } \frac{0.44 \cdot F_2 \cdot D_4}{M_{25}} > 1.0 \wedge D_K \leq 1.4 \\ 28.6 \text{ if } \frac{0.44 \cdot F_2 \cdot D_4}{M_{25}} > 1.0 \wedge 1.4 < D_K < 2.2 \\ 34 \text{ if } \frac{0.44 \cdot F_3 \cdot D_4}{M_{35}} > 1.0 \wedge 1.4 < D_K < 2.2 \end{cases}$$

spr1 := "Внутренний диаметр резьбы анкерного болта:"

spr2 := "Необходимо не меньше четырех и не больше 12-ти болтов диаметром М24"

spr3 := "Необходимо не меньше шести и не больше 12-ти болтов диаметром М30"

spr4 := "Необходимо болты диаметром М36 (не больше 12) установить с шагом 1.2 метра. "

$$I := \begin{cases} \text{spr1} \\ \text{spr2} \text{ if } \frac{0.44 \cdot F_3 \cdot D_4}{M_{35}} > 1.0 \wedge D_K \leq 1.4 \\ \text{spr3} \text{ if } \frac{0.44 \cdot F_3 \cdot D_4}{M_{35}} > 1.0 \wedge 1.4 < D_K < 2.2 \\ \text{spr4} \text{ if } \frac{0.44 \cdot F_3 \cdot D_4}{M_{35}} > 1.0 \wedge D_K > 2.2 \end{cases}$$

I = "Необходимо болты диаметром М36 (не больше 12) установить с шагом 1.2 метра. "

$$d_2 = 22.381$$

Рассчитали колонну на прочность и устойчивость. Прочность и устойчивость колонны и опорной обечайки обеспечены. Оптимальная толщина опорной обечайки равна 14 мм. Диаметр анкерных болтов М36.

4. Технологический расчет

4.1 Тепловой расчет

Расход смеси (G_2) (кг/с):

$$G_2 = 6,28 \text{ кг/с}$$

Температура кипения смеси равна:

$$t_{\text{кип}} = 85^\circ\text{C}.$$

Из табл. LVII подберем параметры греющего пара [1, с. 548]:

$$P_{\text{абс}} = 2 \text{ кгс/см}^2; T_{\text{кип}} = 119,62^\circ\text{C}; r_1 = 2202,8 \text{ кДж/кг}.$$

Расчет теплового баланса:

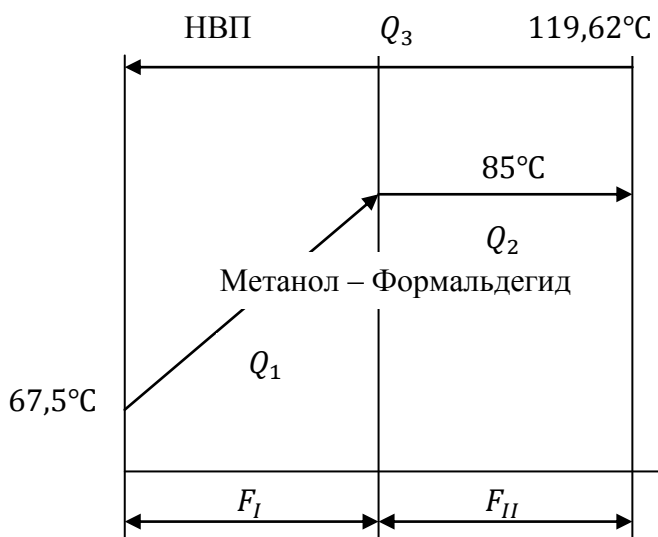


Рисунок 26 – Температурная схема процесса

Q_1 – тепло, необходимое для нагрева бинарной смеси до $t_{\text{кип}}$;

Q_2 – тепло, необходимое для испарения смеси;

Q_3 – тепло, отдаваемое водяным паром;

$Q_{\text{п}}$ – тепловые потери (примем 5%).

$$Q_1 = G_2 \cdot C_{p2} \cdot (t_{\text{кип}} - t_{\text{н}});$$

$$Q_2 = G_2 \cdot r_2;$$

$$Q_3 = G_1 \cdot r_1;$$

$$Q_{\text{п}} = 0,05Q_3.$$

Уравнение теплового баланса:

$$Q_3 = Q_1 + Q_2 + Q_{\text{п}};$$

$$G_1 \cdot r_1 = G_2 \cdot C_{p2} \cdot (t_{\text{кип}} - t_{\text{н}}) + G_2 \cdot r_2 + 0,05 \cdot G_1 \cdot r_1;$$

$$0,95 \cdot G_1 \cdot r_1 = G_2 \cdot C_{p2} \cdot (t_{\text{кип}} - t_{\text{н}}) + G_2 \cdot r_2.$$

Найдем расход водяного пара:

$$G_1 = \frac{G_2 \cdot C_{p2} \cdot (t_{\text{кип}} - t_{\text{н}}) + G_2 \cdot r_2}{0,95 \cdot r_1}$$

Из рис. XI [1, с. 562] определим теплоемкость смеси при средней температуре:

$$t_{\text{ср}} = \frac{t_{\text{н}} + t_{\text{кип}}}{2} = \frac{67,5 + 85}{2} = 76,25^{\circ}\text{C}.$$

Теплоемкость смеси равна:

$$C_{p2} = 4082 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Найдем удельную теплоту испарения смеси при температуре $t_{\text{ср}}$ [1, с. 541]:

$$r_{\text{м}} = 1100 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}};$$

$$r_{\text{ф}} = 2290 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}.$$

$$\begin{aligned} r_2 &= r_{\text{м}} \cdot \bar{x}_{\text{м}} + r_{\text{ф}} \cdot \bar{x}_{\text{ф}} = 1100 \cdot 10^3 \cdot 0,035 + 2290 \cdot 10^3 \cdot 0,965 \\ &= 1827,3 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}. \end{aligned}$$

Расход греющего пара:

$$G_1 = \frac{6,28 \cdot 4082 \cdot (76,25 - 67,5) + 6,28 \cdot 1827,3 \cdot 10^3}{0,95 \cdot 2202,8 \cdot 10^3} = 5,59 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Расчет зоны нагрева и испарения теплообменника

Рассчитываем I зону – зону нагрева.

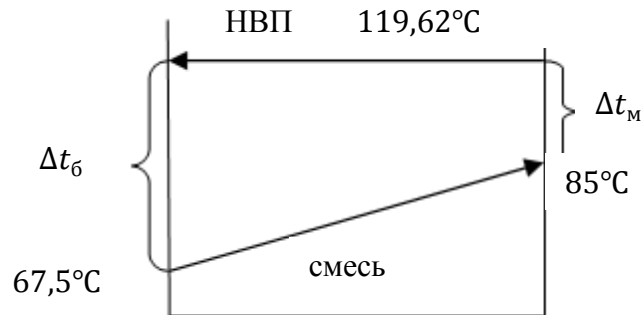


Рисунок 27. Зона нагрева

$$\Delta t_{\phi} = 119,62 - 67,5 = 52,12^{\circ}\text{C};$$

$$\Delta t_{\text{м}} = 119,62 - 85 = 34,62^{\circ}\text{C};$$

$$\Delta T = 119,62 - 119,62 = 0^{\circ}\text{C};$$

$$\Delta t = 85 - 67,5 = 17,5^{\circ}\text{C};$$

$$A = \sqrt{\Delta T^2 + \Delta t^2} = \sqrt{0 + 17,5^2} = 17,5^{\circ}\text{C}.$$

$$\Delta t_{\text{ср}}^{\text{I}} = \frac{A}{\ln\left(\frac{\Delta t_{\phi} + \Delta t_{\text{м}} + A}{\Delta t_{\phi} + \Delta t_{\text{м}} - A}\right)} = \frac{17,5}{\ln\left(\frac{52,12 + 34,62 + 17,5}{52,12 + 34,62 - 17,5}\right)} = 42,8^{\circ}\text{C}.$$

где $\Delta t_{\text{м}}$ и Δt_{ϕ} – большая и меньшая разности температур теплоносителей на границе раздела зон теплообмена, $^{\circ}\text{C}$.

Рассчитываем II зону – зону испарения.

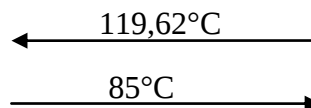


Рисунок 28. Зона испарения

Движущая сила процесса в зоне испарения:

$$\Delta t_{\text{ср}}^{\text{II}} = T - t_{\text{кип}} = 119,62 - 85 = 34,62^{\circ}\text{C}.$$

4.2 Предварительный выбор теплообменника-испарителя

Ориентировочный расчет площади теплопередающей поверхности

Используя формулу $Q = K \cdot F \cdot \Delta t_{cp}$, взяв за основу ориентировочное значение коэффициента теплопередачи, рассчитываем площадь поверхности теплообмена.

I зона:

Ориентировочные значения коэффициента теплопередачи.

От конденсирующего водяного пара к органическим жидкостям (вынужденное движение):

$$K_{op\ min}^I = 120 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}); \quad K_{op\ max}^I = 340 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

$$Q_1 = G_2 \cdot C_{p2} \cdot (t_{кип} - t_n) = 6,28 \cdot 4082 \cdot (85 - 67,5) = 448611,8 \text{ Вт}.$$

Требуемая площадь теплообмена:

$$F_{min}^I = \frac{Q_1}{K_{op\ max}^I \cdot \Delta t_{cp}^I} = \frac{448611,8}{340 \cdot 42,8} = 30,83 \text{ м}^2;$$

$$F_{max}^I = \frac{Q_1}{K_{op\ min}^I \cdot \Delta t_{cp}^I} = \frac{448611,8}{120 \cdot 42,8} = 87,35 \text{ м}^2;$$

II зона:

Ориентировочные значения коэффициента теплопередачи.

От конденсирующего водяного пара к кипящей жидкости (свободное движение):

$$K_{op\ min}^{II} = 700 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}); \quad K_{op\ max}^{II} = 2500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

$$Q_2 = G_2 \cdot r_2 = 6,28 \cdot 1827,3 \cdot 10^3 = 11475444 \text{ Вт}.$$

Требуемая площадь теплообмена:

$$F_{min}^{op} = \frac{Q_2}{K_{op\ max}^{II} \cdot \Delta t_{cp}^{II}} = \frac{11475444}{2500 \cdot 34,62} = 132,6 \text{ м}^2;$$

$$F_{max}^{op} = \frac{Q_2}{K_{op\ min}^{II} \cdot \Delta t_{cp}^{II}} = \frac{11475444}{700 \cdot 34,62} = 473,5 \text{ м}^2;$$

Суммарная требуемая поверхность:

$$F_{\min} = F_{\min}^I + F_{\min}^{II} = 30,83 + 132 = 163,43 \text{ м}^2;$$

$$F_{\max} = F_{\max}^I + F_{\max}^{II} = 87,35 + 473,5 = 560,85 \text{ м}^2.$$

Подбор стандартного теплообменника на основе ориентировочного значения поверхности теплопередачи.

Согласно ГОСТ 15119-79 и ГОСТ 15121-79 из табл. XXXIV [4, с. 533] выбираем аппарат по подходящим приведённым параметрам.

Таблица 5. Конструктивные данные теплообменника.

Диаметр кожуха (внутренний), мм	Число труб		Длина труб, м		
	Общее	На один ход	2	3	4
			Площадь поверхности теплообмена, м ² (по d _{нар})		
1400	1545	1545	-	372	486

4.3 Поверочный расчет выбранного аппарата

1) Коэффициент теплоотдачи от водяного пара к стенке в зоне нагревания

$$\alpha_1 = 3,78 \cdot \lambda_1 \cdot \sqrt[3]{\frac{\rho_1^2 \cdot N \cdot d_{\text{нар}}}{\mu_1 \cdot G_1}}.$$

Значение теплофизических величин выбираются из таблиц при температуре пленки конденсата:

$$t_{\text{пл}} = \frac{T_1 + t_{\text{ст1}}}{2};$$

где

$$t_{\text{ст1}} = T_1 - 0,1 \cdot \Delta t_{\text{ср}}^I = 119,62 - 0,1 \cdot 42,8 = 115,34^\circ\text{C}.$$

$$t_{\text{пл}} = \frac{119,62 + 115,34}{2} = 117,48^\circ\text{C}.$$

Теплофизические величины, табл. XXXIX [3, с. 537]:

$$\rho_1 = 1120 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3};$$

$$\mu_1 = 11,97 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с};$$

$$\lambda_1 = 2,37 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}.$$

Коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha_1 = 3,78 \cdot 2,37 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt[3]{\frac{1120^2 \cdot 1545 \cdot 0,025}{11,97 \cdot 10^{-6} \cdot 5,59}} = 804,5 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

2) Коэффициент теплоотдачи от стенки к смеси в зоне нагрева

При средней температуре $t_{\text{ср}} = 76,5^\circ\text{C}$ теплофизические величины смеси:

Плотность, табл. IV [4, с. 512]:

$$\rho_2 = 930,3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Вязкость, рис. V [4, 556]:

$$\mu_2 = 0,15 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

Скорость смеси в трубах:

$$\omega_2 = \frac{G_2}{\rho_2 \cdot S_2 \cdot N} = \frac{6,28}{930,3 \cdot 0,785 \cdot 0,021^2 \cdot 1545} = 0,0126 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Коэффициент теплопроводности, рис. X [3, с. 560]:

$$\lambda_{\text{м}} = 0,141 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}};$$

$$\lambda_{\text{ф}} = 0,163 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}.$$

$$\lambda_2 = \lambda_{\text{м}} \cdot \bar{x}_{\text{м}} + \lambda_{\text{ф}} \cdot \bar{x}_{\text{ф}} = 0,141 \cdot 0,035 + 0,163 \cdot 0,965 = 0,162 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}.$$

Критерий Прандтля:

$$Pr_2 = \frac{C_{p2} \cdot \mu_2}{\lambda_2} = \frac{4082 \cdot 0,15 \cdot 10^{-3}}{0,162} = 3,8.$$

Критерий Рейнольдса:

$$Re_2 = \frac{\omega_2 \cdot d_{\text{внутр}} \cdot \rho_2}{\mu_2} = \frac{0,0126 \cdot 0,021 \cdot 930,3}{0,15 \cdot 10^{-3}} = 1641.$$

$Re_2 < 2300 \Rightarrow$ режим течения ламинарный.

Критерий Грасгофа:

$$Gr_2 = \frac{d_{\text{экв}}^3 \cdot \rho_2^2 \cdot \beta \cdot \Delta t \cdot g}{\mu_2^2},$$

где β – коэффициент объемного расширения, табл. XXXIII [3, с. 531]:

$$\beta_{\text{м}} = 1,28 \cdot 10^{-3};$$

$$\beta_{\text{ф}} = 1,125 \cdot 10^{-3};$$

$$\beta = \beta_{\text{м}} \cdot \bar{x}_{\text{м}} + \beta_{\text{ф}} \cdot \bar{x}_{\text{ф}} = 1,28 \cdot 10^{-3} \cdot 0,035 + 1,125 \cdot 10^{-3} \cdot 0,965 = 1,13 \cdot 10^{-3}.$$

Разность температур:

$$\Delta t = t_{\text{ст}2} - t_{\text{ср}},$$

где:

$$t_{\text{ст}2} = t_{\text{ср}} + 0,8 \cdot \Delta t_{\text{ср}}^I = 76,25 + 0,8 \cdot 42,8 = 110,49^\circ\text{C}.$$

$$\Delta t = 110,49 - 76,25 = 34,24^\circ\text{C}.$$

$$Gr_2 = \frac{0,021^3 \cdot 930,3^2 \cdot 1,13 \cdot 10^{-3} \cdot 34,24 \cdot 9,81}{0,15^2 \cdot 10^{-6}} = 135,2 \cdot 10^6.$$

$$Gr_2 \cdot Pr_2 = 135,2 \cdot 10^6 \cdot 6,81 = 5,13 \cdot 10^7.$$

$$10^3 < Gr_2 \cdot Pr_2 < 10^9.$$

$$Nu = 0,76 \cdot (Gr_2 \cdot Pr_2)^{0,25} \cdot \left(\frac{Pr_2}{Pr_{\text{ст}}}\right)^{0,25}.$$

Определим критерий Прандтля при $t_{\text{ст}2} = 110,49^\circ\text{C}$:

$$Pr_{\text{ст}} = \frac{C_{p \text{ ст}} \cdot \mu_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}}.$$

Теплофизические величины:

Теплоемкость смеси равна:

$$C_{p \text{ ст}} = 4078 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Аналогично:

$$\lambda_{\text{ст}} = 0,141 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}};$$

$$\mu_{\text{ст}} = 0,38 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

Критерий Прандтля:

$$Pr_{\text{ст}} = \frac{4078 \cdot 0,38 \cdot 10^{-3}}{0,141} = 10,99.$$

Критерий Нуссельта:

$$Nu = 0,76 \cdot (5,13 \cdot 10^7)^{0,25} \cdot \left(\frac{6,81}{10,99} \right)^{0,25} = 57,07.$$

Коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha_2^I = \frac{Nu_2 \cdot \lambda_2}{d_{\text{внутр}}} = \frac{57,07 \cdot 0,162}{0,021} = 440,25 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

3) Коэффициент теплоотдачи от водяного пара к стенке в зоне испарения

$$\alpha_1 = 3,78 \cdot \lambda_1 \cdot \sqrt[3]{\frac{\rho_1^2 \cdot N \cdot d_{\text{нар}}}{\mu_1 \cdot G_1}}.$$

Значение теплофизических величин выбираются из таблиц при температуре пленки конденсата:

$$t_{\text{пл}} = \frac{T_1 + t_{\text{ст1}}}{2};$$

где

$$t_{\text{ст1}} = T_1 - 0,1 \cdot \Delta t_{\text{ср}}^{II} = 119,62 - 0,1 \cdot 34,62 = 116,158^\circ\text{C}.$$

$$t_{\text{пл}} = \frac{119,62 + 116,158}{2} = 117,89^\circ\text{C}.$$

Теплофизические величины, табл. XXXIX [4, с. 537]:

$$\rho_1 = 1125 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3};$$

$$\mu_1 = 12,2 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с};$$

$$\lambda_1 = 2,1 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}.$$

Коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha_1 = 3,78 \cdot 2,1 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt[3]{\frac{1125^2 \cdot 1545 \cdot 0,025}{12,2 \cdot 10^{-6} \cdot 0,63}} = 1470,74 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

4) Коэффициент теплоотдачи от стенки к смеси в зоне испарения

$$\alpha_2^{II} = b^3 \frac{\lambda^2 \cdot \rho \cdot (\Delta T_{\text{кип}})^2}{\mu \cdot \sigma T_{\text{кип}}}.$$

$$\Delta T_{\text{кип}} = t_{\text{ст}} - t_{\text{кип}}.$$

Теплофизические свойства смеси метанол – формальдегид берутся при температуре кипения смеси $t_{\text{кип}} = 85^\circ\text{C}$.

Коэффициент теплопроводности, рис. X [3, с. 560]:

$$\lambda_{\text{м}} = 0,18 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}};$$

$$\lambda_{\text{ф}} = 0,193 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}.$$

$$\lambda = \lambda_{\text{м}} \cdot \bar{x}_{\text{м}} + \lambda_{\text{ф}} \cdot \bar{x}_{\text{ф}} = 0,13 \cdot 0,035 + 0,16 \cdot 0,965 = 0,191 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}.$$

Плотность, табл. IV [4, с. 512]:

$$\rho_2 = 895 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Температура стенки:

$$t_{\text{ст}} = t_{\text{кип}} + \Delta t_{\text{ср}}^{II} \cdot 0,8 = 85 + 0,8 \cdot 34,62 = 112,7^\circ\text{C}.$$

$$\Delta T_{\text{кип}} = 112,7 - 85 = 27,7^\circ\text{C}.$$

Вязкость, рис. V [3, 556]:

$$\mu_2 = 0,17 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

Поверхностное натяжение, табл. XXIV [4, с. 526]:

$$\sigma = 16,5 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Вт}}{\text{м}}.$$

Плотность паров:

$$\rho_{\text{см}}^{\text{п}} = 1,135 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

По рис. 4.10 (1, с. 166) $b=0.092$.

Таким образом:

$$\alpha_2^{\text{II}} = 0,092^3 \frac{0,191^2 \cdot 1545 \cdot (27,7)^2}{0,17 \cdot 10^{-3} \cdot 16,5 \cdot 10^{-3} \cdot (273 + 85)} = 11567,7 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

5) Температурное сопротивление стенки [3, с. 195]:

$$\sum r_{\text{ст}} = r_{31} + \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} + r_{32},$$

где r_{31} – тепловое сопротивление загрязнения стенки со стороны пара;

r_{32} – тепловое сопротивление загрязнения стенки со стороны смеси;

$\lambda_{\text{ст}}$ – коэффициент теплопроводности материала стенки, Вт/(м · К);

δ – толщина стенки трубок, м.

Зона нагрева.

Принимаем тепловые проводимости загрязнений стенки со стороны водяного пара и со стороны смеси из табл. XXXI [4, с. 531]:

$$\frac{1}{r_{31}} = 5800 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \Rightarrow r_{31} = \frac{1}{5800} \frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}};$$

$$\frac{1}{r_{32}} = 5800 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \Rightarrow r_{32} = \frac{1}{5800} \frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}}.$$

Коэффициент теплопроводности из табл. XXVIII [4, с. 529] для стали:

$$\lambda_{\text{ст}} = 17,5 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}.$$

Тогда:

$$\sum r_{\text{ст}} = \frac{1}{5800} + \frac{0,002}{17,5} + \frac{1}{5800} = 4,591 \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}}.$$

В зоне испарения аналогично:

Принимаем тепловые проводимости загрязнений стенки со стороны водяного пара и со стороны пара смеси из табл. XXXI [3, с. 531]:

$$\frac{1}{r_{31}} = 5800 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \Rightarrow r_{31} = \frac{1}{5800} \frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}};$$

$$\frac{1}{r_{32}} = 11600 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \Rightarrow r_{32} = \frac{1}{11600} \frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}}.$$

Тогда:

$$\sum r_{\text{ст}} = \frac{1}{5800} + \frac{0,002}{17,5} + \frac{1}{11600} = 3,729 \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}}.$$

6) Коэффициент теплопередачи

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \Sigma R + \frac{1}{\alpha_2}},$$

где: K – коэффициент теплопередачи выбранного аппарата, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;

α_1 – коэффициент теплоотдачи от греющего пара к стенке, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;

α_2 – коэффициент теплоотдачи от стенки к смеси, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;

ΣR – сумма термических сопротивлений стенки и загрязнений, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

В зоне нагрева:

$$K^I = \frac{1}{\frac{1}{804,5} + 4,591 \cdot 10^{-4} + \frac{1}{440,25}} = 251,7 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

В зоне испарения:

$$K^{II} = \frac{1}{\frac{1}{1470,74} + 3,729 \cdot 10^{-4} + \frac{1}{11567,7}} = 1094,3 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

7) Площадь теплообмена:

В зоне нагрева:

$$F = \frac{448611,81}{251,7 \cdot 42,8} = 41,6 \text{ м}^2;$$

В зоне испарения:

$$F = \frac{11475444}{1094,3 \cdot 34,62} = 302,9 \text{ м}^2.$$

Суммарная поверхность теплообменника-испарителя:

$$F_o = 41,6 + 302,9 = 345,6 \text{ м}^2.$$

Запас поверхности:

$$\Delta F = \frac{372 - 344,5}{344,5} \cdot 100 = 7,9\%.$$

Делаем вывод, что запас поверхности достаточен.

5. Конструктивно-механический расчет

5.1 Расчет обечайки

Расчёт произведен на базе программы Wolfram Mathematica.

Исходные данные :

$P_{раб} = \text{Quantity}[0.2, \text{"Megapascals"}];$

$H = \text{Quantity}[4, \text{"Meters"}];$

$\rho = \text{Quantity}[1000, (\text{"Kilograms"})/(\text{"Meters"}*\text{"Meters"}*\text{"Meters"})];$

$g = \text{Quantity}[10, (\text{"Meters"})/(\text{"Seconds"}*\text{"Seconds"})];$

$\Pi = \text{Quantity}[0.1, (\text{"Millimeters"})/(\text{"Years"})];$

$\tau = \text{Quantity}[30, \text{"Years"}];$

$t_{ст} = \text{Quantity}[130, \text{"DegreesCelsius"}];$

$D_{об} = \text{Quantity}[1400, \text{"Millimeters"}];$

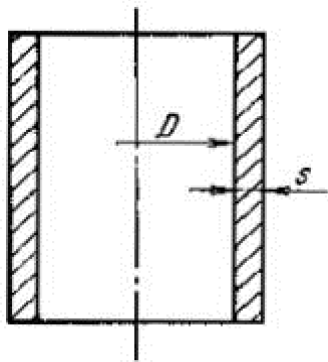


Рисунок 29. Цилиндрическая обечайка

Расчёт :

Расчет толщины стенки обечайки проводим по ГОСТ Р 52857.2 - 2007.[6]

Согласно ГОСТ Р 52857.1 - 2007 пункт 6.2 стр.4, расчётное давление должно учитывать внутреннее давление, гидростатическое давление от среды, содержащейся в сосуде. То есть расчётное давление будет равно :

$P_{гид} = \text{Simplify}[\rho * g * H]$

$40\,000 \text{ kg}/(\text{m s}^2)$

$P_{гид} = \text{UnitConvert}[P_{гид}, \text{"Megapascals"}]$

$\frac{1}{2.5} \text{ МПа}$

$P_{расч} = P_{раб} + P_{гид}$, где $P_{гид}$ - гидростатическое давление среды.

$P_{расч} = P_{раб} + P_{гид}$

0.24 МПа

Согласно ГОСТ Р 52630 - 2012 пункт 8.11 .3 стр.38, пробное давление при гидравлическом испытании сосудов вычисляют по формуле :

$$P_{исп} = 1,25 \cdot P_{расч} \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]_t}$$

Т.к. среда является агрессивной и токсичной, то принимаем материал стали 12Х18Н10Т.

Определим допускаемое напряжение при $t_{ст} = 120 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Допускаемое напряжение определяем линейной интерполяцией из Таблицы А .3 ГОСТ Р 52857.1 - 2007 стр.11., используя пункт 2 примечание этой таблицы :

```
t1=Quantity[20, "DegreesCelsius"];
t2=Quantity[100, "DegreesCelsius"];
t3=Quantity[150, "DegreesCelsius"];
σ1=Quantity[184, "Megapascals"];
σ2=Quantity[168, "Megapascals"];
σ3=Quantity[174, "Megapascals"];
points={{t1,σ1},{t2,σ3},{t3,σ2}};
ifun=Interpolation[points]
σдоп=Round[N[ifun[tст]],2.5]
```

170. МПа

В соответствии с пунктом 3 приложения Таблицы А .3 ГОСТ Р 52857.1 - 2007 стр.12 примем допускаемое напряжение $\sigma_{доп}$:

$\sigma_{доп} = \text{Round}[\sigma_{доп} \cdot 0.83]$

141 МПа

Допускаемое напряжение для стали 12Х18Н10Т при температуре 20 $^{\circ}\text{C}$:

= 184 МПа (Таблица А .3 ГОСТ Р 52857.1 - 2007, стр .11). Тогда давление гидроиспытания будет равно :

$$P_{исп} = 1,25 \cdot P_{расч} \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]_t}$$

$$P_{исп} = \text{Round}[1.25 \cdot P_{расч} \cdot (\sigma_t / \sigma_{доп}), 0.1]$$

0.4 МПа

Допускаемое напряжение для условий испытания определяем по формуле, согласно ГОСТ Р 52857.1 - 2007, стр .5 :

$$[\sigma] = \eta \cdot \left(\frac{R_{p1,0/20}}{n_T} \right),$$

где $\eta=1$ (в соответствии с ГОСТ Р 52857.1 - 2007 пункт 8.3 стр .6) Согласно таблице Б.7 примечания ГОСТ Р 52857.1 - 2007 стр.16, для поковок из стали марки 12Х18Н10Т следует принять :

$$\frac{R_{p1,0/20}}{n_T} = \frac{R_{p1,0/20}}{1,2}, \text{ где}$$

$R_{p1,0/20}$ —предел текучести стали, η_T -коэффициент запаса по пределу текучести ($\eta_T=1,2$).

Тогда:

$$\eta=1; R = \text{Quantity}[276, \text{"Megapascals"}]; \eta_T=1.2;$$

$$\sigma_{доп} = \text{Round}[\eta \cdot R / \eta_T]$$

230 МПа

Согласно ГОСТ Р 52857.2 - 2007 пункт 5.3 .1 стр .6, толщина стенки обечайки, нагруженной внутренним избыточным давлением определяется по формуле :

$$S_{расч} = \frac{D_B P}{2[\sigma] \varphi_{ш} - P} ; S_{исп} = S_{расч} + c$$

где c - прибавка к расчетной толщине на коррозию.

$$c = \Pi \cdot \tau$$

3. mm

$$\varphi_{ш}=1;$$

(в соответствии с ГОСТ Р 52857.1 - 2007 приложения Д таблицы Д .1 стр .22)

Тогда:

Номинальную расчетную толщину стенки обечайки для данного отношения определяем по формуле :

$$s_{расч} = \text{Max}[P_{расч} * D_{об} / (2 * \sigma_{доп} * \varphi_{ш} - P_{расч}), R_{исп} * D_{об} / (2 * \sigma_{доп} * \varphi_{ш} - R_{исп})]$$

1.21845 mm

$$S_{исп} = s_{расч} + c$$

4.21845 mm

Принимаем $S_{исп} = 6$ мм

$$S_{исп} = \text{Round}[S_{исп}, 6]$$

6 mm

Допускаемое внутреннее избыточное давление (ГОСТ Р 52857.2 - 2007 пункт 5.3 .1 стр .6) :

- для рабочих условий:

$$P_{доп} = (2 * \sigma_{доп} * \varphi_{ш} * (S_{исп} - c)) / (D_{об} + (S_{исп} - c))$$

0.602994 МПа

- для условий испытания:

$$P_{доп} = (2 * \sigma_{доп} * \varphi_{ш} * (S_{исп} - c)) / (D_{об} + (S_{исп} - c))$$

0.983607 МПа

Для обечаек с диаметром больше 200 мм должно выполняться условие (в соответствии с ГОСТ Р 52857.2 - 2007 пункт 5.2 стр .5) : Условие применения расчётных формул :

If[($S_{исп} - c$)/ $D_{об} \leq 0.1$, Print["условие применимости формул выполняется"], Print["условие применимости формул не выполняется"]]
условие применимости формул выполняется

Проверим выполнение условия прочности :

If[$P_{расч} \leq P_{доп}$, Print["условие применимости формул выполняется"], Print["условие применимости формул не выполняется"]]
условие применимости формул выполняется

If[$R_{исп} \leq P_{доп}$, Print["условие применимости формул выполняется"], Print["условие применимости формул не выполняется"]]

условие применимости формул выполняется

То есть при толщине стенки обечайки 6 мм прочность обеспечивается как в рабочих условиях, так и в условиях испытания.

5.2 Подбор крышки и днища

Наиболее рациональной формой крышек и днищ аппаратов является эллиптическая. Эллиптические днища и крышки изготавливаются из листового проката штамповкой и могут использоваться в аппаратах с избыточным давлением до 10 МПа.

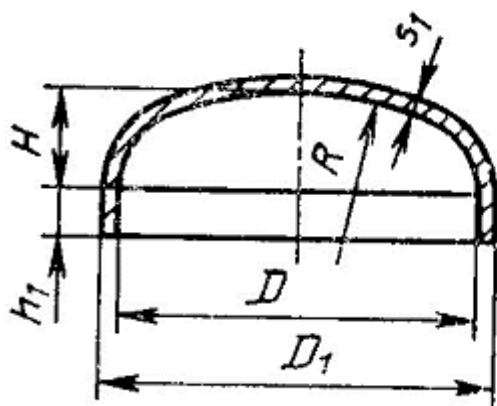


Рисунок 30. Эллиптическое днище

Толщина стенки днища определяется по формуле (ГОСТ Р 52857.2 - 2007 пункт 6.3 стр .14) :

$$S_{исп} = \frac{R \cdot p}{2[\sigma]\phi_{ш} - 0.5p} ; S_{исп} = S_{расч} + c$$

где R - радиус кривизны в вершине днища. В данном случае $R = D$, так как высота эллиптического днища $H = 0,25 D$. (ГОСТ Р 52857.2 - 2007 пункт 6.3 .1 .3 стр .14)

Для днищ, изготовленных из целой заготовки (без сварочной операции), коэффициент $\phi = 1$. (ГОСТ Р 52857.2 - 2007 пункт 6.3 .1 .5 стр .15)

Тогда:

$$H_d = 0.25 \cdot D_{об}$$

350. mm

$R = D_{об}$

1400 mm

$s_{драсч} = \text{Max}[P_{расч} * R / (2 * \sigma_{доп} * \phi_{ш} - 0.5 * P_{расч}), P_{исп} * R / (2 * \sigma_{доп} * \phi_{ш} - 0.5 * P_{исп})]$

1.21792 mm

$S_{дисп} = s_{драсч} + c$

4.21792 mm

Примем $S_{дисп} = 6$ мм

$S_{дисп} = \text{Round}[S_{дисп}, 6]$

6 mm

Допускаемое внутреннее избыточное давление (ГОСТ Р 52857.2 - 2007 пункт 6.3 .1 стр .14) :

-для рабочих условий :

$P_{ддоп} = (2 * \sigma_{доп} * \phi_{ш} * (S_{дисп} - c)) / (R + (S_{дисп} - c))$

0.602994 МПа

- для условий испытания:

$P_{ддоп} = (2 * \sigma_{доп} * \phi_{ш} * (S_{дисп} - c)) / (R + (S_{дисп} - c))$

0.983607 МПа

Проверка применимости формул :

If[0.002 <= (S_{дисп}-c)/D_{об} <= 0.1, Print["условие применимости формул выполняется"], Print["условие применимости формул не выполняется"]]
условие применимости формул выполняется

If[0.002 <= H_д/D_{об} <= 0.5, Print["условие применимости формул выполняется"], Print["условие применимости формул не выполняется"]]
условие применимости формул выполняется

Проверим выполнение условия прочности :

If[P_{расч} <= P_{ддоп}, Print["условие применимости формул выполняется"], Print["условие применимости формул не выполняется"]]
условие применимости формул выполняется

If[P_{исп} <= P_{ддоп}, Print["условие применимости формул выполняется"], Print["условие применимости формул не выполняется"]]

условие применимости формул выполняется

То есть при толщине стенки днища 6 мм прочность обеспечивается как в рабочих условиях, так и в условиях испытания.

Подбираем стандартные стальные отбортованные днище и крышку по ГОСТ 6533 - 78 таблица 2 стр .11 [14] :

Внутренний диаметр - $D = 1400$ мм

Толщина стенки - $S_{д.исп} = 6$ мм

Длина цилиндрической отбортованной части днища - $h_1 = 60$ мм

Внутренняя поверхность - $F = 2,39$ м²

Объем днища - $V = 499,9$ дм³

Масса - $m_d = 590,2$ кг

5.3 Расчет развальцовочного соединения

Обычно трубы соединяют с трубной решеткой на развальцовке. Развальцовочное соединение должно обеспечить необходимые прочность и плотность. Прочность соединения оценивают усилием вырывания трубы из гнезда, плотность – давлением среды, до которого сохраняется герметичность.

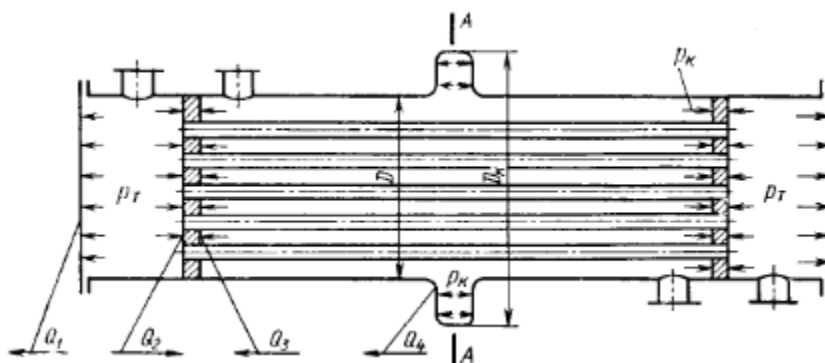


Рисунок 31. Схема к расчету усилий в трубах.

При развальцовке конец трубы обычно выступает на 3-5 мм из гнезда. Это повышает плотность и прочность соединения

Для обеспечения качественной развальцовки и возможности смены труб при ремонте решетки изготавливают из материала большей твердости, чем трубы.

Диаметр отверстия определяется допусками на размеры труб и отклонениями при изготовлении отверстий. В качественном развальцовочном соединении зазор между трубой и отверстием должен быть минимальным.

Трубы обычно развальцовывают на глубину $1,5d_n$ или, если толщина решетки меньше этого значения, на полную глубину отверстия. При этом со стороны межтрубного пространства предусматривают развальцовку пояски трубы шириной $0,75d_n$. Это позволяет избежать проникновения среды в щель между трубой и решеткой и возникновения щелевой коррозии.

В случаях когда требуется повышенная герметичность, трубы можно развальцовывать и обваривать.

При расчете развальцовочного соединения проводят проверку труб на вырывание.

В общем случае необходимо учитывать одновременное действие давлений $P_{\text{корп}}$ и $P_{\text{тр}}$. Давление в корпусе теплообменника $P_{\text{корп}}$ стремится выпучить трубные решетки наружу, а давление в трубах $P_{\text{тр}}$ – внутрь. Трубы удерживают трубные решетки и от давления $P_{\text{корп}}$ подвергаются растяжению. При действии давления $P_{\text{тр}}$ в случае достаточно жестких трубных решеток, все трубы так же работают на растяжение; при значительном прогибе трубных решеток под действием давления $P_{\text{тр}}$ расположенные в центральной части трубной решетки, могут оказаться сжатыми. Кроме давления, на трубы действуют температурные усилия. Так, если трубы нагреты больше, чем корпус, то в них возникают сжимающие напряжения и они подвергаются продольному изгибу, поэтому развальцовочное соединение работает на вырыв труб из решетки. [1]

Осевое усилие Q от давлений в трубном и межтрубном пространстве является результирующей нагрузок: от давления $P_{\text{тр}}$ на крышку теплообменника (Q_1), на трубную решетку со стороны распределительной камеры (Q_2), а также распорной силы от давления $P_{\text{корп}}$ со стороны межтрубного пространства на трубную решетку (Q_3), т.е.

$$Q = Q_1 - Q_2 + Q_3$$

$$Q_1 = P_{\text{тр}} \frac{\pi D_{\text{в}}^2}{4}$$

$$Q_2 = P_{\text{тр}} \frac{\pi}{4} (D_{\text{в}}^2 - n d_{\text{в}}^2)$$

$$Q_3 = P_{\text{корп}} \frac{\pi}{4} (D_{\text{в}}^2 - n d_{\text{н}}^2)$$

Подставляя выражения нагрузок в формулу получим:

$$Q = P_{\text{корп}} \frac{\pi}{4} (D_{\text{в}}^2 - n d_{\text{н}}^2) + P_{\text{тр}} n \frac{\pi}{4} d_{\text{в}}^2 \quad Q = 0,2 \cdot 10^6 \frac{3,14}{4} (1,4^2 - 1545 \cdot 0,0252 + 0,04 \cdot 106 \cdot 15453,144 \cdot 0,0212) = 0,18 \text{ МПа}$$

Если не учитывать, что часть осевой нагрузки от давления воспринимает корпус, и считать, что вся нагрузка приходится на трубы, то усилие на одну трубу при условии равномерного распределения нагрузки на трубы

$$q = \frac{Q}{n} = \frac{0,18}{1545} = 0,0001 \text{ МПа}$$

Удельная нагрузка то давления на единицу длины окружности развальцовки (МН/м)

$$\sigma_0 = \frac{q}{\pi d_{\text{н}}} = \frac{0,0001 \cdot 10^6}{3,14 \cdot 0,025} = 0,0015 \text{ МПа}$$

При относительно толстых решетках проверку труб на вырывание из гнезда можно вести с учетом глубины развальцовки по удельной нагрузке

$$\sigma' = \frac{q}{h \cdot d_{\text{н}}} = \frac{0,0001 \cdot 10^6}{0,05 \cdot 0,025} = 0,08 \text{ МПа}$$

При таком расчете допускаемая удельная нагрузка на единицу площади условной поверхности контакта трубы с гнездом при развальцовке в отверстиях без канавок не должна превышать 12 МПа.

То есть $\sigma' = 0,08 < 12$ МПа. Прочность обеспечена.

5.4 Расчет толщины трубной решетки

Для обеспечения надежной развальцовки труб, сохранения формы отверстий необходима достаточная площадь сечения простенка решетки между соседними труб:

$$f_{\text{м}} = (t - d')h$$

где t – шаг труб, d' – диаметр отверстия в трубной решетке, h – толщина трубной решетки без прибавки на коррозию.

Шаг труб t обычно принимают в зависимости от их наружного диаметра d_H : $t=26$ мм при $d_H=20$ мм; $t=32$ мм при $d_H=25$ мм. Для труб диаметром от 17 до 60 мм шаг находится по следующей формуле:

$$t = 1,2d_H + 2 \text{ мм}$$

$$t = 1,2 \cdot 25 + 2 = 32 \text{ мм}$$

По практическим данным при развальцовке труб наименьшее значение f_m (мм²) определяют в зависимости от d_H по формуле

$$f_m = 4,35d_H + 15$$

Таким образом, из условия надежности развальцовки труб толщина решетки с учетом прибавки на коррозию

$$h = \frac{f_m}{t - d'} + C$$

где $d' = 25,4$ мм, $f_m = 4,35 \cdot 25 + 15 = 124$ прибавка на коррозию с двух сторон $C = 2 \cdot 3$ мм.

$$h = \frac{124}{32 - 25,4} + 2 \cdot 3 = 24,8 \text{ мм}$$

Примем толщину трубной решетки равной 30 мм.

5.5 Расчет и подбор штуцеров и фланцев

Расчет штуцеров сводится к определению диаметра штуцера по уравнению:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot G}{\pi \cdot \rho \cdot w}};$$

где w – скорость, для жидкости принимаем 1,5 м/с, для пара – 25 м/с;

G – массовый расход соответствующего потока теплоносителя, кг/с;

ρ – плотность при соответствующих условиях, кг/м³.

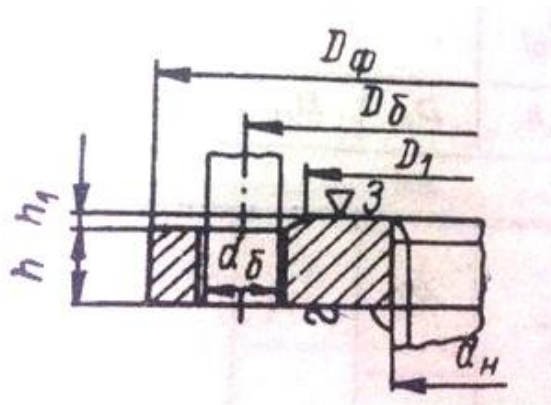


Рисунок 32. Фланец

1. Диаметр условного прохода (внутренний диаметр) штуцеров для подвода смеси:

из табл. IV [4, с. 512] определим плотности компонентов смеси при начальной температуре ($t_n = 67,5^\circ\text{C}$):

Плотность смеси равна:

$$\rho_{\text{см}} = 895 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

$$d_{\text{шт}}^{\text{вн}} = \sqrt{\frac{4 \cdot G_2}{\pi \cdot \omega \cdot \rho}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 6,28}{3,14 \cdot 1,5 \cdot 895}} = 0,077 \text{ м}$$

Рассчитанный диаметр округляем до ближайшего большего значения в соответствии с нормализованным диаметром условного прохода штуцеров кожухотрубных т/о [4, с. 547].

Принимаем $d_{\text{шт}}^{\text{вн}} = 80 \text{ мм}$.

Тогда скорость потока будет:

$$\omega = \frac{4 \cdot G_2}{\pi d_{\text{шт}}^2 \cdot \rho_{\text{см}}} = \frac{4 \cdot 6,28}{3,14 \cdot 0,08^2 \cdot 930,3} = 1,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

По АТК 24.218.06-90 примем патрубок с условным проходом $D_y = 80 \text{ мм}$.

2. Диаметр условного прохода (внутренний диаметр) штуцеров для отвода смеси паров:

Плотность смеси паров при $t_{\text{кин}} = 85^\circ\text{C}$ равна (см. пункт 1.3):

$$\rho_{\text{см}}^{\text{п}} = 1,135 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$d_{\text{шт}}^{\text{вн}} = \sqrt{\frac{4 \cdot G_2}{\pi \cdot \omega \cdot \rho_{\text{см}}^{\text{п}}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 6,28}{3,14 \cdot 25 \cdot 1,135}} = 0,530 \text{ м.}$$

Рассчитанный диаметр округляем до ближайшего большего значения в соответствии с нормализованным диаметром условного прохода штуцеров кожухотрубных т/о [4, с. 547].

Принимаем $d_{\text{шт}}^{\text{вн}} = 500 \text{ мм.}$

Тогда скорость потока будет:

$$\omega = \frac{4 \cdot G_2}{\pi d_{\text{шт}}^2 \cdot \rho_{\text{см}}^{\text{п}}} = \frac{4 \cdot 6,28}{3,14 \cdot 0,5^2 \cdot 1,135} = 28 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

По АТК 24.218.06-90 примем патрубок с условным проходом $D_y = 500 \text{ мм.}$

3.Диаметр условного прохода (внутренний диаметр) штуцеров для подвода водяного пара [4, с. 550]:

$$\rho_{\text{п}} = 1,129 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \text{ при } T = 119,62^\circ\text{C}$$

$$d_{\text{шт}}^{\text{вн}} = \sqrt{\frac{4 \cdot G_1}{\pi \cdot \omega \cdot \rho_{\text{п}}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 5,59}{3,14 \cdot 25 \cdot 1,129}} = 0,502 \text{ м}$$

Рассчитанный диаметр округляем до ближайшего большего значения в соответствии с нормализованным диаметром условного прохода штуцеров кожухотрубных т/о [4, с. 547].

Принимаем $d_{\text{шт}}^{\text{вн}} = 500 \text{ мм.}$

Тогда скорость потока будет:

$$\omega = \frac{4 \cdot G_1}{\pi d_{\text{шт}}^2 \cdot \rho_{\text{п}}} = \frac{4 \cdot 5,59}{3,14 \cdot 0,5^2 \cdot 1,129} = 25 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

По АТК 24.218.06-90 примем патрубок с условным проходом $D_y = 500 \text{ мм.}$

4.Диаметр условного прохода (внутренний диаметр) штуцеров для отвода конденсата водяного пара:

плотность конденсата (воды) [4, с. 537]:

$$\rho_k = 943 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \text{ при } T = 119,62^\circ\text{C}$$

$$d_{\text{шт}}^{\text{вн}} = \sqrt{\frac{4 \cdot G_1}{\pi \cdot \omega \cdot \rho_k}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 5,59}{3,14 \cdot 1,5 \cdot 943}} = 0,071 \text{ м}$$

Рассчитанный диаметр округляем до ближайшего большего значения в соответствии с нормализованным диаметром условного прохода штуцеров кожухотрубных т/о [4, с. 547].

Принимаем $d_{\text{шт}}^{\text{вн}} = 80 \text{ мм}$.

Тогда скорость потока будет:

$$\omega = \frac{4 \cdot G_1}{\pi d_{\text{вн}}^2 \cdot \rho_k} = \frac{4 \cdot 5,59}{3,14 \cdot 0,08^2 \cdot 943} = 1,18 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

По АТК 24.218.06-90 примем патрубок с условным проходом $D_y = 80 \text{ мм}$.

5.6 Расчет опорных лап

Массу аппарата берем из табл. 2.8 [4, с. 56] «Масса кожухотрубных теплообменников, холодильников, испарителей и конденсаторов со стальными трубами (по ГОСТ 15119-79 – ГОСТ 15122-79)» [12].

При диаметре 25х2мм, масса аппарата $M_{\text{ап-та}} = 11200 \text{ кг}$.

$$M = M_{\text{ап-та}} + 20\%,$$

где 20% от массы аппарата учитывают массу фланцев и болтов и равны 900 кг.

$$M = 11200 + 900 = 12100 \text{ кг}.$$

Рассчитаем массу воды в аппарате:

$$M_{\text{воды}} = V_{\text{ап}} \cdot \rho_{\text{в}},$$

– $\rho_{\text{в}}$ принимает равной 1000 кг/м³;

– объем аппарата:

$$V_{\text{ап}} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot L = \frac{3,14 \cdot (1,4)^2}{4} \cdot 4 = 6,15 \text{ м}^3.$$

Масса воды в аппарате:

$$M_{\text{воды}} = 6,15 \cdot 1000 = 6150 \text{ кг}.$$

Рассчитаем общую нагрузку на опоры $G_{\text{общ}}$:

$$G_{\text{общ}} = (M + M_{\text{воды}}) \cdot g = (12100 + 6150) \cdot 10 = 182500 \text{ Н}.$$

Рассчитываем нагрузку на одну опору:

$$\frac{G_{\text{общ}}}{4} = \frac{182500}{4} = 45625 \text{ Н} = 0,0456 \text{ МН}.$$

Из табл. 29.2 принимаем опорные лапы на нагрузку $P=63000 \text{ Н}$ [12, с.673].

Опоры устанавливают по месту на аппарате, на высоте 1,8 м.

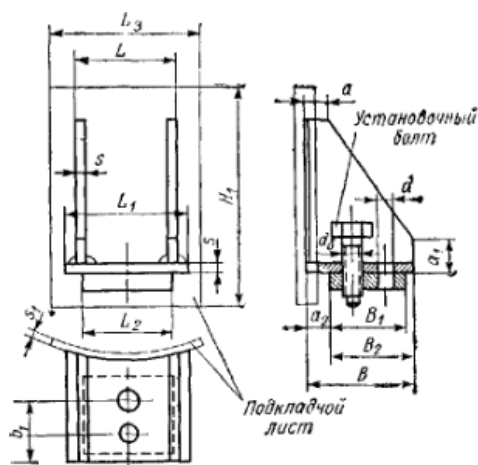


Рисунок 33. Опора

Таблица 6. Размеры опорных лап

Р, МН	L	L ₁	L ₂	B	B ₁	B ₂	b	b ₁	H	h	s	a	a ₁	a ₂	R	d	d ₆	масс а	Подкладной лист		
	мм																	кг	s ₁	L ₃	H ₁
																			мм		
0,063	210	240	200	230	160	170	40	135	345	30	12	30	60	60	18	35	М 30	21,9	10	300	490

6. Гидравлический расчет

6.1 Расчет потерь давления в трубном пространстве теплообменника

Потери давления найдем из уравнения гидравлического сопротивления трубного пространства [4, с. 69]:

$$\Delta P_{\text{тр}} = \lambda \cdot \frac{L \cdot Z}{d_{\text{ЭКВ}}} \cdot \frac{\omega_{\text{тр}}^2 \cdot \rho_{\text{см}}}{2} + (2,5 \cdot (Z - 1) + 2 \cdot Z) \cdot \frac{\omega_{\text{тр}}^2 \cdot \rho_{\text{см}}}{2} + 3 \cdot \frac{\omega_{\text{шт}}^2 \cdot \rho_{\text{см}}}{2}.$$

Скорость движения бинарной смеси (метанол - формальдегид) в трубном пространстве при $Re = 1641$:

$$\omega_{\text{тр}} = \frac{Re \cdot \mu_{\text{см}}}{d_{\text{ЭКВ}} \cdot \rho_{\text{см}}},$$

где $\rho_{\text{см}}$ – плотность смеси при средней температуре $t_{\text{ср}} = 76,25^\circ\text{C}$:

$$\rho_{\text{см}} = 930,3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3};$$

$\mu_{\text{см}}$ – вязкость смеси при средней температуре $t_{\text{ср}} = 76,25^\circ\text{C}$:

$$\mu_{\text{см}} = 0,15 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

Тогда скорость смеси будет равна:

$$\omega_{\text{тр}} = \frac{1641 \cdot 0,15 \cdot 10^{-3}}{0,021 \cdot 930,3} = 0,013 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Рассчитаем коэффициент трения по формуле [4, с. 14]:

$$\lambda = 0,11 \cdot (e + 68/Re)^{0,25},$$

где e – относительная шероховатость труб, рассчитывается по формуле:

$$e = \frac{\Delta}{d_{\text{вн}}},$$

где Δ – высота выступов шероховатости по поверхности, из табл. XI (3, с. 519) для труб стальных цельнотянутых и сварных при незначительной коррозии:

$\Delta = 0,2 \text{ мм}.$

Тогда:

$$\epsilon = \frac{0,2}{21} = 0,0095;$$

$$\lambda = 0,11 \cdot \left(0,0095 + \frac{68}{1641} \right)^{0,25} = 0,052.$$

Скорость смеси в штуцере трубного пространства ω равна 1,5 м/с.

Из табл. XIII [4, с. 520] находим коэффициенты местных сопротивлений.

Вид сопротивления	ζ	$\sum \zeta$
Входная и выходная камера	1,5	$1,5 \cdot 2 = 3$
Вход в трубы и выход из них	1	$1 \cdot 2 = 2$

$$\Delta P_{\text{тр}} = 0,052 \cdot \frac{3 \cdot 1}{0,021} \cdot \frac{0,013^2 \cdot 930,3}{2} + (2,5 \cdot (1 - 1) + 2 \cdot 1) \cdot \frac{0,013^2 \cdot 930,3}{2} + 3 \cdot \frac{1,5^2 \cdot 930,3}{2} = 3141,1 \text{ Па.}$$

6.2 Расчет потерь давления в трубопроводе

Потери давления в трубопроводе находим по формуле [4, с. 42]:

$$\Delta p = \frac{\rho \cdot \omega^2}{2} \left(1 + \frac{\lambda \cdot L}{d} + \sum \zeta \right) + \rho \cdot g \cdot h_{\text{под}} + \Delta p_{\text{доп.}}$$

Плотность смеси равна:

$$\rho_{\text{см}} = 895 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Длина всего трубопровода, включая местные сопротивления – 45 м.

Трубопровод выполнен из стальных труб диаметром:

$$d_{\text{вн}} = \sqrt{\frac{4 \cdot G}{\pi \cdot \rho \cdot \omega}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 6,28}{3,14 \cdot 895 \cdot 1,5}} = 0,077 \text{ м.}$$

где: ω – скорость движения жидкости в штуцерах 0,5 – 2,5 м/с (принимая $\omega = 1,5$ м/с).

Примем диаметр трубопровода 80 мм. Тогда скорость потока будет равна:

$$\omega = 1,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Вязкость смеси при начальной температуре:

$$\mu_2 = 0,15 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

Критерий Рейнольдса Re:

$$Re = \frac{\omega \cdot d \cdot \rho}{\mu} = \frac{1,5 \cdot 0,08 \cdot 895}{0,15 \cdot 10^{-3}} = 71600.$$

$$e = \frac{\Delta}{d} = \frac{0,2}{80} = 0,0025.$$

Коэффициент трения:

$$\lambda = 0,11 \cdot \left(\frac{68}{Re} + e \right)^{0,25} = 0,11 \cdot \left(\frac{68}{71600} + 0,0025 \right)^{0,25} = 0,019.$$

По табл. XIII [4, стр.520] находим коэффициенты местных сопротивлений.

Вид сопротивления	$\Sigma \zeta$
Вход жидкости из бака в трубопровод (труба с острыми краями)	0,5
Задвижка	$3 \cdot 0,5 = 1,5$
Отвод ($\phi = 90^\circ$, $R_0/d = 2$)	$4 \cdot 0,15 = 0,6$
Итого:	2,6

$$\Delta p = \frac{895 \cdot 1,5^2}{2} \left(1 + \frac{0,019 \cdot 45}{0,08} + 2,6 \right) + 895 \cdot 9,81 \cdot 15 + 0,1 \cdot 9,81 \cdot 10^4 = 155895 \text{ Па}.$$

Находим общие потери давления

$$\Delta P_{\text{общ}} = \Delta P_{\text{тр}} + \Delta p = 3141,1 + 155895 = 159036,1 \text{ Па}.$$

Расчет мощности, потребляемой двигателем насоса

$$N = \frac{V \cdot \Delta P_{\text{общ}}}{1000 \cdot \eta}$$

где: V – объемный расход смеси:

$$V = \frac{G_2}{\rho_{\text{см}}} = 6,28/895 = 0,007 \text{ м}^3/\text{с}$$

η – КПД, (принимаяем =60%).

$$N = \frac{0,007 \cdot 159036,1}{1000 \cdot 0,60} = 1,86 \text{ кВт}$$

Определяем общую высоту всасывания насосом

$$\Delta P_{\text{общ}} = 159036,1 \text{ Па} = \rho \cdot g \cdot H_{\text{общ}}$$

$$H_{\text{общ}} = \frac{\Delta P_{\text{общ}}}{\rho \cdot g} = \frac{159036,1}{895 \cdot 9,81} = 18,11 \text{ м. ст. ж.}$$

По рассчитанным данным выбираем насос [4, с. 38]

Таблица 7. Марка насоса и электродвигателя

Насос					Электродвигатель		
Марка	$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	$H,$ м.ст.ж	$n, \text{ л/с}$	η_n	тип	$N_n,$ кВт	η_n
X20/31	$5,5 \cdot 10^{-3}$	31	48,3	0,55	ВАО-41- 2	5,5	0,84

7. Расчет толщины изоляции

Примем температуру окружающего воздуха $t_0 = 20^\circ\text{C}$ и определим суммарный коэффициент теплоотдачи в окружающую среду лучеиспусканием и конвекцией по уравнению [4, с. 168]:

$$\alpha = 9,74 + 0,07 \cdot \Delta t,$$

где Δt – разность температур поверхности аппарата и окружающего воздуха.

Примем температуру поверхности изоляции $t_{\text{ст}} = 40^\circ\text{C}$ [4, с. 201].

Тогда:

$$\alpha = 9,74 + 0,07 \cdot (40 - 20) = 11,14 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

Удельный тепловой поток:

$$q = \alpha(t_{\text{ст}} - t_0) = 11,14 \cdot (40 - 20) = 222 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Принимая приближенно, что все термическое сопротивление сосредоточено в слое изоляции, можно написать:

$$q = K(t_{\text{вн}} - t_0) \approx \frac{\lambda}{\delta}(t_{\text{вн}} - t_0),$$

откуда толщина слоя изоляции:

$$\delta = \frac{\lambda}{q}(t_{\text{вн}} - t_0) = \frac{0,098}{222}(119,62 - 20) = 0,044 \text{ м},$$

где $\lambda = 0,098 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ – коэффициент теплопроводности совелита [табл. XXVIII, 4, с. 529].

Толщину изоляции следует принять равную 5 см.

8. Разработки в области защиты колонных аппаратов от превышения давления

Использование современных программ для расчёта предохранительных клапанов

Работа по этой теме опубликована в сборнике «Химия и химическая технология в XXI веке : материалы XVIII Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых имени профессора Л.П. Кулёва». Также материалы были опубликованы в сборнике «Современная наука. Теория, методология и практические результаты исследований: сборник материалов междисциплинарной научно-практической конференции» (16 апреля 2017 года), Кемерово: КНПЦ Технология Науки.

В данной работе предоставлен расчёт предохранительного клапана по общеизвестной программе VALVESTAR и по программе, разработанной нами в Wolfram Mathematica. Произведено сравнение результатов расчёта с целью выявления недостатков и преимуществ.

Защита аппаратов от превышения давления является одной из важнейших задач на сегодняшний день при разработке оборудования. В современном химическом машиностроении особенно остро стоит проблема в правильном расчёте и подборе защитных устройств, в частности предохранительных клапанов. Обеспечение безопасности при ведении технологического процесса посредством установки предохранительных клапанов и выбор среды, в которой он будет рассчитываться, является актуальной задачей.

Цель проекта – расчет и подбор предохранительного клапана от превышения давления для ректификационной колонны непрерывного действия.

Задачей является разработка пошаговой методики расчета и подбора предохранительного клапана в общеизвестной программе VALVESTAR , а также по программе, разработанной нами в Wolfram Mathematica с дальнейшим сравнением результатов расчёта.

С использованием программы VALVESTAR 7.2.3, разработанной немецкой компанией LESER, был рассчитан и подобран полноподъемный предохранительный клапан типа 4884.8842 с минимальным допустимым давлением 0.04 МПа и максимальным допустимым давлением 1.6 МПа. Максимально допустимая температура 110°C. Проходное сечение седла $d_0=23$ мм и материал корпуса 316L по стандарту ASME. Российский аналог стали - 03X16H15M3.

	№ заказа:	Заказчик:		Контактные данные:	LESER Спецификация заказа предохранительный клапан сог API 520
	Метка : Серийный №: Измененный №:				
LESER Код заказа		4884.8842-0.04 MPa_g-L90A86L95J38J85H03-3.1			

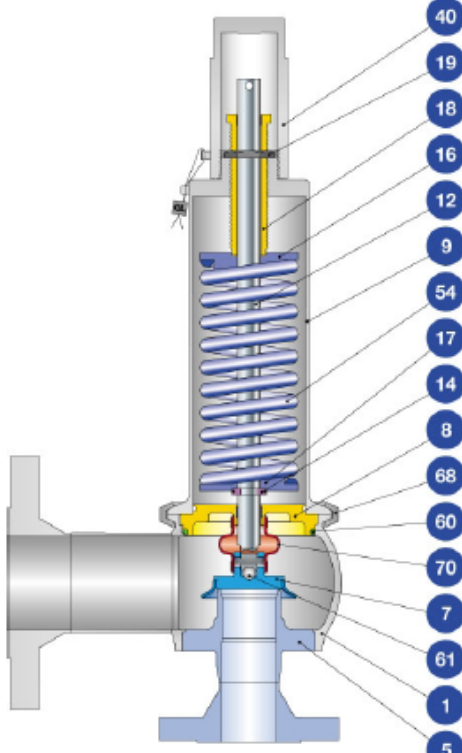
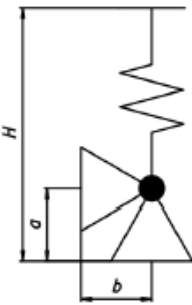
Изображение		№ Наименование Q ASME DIN CTM 1 Корпус 1 316L 1.4404 5 Седло 1 316L 1.4404 7 Диск с мягким уг 1 316L/EPDM [D] 1.4404/EPDM [D] 8 Направляющая 1 316L 1.4404 9 Кожух 1 316L 1.4404 12 Шток 1 316L 1.4404 18 Регулирующий в 1 430/PTFE 1.4104/PTFE 40 Колпак герметич 1 Steel 1.0718 54 Пружина 1 Stainless steel 1.4310
		CTM: Сертификаты испытаний LESER CGA (сертификат основных ☒ требуется ☐ не требуется
		Тип 4884.8842 Вход Код AF DIN 11850 Выход Код FA -
		Проходное сеч d0 23 мм Масса M 8 кг a 77 мм b 132 мм Размер H 291.9 мм Установочное P 0.04 МПа-г cdtb 5.811 пси-г
		
		Примечание:
		Имя API 520 Дата 2016-12-23 Исп.№ 1
		Одобрено LESER/RK 13947 Дата 2016-12-23 Подпись:
		Одобрено заказчиком Дата Подпись:

Рисунок 34. Отчет по расчету предохранительного клапана в VALVESTAR

Расчет и подбор предохранительных устройств, так же возможен в соответствии с ГОСТ 12.2.085 – 2002.

Разработана программа расчёта на базе Wolfram Mathematica. В расчёта подобрали следующий предохранительный клапан: пружинный полноподъемный фланцевый клапан типа СППК4Р– 16 с диаметром 142 мм на

условное давление 1,6 МПа. Исполнение 17c17нж, характеристика среды А – агрессивная, клапан работает при максимальной температуре $t=450^{\circ}\text{C}$.

Выполнена проверка выбранного клапана по формуле Росгортехнадзора, которая удовлетворяет требованиям.

В результате расчёта получили разные типы клапанов, которые удовлетворяют условиям процесса. Также стоит отметить, что подбор диаметра проходного сечения зависит от пропускной способности клапана, и варьируя им, можно изменять этот диаметр, что позволяет выбирать разные типы клапанов. В программе VALVESTAR уже осуществляется пересчёт на весь диапазон пропускной способности, что позволяет нам выбирать нужный нам клапан в зависимости от условий процесса, в то время как в программе, разработанной в Wolfram Mathematica придётся в ручную производить перерасчёт. Также в программе Wolfram Mathematica разработали собственную методику расчёта, которая позволяет рассчитать любой клапан, подстраивая программу расчёта под нужды пользователя с пошаговым изложением расчёта.

9 Социальная ответственность

В данной работе разрабатывается ректификационная установка непрерывного действия производства формалина. В установке идёт процесс разделения бинарной смеси метанол – формальдегид. Необходимо обеспечить меры для нормального протекания процесса и безопасности производства.

Ректификация – процесс разделения гомогенных смесей летучих жидкостей путём двустороннего массообмена и теплообмена между неравновесными жидкой и паровой фазами, имеющими различную температуру и движущимися противоположно друг другу.

Разделение осуществляется в данном случае в колонном аппарате при многократном или непрерывном контакте фаз. При каждом контакте из жидкости испаряется преимущественно низкокипящий компонент (метанол), которым обогащаются пары, а из паровой конденсируется преимущественно высококипящий компонент переходящий в жидкость. Снизу удаляется жидкость представляющая собой почти чистый высококипящий компонент - кубовый остаток (нижний продукт - формальдегид).

9.1 Техногенная безопасность

В моей дипломной работе основными компонентами производства формалина служат метанол и формальдегид. Метанол - сильный нервно-сосудистый яд. Отравление наступает при вдыхании паров, при попадании внутрь и при проникновении через кожу. Действие метанола на организм выражается в параличе сосудов, поражении зрительного нерва и сетчатки глаз. Формальдегид - едкий, удушливый с резким характерным запахом - бесцветный газ. Формальдегид оказывает сильное раздражающее действие на слизистые оболочки глаз, носа и верхних дыхательных путей, вызывая кашель, спазмы в груди и ощущение тяжести в голове.

Для выбора факторов необходимо использовать ГОСТ 12.0.003-74 «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация» [20]:

Таблица 8 – Опасные и вредные факторы при выполнении работ по обслуживанию ректификационной колонны

Источник фактора, наименование видов работ	Факторы (по ГОСТ 12.0.003-74)		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
Полевые работы: 1) регулирование расходов; 2) сбор данных с приборов учета; 3) обследование колонны на предмет выявления повреждений; 4) техническое обслуживание.	1. Шум (повышенный уровень); 2. Метеоусловия; 3. Освещение.	1. Пожарная безопасность оборудования; 2. Электробезопасность; 3. Давление.	ГОСТ 12.1.004-91 [6]; ГОСТ 12.1.005-88 [27]; СанПиН 2.2.4.548-96 [26]; СНиП 2.04.05-91 [27]; СНиП 23-05-95[27]; ГОСТ 12.1.003 – 83. ССБТ.

Таблица 9. Характеристика опасности производства. (Пожаровзрывоопасные, токсические свойства сырья, продуктов)

Наименование сырья, готовой продукции, производства	Класс опасности ГОСТ 12.1.007-76	Температура			Концентрация предел воспламенения		Характеристика токсичности (воздействие на человека)	ПДК вредных веществ в воздухе рабочей зоны производственных помещений ГОСТ 12.1.005-88
		ВСП	ВОСП	СамоВСП	НПВ	ВПВ		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1. Метанол	3	8	13	464	6	34,7	Яд нервного и сосудистого	5 мг/м ³

							действия с резко выраженным комул-ным действием	
2.Формалин (по формальдегиду)	2	56-85	62-80	435	7	73	Токсичен. Раздражает слизистые оболочки, вызывает дерматит	0,5 мг/м (по формальдегиду)

Пары метанола и формальдегида с воздухом образуют взрывоопасные смеси, поэтому при их хранении и перевозке должны соблюдаться все правила обращения с горючими и взрывоопасными веществами.

Не допускаются проливы метанола и формальдегида в помещениях и на наружной установке.

В связи с применением вредных и ядовитых веществ на производстве формалина, средства индивидуальной защиты и аварийный запас принят в соответствии с действующими отраслевыми нормами согласно ГОСТ 12.4.103-83. Все виды ремонтных работ и работ по обслуживанию оборудования производятся в спецодежде, спец. обуви и в каске. Для индивидуальной защиты органов дыхания от вредных препаратов используются противогазы марки А, БКФ, а так же резиновые перчатки, защитные очки, респираторы. С целью защиты работающих от воздействия формалина, метанола, паров кислоты и щелочи производственные помещения снабжены системой приточной и вытяжной вентиляции. При попадании продуктов на тело промыть пораженный участок водой, облитую одежду снять и принять душ. При попадании продуктов в глаза промыть их водой и обратиться в медпункт.

9.2 Анализ опасных производственных факторов и обоснование мероприятий по их устранению (производственная санитария)

Электрический ток. Специфическая опасность электроустановок – токоведущие проводники оборудования, оказавшегося под напряжением в результате повреждения изоляции, не подают каких-либо сигналов, которые предупреждают человека об опасности. Реакция человека на электрический ток возникает лишь при протекании последнего через тело человека.

Электрический ток представляет собой скрытый тип опасности, т.к. его трудно определить в токо- и нетоковедущих частях оборудования, которые являются хорошими проводниками электричества. Смертельно опасным для жизни человека считают ток, величина которого превышает 0,05А, ток менее 0,05А – безопасен (до 1000 В) [21].

Для предотвращения электротравматизма большое значение имеет правильная организация работ, т.е. соблюдение правил технической эксплуатации электроустановок потребителей [21] и правил техники безопасности при эксплуатации электроустановок [21] и правил устройства электроустановок.

Продукты, используемые при производстве формалина, имеют объемное сопротивление, что способствует возникновению статического электричества при их транспортировке, так как все трубопроводы и аппараты изготовлены из углеродистой и легированной стали. Для предупреждения возможности накопления разрядов статического электричества на производстве формалина предусмотрены:

1. Заземление оборудования, трубопроводов.
2. Скорость транспортирования по трубопроводам метанола, формалина не должна превышать 10 м/сек.

Защита зданий, сооружений, оборудования, трубопроводов от прямых ударов молнии, осуществляется путем присоединения корпусов отдельных аппаратов к заземляющему устройству и установкой молниеприемников. Защита аппаратов и трубопроводов от статической индукции и статического электричества осуществляется присоединением к контуру заземления.

Система устройства заземления состоит из внутреннего и внешнего контуров. Внешний контур выполнен из электродов, изготовленных из стальных вертикальных стержней длиной 2,5 м и соединенных между собой полосовой сталью (4х40) мм. Внутренний контур заземления выполнен из полосовой стали (4х25) мм, (4х40) мм и присоединен к внешнему. Все соединения заземляющего устройства выполнены сваркой. Все электрооборудование, пусковая аппаратура, оборудование, трубопроводы, а так же все металлические части, нормально не находящиеся под напряжением, но могущие под таковым оказаться вследствие нарушения изоляции, заземлены присоединением к контуру.

Металлические вентиляционные короба и кожухи теплоизоляции трубопроводов также присоединены к внутреннему контуру защитного заземления. Заземление кабельных конструкций осуществляется с помощью строительных металлоконструкций, на которых они установлены. Колонные и емкостные аппараты заземлены в двух точках.

Пожарная безопасность

Предотвращение образования взрывоопасной среды внутри технологического оборудования должно быть обеспечено [21]:

- герметизацией технологического оборудования;
- поддержанием состава и параметров среды вне области их воспламенения;
- применением ингибирующих (химически активных) и флегматизирующих (инертных) добавок;
- конструктивными и технологическими решениями, принятыми при проектировании производственного оборудования и процессов.

Предотвращение возникновения источника инициирования взрыва должно быть обеспечено:

- регламентацией огневых работ;
- предотвращением нагрева оборудования до температуры самовоспламенения взрывоопасной среды;
- применением средств, понижающих давление во фронте ударной волны;

- применением материалов, не создающих при соударении искр, способных инициировать взрыв взрывоопасной среды;
- применением средств защиты от атмосферного и статического электричества, блуждающих токов, токов замыкания на землю и т.д.;
- применением взрывозащищенного оборудования;
- применением быстродействующих средств защитного отключения возможных электрических источников инициирования взрыва;
- ограничением мощности электромагнитных и других излучений;
- устранением опасных тепловых проявлений химических реакций и механических воздействий.

Оценка взрывоопасности блоков производства формалина произведена в соответствии с «Общими правилами взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств» утвержденными федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору от 11 марта 2013 г. № 96.

Ниже в таблице 10 приведён блок ректификации формалина.

Таблица 10. Блок ректификации формалина.

№ блока и наименование блока	Границы блока	Общий энергетический потенциал взрывоопасности E , кДж	Относительный энергетический потенциал взрывоопасности	Категория взрывоопасности блока	Радиус разрушения блока, м
Ректификация формалина	Ректификационная колонна	73,03	18,9	II	3,3

	на, тепло обмен ник, сборн ик, вакуу мнасо с				
--	--	--	--	--	--

Расчетная категория взрывоопасности для всех блоков III, а так как формалин - вещество II класса опасности, то для всех блоков устанавливается II категория взрывоопасности. Работать только на исправном оборудовании с исправными приборами КИП и средствами автоматизации и управления. Работа на неисправном или негерметичном оборудовании может создать условия для прорыва горючих токсических паров или газов и образования взрывоопасных смесей. Работа с неисправными приборами КИП может привести к значительному отклонению технологических параметров от норм, что, в свою очередь, может вызвать повышенную загазованность, взрыв или пожар.

Не допускать работы оборудования без ограждения движущихся частей и без надежного заземления с целью защиты от статического электричества, грозы и вторичных проявлений молнии. Технологический процесс вести только при нормально работающей вентиляции. Неисправность вентиляционных систем может привести к загазованности производственных помещений и, как следствие, вызвать отравление, пожар, взрыв.

Для обеспечения пожарной безопасности производство формалина оборудуется первичными противопожарными средствами согласно «Нормы первичных средств пожаротушения для производственных складских и жилых помещений». Так как колонна находится на улице, то для пожаротушения

наружной установки предусмотрены лафетные установки и стояки - сухотрубы. В помещении насосной предусмотрена автоматическая система пожаротушения, сблокированная с отключением вентиляции. Для обнаружения, подачи сигнала пожарной тревоги, локализации и ликвидации возможного пожара в насосной и на наружной установке предусмотрена установка автоматического пожаротушения. Огнегасящее вещество - тонко распыленная вода. Подача воды на установку осуществляется по трубопроводам из распределительного пункта по секциям. Колонные аппараты выше 30 метров (высота колонны производства формалина 52 метра) оборудованы кольцами орошения. Для хранения необходимого запаса воды предусмотрен резервуар емкостью 1000 м³.

Давление

Конструкция сосудов должна обеспечивать надежность и безопасность эксплуатации в течение расчетного срока службы и предусматривать возможность проведения технического освидетельствования, очистки, промывки, полного опорожнения, продувки, ремонта, эксплуатационного контроля металла и соединений. Общие требования к аппаратам работающим под давлением, в число которых входит спроектированная ректификационная колонна [25]:

- Для каждого сосуда должен быть установлен и указан в паспорте расчетный срок службы с учетом условий эксплуатации.
- Устройства, препятствующие наружному и внутреннему осмотрам сосудов (мешалки, змеевики, рубашки, тарелки, перегородки и другие приспособления), должны быть, как правило, съемными.

При применении приварных устройств должна быть предусмотрена возможность их удаления для проведения наружного и внутреннего осмотров и последующей установки на место.

- Если конструкция сосуда не позволяет проведение наружного и внутреннего осмотров или гидравлического испытания, предусмотренных требованиями Правил, разработчиком проекта сосуда в руководстве по эксплуатации должны быть указаны методика, периодичность и объем

контроля, выполнение которых обеспечит своевременное выявление и устранение дефектов. В случае отсутствия в руководстве таких указаний методика, периодичность и объем контроля определяются специализированной организацией.

- Конструкции внутренних устройств должны обеспечивать удаление из сосуда воздуха при гидравлическом испытании и воды после гидравлического испытания.

- Сосуды должны иметь штуцера для наполнения и слива воды, а также для удаления воздуха при испытании.

- На каждом сосуде должны быть предусмотрены вентиль, кран или другое устройство, позволяющее осуществлять контроль за отсутствием давления в сосуде перед его открыванием; при этом отвод среды должен быть направлен в безопасное место.

- Расчет на прочность сосудов и их элементов должен производиться по НД, согласованной с Госгортехнадзором России. Сосуды, предназначенные для работы в условиях циклических и знакопеременных нагрузок, должны быть рассчитаны на прочность с учетом этих нагрузок.

При отсутствии нормативного метода расчет на прочность должен выполняться по методике, согласованной со специализированной научно-исследовательской организацией.

Наружные глухие элементы (например, накладки), не работающие под давлением, должны иметь дренажные отверстия в самых низких местах.

- Заземление и электрическое оборудование сосудов должны соответствовать правилам технической эксплуатации электроустановок потребителей и правилам техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей в установленном порядке.

Анализ вредных производственных факторов и обоснование мероприятий по их устранению (производственная санитария)

1. Недостаточная освещенность рабочей зоны. Среди технических требований к рабочему месту инженера особенно важным является требование к

процесса. Недостаточная освещенность способствует возрастанию нагрузки на органы зрения и приводит к утомляемости организма. Поэтому необходимо обеспечить оптимальное сочетание общего и местного освещения.

Естественное освещение должно удовлетворять СНиП II-4-79. Нормы естественного освещения установлены с учетом обязательной регулярной очистки стекол световых проемов не реже двух раз в год (для помещений с незначительным выделением пыли, дыма и копоти). Учитывая, что солнечный свет оказывает благоприятное воздействие на организм человека, необходимо максимально продолжительно использовать естественное освещение.

В соответствии с характером выполняемых работ, освещенность рабочего места по СНиП II-4-79 должна быть 200 Лк – общая освещенность и 300 лк — комбинированное освещение.

2. *Метеоусловия.* Параметры микроклимата в значительной степени влияют тепловое самочувствие человека и, следовательно, на его работоспособность, а также и на надежность работы техники. С целью создания нормальных условий для персонала установлены нормы производственного микроклимата. На производстве согласно [26] должны обеспечиваться оптимальные параметры микроклимата, как показано в таблице 4.

Таблица 11 – Оптимальные нормы микроклимата на рабочем месте (СанПиН 2.2.4.548 – 96) [26]

Сезон года	Категория тяжести выполняемых работ	Температура С°		Относительная Влажность, %		Скорость движения воздуха, м/сек	
		Фактические	Оптимальные	Фактические	Оптимальные	Фактически	Оптимальные
1	2	3	4	5	6	7	8
Холодный	IIб	15	17-19	45	40-60	0.1	0.1
Теплый	IIа	21	20-22	45	40-60	0.1	0.1

В целях профилактики неблагоприятного воздействия микроклимата должны быть использованы защитные мероприятия: системы местного кондиционирования воздуха, воздушное душирование, компенсация неблагоприятного воздействия одного параметра микроклимата изменением другого, спецодежда и другие средства индивидуальной защиты, перерывы в работе [26].

3. *Шум*. Длительное воздействие шума снижает остроту слуха и зрения, повышает кровяное давление, утомляет центральную нервную систему, в результате чего ослабляется внимание, увеличивается количество ошибок в действиях рабочего, снижается производительность труда. Воздействие шума приводит к появлению профессиональных заболеваний и может явиться причиной несчастного случая.

Органы слуха человека воспринимают звуковые колебания с частотой 16–20000 Гц. Колебания с частотой ниже 20 Гц (инфразвук) и выше 20000 Гц (ультразвук) не вызывают слуховых ощущений, но оказывают биологическое воздействие на организм. Гигиенические нормативы шума определены ГОСТ 12.1.003 - 83* «ССБТ. Шум. Общие требования безопасности» и СН 2.2.4/2.1 .8.562-96 «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых и общественных зданий».

Для снижения шума в помещениях проводятся следующие основные мероприятия:

- охрану атмосферного воздуха от загрязняющих веществ;
- снижение концентрации загрязняющих веществ в сточных водах производства.

Твердых отходов в производстве формалина нет.

В моей дипломной работе возможными источниками загрязнения атмосферы являются:

- вакуум-насосы процесса ректификации
- сальники насосов

- воздушники от аппаратов
- парк емкостей формалина
- факельная установка

Выбросы формальдегида и метанола на производстве сведены до минимума. Инертные газы, содержащие метанол и формальдегид, от вакуум-насосов направляются на сжигание. Загрязнение воздуха от сальников насосов уменьшается ввиду использования герметичных насосов и насосов с двойным торцевым уплотнением.

Так как в моем аппарате идет процесс разделения метанола – формальдегида, то к аппарату подведено «азотное дыхание», которое объединено в общий коллектор и направляется на сжигание.

На складе формалина выбросы от «дыхания» емкостей при приеме и перекачивании формалина очищаются частично в ловушках.

Сточные воды от производства формалина, образующиеся при опорожнении и промывке насосов, перед ремонтом собираются в подземную емкость и по мере заполнения передавливаются азотом в стандартизатор и далее в процесс. Ливневые стоки с отметок наружной установки (ректификационной колонны) через прямки технологических ниток направляются в ливневую канализацию. Стоки от смыва полов на складе формалина направляются в хим. загрязненную канализацию.

Таблица 12. Сточные воды

Наименование стока, отделение, аппарат	Куда сбрасывается	Кол-во стоков, м ³ /сутки	Периодичность стоков	Состав сброса, мг/л (по компонентам)	Допустимое кол-во сбрас-х в-в, кг/сутки	Примечание

1	2	3	4	5	6	7
Сточные воды от промывки и насосов	В ёмкость	0,5	Периодически 1 раз в 3 дня	Формальдегид - 2000 Метанол -2000	ДВП, мг/л Формальдегид - 0,66 Метанол -6,00	Из ёмкости стоки поступают в стандартизатор и далее в процесс
Сточные воды от смыва полов и ливневые стоки	В хим. загрязнённую канализацию	Не более 20 м ³ на операцию	Периодически 2 раза в сутки	Формальдегид - 1860 Метанол -1550	Формальдегид - 0,66 Метанол -6,00	ДВП - допустимые величины показателей состава сточных вод, поступающих на очистные сооружения. Установлены областным комитетом экологии с 02.03.94 г. Пересматриваются ежегодно в зависимости от работы очистных сооружений.

Защита в чрезвычайных ситуациях

Таблица 13. Возможные типичные аварийные ситуации. Способы их ликвидации

Возможные производственные неполадки, аварийные ситуации	Причины возникновения	Способы устранения
1	2	3
Понижение давления воздуха КИП на входе цех менее 2,5 кгс/см ² (0,25 МПа)	Авария в АКЦ	Произвести "Аварийную остановку" согласно инструкции Ц-2.
Понижение напряжения в сети	1. Кратковременное падение напряжения, менее 2 сек. 2. Падение напряжения более 2 сек.	1. Проверить работоспособность всех эл. агрегатов. В случае отключения, произвести запуск. 2. Произвести "Аварийную остановку" согласно инструкции Ц-2
Взрыв/разгерметизация оборудования	Резкое повышение давления в аппаратах	Произвести "Аварийную остановку" согласно инструкции Ц-2
Внезапное обрушение зданий	Землетрясение, иные причины	Произвести "Аварийную остановку" согласно инструкции Ц-2
Возникновение	Загорание пролитой	Закрыть арматуру у

местного пожара	жидкости	уровнемера и проверить его работу. Выключить приточно-вытяжную вентиляцию. Закрыть окна и двери, если пожар произошел в помещении. Вызвать пожарную охрану по телефону 01, 24-01 или по пожарному извещателю. Вызвать газоспасательную службу по телефону 04, 21-04. Приступить к тушению пожара первичными средствами пожаротушения. Порядок дальнейших действий определяется согласно "Плана ликвидации аварийных ситуаций"
-----------------	----------	--

Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны

Рабочее место – это часть пространства, в котором инженер осуществляет трудовую деятельность и проводит большую часть рабочего времени. Рабочее место, хорошо приспособленное к трудовой деятельности инженера, правильно и целесообразно организованное, в отношении пространства, формы, размера, обеспечивает ему удобное положение при работе и высокую производительность труда при наименьшем физическом и психическом напряжении. При правильной организации рабочего места производительность труда инженера возрастает с 8 до 20 процентов [1].

Согласно СанПиН 2.2.2/2.4.1340 – 03 [27] (рабочее место для выполнения работ, в положении сидя) конструкция рабочего места и взаимное расположение всех его элементов должно соответствовать антропометрическим, физическим и психологическим требованиям. Большое значение имеет также характер работы. В частности, при организации рабочего места инженера должны быть соблюдены следующие основные условия:

- оптимальное размещение оборудования, входящего в состав рабочего места;
- достаточное рабочее пространство, позволяющее осуществлять все необходимые движения и перемещения;
- необходимо естественное и искусственное освещение для выполнения поставленных задач;
- уровень акустического шума не должен превышать допустимого значения.

Рабочая поза сидя вызывает минимальное утомление инженера. Рациональная планировка рабочего места предусматривает четкий порядок и постоянство размещения предметов, средств труда и документации. То, что требуется для выполнения работ чаще, расположено в зоне легкой досягаемости рабочего пространства.

Правовые и организационные мероприятия по обеспечению безопасности

При разработке данного раздела учитывались необходимые нормы и требования законов Российской Федерации при работе за компьютером.

Специальные правовые нормы трудового законодательства

К работе с огнеопасными и ядовитыми веществами допускаются лица не моложе 18 лет, прошедшие медкомиссию и имеющие допуск к самостоятельной работе.

В соответствии с пунктом 13.1 статьи 13 Постановления Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 03.06.2003 № 118" [25]. О введении в действие санитарно-эпидемиологических правил и нормативов СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03" [27] лица, работающие с ПЭВМ более 50% рабочего времени (профессионально связанные с эксплуатацией ПЭВМ), должны проходить обязательные предварительные при поступлении на работу и периодические медицинские осмотры в установленном порядке.

Нормальная продолжительность рабочего времени согласно статье 91 Трудового кодекса РФ не может превышать 40 часов в неделю. Согласно статье 92 Трудового кодекса РФ сокращенная продолжительность рабочего времени при проведении работ профессионально связанных с эксплуатацией ПЭВМ не предусмотрена.

В соответствии с Типовой инструкцией по охране труда при работе на персональном компьютере ТОИ Р-45-084-01, продолжительность непрерывной работы с компьютером без регламентированного перерыва не должна превышать двух часов. При выполнении в течение рабочей смены работ, относящихся к различным видам трудовой деятельности, за основную работу с компьютером следует принимать такую, которая занимает не менее 50% времени в течение рабочей смены или рабочего дня.

Согласно статье 111 Трудового кодекса РФ при шестидневной рабочей неделе работникам предоставляются один выходной день в неделю – воскресенье.

10 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Исследования в области совершенствования технологии процессов фракционирования нефтепродуктов и их аппаратного оформления являются одним из важнейших направлений технического прогресса. Проблема интенсификации работы ректификационных колонн существовала всегда: меняется сырье, производительность установок и поставленные задачи. В последние годы при реконструкции тарельчатых ректификационных колонн чаще всего тарельчатые контактные устройства заменяются на более совершенные насадочные контактные устройства. Насадочная колонна обеспечивает меньший перепад давления по высоте аппарата, более широкий диапазон устойчивой работы, более высокий КПД, и, соответственно более высокую разделительную способность. Колонны с такими характеристиками позволяют решать вопросы углубления переработки нефти и нефтепродуктов, энергосбережения и повышения гибкости как существующих, так и проектируемых технологий. [18]. Это свидетельствует о том, что задачи эффективного потребления ресурсов всегда являлись достаточно актуальными. Технологический процесс всегда сопровождается потреблением тех или иных ресурсов: будь то материальные, энергетические, или трудовые. Стратегический менеджмент предусматривает разработку и следование стратегии эффективного использования ресурсов.

В настоящее время перспективность всех научных разработок диктуется исключительно их коммерческой ценностью, опираясь на которую авторы исследования получают соответствующее финансирование на дальнейшие разработки.

Создание новых и реконструкция уже существующих ректификационных колонн с учётом современных требований к аппаратному оформлению— актуальная задача, решение которой позволит улучшить

качество, расширить ассортимент продуктов, в том числе получаемых и используемых непосредственно на промыслах.

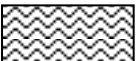
Целью раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является проектирование и создание конкурентоспособных разработок, технологий, отвечающих современным требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

Потенциальные потребители результатов исследования

Для анализа потребителей результатов исследования необходимо рассмотреть целевой рынок и провести его сегментирование [18]. На рисунке 1 представлена карта сегментирования рынка по разработке регулярных перекрёстноточных насадок (РПТН).

Размер компании	Вид продукции	
	РПТН для НПЗ	РПТН для нефтехимии
Крупные		
Средние		
Мелкие		

Рисунок 35 — Карта сегментирования рынка услуг по разработке РПТН:

-  – ОАО «Орскнефтеоргсинтез», г. Орск
-  – ОАО «Сибур», г. Москва
-  – ОАО «Газпром», г.Москва

10.1 Анализ конкурентных технических решений

Чтобы оценить эффективность научной разработки и определить направление ее дальнейшего развития, необходимо определить её положение на рынке конкурентных технических решений.

В таблице 14 представлен сравнительный анализ разного типа насадок (н) в рамках выполнения ВКР и двух конкурентных работ (к1) и (к2) [18].

Таблица 14 — Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б _ф	Б _{к1}	Б _{к2}	К _ф	К _{к1}	К _{к2}
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Упрощение конструкции и обслуживания колонны	0,1	4	3	3	0,4	0,3	0,3
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,05	5	5	5	0,25	0,25	0,25
3. Увеличение выхода продукта за счёт увеличения расхода питания	0,15	5	3	4	0,75	0,55	0,6
4. Энергоэкономичность	0,05	4	4	3	0,2	0,2	0,15
5. Надежность	0,02	5	5	5	0,1	0,1	0,08
6. Безопасность	0,02	5	5	4	0,1	0,1	0,08
7. Потребность в ресурсах памяти	0,02	3	3	3	0,06	0,06	0,06
8. Увеличение КПД работы колонны	0,1	5	5	4	0,5	0,5	0,5
9. Возможность подключения в сеть ЭВМ	0,01	3	3	3	0,03	0,03	0,03
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Конкурентоспособность продукта	0,1	4	4	3	0,4	0,4	0,3
2. Уровень проникновения на рынок	0,1	2	3	3	0,2	0,3	0,3
3. Цена	0,15	4	3	3	0,6	0,55	0,55
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0,02	4	2	3	0,08	0,04	0,06
5. Послепродажное обслуживание	0,05	2	2	3	0,1	0,1	0,15
6. Финансирование научной разработки	0,05	1	2	2	0,05	0,1	0,1
7. Срок выхода на рынок	0,01	3	3	3	0,03	0,03	0,03
8. Наличие сертификации разработки	0,01	3	3	4	0,03	0,03	0,04
Итого	1	62	58	55	3,88	3,54	3,58

Особенностью конкурентного решения [18] является замена тарелок в ректификационной колонне на насадку. Среди заявленных выгод: снижение энергозатрат на ведение процесса и увеличение выхода продукции, за счёт увеличения в итоге расхода питания на колонну.

Анализ альтернативных работ показал, что разработанная в рамках ВКР схема замены тарелок в колонне на насадку обладает приемлемым

конкурентным уровнем. Однако, в будущем, необходимо увеличить расчетные возможности для проведения данных исследований. В дальнейшем следует обратить внимание на рациональное использование различных типов насадок.

Диаграмма Исикавы

С целью установления причинно-следственных связей, возникающих в ходе выполнения модернизации основного технологического оборудования путём замены тарелки на насадки в колонне, сформирована диаграмма Исикава. Основными факторами, влияющими на объект исследования, являются методы, оборудование и исполнитель.



Рисунок 36 — Причинно-следственная диаграмма

Анализируя факторы, влияющие на реализацию поставленной задачи, можно принять следующие меры по оптимизации выполнения работы. Для фактора «оборудование» можно рассмотреть вариант использования более мощного процессорного блока. Для фактора «методы» вариантом решения проблемы является накопление и анализ данных на основе проведения собственных расчетов. Для фактора «магистрант» предлагается выполнять поэтапный подбор разных типов тарелок и насадок с их вариацией.

Оценка готовности проекта к коммерциализации

Логическим завершением разработки объекта модернизации и создания необходимых математических и аппаратных расчётов является практическое применение на действующем промышленном объекте. Для осуществления реализации разработки необходимо представить её в виде коммерческого проекта.

Таблица 15 — 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	4	3
2	Определены перспективные направления коммерциализации научно-технического задела	2	2
3	Определены отрасли и технологии для предложения на рынке	4	3
4	Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынке	5	3
5	Определены авторы и осуществлена охрана их прав	5	3
6	Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	4	3
7	Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	2	2
8	Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	2	3
9	Определены пути продвижения научной разработки на рынок	2	3
10	Разработана стратегия (форма) реализации научной	4	3

	разработки		
11	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	1	1
12	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	2	2
13	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	4	3
14	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	1	1
15	Прорабатывается механизм реализации научного проекта	4	3
	ИТОГО БАЛЛОВ	46	36

Согласно данным таблицы 15 суммарное количество баллов по категории степень проработанности научного проекта составляет 46, что указывает на готовность проекта к коммерциализации с перспективой выше среднего (45-59 баллов). В свою очередь уровень имеющихся знаний у разработчика находится в диапазоне 44-30, что говорит о перспективе ниже среднего уровня.

Таким образом, реализация данного проекта вероятна и требует партнерского участия и инвестирования со стороны научно-исследовательских объединений, промышленных организаций. Развить компетенцию разработчика в сфере коммерциализации проекта (в данном случае магистранта) возможно путем более полного и подробного ознакомления с предыдущими и действующими проектами.

10.2 Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования

Для обеспечения коммерческой отдачи от реализации проекта возможно применение таких методов коммерциализации научных разработок, как торговля патентными лицензиями, передача ноу-хау, инжиниринг, франчайзинг, организация собственного предприятия и т.д. Для коммерциализации данного типа модернизации оборудования актуален метод инжиниринга по следующим причинам. Во-первых, разработанный метод модернизации имеет значимое практическое применение, учитывает множество параметров протекания процесса в аппарате и способствует оптимизации, энерго- и ресурсосбережению и, в конечном счете, снижению затрат на производство. Во-вторых, для разработки метода модернизации необходим большой объем актуальных промышленных данных, для установления закономерностей, анализа взаимосвязей, тестирования и т.п. В-третьих, существует практика сотрудничества производственных организаций с научными объединениями с целью решения промышленных задач путем глубоко научного изучения и поиска обоснованных вариантов решения.

Таким образом, инжиниринг, в данном случае, реализуется путем заключения договора на осуществление изучения и оптимизации промышленного процесса. Стороной консультантом выступает научно-исследовательская группа научной организации (университет, кафедра). Заказчик представлен в лице производственной организации (завод, фабрика).

Инициация проекта

Для определения нового проекта необходимо составление Устава проекта. В рамках магистерской работы предполагается наличие таких критериев, как цели и результаты проекта, организационная структура проекта, ограничения и допущения проекта (таблица 12-15).

Таблица 16 — Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидание заинтересованных сторон
Научное объединение кафедры (студенты, преподаватели)	1) Освоение принципиально новой (для научной группы) области исследования и методов модернизации оборудования 2) Коммерческое продвижение проекта 3) Развитие и укрепление связей с отраслью промышленности (производственные компании, заводы) в области совместных научных разработок.
Представители промышленности (компании, заводы)	1) Получение проекта, способствующего оптимизации, энерго-и ресурсосбережению действующего производства. 2) Развитие и укрепление связей с научным объединением (университет, кафедра) в области совместных научных разработок.
Университет, к которому относится научное объединение	Продвижение статуса учебного заведения, повышение научного престижа
Научные объединения сторонние (конкурирующие)	Опасения в связи с появлением конкурентоспособного проекта

Таблица 17 — Цели и результаты проекта

Цели проекта:	Разработка метода и способа модернизации ректификационной колонны, и сравнение ее энергоэффективности с аналогами.
Ожидаемые результаты проекта:	Получение модернизированного оборудования с высоким уровнем энергоэффективности
Критерии приемки результата проекта:	1) Новизна идеи 2) Адекватность относительно действующего промышленного процесса 3) Расчеты обеспечивают получение полного набора необходимых производственных показателей 4) Универсальность 5) Простота и точность расчёта
Требование к результату проекта:	Максимальное соответствие критериям приемки результата проекта

Таблица 18 — Рабочая группа проекта

№ п/п	ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функция	Трудозатраты, час.(за 2 года)
1	Беляев В.М., доцент каф. ОХХТ	Руководитель проекта	Координирование проекта, консультирование	480
2	Кукарин А.С., магистрант каф. ОХХТ	Исполнитель по проекту	Сбор и анализ литературных данных, выполнение необходимых расчётов, интерпретация результатов	3840

Таблица 19 — Ограничения проекта

Фактор	Ограничения /допущения
Расчетные возможности	Выполнение расчетов ограничено компьютерными мощностями кафедры
Сроки завершения проекта	Июнь 2017 года
Бюджет проекта	Материальная база научной группы (кафедры)

Планирование управления научно-техническим проектом

Бюджет научного исследования

Выполнение научных исследований влечет за собой ряд материальных затрат для обеспечения эффективной и комфортной работы.

Таблица 20 — Сырье, материалы, комплектующие изделия и покупные полуфабрикаты

Наименование	Кол-во	Цена за единицу, руб	Сумма, руб
Тетрадь	2 шт	25	50
Ручка	6 шт	20	120
Карандаш	2 шт	12	24
Картридж для принтера	1 шт	550	550
Бумага	1 шт	300	300
Всего за материалы			1044
Транспортно-заготовительные расходы (3-5%)			53
Итого по статье			1097

Таблица 21 — Расчет затрат по статье «Спецоборудование для научных работ»

№ п/п	Наименование оборудования	Кол-во единиц оборудования	Цена единицы оборудования, тыс. руб	Общая стоимость оборудования, тыс. руб
1	ПО Microsoft office	1	1,557	1,557
2	КОМПАС 3D V16	1	1,490	1,490
3	Wolfram Mathematica 11	1	25,580	25,580

Таблица 22 — Расчет основной заработной платы

№ п/п	Исполнитель по категориям	Трудоемкость, чел.-дн.	Заработная плата, приходящаяся на один чел.-дн., тыс.руб.	Всего заработная плата по тарифу (окладам), тыс.руб.
1	Руководитель	20	1,19	23,8
3	Магистрант	160	0,36	57,6

Статья расчета заработной платы включает в себя основную заработную плату работников и дополнительную.

$$C_{\text{зп}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}},$$

где $Z_{\text{осн}}$ — основная заработная плата;

$Z_{\text{доп}}$ — дополнительная заработная плата.

В свою очередь основная заработная плата определяется как:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_{\text{раб}},$$

где $Z_{\text{осн}}$ — основная заработная плата одного работника;

$T_{\text{раб}}$ — продолжительность работ, выполняемых научно

— техническим работником, раб. дн. ;

$Z_{\text{дн}}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Средняя заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}},$$

где $Z_{\text{м}}$ – месячный должностной оклад работника, руб;

M – количество месяцев работы без отпуска в течении года;

при отпуске в 24 раб. дня $M = 11,2$ месяца, 5 – дн. неделя;

при отпуске в 48 раб. дней M

$= 10,4$ месяца, 6 – дн. неделя; $F_{\text{д}}$

– действительный годовой фонд рабочего времени научно

– технического персонала, раб. дн. (таблица 10).

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{б}} \cdot (k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) \cdot k_{\text{р}},$$

где $Z_{\text{б}}$ – базовый оклад, руб;

$k_{\text{пр}}$ – приемлимый коэффициент;

$k_{\text{д}}$ – коэффициент доплат и надбавок;

$k_{\text{р}}$ – районный коэффициент.

Таблица 23 — Баланс рабочего времени за два года

Показатели рабочего времени	Руководитель	Магистрант
Календарное число дней	730	730
Количество нерабочих дней		
-выходные дни	104	104
- праздничные дни	18	18
Потери рабочего времени		
-отпуск	48	48
-невыходы по болезни	14	14
Действительный годовой фонд рабочего времени	546	546

Таблица 24 — Расчет основной заработной платы

Исполнитель	З _б , руб.	k _р	З _м , руб.	З _{дн} , руб.	T _{раб} , раб. дн.	З _{осн} , руб.
Руководитель	36 800	1,3	47 840	1 173	273	248 676
Магистрант	11 000	1,3	14 343	352	273	74 624

Дополнительная заработная плата рассчитывается исходя из 10-15% от основной заработной платы:

$$З_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot З_{\text{осн}},$$

где З_{доп} — дополнительная заработная плата, руб;

k_{доп} — коэффициент дополнительной зарплаты;

З_{осн} — основная заработная плата, руб.

Таблица 25 — Заработная плата исполнителей НТИ

Заработная плата	Руководитель	Магистрант
Основная зарплата	248 676	74 624
Дополнительная зарплата	37 301	11 193
Итого по статье С _{зп}	282 977	85 817

Отчисления на социальные нужды во внебюджетные фонды:

$$С_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}), (6)$$

где k_{внеб} — коэффициент отчисления на уплату во внебюджетные фонды.

На 2014 г. в соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%. На основании пункта 1 ст.58 закона №212-ФЗ для учреждений, осуществляющих образовательную и научную деятельность в 2014 году водится пониженная ставка — 27,1%.

Стипендиальный выплаты студентам, магистрам и аспирантам не облагаются налогом.

Отчисления на социальные нужды составляют 76 687 руб.

Научные и производственные командировки ($C_{\text{ком}}$) составляют 10% $C_{\text{зп}}$ исполнителей проекта и равны 52 428 руб.

Общие затраты за два года реализации проекта с учетом всех вышеупомянутых пунктов составили 530 633 руб.

Организационная структура проекта

Исходя из рекомендаций [1] выбран проектный вариант организационной структуры проекта.



Рисунок 37 — Проектная структура проекта

Матрица ответственности

С целью распределения ответственности между участниками проекта сформирована матрица ответственности (таблица 26).

Таблица 26 — Матрица ответственности

Этапы проекта	Руководитель проекта	Магистрант
Формирование актуальной проблемы	И	О
Выбор методики решения	С	И
Литературный обзор	С	И
Проведение расчетов	С	И

Анализ полученных данных	С	И
Структурирование и оформление результатов	С	И

План проекта

С целью иллюстрации графика выполнения работы строится календарный план для максимального по длительности исполнения работ в рамках научно-исследовательского проекта на основе временных показателей проведения научного исследования с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени дипломирования. Календарный план-график приведен в Приложении А.

10.3 Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Оценка сравнительной эффективности исследования

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{\text{pi}}}{\Phi_{\text{max}}},$$

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

Φ_{pi} – стоимость i -го варианта исполнения;

Φ_{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).

Таблица 27 — Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии	Объект исследования	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Аналог 1	Аналог 2
1. Способствует росту производительности труда пользователя		0,25	5	5	3
2. Удобство в эксплуатации		0,20	4	5	3
3. Энергосбережение		0,20	5	5	4
4. Надежность		0,20	5	5	3
6. Материалоемкость		0,15	5	5	5
ИТОГО		1			

$$I_{\text{р.-тек.пр.}} = 0,25 * 5 + 0,20 * 4 + 0,20 * 5 + 0,20 * 5 + 0,15 * 5 = 4,8$$

$$I_{\text{р.-аналог 1}} = 0,25 * 5 + 0,20 * 5 + 0,20 * 5 + 0,20 * 5 + 0,15 * 5 = 5,0$$

$$I_{\text{р.-аналог 2}} = 0,25 * 3 + 0,20 * 3 + 0,20 * 4 + 0,20 * 3 + 0,15 * 5 = 3,5$$

В результате проведенной работы была спроектирована и создана конкурентоспособная разработка, отвечающая современным требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения. Сравнение значений интегральных показателей ресурсоэффективности позволило понять, что более эффективным вариантом решения поставленной в магистерской диссертации технической задачи с позиции финансовой и ресурсной эффективности является исполнение 1 или 2.

Приложение А

Обозначения: Руководитель –  ; Магистрант – 

№ работ	Вид работ	Исполнители	T _{Ki} кал. Дн.	Продолжительность выполнения работ																															
				сент.			окт.			ноя.			дек.			январ.			февр.			март			апрель			май			июнь				
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33			
1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель	3																																
2	Выбор направления исследований	Руководитель, магистрант	5																																
3	Календарное планирование работ по теме	Магистрант	4																																
4	Изучение литературы, вычисление приближенных значений	Магистрант	110																																
5	Корректировка полученных результатов	Руководитель, магистрант	40																																
6	Конечный расчёт аппарата	Магистрант	30																																
7	Сравнение энергоэффективности методов модернизации	Магистрант	15																																
8	Оценка полученных результатов	Руководитель	10																																

[illegible]

Заключение

В процессе проделанной работы была произведена модернизация ректификационной установки для разделения смеси метанол-формальдегид.

Были получены следующие данные:

- диаметр колонны - 2800 мм;
- высота колонны – 52 м;

Толщина цилиндрической обечайки, эллиптического днища и крышки 10 мм. В качестве массообменного устройства вместо колпачковых тарелок ТСК-Р была выбрана регулярная насадка Sulzer Mellapak 170. Общая высота насадки равняется 30 м. Проведен механический и прочностной расчёт колонны.

Также был рассчитан испаритель, проведён его механический и прочностной расчёт, построены графики и таблицы.

В результате расчёта получили, что штуцер диаметром 600 мм необходимо укрепить с помощью утолщения стенки штуцера. Проведя аналогичный расчёт для диаметров штуцеров 500 мм и 100 мм выяснилось, что и их необходимо укрепить путём утолщения стенки штуцера. Для диаметра штуцера 65 мм и 80 мм укрепление отверстия не требуется. Штуцер диаметром 1000 мм необходимо укрепить накладным листом.

Были рассчитаны фланцевые соединения на прочность и герметичность. Выяснили, что прочность и герметичность обеспечена.

Колонна была рассчитана на прочность и устойчивость. Прочность и устойчивость колонны и опорной обечайки обеспечены. Толщина опорной обечайки 14 мм, диаметр анкерных болтов М36.

Публикации научных разработок

Тема	Место проведения конференций, название	Дата проведения конференции
Использование современных программ для расчёта предохранительных клапанов	XVIII Международная научно-практическая конференция студентов и молодых ученых «Химия и химическая технология в XXI веке» имени профессора Л.П. Кулёва. ТПУ	29 мая – 01 июня 2017 г.
Использование современных программ для расчёта предохранительных клапанов	Междисциплинарная научно – практическая конференция «Современная наука, теория, методология и практические результаты исследований» Кузбасский научно – публикационный центр «Технология науки»	25 мая 2017 г.

Список использованной литературы

1. Дытнерский Ю.А., Процессы и аппараты химической технологии. 2-е изд., перераб. и дополн.- М.: Химия, 2010, 493с.
2. Марешова Л.А., Богатых К.Ф., Рольник Л.З., Ягафарова Г.Г. Результаты внедрения в промышленность разработок по регулярным перекрестноточным насадками учёными Уфимского государственного нефтяного технического университета, Нефтегазовое дело, 2007, 11 стр.
3. Лаптева Е.А. Энергосбережение на технологической установке разделения этаноламинов: ГОУ ВПО Казанский государственный энергетический университет. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Казань, 2009, 169 стр.
4. Павлов К. Ф., Романков П. Г., Носков А. А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов. Л.: Химия, 2007, 575с.
5. Лащинский А. А., Толчинский А. Р. Основы конструирования и расчета химической аппаратуры. Л.: Машиностроение, 1970, 752с.
6. ГОСТ Р 52857.2 – 2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчёта на прочность. Расчет цилиндрических и конических обечаек, выпуклых и плоских днищ и крышек, М: 2008 – 44 стр.
7. ГОСТ Р 52857.1 – 2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчёта на прочность. Общие требования., М: 2008 – 26 стр.
8. Беляев. В.М., Миронов В.М. Конструирование и расчёт элементов оборудования отрасли. Часть I. Тонкостенные сосуды и аппараты химических производств. ТПУ.: 2011, 300 стр.
9. ГОСТ Р 52857.3 – 2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчёта на прочность. Укрепление отверстий в обечайках и днищах при внутреннем и внешнем давлениях. Расчет на прочность обечаек и днищ при внешних статических нагрузках на штуцер, М: 2008 – 29 стр.
10. ГОСТ Р 52857.4 – 2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчёта на прочность. Расчет на прочность и герметичность фланцевых соединений, М: 2008 – 40 стр.

11. ГОСТ 15119 – 79. Испарители кожухотрубчатые с неподвижными трубными решётками и кожухотрубчатые с температурным компенсатором на кожухе., М: 1981 – 16 стр.
12. ГОСТ Р 51274 - 99. Аппараты колонного типа. Нормы и методы расчёта на прочность., М: 1999 – 16 стр.
13. ГОСТ Р 51273 - 99. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчёта на прочность. Определение расчётных усилий для аппаратов колонного типа от ветровых нагрузок и сейсмических воздействий, М: 1999 – 16 стр.
14. ГОСТ 6533 - 78. Днища эллиптические отбортованные стальные для сосудов, аппаратов и котлов. Основные размеры., М: 1980 – 26 стр.
15. М. Ф. Михалёв. Расчёт и конструирование машин и аппаратов химических производств. Примеры и задачи. Л: Машиностроение, 1984 – 303 стр.
16. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. Учебник для вузов - 10-е изд., стереотипное, доработанное. Перепечатано с изд. 1973 г. — М.: ООО ТИД «Альянс», 2004. — 753 с.
17. Огородников С.К. Формальдегид. – Л.: Химия, 1984. – 280 с., ил.
18. Основы функционально-стоимостного анализа: Учебное пособие / Под ред. М.Г. Карпунина и Б.И. Майданчика. - М.: Энергия, 1980. - 175 с.
19. Видяев И.Г., Серикова Г.Н., Гаврикова Н.А. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение. Учебное пособие – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 36 с.
20. ГОСТ Р 12.1.019-2009 Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты. – М: 2010 – 32 стр.
21. ГОСТ 12.0.003-74 Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. – М: 1974 – 4 стр.
22. ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования (с Изменением N 1). – М: 1992 – 126 стр.
23. ГОСТ 12.1.005-88. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. М: 1989 – 71 стр.

24. ГОСТ 12.1.012-2004. ССБТ. Вибрационная безопасность. Общие требования. М: 1991 – 20 стр.
25. Федеральный закон от 27.12.2002 N 184-ФЗ (ред. от 23.06.2014) "О техническом регулировании" (с изм. и доп., вступ. в силу с 22.12.2014). М: 2002 – 52 стр.
26. РД 09-364-00 Типовая инструкция по организации безопасного проведения огневых работ на взрывоопасных взрывопожароопасных объектах. М: 2010 – 19 стр.
27. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений., М: 1996 – 25 стр.
28. СанПиН 2.2.2/2.4.1340 – 03 Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы". I. Общие положения и область применения. М: 2003 – 18 стр.
29. АТК 24.200.04-90 Опоры цилиндрические и конические вертикальных аппаратов. Типы и основные размеры., М: 1991 – 53 стр.
- 30.Фарамазов С.А.Оборудования НПЗ и его эксплуатация,М:1978–352 стр.
31. 4. Скворцов Ю.В. Организационно-экономические вопросы в дипломном проектировании: Учебное пособие. – М.: Высшая школа, 2006. – 399 с.

Приложение Б

Introduction

Rectification is the process of homogeneous mixture separating of volatile liquids by bilateral mass transfer and heat transfer between the non-equilibrium liquid and vapor phases with different temperatures and moving opposite to one another.

The separation is usually carried out in columned devices with multiple or continuous contact phases. During the contact of the liquid a low boiling point component evaporates, a high-boiling component that goes into the liquid condensed from the vapor phase. Finally, the vapor becomes pure low boiling component due to the exchange of components. The vapors coming from the top of the column after condensation in a separate unit give distillate (top product) and reflux, i.e. the fluid that returns to irrigate the column and interact with the rising vapors in column. At the bottom the removed liquid is almost a pure high boiling component, i.e. underflow. Part of the residue is vaporized in the lower portion of the column for ascending of vapor flow.

Rectification has been known since the early nineteenth century, as one of the most important processes mainly in alcohol and petroleum industries. Currently, rectification is widely used in various fields of chemical engineering, where the selection of components in pure form is very important (in the organic synthesis of derivatives, isotopes, semiconductors, and a variety of other substances of high purity).

Calculation of shell junction

The purpose of calculation: determine strain in junction of cylindrical shell with elliptical bottom under the conditions of internal pressure loading.

Design scheme for the definition of boundary forces and moments is shown in figure.

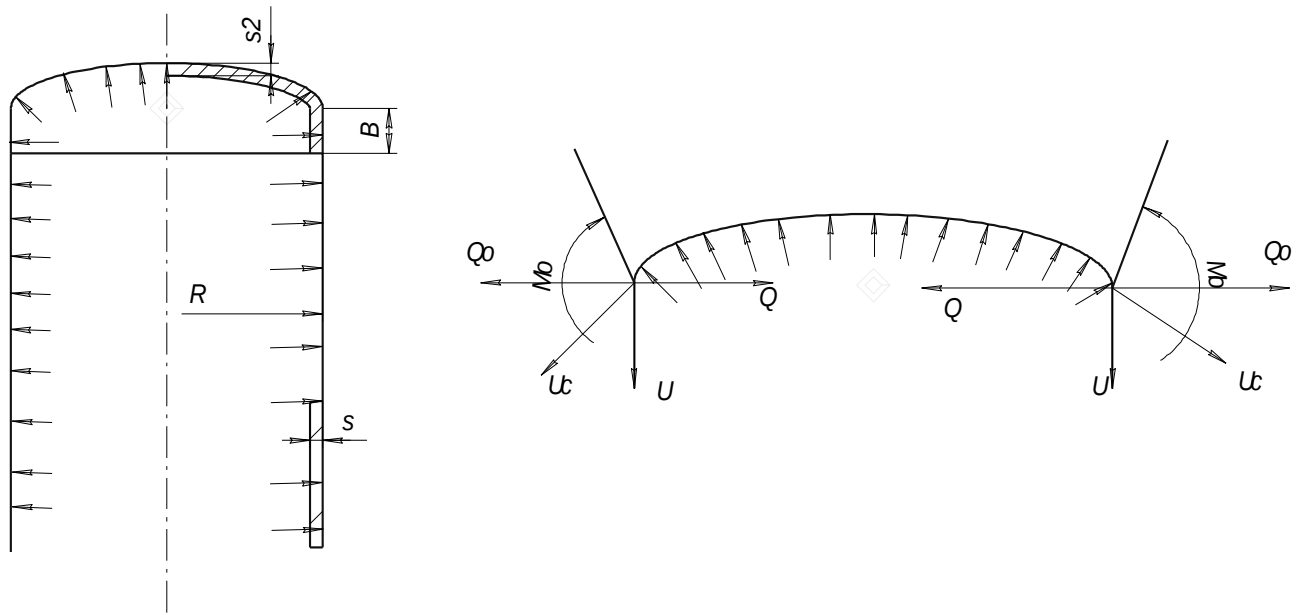


Figure № 6. The scheme of junction shells.

We define the boundary forces and moments from the equation of strain compatibility for the junction shell with elliptical bottom

$$\begin{aligned} \Delta P_r - \Delta Q_{0,r} + \Delta M_{0,r} &= \Delta P_e + \Delta Q_{0,e} + \Delta M_{0,e} \\ \theta P_r - \theta Q_{0,r} + \theta M_{0,r} &= -\theta P_e - \theta Q_{0,e} - \theta M_{0,e} \end{aligned} ,$$

where ΔP_r , $\Delta Q_{0,r}$, $\Delta M_{0,r}$, θP_r , $\theta Q_{0,r}$, $\theta M_{0,r}$ - radial and angular displacements of the cylindrical edge of the shell under load, respectively P , Q_0 , M_0 ; ΔP_e , $\Delta Q_{0,e}$, $\Delta M_{0,e}$, θP_e , $\theta Q_{0,e}$, $\theta M_{0,e}$ - radial and angular displacements of the elliptical edge of the shell under load, respectively P , Q_0 , M_0 ; s_{exec} - effective wall thickness.

Substitute appropriate values into the equation strain

$$\begin{aligned} & \frac{(2 - \mu) \cdot (R_e)^2 \cdot P_{cul}}{2 \cdot E_e \cdot 10^5 \cdot (s_{effec} - c)} - \frac{2 \cdot \beta \cdot R_e^2}{(s_{effec} - c) \cdot E_e \cdot 10^5} \cdot Q_0 + \frac{2 \cdot \beta^2 \cdot R_e^2}{10^5 \cdot E_e \cdot (s_{effec} - c)} \cdot M_0 = \\ & = \frac{(a_e)^2 \cdot P_{cul}}{2 \cdot E_e \cdot 10^5 \cdot (s_{effec} - c)} \cdot \left(2 - \mu - \frac{a_e^2}{b_e^2} \right) + \frac{2 \cdot \beta \cdot e \cdot a_e^2}{(s_{effec} - c) \cdot E_e \cdot 10^5} \cdot Q_0 + \frac{2 \cdot \beta \cdot e^2 \cdot a_e^2}{E_e \cdot 10^5 \cdot (s_{effec} - c)} \cdot M_0 \\ & 0 - \frac{2 \cdot \beta^2 \cdot R_e^2}{(s_{effec} - c) \cdot E_e \cdot 10^5} \cdot Q_0 + \frac{4 \cdot \beta^3 \cdot R_e^2}{E_e \cdot 10^5 \cdot (s_{effec} - c)} \cdot M_0 = \end{aligned}$$

$$= -0 + \frac{2 \cdot \beta_e^2 \cdot a^2}{(s_{\text{effec}} - c) \cdot E_{\text{r}} \cdot 10^5} \cdot Q_0 + \frac{4 \cdot \beta_e^3 \cdot a^2}{E_{\text{r}} \cdot 10^5 \cdot (s_{\text{effec}} - c)} \cdot M_0$$

where $\mu=0,3$ (Poisson's ratio)

$$\beta := \frac{\sqrt[4]{3 \cdot (1 - \mu^2)}}{\sqrt{R_{\text{r}} \cdot (s_{\text{effec}} - c)}} = 0.013 \quad \beta_e := \beta$$

$$a := R_{\text{r}} \quad b := \frac{D}{4} = 700 \text{ mm}$$

$$\Delta P_c := \frac{(2 - \mu) \cdot (R_{\text{r}})^2 \cdot P_{\text{cul}}}{2 \cdot E_{\text{r}} \cdot 10^5 \cdot (s_{\text{effec}} - c)} = 0.667$$

$$\Delta P_e := \frac{(a)^2 \cdot P_{\text{cul}}}{2 \cdot E_{\text{r}} \cdot 10^5 \cdot (s_{\text{effec}} - c)} \cdot \left(2 - \mu - \frac{a^2}{b^2} \right) = -0.903$$

$$\Delta Q_{0,c} := \frac{2 \cdot \beta \cdot R_{\text{r}}^2}{(s_{\text{effec}} - c) \cdot E_{\text{r}} \cdot 10^5} \quad \Delta Q_{0,e} := \frac{2 \cdot \beta_e \cdot a^2}{(s_{\text{effec}} - c) \cdot E_{\text{r}} \cdot 10^5}$$

$$\Delta M_{0,r} := \frac{2 \cdot \beta^2 \cdot R_{\text{r}}^2}{10^5 \cdot E_{\text{r}} \cdot (s_{\text{effec}} - c)} \quad \Delta M_{0,e} := \frac{2 \cdot \beta_e^2 \cdot a^2}{E_{\text{r}} \cdot 10^5 \cdot (s_{\text{effec}} - c)}$$

$$\theta_{Pr} := 0$$

$$\theta_{Pe} := 0$$

$$\theta Q_{0,r} := \frac{2 \cdot \beta^2 \cdot R_{\text{r}}^2}{(s_{\text{effec}} - c) \cdot E_{\text{r}} \cdot 10^5} \quad \theta Q_{0,e} := \frac{2 \cdot \beta_e^2 \cdot a^2}{(s_{\text{effec}} - c) \cdot E_{\text{r}} \cdot 10^5}$$

$$\theta Q_{0,r} := \frac{2 \cdot \beta^2 \cdot R_{\text{r}}^2}{(s_{\text{effec}} - c) \cdot E_{\text{r}} \cdot 10^5} \quad \theta Q_{0,e} := \frac{2 \cdot \beta_e^2 \cdot a^2}{(s_{\text{effec}} - c) \cdot E_{\text{r}} \cdot 10^5}$$

$$\theta M_{0,r} := \frac{4 \cdot \beta^3 \cdot R_{\text{r}}^2}{E_{\text{r}} \cdot 10^5 \cdot (s_{\text{effec}} - c)} \quad \theta M_{0,e} := \frac{4 \cdot \beta_e^3 \cdot a^2}{E_{\text{r}} \cdot 10^5 \cdot (s_{\text{effec}} - c)}$$

$$Q_0 := 0 \quad M_{,0} := 0$$

Given

$$\Delta P_{r,e} - \Delta Q_{0,r,e} \cdot Q_0 + \Delta M_{0,r,e} \cdot M_{,0} = \Delta P_e + \Delta Q_{0,e} \cdot Q_0 + \Delta M_{0,e} \cdot M_{,0}$$

$$\theta P_{r,e} - \theta Q_{0,r,e} \cdot Q_0 + \theta M_{0,r,e} \cdot M_{,0} = -\theta P_e - \theta Q_{0,e} \cdot Q_0 - \theta M_{0,e} \cdot M_{,0}$$

$$V_{,0} := \text{Find}(Q_0, M_{,0}) = \begin{pmatrix} 21.564 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$Q_{0,0} := V_{,0} = 21.564$$

$$M_{,0,0} := V_{,1} = 0$$

$$Q_0 = 21.564 \text{ MPa}$$

$$M_{,0} = 0 \text{ N*m}$$

We define the total strains at the edge of the elliptical bottom, meridian and ring strain, respectively by the formulas:

$$\sigma_{me} = \sigma_{P.me} + \sigma_{Q.0me} + \sigma_{M.0me}$$

$$\sigma_{te} = \sigma_{P.te} + \sigma_{Q0.te} + \sigma_{M.0te}$$

where $\sigma_{P.me}$, $\sigma_{Q.0me}$, $\sigma_{M.0me}$ - meridian strain acting on loads, respectively P, Q0, M0;

$\sigma_{P.te}$, $\sigma_{Q.0te}$, $\sigma_{M.0te}$ - ring strain acting on loads, respectively P, Q0, M0.

$$\sigma_{me} := \frac{P_{cul} \cdot a}{2 \cdot (s_{,effec} - c)} + 0 + \frac{6 \cdot M_{,0}}{(s_{,effec} - c)^2} = 56 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{te} := \frac{P_{cul} \cdot a \cdot \left(2 - \frac{a^2}{b^2}\right)}{2 \cdot (s_{,effec} - c)} + \frac{2 \cdot Q_0 \cdot \beta_e \cdot a}{s_{,effec} - c} + \frac{2 \cdot M_{,0} \cdot \beta_e^2 \cdot a}{s_{,effec} - c} + \frac{6 \cdot \mu \cdot M_{,0}}{(s_{,effec} - c)^2} = -1.705 \times 10^{-13} \text{ MPa}$$

We define the total strains at the edge of the cylindrical shell, meridian and ring strain, respectively by the formulas:

$$\sigma_{m0} = \sigma_{P.m0} + \sigma_{Q.0m0} + \sigma_{M.0m0}$$

$$\sigma_{t0} = \sigma_{P.t0} + \sigma_{Q0.t0} + \sigma_{M.0t0}$$

where $\sigma_{P.m0}$, $\sigma_{Q.0m0}$, $\sigma_{M.0m0}$ meridian strain acting on loads, respectively P, Q0, M0;

$\sigma_{P.t0}$, $\sigma_{Q.0t0}$, $\sigma_{M.0t0}$ - ring strain acting on loads, respectively P, Q0, M0.

$$\sigma_{m0} := \frac{P_{cul} \cdot R}{2 \cdot (s_{, effec} - c)} + 0 + \frac{6 \cdot M_{,0}}{(s_{, effec} - c)^2} = 112 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{t0} := \frac{P_{cul} \cdot R}{(s_{, effec} - c)} - \frac{(2 \cdot Q_0) \cdot \beta \cdot R}{s_{, effec} - c} + \frac{2 \cdot M_{,0} \cdot \beta^2 \cdot R}{s_{, effec} - c} + \frac{6 \cdot \mu \cdot M_{,0}}{(s_{, effec} - c)^2} = 3.411 \times 10^{-13} \text{ MPa}$$

We determine the maximum strain at the edge of the elliptical bottom and a cylindrical shell, respectively

$$\sigma_{maxe} := \max(\sigma_{me}, \sigma_{te})$$

$$\sigma_{maxe} = 56 \text{ MPa}$$

Allowable strain at the edge of the element:

$$\sigma_c := 1.3 \cdot \sigma_{all} = 185.9 \text{ MPa}$$

This increase in σ_c related to the local nature of the boundary strain, leading to the formation through the distortion of the plastic hinge, precluding destruction of the junction.

Testing conditions:

$$Us7 := \begin{cases} \text{"condition is satisfied"} & \text{if } \sigma_{maxe} < \sigma_c \\ \text{"condition is not satisfied"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Us7 = \text{"condition is satisfied"}$$

$$\sigma_{max0} := \max(\sigma_{m0}, \sigma_{t0})$$

$$\sigma_{max0} = 112 \text{ Mpa}$$

$$Us8 := \begin{cases} \text{"condition is satisfied"} & \text{if } \sigma_{maxe} < \sigma_c \\ \text{"condition is not satisfied"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Us8 = \text{"condition is satisfied"}$$

As a result of calculation we have shown that the strength of the junction shells is provided, and the relative movement of the mating parts is missing.

1.2 Intensification of the operation of the distillation column by replacing the plates with a regular nozzle

The problem of intensifying of the work of rectifying columns has always existed: raw materials are changing, the productivity of plants and the assigned tasks. In recent years, when reconstructing the tray-type distillation columns, the plate-type contact devices are most often replaced with more perfect packing contact devices. The packed column provides a smaller pressure drop across the height of the apparatus, a wider range of stable operation, higher efficiency, and, accordingly, higher separation capacity. Columns with such characteristics allow to solve the issues of deepening the processing of oil and oil products, saving energy and increasing the flexibility of both existing and projected technologies. [10]

In 1992 the first oil vacuum column of the AVT-2 "Orsknefteorgsintez" unit was reconstructed. Before the reconstruction, the cap was fitted with cap plates, their separating capacity in the reinforcing part of the column was only 5.6 theoretical plates (TT), with all the ensuing consequences. As a result of the reconstruction, the plates were replaced with 20 packed blocks, 17 of which were located in the strengthening part of the column [10].

The separating power of the strengthening part of the column was increased to 10.8 tons, which allowed reducing the overlap of adjacent oil distillates in 1.5-2.0 times and obtained narrower 100-110 ° C oil fractions instead of 140-150 ° C. The selection of oil distillates was increased from 18.5 to 22.5% by weight. for oil. As a result of industrial inspection and subsequent modeling of the operation of the reconstructed vacuum column of the AVT-2 unit, it was also possible to evaluate the vapor and liquid loads and efficiency at all packs of the nozzle. The heat and mass exchange coefficient of efficiency along the height of the column turned out to be 0.9 in the condensation zone, 0.94 in the strengthening vacuum vacuum cell, 0.65 in the spindle distillate strengthening section, 0.6 in the machine distillate strengthening section, and 0.4 in the stripping part of the column. The steam flow rate was cut by half, the heating temperature of the raw material was reduced by 10-15 °C. [10].

Based on the available data and successful applications of this technology, it was decided to modernize the equipment, in particular, the rectification column for formalin production, by replacing the bubble plates with a stacked packing of the Sulzer Mellapak type. And replace it in such a way that the structural data of the column, that is its diameter (2800 mm) and height (52000 mm), do not change.

We select the nozzle with the following characteristics: Mellapak 170 (specific surface $\varepsilon = 170 \text{ m}^3 / \text{m}^3$, free nozzle volume $a = 0.95$), steel type: stainless. Scope: basic chemistry and petrochemistry, refining processes. Diameter and operating parameters of the column: $D = 80$ to 17000 mm , pressure: $P =$ from vacuum to excess, liquid load: from 0.2 to $200 \text{ m}^3/\text{m}^2$. In means, that this type of nozzle fully meets our requirements.

In accordance with the above described, we will recalculate for the purpose of studying how much power consumption can be changed without changing the overall dimensions of the column. The calculation is based on Wolfram Mathematica.

Initial data:

$\rho_{yup} = 1.179$; (* Gas density at the top of the column *)

$\rho_{yd} = 1.135$ (* Gas density at the bottom of the column *)

$\rho_x = 846.354$ (* Liquid density, total *)

$\mu_{xup} = 0.2048$ (* Dynamic coefficient of viscosity of the liquid at the top of the column *)

$\mu_{xd} = 0.1$; (* Dynamic coefficient of viscosity of the liquid at the bottom of the column *)

$\mu_{yup} = 0.0028$; (* Dynamic coefficient of viscosity of the gas at the top of the column *)

$\mu_{yd} = 0.0026$; (* Dynamic coefficient of viscosity of the gas at the bottom of the column *)

$\rho_{xup} = 835.579$ (* The density of the liquid in the upper part of the column *)

$\rho_{xd} = 930.3$ (* The density of the liquid at the bottom of the column *)

$A = 170$; (* Specific surface of the nozzle *)

$E = 0.95$; (* Free nozzle volume *)

$g = 9.81$; (* Factor of free fall *)

$G_f = 8.1$; (* Power Consumption *)

$X_p = 0.97$; (* Content of the volatile component in the distillate *)

$X_f = 0.2724$; (* Content of the highly volatile component in the feed *)

$X_w = 0.07$; (* Content of the volatile component in the bottom residue *)

Calculation:

Bottom-up residue consumption:

$$G_w = G_f * (X_p - X_f) / (X_p - X_w)$$

6.2784

Distillate consumption:

$$G_p = G_f - G_w$$

1.8216

Reflux ratio:

$$R = 2.1;$$

Average temperature in the column:

$$T_m = 53.75;$$

$$P_0 = 0.1033;$$

$$M_p = 31.936 \text{ (* Average molar mass of the components in the column *)}$$

$$T_0 = 273;$$

$$P = 0.04; \text{ (* Working pressure in the column *)}$$

The average mass flow of steam at the top of the column:

$$G_{up} = G_p * (R + 1) * 31.358 / 32$$

5.53367

The average mass flow of steam at the bottom of the column:

$$G_d = G_p * (R + 1) * 30.728 / 32$$

5.42249

The average mass load (flow rate) in the liquid at the top of the column:

$$L_{up} = G_p * R * 31.358 / 32$$

3.74861

The average mass load (flow rate) in the liquid at the bottom of the column:

$$L_d = (G_p * R * 30.326 / 32) + (G_f * 30.326 / 30.52)$$

$$11.6738$$

Limit steam velocity at the top of the column:

$$\text{Solve}[(W_v1^2 * a * \rho_{yup} * \mu_{xup}^{0.16}) / (g * \epsilon^3 * \rho_{xup}) == 1.2 * \text{Exp}[-4 * (L_{up} / G_{up})^{0.25} * (\rho_{yup} / \rho_{xup})^{0.125}], W_v1]$$

$$\{\{W_v1 \rightarrow -3.31287\}, \{W_v1 \rightarrow 3.31287\}\}$$

The limiting speed of steam at the bottom of the column:

$$\text{Solve}[(W_v2^2 * a * \rho_{yd} * \mu_{xd}^{0.16}) / (g * \epsilon^3 * \rho_{xd}) == 1.2 * \text{Exp}[-4 * (L_d / G_{up})^{0.25} * (\rho_{yd} / \rho_{xd})^{0.125}], W_v2]$$

$$\{\{W_v2 \rightarrow 2.94276\}, \{W_v2 \rightarrow 2.94276\}\}$$

Let's take the working speed 30% below the maximum speed:

$$W_{v1} = 3.1;$$

$$W_{v2} = 2.94;$$

$$W_{vup} = W_{v1} * 0.7$$

$$2.31$$

$$W_{vd} = W_{v2} * 0.7$$

$$2.03$$

Let us find the average vapor velocity:

$$W_{vm} = (W_{vup} + W_{vd}) / 2$$

$$2.17$$

The approximate diameter of the column is determined from the flow equation (with an increase in the flow rate of the initial mixture by 40%):

$$V = (G_p * (R + 1) * 22.4 * (T_m + 273) p_0) / (M_p * T_0 * P)$$

$$12.2427$$

$$D_{msh} = \text{Sqrt}[V / (0.785 * W_{vm})]$$

$$2.68085$$

Let's take the shell diameter as follows:

$$D_{sh} = 2.8$$

$$2.8$$

The actual vapor velocity in the column is:

$$W_v = W_{vm} * (D_{msh} / D_{sh})^2$$

1.98925

In the result of the recalculation, it was obtained that when the cap plates are replaced with a nozzle without changing the overall dimensions of the installation, the power consumption is increased by 40%, which in turn increases the yield of the product also by 40% from the previously set value.

It is also necessary to compare the nozzle itself with the plates to identify the advantages and disadvantages of some in front of others in order to determine the optimal method for rectifying our mixture.

One of the main factors in the choice of the method of rectification is the hydraulic resistance of the column. The smaller it is, the less energy is needed to overcome it, in order to ensure efficient operation of the column. So, let's compare the hydraulic resistance of the column in our process:

Complete hydraulic resistance of the distillation column with bubble cap:

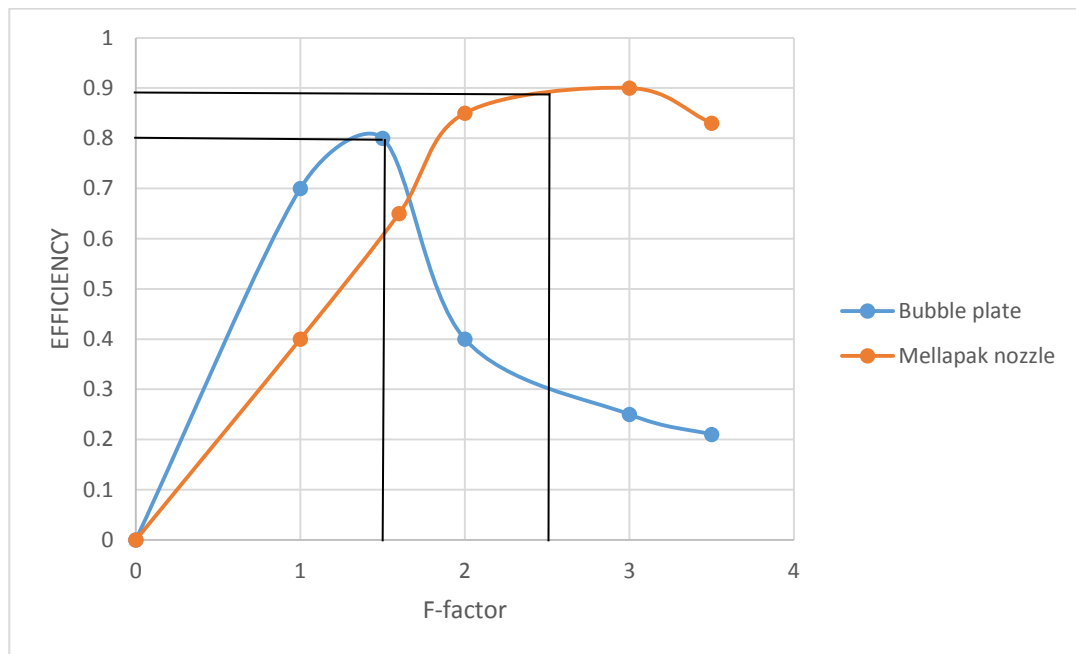
$$\Delta p = \Delta p_{up} N_{up} + \Delta p_{d} N_d = 289.93 \cdot 40 + 364.43 \cdot 30 = 22530 \text{ Pa.}$$

Total hydraulic resistance of the distillation column with nozzle:

$$\Delta p = \Delta p_{up} + \Delta p_d = 6537.85 + 1816.47 = 8354.33 \text{ Pa.}$$

As we see the hydraulic resistance of the column with a nozzle is 3 times less than with a column with bubble cap. Since one of the main conditions for choosing a contact device is a low hydraulic resistance, the choice in favor of the nozzle is obvious.

Also an important parameter is the efficiency of the contact devices. Graph 1 shows the dependence of the efficiency of the packing device from the F-factor.



Graph 1. Mass transfer device efficiency

The F-factor is equal to the product of the gas velocity in the column to the root of the gas density, that is:

- for the cap plate: $w = Wv\sqrt{\rho_{mv}} = 1.421\sqrt{1.157} = 1.5$

- for the Mellapak nozzle: $w = Wv\sqrt{\rho_{mv}} = 1.989\sqrt{1.157} = 2.5$

In this case, the efficiency for the plate is 0.8, and for the nozzle is 0.9

That is, with the same dimensions of the column, the efficiency of the nozzle is higher compared to the cap plate, and when the F-factor is increased, the efficiency also increases.

On the basis of the data obtained, we will compile a table, to which we shall reduce all the parameters.

Table 1. Comparative characteristics of mass transfer devices

	Bubble plate	Mellapak Nozzle
1. Power consumption (kg/s)	5.787	8.1
2. Efficiency (%)	0.8	0.9
3. Hydraulic resistance (Pa)	22530	8354.33
4. Steam productivity (kg/s)	3.75	5.45
5. Productivity in liquid (kg/s)	5.37	7.71

So, we can see that the replacement of the cap plates on the nozzle is completely justified, and thus it is possible to increase considerably the performance of the column, its efficiency and reduce energy costs.

In all respects, the nozzle outperforms the plate, especially in terms of hydraulic resistance, performance and efficiency. And considering that the cost of these mass-exchange devices is almost the same, the choice in favor of the nozzle as a mass-exchange device is quite obvious.