

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

Инженерная школа новых производственных технологий
Научно-образовательный центр Н.М. Кижнера
Направление подготовки 18.03.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии
Профиль Машины и аппараты химических производств

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Проект насадочной ректификационной колонны для разделения бинарной смеси бензол-толуол

УДК 66.048.3:66.066:547.532/.533

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4К41	Нутфуллин Рустам Радифович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Тихонов Н.В.	к.т.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Верховская М.В.	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Штейнле А.В.	к.м.н.		

По разделу «Механический расчет оборудования»

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

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель НОЦ	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Краснокутская Е.А.	д.х.н.		

Томск – 2018 г.

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

Инженерная школа новых производственных технологий
 Направление подготовки «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической
 технологии, нефтехимии и биотехнологии»
 Научно-образовательный центр Н.М. Кижнера

УТВЕРЖДАЮ:
 Зав. кафедрой

 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Бакалаврской работы

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

Студенту:

Группа	ФИО
4К41	Нутфуллину Рустаму Радифовичу

Тема работы:

Проектирование насадочной ректификационной колонны для разделения бинарной смеси бензол-толуол	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе</p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Расчет насадочной ректификационной колонны непрерывного действия для разделения бинарной смеси бензол</p> <p>Производительность колонны по дистилляту $P = 200 \frac{\text{тонн}}{\text{сутки}} = 8333,33 \frac{\text{кг}}{\text{ч}} = 2,315 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$</p> <p>Содержание легковолетучего компонента в массовых %:</p> <ul style="list-style-type: none"> • в исходной смеси 55; • в дистилляте 90; • в кубовом остатке 5; <p>Давление в паровом пространстве дефлегматора $P = 0,1 \text{ МПа}$</p>
---	---

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<p>1. Технологический расчет включает в себя:</p> <ul style="list-style-type: none"> • описание схемы производства; • составление материального баланса колонны; • расчет оптимального флегмового числа, числа теоретических и реальных тарелок; <p>2. Конструктивно-механический расчет:</p> <ul style="list-style-type: none"> • расчет оптимального диаметра и высоты колонны; • расчет гидравлического сопротивления тарелок; • выбор материала ректификационной колонны; • расчет толщины стенки цилиндрической обечайки, крышки и днища; • расчет штуцеров и фланцев; • расчет укрепления отверстий; • расчет опорной обечайки; • поверочный расчет колонного аппарата <p>3. Тепловой расчет</p> <p>4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение:</p> <ul style="list-style-type: none"> • анализ рынка в России; поиск слабых и сильных сторон предприятия (SWOT-анализ); • расчет основных экономических показателей производства; • построение графика безубыточности. <p>5. Социальная ответственность:</p> <ul style="list-style-type: none"> • производственная безопасность; • экологическая безопасность; • безопасность при чрезвычайных ситуациях; •
<p>Перечень графического материала</p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>Лист 1 - Технологическая схема (A₁); Лист 2 - Общий вид ректификационной колонны (A₀); Лист 3 - Экономические показатели (A₁).</p>
<p>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</p> <p><i>(с указанием разделов)</i></p>	
<p style="text-align: center;">Раздел</p>	<p style="text-align: center;">Консультант</p>
<p style="text-align: center;">Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>	<p style="text-align: center;">Верховская М.В.</p>
<p style="text-align: center;">Социальная ответственность</p>	<p style="text-align: center;">Штейнле А.В.</p>
<p style="text-align: center;">Механический расчет оборудования</p>	<p style="text-align: center;">Беляев В.М.</p>
<p>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</p>	

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Тихонов Николай Викторович	к.т.н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4К41	Нутфуллин Рустам Радифович		

Код результат а	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС ВПО, критериев и/или заинтересованных сторон
<i>Профессиональные компетенции</i>		
Р1	Применять базовые математические, естественнонаучные, социально-экономические и специальные знания в профессиональной деятельности	Требования ФГОС (ПК-1,2,3,19,20), Критерий 5 АИОР (п. 1.1)
Р2	Применять знания в области энерго- и ресурсосберегающих процессов и оборудования химической технологии, нефтехимии и биотехнологии для решения производственных задач	Требования ФГОС (ПК-4,5,9,15 ОК-7), Критерий 5 АИОР (п. 1.1, 1.2)
Р3	Ставить и решать задачи производственного анализа, связанные с созданием и переработкой материалов с использованием моделирования объектов и процессов химической технологии, нефтехимии и биотехнологии	Требования ФГОС (ПК-4,5,8,11, ОК-2,4), Критерий 5 АИОР (п. 1.2)
Р4	Проектировать и использовать новое энерго-и ресурсосберегающее оборудование химической технологии, нефтехимии и биотехнологии	Требования ФГОС (ПК-8,11,23,24), Критерий 5 АИОР (п. 1.3)
Р5	Проводить теоретические и экспериментальные исследования в области энерго-и ресурсосберегающих процессов химической технологии, нефтехимии и биотехнологии	Требования ФГОС (ПК-1,4,5,19-22, ОК-7,10), Критерий 5 АИОР (п. 1.4)
Р6	Осваивать и эксплуатировать современное высокотехнологичное оборудование, обеспечивать его высокую эффективность и надежность, соблюдать правила охраны здоровья и безопасности труда на производстве, выполнять требования по защите окружающей среды	Требования ФГОС (ПК-6,12,13,14,17, ОК-3,4,8), Критерий 5 АИОР (п. 1.5)
Р7	Применять знания по проектному менеджменту для ведения инновационной инженерной деятельности с учетом юридических аспектов защиты	Требования ФГОС (ПК-3, 8, 9, 10, 11, 12, 13), Критерий 5 АИОР

	интеллектуальной собственности	(п. 2.1), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI
Код результата а	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС ВПО, критериев и/или заинтересованных сторон
P8	Использовать современные компьютерные методы вычисления, основанные на применении современных эффективных программных продуктов при расчете свойств материалов, процессов, аппаратов и систем, характерных для профессиональной области деятельности; находить необходимую литературу, использовать компьютерные базы данных и другие источники информации	Требования ФГОС (ПК-4, 5, 9, 10, 11, 14)
<i>Общекультурные компетенции</i>		
P9	Демонстрировать знания социальных, этических и культурных аспектов профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-1,2,6-10), Критерий 5 АИОР (пп.2.4,2.5)
P10	Самостоятельно учиться и непрерывно повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-6,7,8), Критерий 5 АИОР (2.6)
P11	Владеть иностранным языком на уровне, позволяющем разрабатывать документацию, презентовать результаты профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-11) Критерий 5 АИОР (п.2.2)
P12	Эффективно работать индивидуально и в коллективе, демонстрировать ответственность за результаты работы и готовность следовать корпоративной культуре организации	Требования ФГОС (ОК-3,4,5,12) Критерий 5 АИОР (пп.1.6, 2.3)

Реферат

В бакалаврской работе рассчитана насадочная ректификационная колонна для разделения бинарной смеси бензол-толуол.

Произведен технологический, тепловой и конструктивно-механический расчет проектируемой колонны. Определены основные толщины стенок элементов, проверены условия устойчивости и прочности. Был произведен расчет фланцевых соединений на прочность и герметичность, подбор опорного узла, поверочный механический расчет колонны на действие ветровых нагрузок.

В разделе «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» определены потенциальные потребители результатов исследования, приведен SWOT-анализ, анализ конкурентных технических решений, проведено планирование научно-исследовательских работ, определена структура работ в рамках научного исследования, выполнено определение трудоемкости выполнения работ, разработан график проведения научного исследования, рассчитаны затраты, определена ресурсная, финансовая, бюджетная, социальная и экономическая эффективности исследования.

Раздел «Социальная ответственность» включает в себя Определены вредные и опасные производственные факторы, предложены способы снижения негативного воздействия на организм человека.

Бакалаврская работа содержит расчетно-пояснительную записку из 148 страниц текста, 18 таблиц, 13 рисунков, 23 литературных источника и графическую часть из 1 листа формата А0 и 2-х листов А1.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Реферат	7
Введение.....	10
Литературный обзор	12
1 Технологический расчет.....	14
1.1 Материальный баланс ректификационной колонны.....	14
1.2 Пересчет состава фаз из массовых долей в мольные	15
1.3 Построение фазовых диаграмм	16
1.4 Определение рабочего флегмового числа	18
1.5 Массовые расходы жидкости в верхней и нижней частях колонны	23
2 Конструктивный расчет.....	26
2.1 Скорость пара и диаметр колонны.....	26
2.2 Расчет плотности и вязкости компонентов	27
2.3 Определение высоты насадки.....	29
2.4 Гидравлическое сопротивление насадки.....	38
2.5 Тепловой расчет	40
2.6 Расчет и подбор штуцеров	42
2.6.1 Штуцер для ввода исходной смеси	43
2.6.2. Штуцер для ввода флегмы	43
2.6.3 Штуцер для отвода кубового остатка	43
2.6.4 Штуцер для вывода паров дистиллята	43
2.6.5 Штуцер для ввода паров кубовой смеси	44
2.7 Расчет тепловой изоляции.....	44
3 Механический расчет.....	46
3.1 Определение толщины стенки цилиндрической обечайки, днища и крышки	46
3.1.1 Выбор материала ректификационной колонны.....	46
3.1.2 Определение расчетных параметров	47
3.2 Расчет толщины стенок цилиндрической части аппарата.....	49
3.3 Расчет толщины днища и крышки	52
3.4 Расчет фланцевых соединений	53

3.5	Определение необходимости укрепления отверстий.....	67
3.6	Подбор опор.....	72
3.7	Поверочный расчет колонны	75
3.6.1	Определение расчетных усилий от ветровых нагрузок.....	75
3.6.2	Расчет аппарата на прочность	90
4	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	103
4.1	Потенциальные потребители результатов исследования	103
4.2	Анализ конкурентных технических решений.....	103
4.2.1	SWOT–анализ.....	106
4.3	Планирование научно-исследовательских работ	112
4.3.1	Структура работ в рамках научного исследования.....	112
4.3.2	Определение трудоемкости выполнения работ.....	113
4.3.3	Разработка графика проведения научного исследования.....	115
4.3.4	Расчет затрат.....	118
4.5	Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.....	126
5	Социальная ответственность	131
	Введение.....	131
5.1	Производственная безопасность	132
5.1.1	Выявление вредных факторов при разработке и эксплуатации научного исследования.....	132
5.1.2	Выявление опасных факторов при разработке и эксплуатации научного исследования.....	137
5.2	Экологическая безопасность.....	139
5.3	Безопасность в чрезвычайных ситуациях	140
5.4	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	142
5.4.1.	Специальные правовые нормы трудового законодательства.	142
5.4.2.	Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны	144
	Список использованной литературы.....	147

Введение

Ректификация — массообменный процесс, который осуществляется в большинстве случаев в противоточных колонных аппаратах с контактными элементами (насадки, тарелки). Так же в связке с ректификационной колонной в установке имеются два теплообменных аппарата: кипятильник, который предназначен для генерации парового потока, и конденсатор, в котором пар из верхней части колонны конденсируется. Часть конденсата отправляется обратно в колонну потоком флегмы.

Как нам известно из [1], при ректификации исходная смесь делится на две части: дистиллят — смесь, обогащенную низкокипящим компонентом (НКК), и кубовый остаток — смесь, обогащенную высококипящим компонентом (ВКК).

Простейшая технологическая схема процесса ректификации представлена на рисунке 1. Исходная смесь поступает из промежуточной емкости 1 центробежным насосом 2 в теплообменник 3, где подогревается до температуры кипения. Нагретая смесь поступает на разделение в ректификационную колонну 5 на тарелку питания, где состав жидкости равен составу исходной смеси \overline{X}_F . Стекая вниз по колонне, жидкость взаимодействует с поднимающимся вверх паром, образующимся при кипении кубовой жидкости в кипятильнике 4. Начальный состав пара примерно равен составу кубового остатка \overline{X}_W , т. е. обеднен легколетучим компонентом. В результате массообмена с жидкостью пар обогащается низкокипящим компонентом. Для более полного обогащения верхнюю часть колонны орошают в соответствии с заданным флегмовым числом жидкостью (флегмой) состава \overline{X}_P , получаемой в дефлегматоре 6 путем конденсации пара, выходящего из колонны. Часть конденсата выводится из дефлегматора в виде готового продукта разделения — дистиллята, который охлаждается в теплообменнике 7 и направляется в промежуточную емкость 8.

Из кубовой части колонны насосом 9 непрерывно выводится кубовая

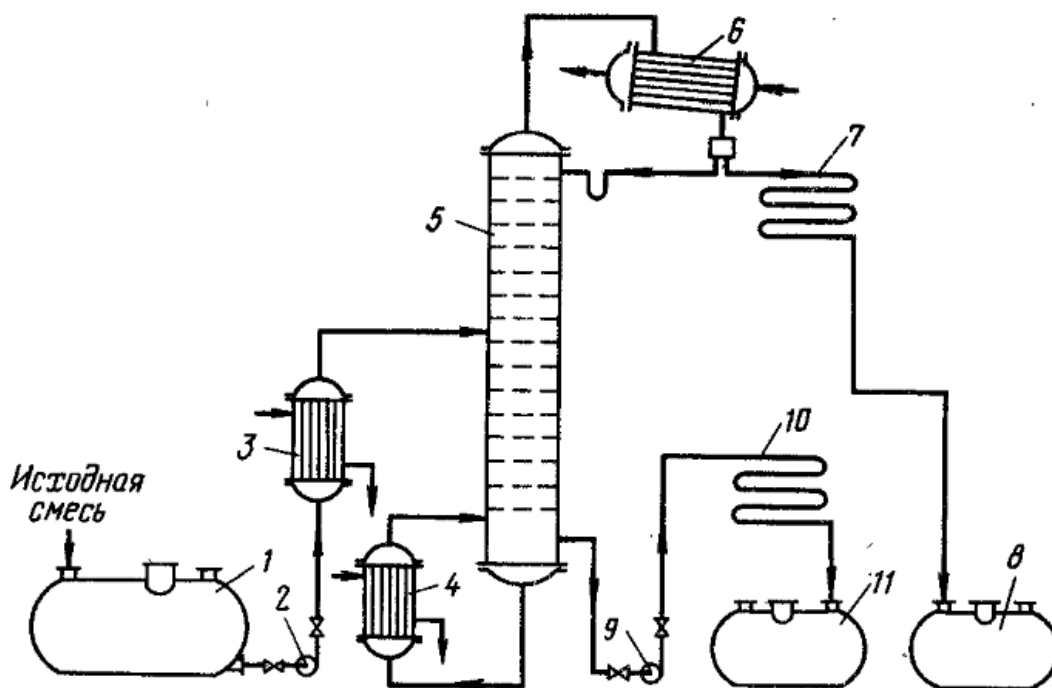


Рис. 1 — Принципиальная схема ректификационной установки:

1 – ёмкость для исходной смеси; 2, 9 – насосы; 3 – теплообменник-подогреватель; 4 – кипятильник; 5 – ректификационная колонна; 6 – дефлегматор; 7 – холодильник дистиллята; 8 – ёмкость для сбора дистиллята; 10 – холодильник кубовой жидкости; 11 – ёмкость для кубовой жидкости.

жидкость – продукт, обогащенный высококипящим компонентом, который охлаждается в теплообменнике 10 и направляется в емкость 11.

Таким образом, в ректификационной колонне осуществляется непрерывный неравновесный процесс разделения исходной бинарной смеси на дистиллят (с высоким содержанием легколетучего компонента) и кубовый остаток (обогащенный труднолетучим компонентом).

В расчет ректификационной колонны входит определение её основных геометрических размеров – диаметра и высоты, которые определяются гидродинамическим режимом работы колонны, который зависит от скорости, физических свойств фаз и типа насадки.

Литературный обзор

Определенно можно сказать, что ректификация занимает высокое место в химической технологии. Практически каждый нефтеперерабатывающий завод оснащен хотя бы одной такой установкой, без массообменных аппаратов в нефтегазовой промышленности никак не обойтись.

В данной работе рассмотрена ректификационная колонна, предназначенная для разделения смеси бензол-толуол. Данная смесь является примесью при производстве высокооктановых бензинов. После разделения очищенные продукты находят промышленное применение, например, бензол применяется в производстве пластмасс, лекарств, красителей, для синтеза других продуктов. Ранее для повышения октанового числа бензол вводили в топливо, но затем его перестали использовать из-за возросшей конкуренцией на рынке высокооктановых бензинов. Толуол нашел применение в основном как растворитель, но также и в военной промышленности в производстве взрывчатых веществ.

Существует множество конструкций массообменных колонных аппаратов, но опираясь на результаты анализа [2], можно сказать, что насадочные ректификационные колонны имеют большой потенциал в химической промышленности, так как наиболее полно отвечают требованиям, которые предъявляются к ректификационным колоннам, позволяют создать наиболее энергосберегающую схему производства, имеет преимущество в процессах с образованием нежелательных побочных продуктов.

В настоящее время идут активные исследования контактных устройств насадочных ректификационных колонн. Используются соединения элементов насадки в пакеты за счет жесткого бандажа и сварки, но это приводит к определенным трудностям при монтаже пакетов. Разработаны также насадки, выполняемые в виде пакетов с высотой 120-150 мм. Конструкция в виде упругого эллипса позволяет восстановить осевые деформации пакетов при монтаже. Диаметр устанавливаемых пакетов после монтажа равен диаметру колонны, что

обеспечивает наиболее плотное прилегание насадочных пакетов к корпусу аппарата и решает вопрос с проявлением пристеночного эффекта, который образуется при эксплуатации других типов насадочных контактных устройств. За счет плотной укладки насадочных пакетов достигается увеличение эффективности действия колонны на 10-15 %, равномерное распределение жидкости по колонне.

Также сейчас идет речь о так называемой реактивной ректификации, которая имеет преимущества в виде [3] улучшенной селективности, конверсии, более эффективного использования теплового эффекта химической реакции, появления возможности разделения компонентов, температуры кипения которых очень близки.

Обычно такие процессы проводят совместно, то есть отделение компонентов друг от друга и химическое превращение проходят одновременно в одном аппарате. Оптимизация сложного химико-технологического процесса таким образом в настоящее время является трендом, ведь это позволяет сократить технологическую схему, оптимизировать сложные химические превращения. Интересным фактом является то, что эффективность в таких комбинированных процессах превышает эффективность обычного проведения процессов отдельно.

В настоящее время ведутся исследования по улучшению качества продуктов, получаемых в процессе ректификации, возможность уменьшения размеров аппарата при неизменной производительности и качестве продукции, более металлоемкое ведение процесса, чтобы ректификация была дешевым и очень производительным процессом.

1 Технологический расчет

Ниже представлен расчет материального баланса насадочной ректификационной колонны непрерывного действия и определение рабочего флегмового числа.

1.1 Материальный баланс ректификационной колонны

Расчет материального баланса ведем по [4, с. 227]. Определение материального баланса процесса ректификации заключается в решении двух уравнений и необходим для определения расходов исходной смеси и кубового остатка.

Общее уравнение материального баланса:

$$G_F = G_P + G_W; \quad (1.1)$$

где G_F — массовый расход исходной смеси [кг/с];

G_P — массовый расход дистиллята [кг/с];

G_W — массовый расход кубового остатка [кг/с].

Произведем пересчет производительности из т/сутки в кг/с:

$$G_P = \frac{G_P * 1000}{86400} = \frac{200 * 1000}{86400} = 2,315 \left[\frac{\text{кг}}{\text{с}} \right]$$

Уравнение материального баланса по низкокипящему компоненту:

$$G_F * \bar{X}_F = G_P * \bar{X}_P + G_W * \bar{X}_W; \quad (1.2)$$

где \bar{X}_F — массовая доля низкокипящего компонента в исходной смеси [% масс.];

\bar{X}_P — массовая доля низкокипящего компонента в дистилляте [% масс.];

\bar{X}_W — массовая доля низкокипящего компонента в кубовом остатке [% масс.].

Выражая из уравнения (1.1) массовый расход исходной смеси и подставляя его в уравнение (1.2) можно определить массовый расход кубового

остатка. Подставляя полученное значение расхода в уравнение (1.1) определим недостающее значение расхода.

Таким образом:

$$(G_P + G_W) * \bar{X}_F = G_P * \bar{X}_P + G_W * \bar{X}_W;$$

$$G_W = \frac{G_P * (\bar{X}_P - \bar{X}_F)}{\bar{X}_F - \bar{X}_W} = \frac{2,315 * (0,9 - 0,55)}{0,55 - 0,05} = 1,62 \left[\frac{\text{кг}}{\text{с}} \right];$$

$$G_F = G_P + G_W = 2,315 + 1,62 = 3,935 \left[\frac{\text{кг}}{\text{с}} \right];$$

1.2 Пересчет состава фаз из массовых долей в мольные

Проведём пересчет состав фаз из массовых долей в мольные по уравнению:

$$X = \frac{\frac{\bar{X}}{M_{\text{нкк}}}}{\frac{\bar{X}}{M_{\text{нкк}}} + \frac{1 - \bar{X}}{M_{\text{вкк}}}} \quad (1.3)$$

где $M_{\text{нкк}}$ — молярная масса низкокипящего компонента [г/моль];

$M_{\text{вкк}}$ — молярная масса высококипящего компонента [г/моль];

X — мольная доля низкокипящего компонента в исходной смеси, кубовом остатке или дистилляте;

\bar{X} — массовая доля низкокипящего компонента в исходной смеси, кубовом остатке или дистилляте.

В данной бакалаврской работе низкокипящим компонентом является бензол с молярной массой $M_B = 78 \frac{\text{г}}{\text{моль}}$, высококипящий компонент — толуол с молярной массой $M_T = 92 \frac{\text{г}}{\text{моль}}$.

Произведем перевод массовых долей в мольные:

$$X_F = \frac{\frac{\bar{X}_F}{M_B}}{\frac{\bar{X}_F}{M_B} + \frac{1 - \bar{X}_F}{M_T}} = \frac{\frac{0,55}{78}}{\frac{0,55}{78} + \frac{1 - 0,55}{92}} = 0,583 \frac{\text{кмоль}}{\text{кмоль смеси}};$$

$$X_P = \frac{\frac{\overline{X_P}}{M_B}}{\frac{\overline{X_P}}{M_B} + \frac{1 - \overline{X_P}}{M_T}} = \frac{\frac{0,9}{78}}{\frac{0,9}{78} + \frac{1 - 0,9}{92}} = 0,923 \frac{\text{кмоль}}{\text{кмоль смеси}};$$

$$X_W = \frac{\frac{\overline{X_W}}{M_B}}{\frac{\overline{X_W}}{M_B} + \frac{1 - \overline{X_W}}{M_T}} = \frac{\frac{0,05}{78}}{\frac{0,05}{78} + \frac{1 - 0,05}{92}} = 0,055 \frac{\text{кмоль}}{\text{кмоль смеси}};$$

В результате пересчета получены следующие значения (в $\frac{\text{кмоль}}{\text{кмоль смеси}}$) $X_F = 0,583$, $X_P = 0,923$, $X_W = 0,055$.

1.3 Построение фазовых диаграмм

Для построения t-x, y диаграммы имеющейся бинарной смеси и ее линии равновесия необходимо установить равновесные составы фаз разделяемой смеси бензол-толуол. Данные Таблицы 1 взяты из [5, с. 327]

Таблица 1 — Равновесные составы фаз смеси бензол – толуол

t, °C	x	y*
80	1	1
84	0,823	0,922
88	0,659	0,830
92	0,508	0,720
96	0,376	0,596
100	0,256	0,453
104	0,155	0,304
108	0,058	0,128
110	0	0

На основании справочных данных строим график зависимости температуры от составов жидкой и паровой фаз (t-x, y диаграмма), представленного на рисунке 2, график зависимости содержания низкокипящего

компонента (бензол) в паре от его содержания в жидкости (линия равновесия), представленного на рис. 3.

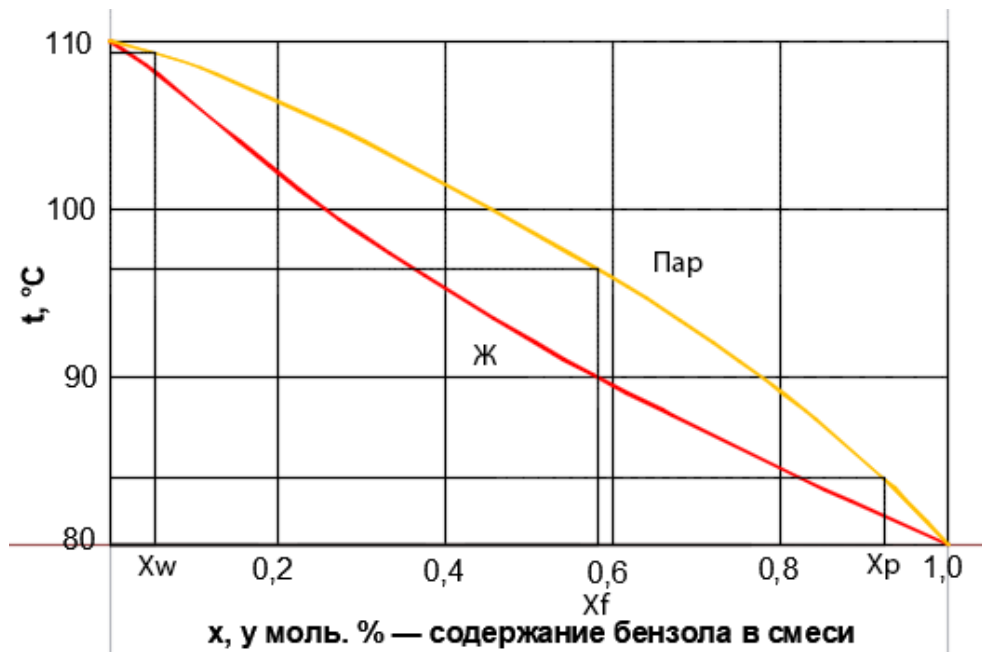


Рис. 2 — t - x , y диаграмма для бинарной смеси бензол – толуол

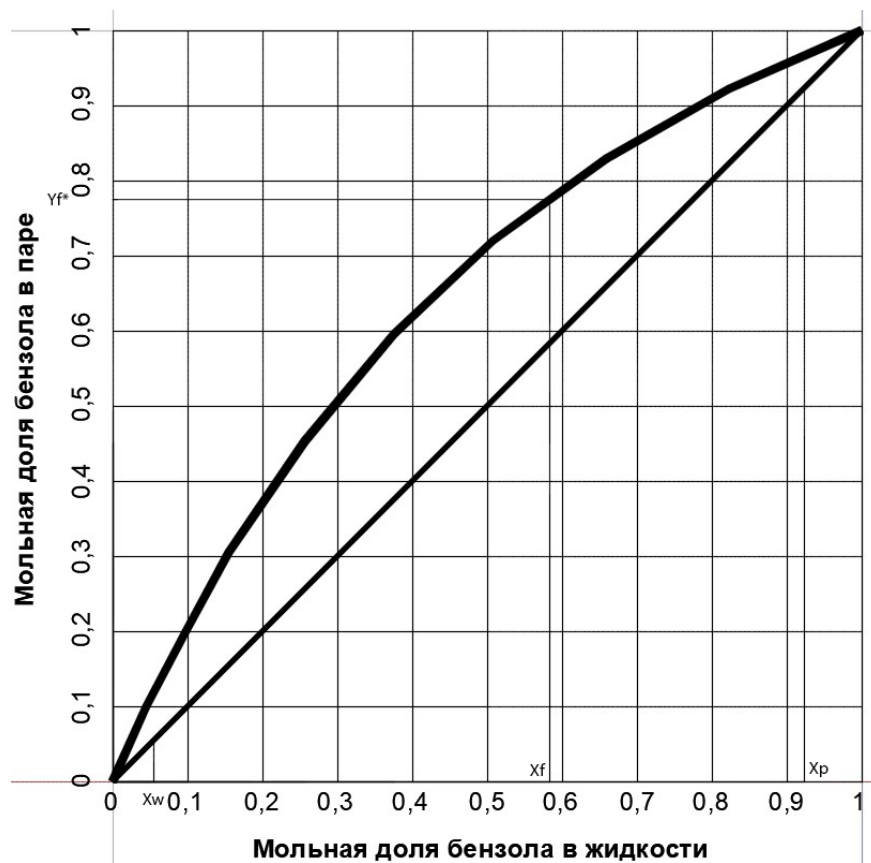


Рис. 3 — y - x диаграмма для бинарной смеси бензол – толуол

1.4 Определение рабочего флегмового числа

Определим минимальное флегмовое число:

$$R_{min} = \frac{X_P - Y_F^*}{Y_F^* - X_F}, \quad (1.4)$$

где X_P, X_F, Y_F^* – мольные доли бензола в дистилляте, исходной смеси и в паре исходной смеси соответственно (определяются по рис. 3)

$$R_{min} = \frac{0,923 - 0,765}{0,765 - 0,583} = 0,868;$$

Задаемся рядом значений коэффициента избытка флегмы β (от 1 до 2) и рассчитываем соответствующие рабочие флегмовые числа R по формуле:

$$R = \beta * R_{min}; \quad (1.5)$$

Для каждого значения R на y - x диаграмме строим рабочие линии укрепляющей и исчерпывающей частей колонны по уравнениям:

для укрепляющей части:

$$y = \frac{R}{R + 1} * 1 + \frac{X_p}{R + 1} \quad (1.6)$$

для исчерпывающей части:

$$y = \frac{R + F}{R + 1} * 1 - \frac{F - 1}{R + 1} * X_w \quad (1.7)$$

Для каждого случая определяем число теоретических ступеней изменения концентрации N_T .

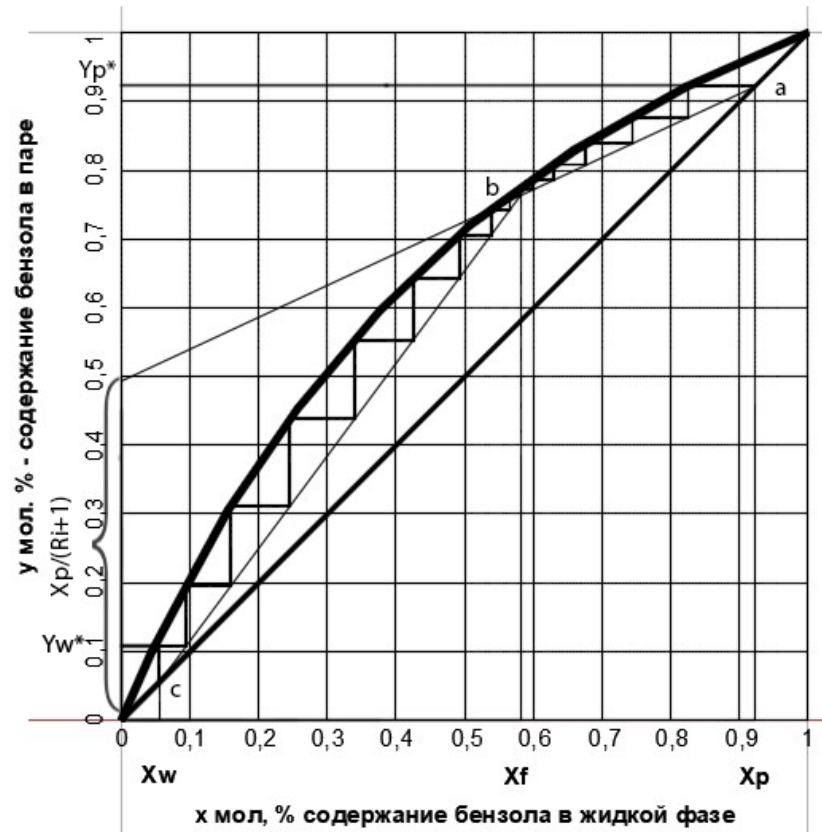


Рис. 4 (а) — Определение числа теоретических ступеней при $R_1 = 0,868$

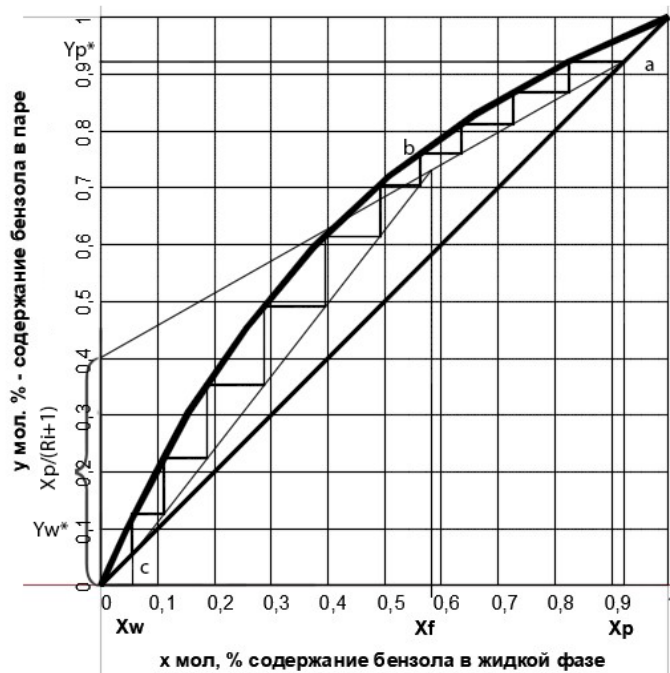


Рис. 4 (б) — Определение числа теоретических ступеней при $R_1 = 1,0416$

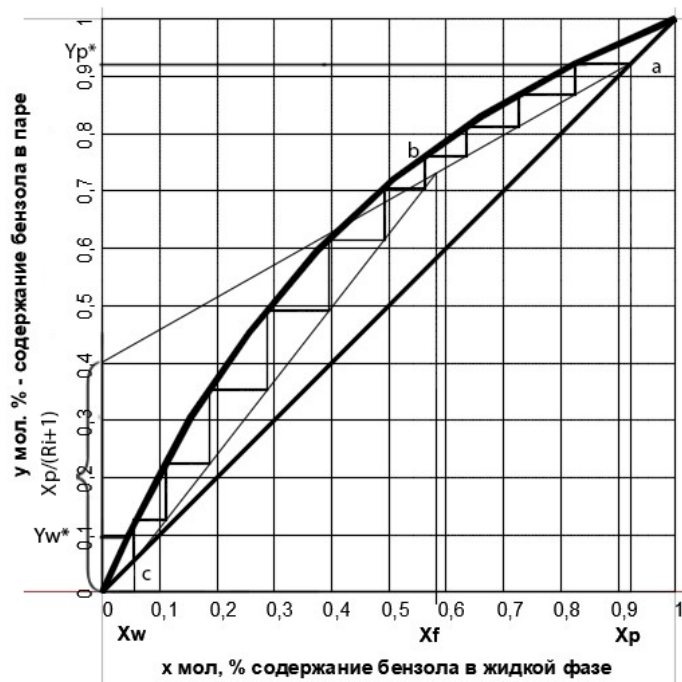


Рис. 4 (в) — Определение числа теоретических ступеней при $R_1 = 1,302$

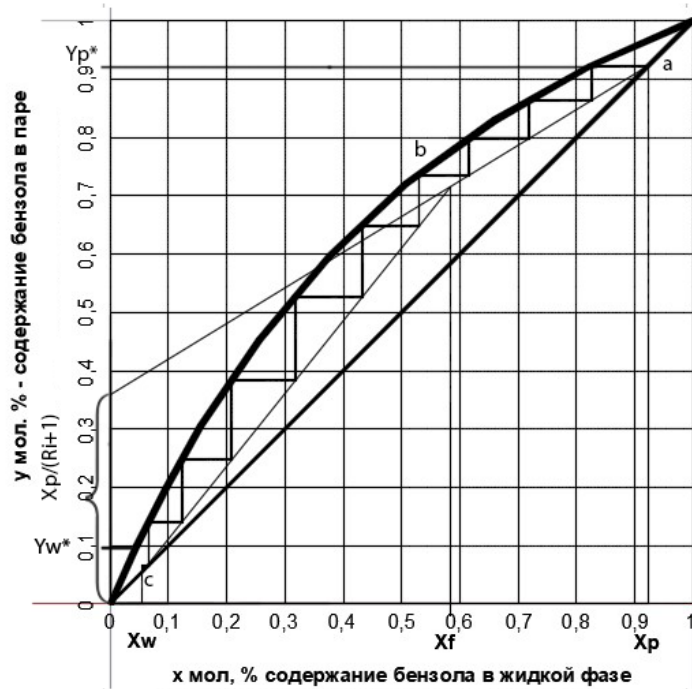


Рис. 4 (г) — Определение числа теоретических ступеней при $R_1 = 1,562$

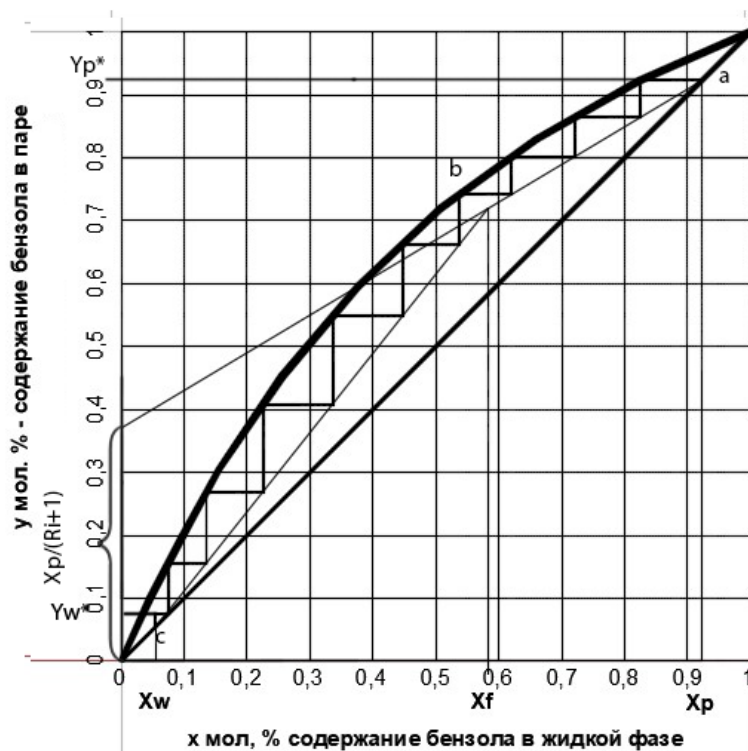


Рис. 4 (д) — Определение числа теоретических ступеней при $R_1 = 1,736$

Все результаты расчетов занесены в таблицу 2.

Таблица 2 — Определение оптимального рабочего флегмового числа

β_i	1	1,2	1,5	1,8	2
R_i	0,868	1,0416	1,302	1,562	1,736
N	14	12	9,5	9,1	9,1
$N_i(R_i + 1)$	27,086	24,499	21,869	23,318	24,898

На данном этапе необходимо построить график зависимости $N(R+1) = f(R)$, по которому будет определено оптимальное рабочее флегмовое число, соответствующее минимуму данного графика.

График представлен на рис. 5. Минимуму на графике соответствует $R_{\text{раб}} = 1,326$. Коэффициент избытка флегмы в этом случае:

$$\beta = \frac{R_{\text{раб}}}{R_{\text{min}}} = \frac{1,326}{0,868} = 1,528;$$

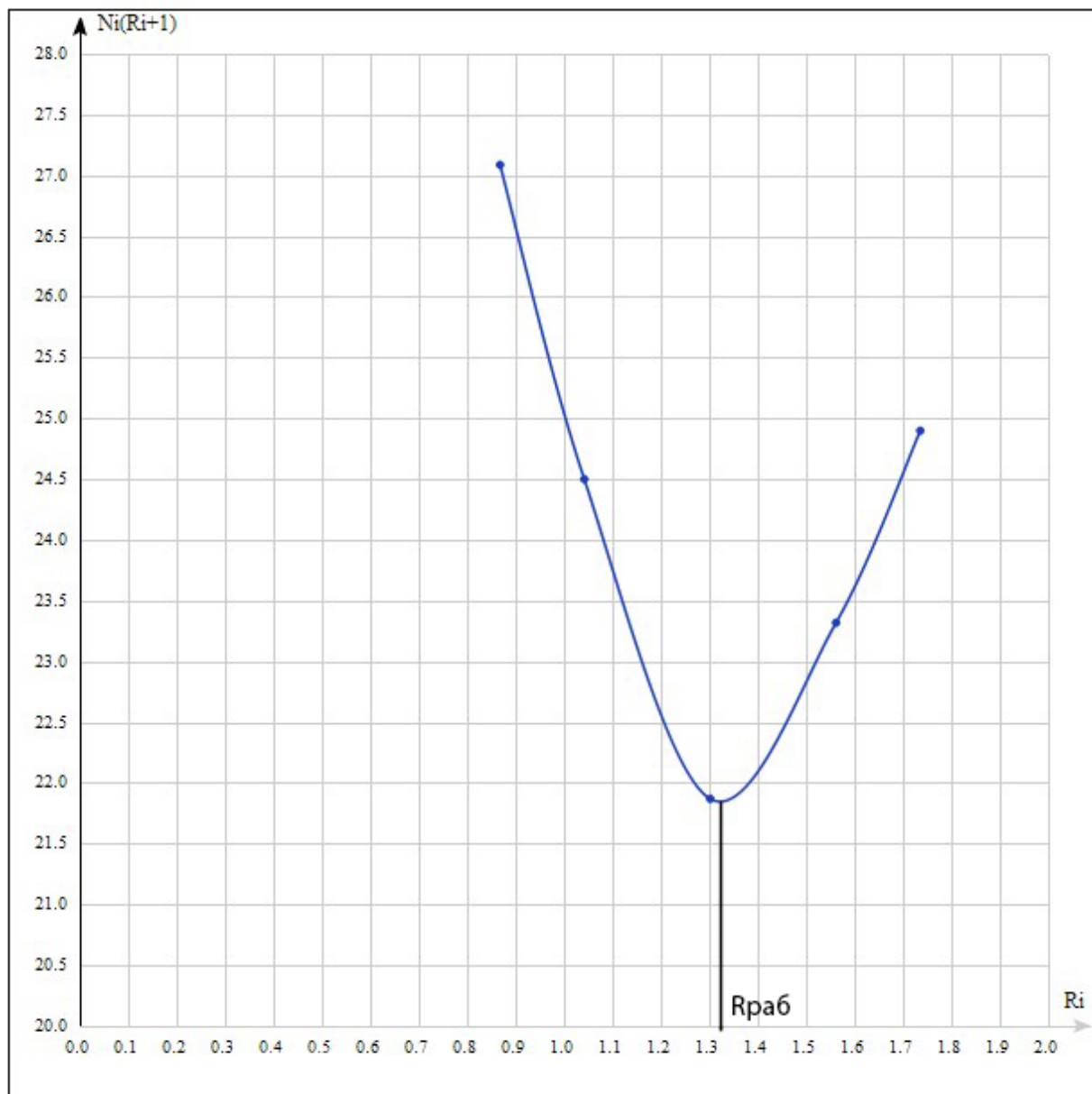


Рис. 5 — Определение рабочего флегмового числа

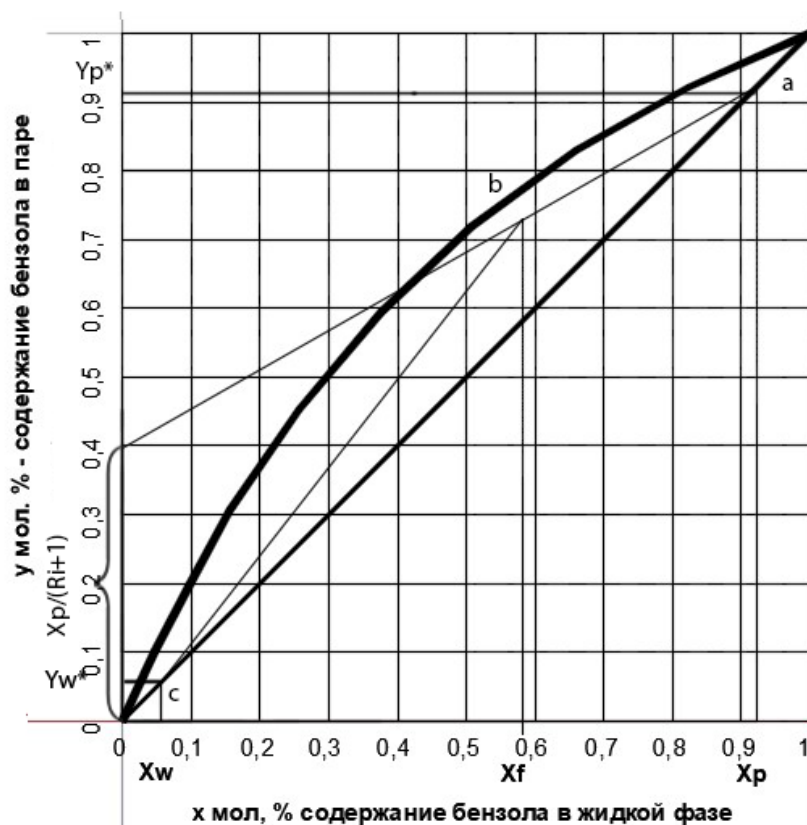


Рис. 6 — Изображение рабочих линий в диаграмме $y-x$ диаграмме при действительном флегмовом числе $R = 1,326$

В результате проведенной графической работы определено действительное флегмовое число. Следующим этапом необходимо рассчитать массовые расходы жидкости в нижней и верхней частях колонны.

1.5 Массовые расходы жидкости в верхней и нижней частях колонны

Средние массовые расходы по жидкости для верхней и нижней частей колонны определяются из соотношений [4, с. 229]:

$$L_B = \frac{PRM_B}{M_P}; \quad (1.8)$$

$$L_B = \frac{PRM_H}{M_P} + \frac{FM_H}{M_F} \quad (1.9)$$

где M_P и M_F – мольные массы дистиллята и исходной смеси;

M_B и M_H – средние молярные массы жидкости в верхней и нижней частях колонны.

Средние молярные массы жидкости в верхней и нижней частях колонны:

$$\begin{aligned}M_B &= M_B x_{\text{ср.в}} + M_T (1 - x_{\text{ср.в}}); \\M_H &= M_B x_{\text{ср.н}} + M_T (1 - x_{\text{ср.н}}); \end{aligned} \quad (1.10)$$

где M_B и M_T – молярные массы бензола и толуола соответственно равные 78 кг/кмоль и 92 кг/кмоль;

$x_{\text{ср.в}}$ и $x_{\text{ср.н}}$ – средний молярный состав жидкости в верхней и нижней частях колонны:

$$\begin{aligned}x_{\text{ср.в}} &= \frac{x_P + x_F}{2} = \frac{0.923 + 0.583}{2} = 0.753 \left[\frac{\text{кмоль}}{\text{кмоль смеси}} \right]; \\x_{\text{ср.н}} &= \frac{x_F + x_W}{2} = \frac{0.583 + 0.055}{2} = 0.319 \left[\frac{\text{кмоль}}{\text{кмоль смеси}} \right]; \end{aligned}$$

Тогда:

$$\begin{aligned}M_B &= M_B x_{\text{ср.в}} + M_T (1 - x_{\text{ср.в}}) = 78 * 0,753 + 92 * (1 - 0,753) = \\ &= 81,458 \left[\frac{\text{кг}}{\text{кмоль}} \right]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}M_H &= M_B x_{\text{ср.н}} + M_T (1 - x_{\text{ср.н}}) = 78 * 0,319 + 92 * (1 - 0,319) = \\ &= 87,534 \left[\frac{\text{кг}}{\text{кмоль}} \right]; \end{aligned}$$

Молярная масса исходной смеси:

$$\begin{aligned}M_F &= M_B * x_{\text{ср.в}} + M_T (1 - X_F) = 78 * 0,753 + 92 * (1 - 0,583) = \\ &= 97,098 \left[\frac{\text{кг}}{\text{кмоль}} \right]; \end{aligned}$$

Молярную массу дистиллята в данном случае следует принять равной молярной массе легколетучего компонента – бензола.

Подставим рассчитанные величины в уравнения

$$L_B = \frac{PRM_B}{M_P} = \frac{2,315 * 1,326 * 81,458}{78} = 3,206 \text{ [кг/с];}$$

$$L_B = \frac{PRM_H}{M_P} + \frac{FM_H}{M_F} = \frac{2,315 * 1,326 * 87,534}{78} + \frac{3,935 * 87,534}{97,098} = 6,992 \text{ [кг/с]}$$

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

$$\begin{aligned} G_B &= G_P(R + 1) \frac{M'_B}{M_P}; \\ G_H &= G_P(R + 1) \frac{M'_H}{M_P}; \end{aligned} \quad (1.11)$$

где M'_B и M'_H — средние молярные массы паров в верхней и нижней частях колонны:

$$\begin{aligned} M'_B &= M_B * y_{\text{ср.в}} + M_T * (1 - y_{\text{ср.в}}); \\ M'_H &= M_B * y_{\text{ср.н}} + M_T * (1 - y_{\text{ср.н}}) \end{aligned} \quad (1.12)$$

где

$$\begin{aligned} y_{\text{ср.в}} &= \frac{y_P + y_F}{2} = \frac{0,923 + 0,765}{2} = 0,844 \left[\frac{\text{кмоль}}{\text{кмоль смеси}} \right]; \\ y_{\text{ср.н}} &= \frac{y_F + y_W}{2} = \frac{0,765 + 0,055}{2} = 0,41 \left[\frac{\text{кмоль}}{\text{кмоль смеси}} \right]; \end{aligned}$$

Тогда

$$\begin{aligned} M'_B &= M_B * y_{\text{ср.в}} + M_T * (1 - y_{\text{ср.в}}) = 78 * 0,844 + 92 * (1 - 0,844) = \\ &= 80,144 \left[\frac{\text{кг}}{\text{кмоль}} \right]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M'_H &= M_B * y_{\text{ср.н}} + M_T * (1 - y_{\text{ср.н}}) = 78 * 0,41 + 92 * (1 - 0,41) = \\ &= 86,26 \left[\frac{\text{кг}}{\text{кмоль}} \right]; \end{aligned}$$

Подставляя численные значения в уравнения (1.11), получаем:

$$\begin{aligned} G_B &= G_P(R + 1) \frac{M'_B}{M_P} = 2,315 * (1,326 + 1) * \frac{80,144}{78} = 5,535 \left[\frac{\text{кг}}{\text{с}} \right]; \\ G_H &= G_P(R + 1) \frac{M'_H}{M_P} = 2,315 * (1,326 + 1) * \frac{86,26}{78} = 5,955 \left[\frac{\text{кг}}{\text{с}} \right]; \end{aligned}$$

В результате расчетов определены массовые расходы жидкости, средние массовые потоки пара в верхней и нижней частях колонны.

2 Конструктивный расчет

2.1 Скорость пара и диаметр колонны

Определение рабочей скорости паров зависит от многих факторов и как правило реализуется с помощью технико-экономического расчета для определенного процесса. Рабочая скорость ректификационных колонн с плёночным режимом течения жидкости и работающих при атмосферном давлении, принимается 20-30% ниже скорости захлебывания.

Предельная фиктивная скорость пара при захлебывании насадочных колонн определяется выражением [4, с. 230]:

$$\frac{\omega_{\text{п}}^2 * a * \rho_y * \mu_x^{0.16}}{g * \varepsilon^3 * \rho_x} = 1,2 * \exp \left[-4 * \left(\frac{L}{G} \right)^{0,25} * \left(\frac{\rho_y}{\rho_x} \right)^{0,125} \right] \quad (2.1)$$

где ρ_x, ρ_y — средние плотности жидкости и пара, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$;

$\mu_x^{0.16}$ — вязкость, $\text{мПа}\cdot\text{с}$; a — удельная поверхность, $\frac{\text{м}^2}{\text{м}^3}$;

g — ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$;

ε — свободный объем, $\frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}$;

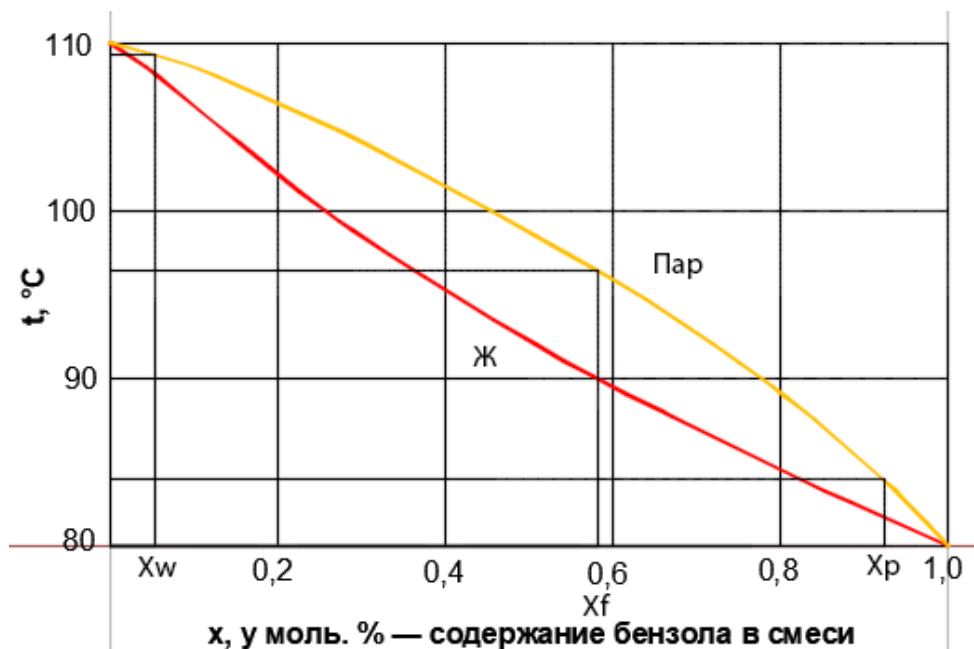
L — расход жидкой фазы; $\text{кг}/\text{с}$;

G — расход паровой фазы, $\text{кг}/\text{с}$.

Отношение расхода жидкой фазы к расходу паровой фазы различны, так же, как различны физические свойства фаз в различных частях колонны, соответственно, необходимо провести расчет скорости захлебывания для всех частей колонны в отдельности.

2.2 Расчет плотности и вязкости компонентов

В данном пункте необходимо определить средние температуры фаз и плотности жидкости и пара в различных частях колонны. Определение средних



температур следует проводить по t - x диаграмме (рис. 7) по средним составам фаз: $t_b = 84 \text{ }^\circ\text{C}$; $t_n = 109,25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Рис. 7 — t - x , y диаграмма для бинарной смеси бензол-толуол

Тогда, плотности пара $\rho_{yв}, \rho_{yн}$ в верхней и нижней частях колонны находим по уравнениям:

$$\rho_{yв} = \frac{M'_B}{22,4} * \frac{T_0}{T_0 + t_b} = \frac{80,184}{22,4} * \frac{273}{273 + 84} = 2,737 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3};$$

$$\rho_{yн} = \frac{M'_H}{22,4} * \frac{T_0}{T_0 + t_n} = \frac{86,26}{22,4} * \frac{273}{273 + 109,25} = 2,75 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3};$$
(2.2)

Из диаграммы (рис. 7) при концентрациях X_p и X_w , находим значения температур жидкой фазы в верху и в кубе колонны, которые равны: $t_p = 81 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_w = 108 \text{ }^\circ\text{C}$

Рассчитаем плотности жидкой фазы в верху колонны и в кубе:

$$\rho_{см} = \frac{\rho_1 \cdot \rho_2}{x \cdot \rho_1 + (1 - x) \cdot \rho_2}$$
(2.3)

где ρ_1, ρ_2 – плотности компонентов смеси, $\text{кг}/\text{м}^3$;

X – концентрация одного из компонентов смеси, мас. доли.

Плотности компонентов определены по [4, с. 175].

$$\rho_P = \frac{\rho_1 \cdot \rho_2}{x_{\text{ср.в}} \cdot \rho_1 + (1 - x_{\text{ср.в}}) \cdot \rho_2} = \frac{814 \cdot 807}{0,753 \cdot 814 + (1 - 0,753) \cdot 807} = 812,3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$\rho_W = \frac{\rho_1 \cdot \rho_2}{x_{\text{ср.в}} \cdot \rho_1 + (1 - x_{\text{ср.в}}) \cdot \rho_2} = \frac{783 \cdot 779}{0,319 \cdot 783 + (1 - 0,319) \cdot 779} = 781,7 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Вычислим среднюю плотность жидкости в колонне:

$$\rho_x = \frac{\rho_P + \rho_W}{2} = \frac{812,3 + 781,7}{2} = 796 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Вязкости жидкости в укрепляющей и исчерпывающей частях колонны находим по уравнениям:

$$\begin{aligned} \lg \mu_{x_{\text{в}}} &= x_{\text{ср}} * \lg \mu_{x_{\text{б в}}} + (1 - x_{\text{ср в}}) * \lg \mu_{x_{\text{т н}}} \\ \lg \mu_{x_{\text{н}}} &= x_{\text{ср}} * \lg \mu_{x_{\text{б н}}} + (1 - x_{\text{ср н}}) * \lg \mu_{x_{\text{т н}}} \end{aligned} \quad (2.4)$$

где $\mu_{x_{\text{б}}}$, $\mu_{x_{\text{т}}}$ — вязкости жидких бензола и толуола

Тогда

$$\begin{aligned} \lg \mu_{x_{\text{в}}} &= x_{\text{ср}} * \lg \mu_{x_{\text{б в}}} + (1 - x_{\text{ср в}}) * \lg \mu_{x_{\text{т}}} = 0,753 * \lg 0,2416 + \\ &+ (1 - 0,753) * 0,3094 \\ \lg \mu_{x_{\text{н}}} &= x_{\text{ср}} * \lg \mu_{x_{\text{б н}}} + (1 - x_{\text{ср н}}) * \lg \mu_{x_{\text{т н}}} = \\ &= 0,319 * \lg 0,3050 + (1 - 0,319) * \lg 0,2525 \end{aligned}$$

Исходя из этого:

$$\mu_{x_{\text{в}}} = 0,256 \text{ мПа} \cdot \text{с}$$

$$\mu_{x_{\text{н}}} = 0,268 \text{ мПа} \cdot \text{с}$$

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

$$\frac{\omega_{\text{п}}^2 * 87,5 * 2,737 * 0,256^{0,16}}{9,8 * 0,785^3 * 796} = 1,2 * \exp \left[-4 * \left(\frac{3,206}{5,535} \right)^{0,25} * \left(\frac{2,737}{796} \right)^{0,125} \right]$$

Откуда $\omega_{\text{пв}} = 3,497 \text{ м/с}$

$$\frac{\omega_{\text{п}}^2 * 87,5 * 2,75 * 0,268^{0,16}}{9,8 * 0,785^3 * 796} = 1,2 * \exp \left[-4 * \left(\frac{6,992}{5,955} \right)^{0,25} * \left(\frac{2,75}{796} \right)^{0,125} \right]$$

Откуда $\omega_{\text{пн}} = 2,94 \text{ м/с}$

Примем рабочую скорость на 30% ниже предельной:

$$\omega_{\text{пв}} = 3,497 \cdot 0,7 = 2,448 \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

$$\omega_{\text{пн}} = 2,94 \cdot 0,7 = 2,058 \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

Исходя из уравнения расхода, диаметр ректификационной колонны:

$$d = \sqrt{\frac{4 * G}{\pi * \omega * \rho}} \quad (2.5)$$

Следовательно, можно определить диаметры укрепляющей и исчерпывающей частей колонны:

$$d_{\text{в}} = \sqrt{\frac{4 * G}{\pi * \omega * \rho}} = \sqrt{\frac{4 * 5,535}{3,14 * 2,448 * 2,737}} = 1,026 \text{ м};$$

$$d_{\text{н}} = \sqrt{\frac{4 * G}{\pi * \omega * \rho}} = \sqrt{\frac{4 * 5,955}{3,14 * 2,058 * 2,75}} = 1,157 \text{ м};$$

Рационально принять диаметр колонны из нормального ряда диаметров, принятых в химической промышленности равным $d = 1,2 \text{ м}$ [4, с. 197]. Из-за близости полученных значений диаметров верхней и нижней частей колонны, следует принять диаметр колонны одинаковым для обеих частей колонны.

Действительные рабочие скорости паров определяются уравнениями:

$$\omega_{\text{в}} = \frac{\omega_{\text{пв}} * d_{\text{в}}^2}{d} = \frac{2,448 * 1,026^2}{1,2} = 1,788 \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

$$\omega_{\text{н}} = \frac{\omega_{\text{пн}} * d_{\text{н}}^2}{d} = \frac{2,94 * 1,157^2}{1,2} = 1,914 \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

Действительные рабочие скорости паров составляют от предельных скоростей 51% и 65% соответственно.

2.3 Определение высоты насадки

Высота насадки определяется с помощью модифицированного уравнения массопередачи:

$$H = n_{\text{оу}} h_{\text{оу}} \quad (2.6)$$

где $n_{\text{оу}}$ - общее число единиц переноса по паровой фазе;

h_{oy} - общая высота единицы переноса, м;

Для определения общего числа единиц переноса, следует воспользоваться уравнением:

$$n_{oy} = \int_{y_w}^{y_p} \frac{dy}{y^* - y} \quad (2.7)$$

Решение этого интеграла необходимо провести методом графического интегрирования:

$$\int_{y_w}^{y_p} \frac{dy}{y^* - y} = SM_x M_y \quad (2.8)$$

где S - площадь, ограниченная кривой, ординатами y_w и y_p и осью абсцисс (рис . 3.1);

M_x , M_y - масштабы осей координат.

Таблица 3 включает в себя данные, необходимые для графического изображения функции $1/(y^* - y) = f(y)$.

Таблица 3 — Данные для графического изображения функции $1/(y^* - y) = f(y)$

x	y	y*	y* - y	$\frac{1}{y^* - y}$	m
0,055	0,055	0,121	0,066	15,15	1,84
0,155	0,182	0,305	0,123	8,13	1,43
0,256	0,312	0,450	0,138	7,24	1,22
0,350	0,432	0,565	0,133	7,52	1
0,450	0,594	0,665	0,071	14,08	0,85
0,550	0,687	0,750	0,063	15,87	0,72
0,583	0,730	0,774	0,044	22,72	0,73
0,650	0,767	0,823	0,056	17,86	0,58
0,750	0,824	0,881	0,057	17,54	0,53
0,850	0,881	0,934	0,053	18,87	0,44
0,900	0,910	0,956	0,046	21,74	0,43
0,923	0,923	0,966	0,043	23,25	1,84

m – средний коэффициент распределения в условиях равновесия.

$$m_{\text{в}} = 1,115$$

$$m_{\text{н}} = 0,496$$

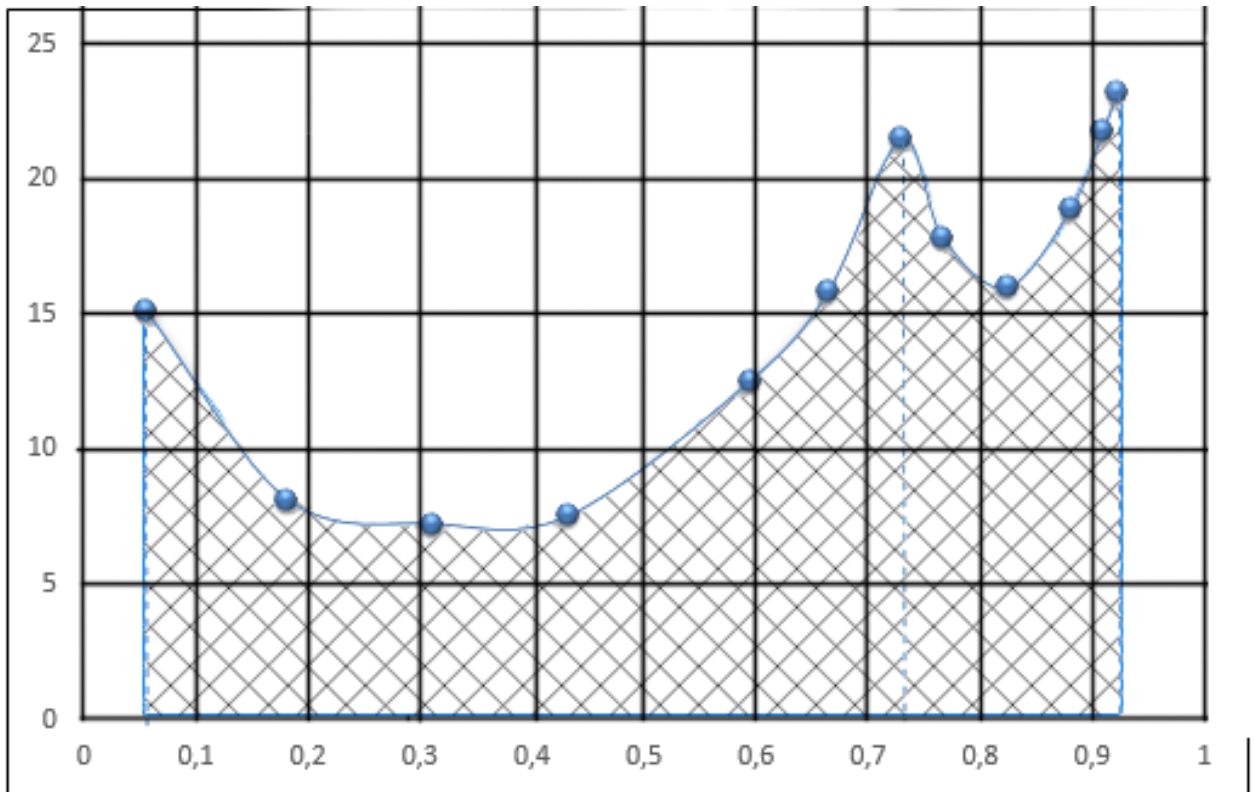


Рис. 8 — Графическое определение общего числа единиц переноса в паровой фазе для укрепляющей части колонны в интервале изменения состава пара от y_F до y_p и для исчерпывающей – в интервале от y_w до y_F

По правилу трапеций найдем площадь $S = 10,77$

Число единиц переноса в укрепляющей и исчерпывающей частях колонны следует определять по рис. 8:

$$n_{\text{оув}} = \int_{y_w}^{y_p} \frac{dy}{y^* - y} = 8,37$$

$$n_{\text{оун}} = \int_{y_w}^{y_p} \frac{dy}{y^* - y} = 3,86$$

Общая высоту единиц переноса $h_{\text{оу}}$ определяется уравнением аддитивности [4, с. 233]:

$$h_{\text{оу}} = h_y + \frac{mGh_x}{L} \quad (2.9)$$

где h_x и h_y – частные высоты единиц переноса соответственно в жидкой и паровой фазах;

m – средний коэффициент распределения в условиях равновесия для соответствующей части колонны.

Отношение расхода жидкой фазы к расходу паровой фазы $\frac{G}{L}$, кмоль/кмоль, равно:

для укрепляющей части колонны:

$$\frac{G}{L} = \frac{R + 1}{R} = \frac{1.326 + 1}{1.326} = 1,754;$$

Для исчерпывающей части колонны:

$$\frac{G}{L} = \frac{R + 1}{R + f} = \frac{1.326 + 1}{1.326 + 1.365} = 0.864;$$

где

$$f = \frac{FM_p}{PM_F} = \frac{3.935 * 78}{2,315 * 97.098} = 1,365;$$

Высота единицы переноса в жидкой фазе [1, с. 233]:

$$h_x = 0,258 * \Phi * c * Pr_x^{0.5} * Z^{0.15} \quad (2.10)$$

где c и Φ – коэффициенты, рассчитываемые по уравнениям, приведенным ниже;

Pr_x – критерий Прандтля для жидкости;

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

Определим высоту единицы переноса в паровой фазе [4, с. 233]:

$$h_y = \frac{0,0175 * \psi * Pr_y^{0.5} * d^{1,24} * Z^{0,33}}{(L_S * f_1 * f_2 * f_3)^{0,6}} \quad (2.11)$$

где ψ, f_1, f_2, f_3 – коэффициенты, рассчитываемые по уравнениям, приведенным ниже;

Pr_y – критерий Прандтля для пара;

L_S – массовая плотность орошения, кг/ (м² с);

d – диаметр колонны, м.

Так как максимально допустимое по колонне отношение скорости пара к скорости захлебывания в верхней $f_B = 0,51$ и нижней $f_H = 0,65$ части колонны больше 0,45, то для расчета коэффициента c можно воспользоваться формулой:

$$\begin{aligned} c_B &= 0,814 + 1,342 * f_B - 2,066 * f_B^2 = \\ &= 0,814 + 1,342 * 0,51 - 2,066 * 0,51^2 = 0,961 \\ c_H &= 0,814 + 1,342 * f_H - 2,066 * f_H^2 = 0,814 + 1,342 * 0,65 - 2,066 * 0,65^2 \\ &= 0,813 \end{aligned} \quad (2.12)$$

Необходимо выбрать насадку для определения коэффициентов ψ и Φ , в нашем случае это насадка 50 мм, соответственно формулы для нахождения вышеперечисленных коэффициентов:

$$\begin{aligned} \Phi_B &= 0,056 + 4,73 * 10^{-3} * L_B - 3,97 * 10^{-5} * L_B^2 = \\ &= 0,056 + 4,73 * 10^{-3} * 3,206 - 3,97 * 10^{-5} * 3,206^2 = 0,071 \end{aligned} \quad (2.13)$$

$$\begin{aligned} \Phi_H &= 0,056 + 4,73 * 10^{-3} * L_B - 3,97 * 10^{-5} * L_H^2 = \\ &= 0,056 + 4,73 * 10^{-3} * 6,992 - 3,97 * 10^{-5} * 6,992^2 = 0,087 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \psi_B &= 74,85 + 698 * f_B - 870 * f_B^2 = \\ &= 74,85 + 698 * 0,51 - 870 * 0,51^2 = 204,54 \end{aligned} \quad (2.14)$$

$$\psi_H = 74,85 + 698 * f_B - 870 * f_B^2 = 74,85 + 698 * 0,65 - 870 * 0,65^2 = 160,98$$

Расчет коэффициентов проведен по методике программы «РАБИРЕК-48» [6].

Перед расчетом h_x и h_y следует определить коэффициенты диффузии в жидкой и паровой фазах, а так же вязкости паров:

Вязкость паров для укрепляющей части колонны

$$\mu_{yB} = \frac{M'_B}{\frac{y_B * M_B}{\mu_{yB}} + \frac{(1 - y_B) * M_T}{\mu_{yT}}} \quad (2.15)$$

где μ_{yB} и μ_{yT} – вязкость паров бензола и толуола при средней температуре в укрепляющей части колонны, мПа с;

y_B – средняя концентрация паров.

$$y_B = \frac{y_P + y_F}{2} = \frac{0,73 + 0,923}{2} = 0,827.$$

$$\mu_{yB} = \frac{M'_B}{\frac{y_B * M_6}{\mu_{y6}} + \frac{(1 - y_B) * M_T}{\mu_{yT}}} = \frac{80.184}{\frac{0.8265 * 78}{0.0091} + \frac{(1 - 0.8265) * 92}{0.00849}}$$

$$= 0,0089 \text{ мПа} * \text{с}.$$

Аналогичным расчетом для нижней части колонны: $\mu_{yH} = 0,0095 \text{ мПа} \cdot$

с.

Вязкости верхней и нижней частей колонны близки, поэтому можно взять среднее значение.

$$\mu_y = \frac{\mu_{yB} + \mu_{yH}}{2} = \frac{0,0089 + 0,0095}{2} = 0,0092 \text{ мПа} * \text{с};$$

При средней температуре определяем коэффициент диффузии в жидкости:

$$D_x = D_{x20} * [1 + b * (t - 20)]; \quad (2.16)$$

Коэффициент диффузии D_{x20} вычисляется по следующей формуле:

$$D_{x20} = \frac{10^{-6} * \sqrt{\frac{1}{M_6} + \frac{1}{M_T}}}{A * B * \sqrt{\mu_x} * (\vartheta_6^{\frac{1}{3}} + \vartheta_T^{\frac{1}{3}})}; \quad (2.17)$$

где А, В – коэффициенты, которые зависят от свойств растворенного вещества и растворителя;

ϑ_6, ϑ_T – мольные объемы компонентов в жидком состоянии при температуре кипения, см³/моль;

μ_x – вязкость жидкости при 20°С, мПа с.

Определим коэффициент диффузии в жидкости для укрепляющей части колонны при 20°С:

$$D_{xв20} = \frac{10^{-6} * \sqrt{\frac{1}{78} + \frac{1}{92}}}{1 * 1 * \sqrt{0,63} * (96^{\frac{1}{3}} + 118,2^{\frac{1}{3}})} = 2,155 * 10^{-9} \frac{\text{м}^2}{\text{с}};$$

Температурный коэффициент b следует определять по уравнению:

$$b = \frac{0,2 * \sqrt{\mu_x}}{\sqrt[3]{\rho_x}}; \quad (2.18)$$

Где значения μ_x и ρ_x принимаются при температуре 20°С;

Отсюда:

$$b = \frac{0,2 * \sqrt{0,63}}{\sqrt[3]{796}} = 0,017;$$

Следовательно

$$\begin{aligned} D_{xв} &= D_{xв20} * [1 + b * (t - 20)] = 2,2155 * 10^{-9} * [1 + 0,017 * (84 - 20)] \\ &= 4.517 * 10^{-9} \frac{м^2}{с}; \end{aligned}$$

Подобным образом определяем для исчерпывающей части колонны:

$$D_{xн20} = \frac{10^{-6} * \sqrt{\frac{1}{78} + \frac{1}{92}}}{1 * 1 * \sqrt{0,63} * (96^{\frac{1}{3}} + 118,2^{\frac{1}{3}})} = 2,227 * 10^{-9} \frac{м^2}{с}$$

где вязкость бензола 0,7 мПа*с;

вязкость толуола 0,584 мПа*с;

$$\mu_x = 0,7 * 0,05 + 0,584 * 0,95 = 0,59 \text{ мПа} * \text{с};$$

плотность бензола 879 кг/м³;

плотность толуола 866,9 кг/м³;

$$\rho_x = 879 * 0,05 + 866,9 * 0,95 = 867.505 \frac{кг}{м^3};$$

$$b = \frac{0,2 * \sqrt{0,59}}{\sqrt[3]{867.505}} = 0,016;$$

$$\begin{aligned} D_{xн} &= D_{xн20} * [1 + b * (t - 20)] = 2,227 * 10^{-9} * [1 + 0,016 * (109,25 - 20)] \\ &= 5,632 * 10^{-9} \frac{м^2}{с}; \end{aligned}$$

Вычисление коэффициента диффузии в паровой фазе сводится к решению уравнения:

$$D_y = \frac{4,22 * 10^{-3} * T^{\frac{3}{2}}}{P * (\vartheta_6^{\frac{1}{3}} + \vartheta_T^{\frac{1}{3}})^2} \sqrt{\frac{1}{M_6} + \frac{1}{M_T}} \quad (2.19)$$

где T – средняя температура в соответствующей части колонны, К;

P – абсолютное давление в колонне, Па.

Следовательно, для укрепляющей части:

$$D_{yB} = \frac{4,22 * 10^{-3} * (273 + 84)^{\frac{3}{2}}}{10^5 * \left(96^{\frac{1}{3}} + 118,2^{\frac{1}{3}}\right)^2} \sqrt{\frac{1}{78} + \frac{1}{92}} = 4,86 * 10^{-6} \frac{M^2}{c};$$

По подобному уравнению вычислим для исчерпывающей части колонны:

$$D_{yH} = \frac{4,22 * 10^{-3} * (273 + 109,25)^{\frac{3}{2}}}{10^5 * \left(96^{\frac{1}{3}} + 118,2^{\frac{1}{3}}\right)^2} \sqrt{\frac{1}{78} + \frac{1}{92}} = 5,394 * 10^{-6} \frac{M^2}{c};$$

Следовательно, для укрепляющей части колонны:

$$\begin{aligned} h_{xB} &= 0,258 * \Phi * c * Pr_x^{0,5} * Z^{0,15} = \\ &= 0,258 * 0,071 * 0,961 * \left(\frac{0,256 * 10^{-3}}{796 * 4,517 * 10^{-9}}\right)^{0,5} * 3^{0,15} = 0,175 \text{ м} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h_{yB} &= \frac{0,0175 * \psi * Pr_y^{0,5} * d * Z^{0,33}}{(L_s * f_1 * f_2 * f_3)^{0,6}} = \\ &= \frac{0,0175 * 204,54 * \left(\frac{0,0089 * 10^{-3}}{2,73 * 4,89 * 10^{-6}}\right)^{0,5} * 1,2 * 3^{0,33}}{\left(\frac{3,2}{0,785 * 1,2^2} * 0,256^{0,16} * \left(\frac{1000}{796}\right)^{1,25} * \left(\frac{72,8 * 10^{-3}}{20 * 10^{-3}}\right)^{0,8}\right)^{0,6}} = \\ &= 1,573 \text{ м} \end{aligned}$$

Для нижней части колонны:

$$\begin{aligned} h_{xH} &= 0,258 * 0,087 * 0,813 * \left(\frac{0,268 * 10^{-3}}{796 * 5,632 * 10^{-9}}\right)^{0,5} * 3^{0,15} = 0,167 \text{ м} \\ h_{yH} &= \frac{0,0175 * 160,98 * \left(\frac{0,0095 * 10^{-3}}{2,75 * 5,39 * 10^{-6}}\right)^{0,5} * 1,2 * 3^{0,33}}{\left(\frac{6,992}{0,785 * 1,2^2} * 0,268^{0,16} * \left(\frac{1000}{796}\right)^{1,25} * \left(\frac{72,8 * 10^{-3}}{20 * 10^{-3}}\right)^{0,8}\right)^{0,6}} = 1,07 \text{ м} \end{aligned}$$

Определим общую высоту единиц переноса для укрепляющей и исчерпывающей частей колонны:

$$\begin{aligned} h_{oyB} &= 1,573 + 1,11 * \frac{1,326 + 1}{1,326} * 0,175 = 1,914 \text{ м}; \\ h_{oyH} &= 0,67 + 0,49 * \frac{1,326 + 1}{1,326} * 0,166 = 1,21 \text{ м}; \end{aligned}$$

Определение высоты насадки в разных частях колонны сводится к решению уравнений:

$$H_B = 1,914 * 8,37 = 16,02 \text{ м};$$

$$H_H = 0,813 * 3,68 = 4,45 \text{ м};$$

Общая высота насадки в колонне:

$$H_0 = H_B + H_H = 16,02 + 4,45 = 20,47 \text{ м};$$

С учетом того, что высота слоя насадки в одной секции $Z = 3$ м, общее число секций в колонне составляет 6 (5 секции в верхней части и 1 в нижней).

Общую высоту ректификационной колонны определяют по уравнению:

$$H_K = Z * n + (n - 1) * h_p + Z_B + Z_H \quad (2.20)$$

где Z – высота насадки в одной секции, м;

n – число секций;

h_p – высота промежутков между секциями насадки, в которых устанавливают распределители жидкости, м (примем 1 м);

Z_B и Z_H – соответственно высота сепарационного пространства над насадкой и расстояние между днищем колонны и насадкой, м.

Значения Z_B и Z_H выбирают в соответствии с рекомендациями [4, с. 235]:

Высота колонны определяется следующим уравнением:

$$H_K = 3 * 5 + 3 * 1 + 1 + 2 = 26 \text{ м};$$

2.4 Гидравлическое сопротивление насадки

Гидравлическое сопротивление насадки ΔP определяется по уравнению:

$$\Delta P = 10^{169U} * \Delta P_C; \quad (2.21)$$

Расчет гидравлического сопротивления сухой неорошаемой насадки проводят по уравнению:

$$\Delta P_C = \lambda * \frac{H * \omega^2 * \rho_y}{d_s * 2 * \varepsilon^2}; \quad (2.22)$$

где λ – коэффициент сопротивления сухой насадки, зависящей от режима движения газа в насадке.

Число Рейнольдса для газа в укрепляющей и исчерпывающей частях колонны равны:

$$Re_{y_B} = \frac{\omega_B d_3 \rho_{y_B}}{\varepsilon * \mu_{y_B}} = \frac{1,78 * 0,035 * 2,73}{0,785 * 0,0089 * 10^{-3}} = 24400$$

$$Re_{y_H} = \frac{\omega_H d_3 \rho_{y_H}}{\varepsilon * \mu_{y_H}} = \frac{1,91 * 0,035 * 2,75}{0,785 * 0,0095 * 10^{-3}} = 24520$$

Отсюда ясно, что режим течения турбулентный.

Определим коэффициент сопротивления сухой насадки для турбулентного режима:

$$\lambda = \frac{16}{Re_y^{0,2}} \quad (2.23)$$

Для укрепляющей и исчерпывающей частей колонны получаем

$$\lambda_B = \frac{16}{Re^{0,2}} = \frac{16}{24400^{0,2}} = 2,122;$$

$$\lambda_H = \frac{16}{Re^{0,2}} = \frac{16}{24520^{0,2}} = 2,119;$$

Гидравлическое сопротивление сухой насадки укрепляющей и исчерпывающей частях колонны равно:

$$\Delta P_{C_B} = \lambda_B * \frac{H * \omega_B^2 * \rho_{y_B}}{d_3 * 2 * \varepsilon^2} = 2,122 * \frac{15 * 1,78^2 * 2,73}{0,035 * 2 * 0,785^2} = 6456 \text{ Па}$$

$$\Delta P_{C_H} = \lambda_H * \frac{H * \omega_H^2 * \rho_{y_H}}{d_3 * 2 * \varepsilon^2} = 2,119 * \frac{3 * 1,91^2 * 2,75}{0,035 * 2 * 0,785^2} = 1486 \text{ Па}$$

Плотность орошения в укрепляющей и исчерпывающей частях колонны вычисляется по уравнениям:

$$U_B = \frac{L_B}{\rho_{x_B} * 0,785 * d^2} = \frac{3,2}{796 * 0,785 * 1,2^2} = 0,0035 \frac{\text{м}^3}{\text{м}^2 * \text{с}}; \quad (2.24)$$

$$U_H = \frac{L_H}{\rho_{x_H} * 0,785 * d^2} = \frac{6,99}{796 * 0,785 * 1,2^2} = 0,0077 \frac{\text{м}^3}{\text{м}^2 * \text{с}};$$

Гидравлическое сопротивление орошаемой насадки в укрепляющей и исчерпывающей частях колонны:

$$\Delta P_B = 10^{169U} * \Delta P_C = 10^{169 * 0,0035} * 4386 = 25830 \text{ Па};$$

$$\Delta P_H = 10^{169U} * \Delta P_C = 10^{169 * 0,0077} * 1993 = 30563 \text{ Па};$$

Общее гидравлическое сопротивление орошаемой насадки в колонне:

$$\Delta P = \Delta P_B + \Delta P_H = 25830 + 30563 = 56393 \text{ Па}$$

2.5 Тепловой расчет

Рассчитаем расход теплоты, отдача которой происходит в дефлегматоре-конденсаторе охлаждающей воде:

$$Q_D = P * (1 + R) * r_p = 2,315 * (1 + 1,326) * 390,416 * 10^3 = 2102000 \text{ Вт}$$

Здесь

$$\begin{aligned} r_p &= \bar{x}_p * r_b + (1 - \bar{x}_p) * r_t = 0,923 * 391,3 + (1 - 0,923) * 379,82 = \\ &= 390,416 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \end{aligned}$$

где r_b и r_t — удельные теплоты конденсации бензола и толуола.

Рассчитаем удельные теплоемкости исходной смеси F, дистиллята P, кубового остатка W. Удельные теплоемкости бензола и толуола при разных температурах рассчитаны и переведены по [5, Рис. XI, с. 562]:

$$\begin{aligned} C_F &= C_b * x_F + C_t * (1 - x_F) = 1967,86 * 0,583 + 1953,86 * (1 - 0,583) = \\ &= 1962 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} * \text{К}}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_P &= C_b * x_P + C_t * (1 - x_P) = 1920,4 * 0,923 + 1906,2 * (1 - 0,583) = \\ &= 1919 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} * \text{К}}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_W &= C_b * x_W + C_t * (1 - x_W) = 2019 * 0,923 + 2004,075 * (1 - 0,583) = \\ &= 2005 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} * \text{К}}; \end{aligned}$$

Получаемый в кубе-испарителе расход теплоты от греющего пара:

$$Q_k = Q_D + P * c_P * t_P + W * c_W * t_W - F * c_F * t_F + Q_{\text{пот}} \quad (2.25)$$

$$\begin{aligned} Q_k &= 1,03 * (2102000 + 2,315 * 10^3 + 192,56 * 84 + 1,62 * 1894,71 * \\ &109,25 - 3,935 * 1962,26 * 96,375) = 2149000 \text{ Вт} \end{aligned}$$

В уравнении приняты тепловые потери 3% от полезной затрачиваемой теплоты.

Проведем расчет расхода теплоты в паровом подогревателе для исходной смеси:

$$Q = 1,05 * c_F * (t_F - t_{нач}) = 1,05 * 3,935 * 1962,022 * (96,375 - 20) = 619100 \text{ Вт};$$

где $t_{нач}$ принять равным $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

В данном случае тепловые потери следует принять в размере 5%.

Расход теплоты, отдаваемой охлаждающей воде в водяном холодильнике дистиллята:

$$Q = P * c_P * (t_P - t_{кон}) = 2,315 * 1919,122 * (84 - 25) = 262100 \text{ Вт};$$

где $t_{кон}$ принять равным $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Расход теплоты, отдаваемой охлаждающей воде в водяном холодильнике кубового остатка:

$$Q = W * c_W * (t_W - t_{кон}) = 1,62 * 2004,89 * (109,25 - 25) = 273600 \text{ Вт};$$

Проведем расчет расхода греющего пара, который имеет давление $p_{абс} = 2 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$ и влажность 5%:

а) в кубе-испарителе:

$$G_{г.п.} = \frac{Q_k}{r_{г.п.} * \chi} = \frac{2149000}{2202,2 * 10^3 * 0,95} = 1,027 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

б) в подогревателе исходной смеси:

$$G_{г.п.} = \frac{Q}{r_{г.п.} * \chi} = \frac{619100}{2202,2 * 10^3 * 0,95} = 0,296 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

$$\text{Всего: } 1,027 + 0,296 = 1,323 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

Определение расхода остужающей воды при нагревании ее на $20 \text{ }^\circ\text{C}$:

а) в дефлегматоре:

$$V_B = \frac{Q_D}{c_B * (t_{кон} - t_{нач}) * \rho_B} = \frac{2102000}{4190 * (25 - 20) * 1000} = 0,1 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

б) в водяном холодильнике дистиллята:

$$V_D = \frac{Q_D}{c_B * (t_{кон} - t_{нач}) * \rho_B} = \frac{262100}{4190 * (25 - 20) * 1000} = 0,0125 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

в) в водяном холодильнике кубового остатка:

$$V_B = \frac{Q_D}{c_B * (t_{\text{кон}} - t_{\text{нач}}) * \rho_B} = \frac{273600}{4190 * (25 - 20) * 1000} = 0,0135 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

$$\text{Всего: } 0,1 + 0,0125 + 0,0135 = 0,126 \frac{\text{м}^3}{\text{с}} \text{ или } 453,6 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}}$$

2.6 Расчет и подбор штуцеров

Схематичное изображение ректификационной колонны необходимо для определения схемы расположения штуцеров. Под каждым номером подразумевается номер рассчитываемого штуцера. Схема представлена на рисунке:

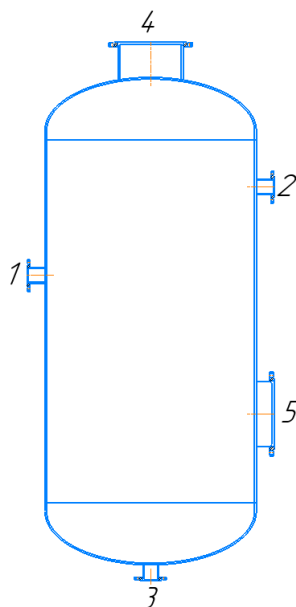


Рис. 9 – Схема расположения штуцеров

Штуцеры необходимы для присоединения трубопроводов к сосудам и аппаратам. В проектируемом аппарате проводится процесс ректификации, исходя из условий которой можно задаться штуцерами приварными фланцами с уплотнительной поверхностью шип-паз и тонкостенными патрубками. Для расчета штуцеров необходимо провести расчет по уравнению:

$$d = \sqrt{\frac{4 * G}{\pi * \rho * \omega}} \quad (2.26)$$

где ω — скорость, примем для жидкости равной 1,5 м/с, для пара – 25 м/с.

2.6.1 Штуцер для ввода исходной смеси

Расчет следует проводить по уравнению:

$$d_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot G_F}{\rho_F \cdot \omega_{ж} \cdot \pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 3.935}{(795 \cdot 1.5 \cdot \pi)}} = 0.065 \text{ м}$$

Примем штуцер по АТК 24.218.06-90 [7] с условным проходом $D_y = 80$ мм и соответствующий ему фланец.

2.6.2. Штуцер для ввода флегмы

Расчет проводится по уравнению:

$$d_5 = \sqrt{\frac{4 \cdot G_P \cdot R_{\phi}}{\rho_P \cdot \omega_{ж} \cdot \pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 2.315 \cdot 1.326}{(809.47 \cdot 1.5 \cdot \pi)}} = 0.057 \text{ м}$$

Примем штуцер с по АТК 24.218.06-90 условным проходом $D_y = 80$ мм и соответствующий ему фланец.

2.6.3 Штуцер для отвода кубового остатка

Расчет проводится по уравнению:

$$d_4 = \sqrt{\frac{4 \cdot 2 \cdot G_W}{\rho_W \cdot \omega_{ж} \cdot \pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 2 \cdot 1.62}{(780.63 \cdot 1.5 \cdot \pi)}} = 0.059 \text{ м}$$

Примем штуцер по АТК 24.218.06-90 с условным проходом $D_y = 80$ мм мм.

2.6.4 Штуцер для вывода паров дистиллята

Расчет проводится по уравнению:

$$d_2 = \sqrt{\frac{4 \cdot G_B}{\rho_{ув} \cdot \omega_{п} \cdot \pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 5.535}{(2.73 \cdot 25 \cdot \pi)}} = 0.321 \text{ м}$$

Примем штуцер по АТК 24.218.06-90 с условным проходом $D_y = 350$ мм и соответствующий ему фланец.

2.6.5 Штуцер для ввода паров кубовой смеси

Расчет проводится по уравнению:

$$d_3 = \sqrt{\frac{4 \cdot G_H}{\rho_{\text{УН}} \cdot \omega_{\text{П}} \cdot \pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 5.95}{(2.75 \cdot 25 \cdot \pi)}} = 0.332 \text{ м}$$

Примем штуцер по АТК 24.218.06-90 с условным проходом $D_y = 350$ мм и соответствующий ему фланец.

2.7 Расчет тепловой изоляции

Определение толщины тепловой изоляции сводится к решению равенства удельных потоков через слой изоляции от поверхности изоляции в окружающую среду:

$$\alpha_{\text{В}} * (t_{\text{СТ2}} - t_{\text{В}}) = \left(\frac{\lambda_{\text{И}}}{\delta_{\text{И}}}\right) * (t_{\text{СТ1}} - t_{\text{СТ2}}); \quad (2.27)$$

где $\alpha_{\text{В}} = 9,3 + 0,3058 * t_{\text{СТ2}}$ – коэффициент теплоотдачи от внешней поверхности изоляционного материала в окружающую среду, Вт/(м² К);

$t_{\text{СТ2}}$ – температура изоляции со стороны окружающей среды (температура определена техникой безопасности на предприятиях и равна 40 °С);

$t_{\text{СТ1}}$ – температура изоляции со стороны аппарата;

$t_{\text{В}}$ – температура окружающей среды (воздуха), °С;

$\lambda_{\text{И}}$ – коэффициент теплопроводности изоляционного материала, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$.

Определим толщину тепловой изоляции:

$$\alpha_{\text{В}} = 9,3 + 0,3058 * 40 = 21,532;$$

Материалом тепловой изоляции будет выступать совелит с составом 85 % магнезии и 15 % асбеста, коэффициент теплопроводности которого равен $\lambda_{и} = 0,098 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$. [8, с. 529].

Толщина тепловой изоляции равна:

$$\delta_{и} = \frac{\lambda_{и} * (t_{ст1} - t_{ст2})}{\alpha_{в} * (t_{ст2} - t_{в})} = \frac{0,098 * (109,25 - 40)}{21,532 * (40 - 10)} = 0,011 \text{ м};$$

Здесь $t_{в}$ для аппаратов, работающих на открытом воздухе примем равным в зимнее время [4] 10°C

Принимаем толщину изоляции 20 мм.

3 Механический расчет

В цель механического расчета оборудования входит обеспечение механической надежности работы проектируемой аппаратуры. При расчете ректификационной колонны необходимо обеспечить такие критерии надежности, как прочность и устойчивость от избыточного внутреннего давления, собственного веса, изгибающих моментов от действия ветровых нагрузок.

3.1 Определение толщины стенки цилиндрической обечайки, днища и крышки

Данный пункт подразумевает под собой определение толщин стенок, теоретически необходимых для обеспечения прочности сосуда (или его элемента) при воздействии внутреннего или наружного давления.

3.1.1 Выбор материала ректификационной колонны

Выбор материала ректификационной колонны обусловлен специфическими условиями работы. Выбранная марка стали обязательно должна удовлетворять определенные критерии, такие как хладостойкость, совместимость по агрессивности среды, доступность на рынке и сравнительная дешевизна.

Материал для изготовления стальных сварных аппаратов должен быть химически- и коррозионностойким в заданной среде, при рабочих параметрах, обладать хорошей свариваемостью и соответствующими прочностными и пластическими характеристиками в рабочих условиях, допускать холодную и горячую механическую обработку, а также иметь низкую стоимость и высокую распространённость на рынке.

Рабочей средой является бинарная смесь бензола и толуола. Смесь является коррозионно-активной, следовательно, необходимо принять хромоникелевую сталь, которая обладает коррозионной стойкостью.

3.1.2 Определение расчетных параметров

Примем расчетную температуру стенки колонны равной температуре среды:

$$\begin{aligned}t_p &= t_C \\t_p &= \max(t_C, 20) \\t_p &= 109.25 \text{ } ^\circ\text{C}\end{aligned}$$

Исходя из того, что проектируемый аппарат изготавливается не из стальных отливок [9, п. 8.3, с. 6], а из листового проката, поправочный коэффициент η к допускаемым напряжениям должен быть равен единице.

$$\eta := 1$$

Допускаемое напряжения определяется согласно по таблице А.3 [9, с. 11] интерполируя стандартные значения с последующим округлением в меньшую сторону в пределах до 0,5 МПа.

$$\begin{aligned}t &= \begin{pmatrix} 100 \\ 150 \end{pmatrix} \\ \sigma &= \begin{pmatrix} 174 \\ 168 \end{pmatrix}\end{aligned}$$

Допускаемое напряжение для стали 12Х18Н10Т при расчетной температуре:

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

Модуль упругости определяется согласно по таблице В.1 [5, с. 21]:

$$E := 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Допускаемое напряжение для стали с учетом поправочного коэффициента, принятого по [9, п.8.3, с.6.]:

$$\sigma_{\text{Д}} = \eta \cdot \sigma = 172.5 \text{ МПа} \quad (3.1)$$

Определим допускаемое напряжение для стали при гидравлических испытаниях:

$$n_{\text{T}} = 1.1 \text{ исходя из рекомендаций [9, табл. 1, с. 5]}$$

Расчетное значение предела текучести при 20 °С для стали 12Х18Н10Т:

$$R_{e1.0} = 276 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{\text{И}} = \text{Floor}\left(\frac{R_{e1.0}}{n_{\text{T}}}, 0.5\right) = 250.5 \text{ МПа}$$

По рекомендациям таблицы А.3 [5, с. 11], примем:

$$\sigma_{20} = 184 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{\text{Д}} = 172.5 \text{ МПа}$$

Расчетное давление рассчитывается следующим образом:

$$P_{\text{Расч}} = P + \frac{\rho_{\text{В}} \cdot g \cdot H_{\text{Ц}}}{10^9} = 0.1 + \frac{998.2 \cdot 9.81 \cdot 26000}{10^9} = 0.355 \text{ МПа} \quad (3.2)$$

Пробное давления при гидравлических испытаниях определяется:

$$P_{\text{пр}} := 1.25 \cdot P_{\text{Расч}} \cdot \frac{\sigma_{20}}{\sigma_{\text{Д}}} = 1.25 \cdot 0.355 \cdot \left(\frac{184}{172.5}\right) = 0.473 \text{ МПа} \quad (3.3)$$

Определим условное давление для выбора фланцевых соединений:

$$P_{\text{усл}} := P_{\text{пр}} \cdot \frac{\sigma_{20}}{\sigma_{\text{Д}}} = 0.473 \cdot \left(\frac{184}{172.5}\right) = 0.505 \text{ МПа} \quad (3.4)$$

По рекомендациям [8, табл. 14.3, с. 403] принимаем:

$$P_{\text{усл}} = 0.6 \text{ МПа}$$

3.2 Расчет толщины стенок цилиндрической части аппарата

Расчетная схема цилиндрической обечайки корпуса представлена на рисунке

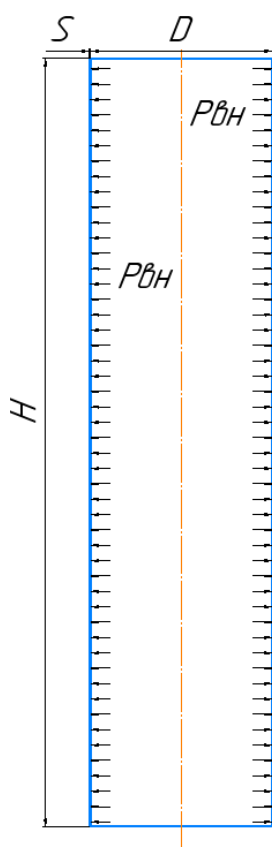


Рисунок 10 – Расчетная схема обечайки

Целью расчета толщины стенки цилиндрического элемента обечайки является обеспечение механической прочности ректификационной колонны в рабочих или условиях испытаний. В данном расчете критерием прочности будет являться допускаемое давление $[p]$, МПа.

Расчет толщины стенки цилиндрической обечайки проводится по методике, указанной в [10] и сводится к определению:

- расчетного давления;
- допускаемых напряжений материала;
- пробного давления;
- способа сварки и контроля сварного шва;
- толщины стенки;
- выполнения условия прочности;

- выполнения применимости расчетных формул.

Расчетное, пробное давления, допускаемые напряжения определены в пункте 3.1.2.

Исполнительная толщина стенки цилиндрического элемента обечайки рассчитывается по формуле [9]:

$$s \geq s_p + c$$

Где s_p – расчетная толщина стенки цилиндрической части колонны.

Прибавки к номинальным расчетным толщинам определяется по формуле:

$$c = c_K + c_{\text{Э}} + c_{\text{Д}} \quad \text{МПа} \quad (3.5)$$

где c_K - прибавка на коррозию;

$c_{\text{Э}}$ - прибавка на эрозию;

$c_{\text{Д}}$ - прибавка по технологическим и монтажным соображениям.

Прибавки к расчетной толщине стенки:

$$c_K := \Pi \cdot \tau_{\text{Э}} = 0.1 \cdot 10 = 1.0 = 1.0 \quad \text{мм} \quad (3.6)$$

для компенсации коррозии центральной обечайки

Так как в аппарате отсутствуют высокие скорости среды, прибавку к расчетной толщине стенки для компенсации эрозии примем исходя из рекомендаций и исходным данным [8, с. 408]:

$$c_{\text{Э}} = 0 \text{ мм}$$

Так как проектируемый аппарат не будет подвержен каким-либо технологическим операциям, можем принять, что:

$$c_{\text{Д}} := 0 \quad \text{мм}$$

Отсюда

$$c = c_K + c_{\text{Э}} + c_{\text{Д}} = 1 \quad \text{мм}$$

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

сваркой с двусторонним сплошным проваром при длине контролируемых швов 100%, по таблице Д.1. [9], в соответствии с рекомендацией [1, с. 190]:

$$\phi_p := 1$$

Расчетная и исполнительные толщины стенок цилиндрической обечайки в соответствии с ГОСТ Р 52857.2-2007:

$$s_p := \max\left(\frac{P_{\text{расч}} \cdot D_B}{2 \cdot \sigma_D \cdot \phi_p - P_{\text{расч}}}, \frac{P_{\text{пр}} \cdot D_B}{2 \cdot \sigma_{\text{И}} \cdot \phi_p - P_{\text{пр}}}\right) = 1.236 \text{ мм} \quad (3.7)$$

Соответственно, исполнительная толщина стенки:

$$s := (s_p + c) = 3.236 \text{ мм} \quad (3.8)$$

По техническим требованиям [4], колонные аппараты диаметром 1200 мм должны иметь толщину стенки обечайки не менее 10 мм. Исходя из этого принимаем:

$$S := 10 \text{ мм}$$

Проведем проверку на условие прочности. Допускаемое внутреннее избыточное давление в рабочих условиях вычисляем по формуле:

$$P_{\text{доп}} := 2 \cdot \sigma_D \cdot \phi_p \cdot \frac{(S - c)}{D_B + (S - c)} = 2 \cdot 172.5 \cdot 1 \cdot \left[\frac{(10 - 1)}{[1200 + (10 - 1)]}\right] = 2.57 \text{ МПа} \quad (3.9)$$

Допускаемое внутреннее избыточное давление при гидравлических испытаниях вычисляем по формуле:

$$P_{\text{доп.и}} = 2 \cdot \sigma_{\text{И}} \cdot \phi_p \cdot \frac{(S - c)}{D_B + (S - c)} = 2 \cdot 250.5 \cdot 1 \cdot \left[\frac{(10 - 1)}{[1200 + (10 - 1)]}\right] = 3.73 \text{ МПа} \quad (3.10)$$

Условие прочности выполняется, так как:

$$P_{\text{расч}} \leq P_{\text{доп}}$$

Расчетное давление должно быть меньше или равно допускаемого внутреннего избыточного давления в рабочих условиях. Подставив значения, получим:

$$0,355 \leq 2,57 \text{ МПа};$$

Необходимо провести проверку и при гидравлических условиях:

$$P_{\text{проб}} \leq P_{\text{доп.и}}$$

Подставим значения:

$$0,473 \leq 3,73 \text{ МПа.}$$

Проведем проверку условия применимости формул:

$$Usl_1 := \begin{cases} \text{"Условие применимости формул выполняется"} & \text{if } \frac{S - c}{D_B} \leq 0.1 \\ \text{"Условие применимости формул не выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\frac{S - c}{D_B} = \frac{(10 - 1)}{1200} = 0.0075 \quad (3.11)$$

$$0,0075 \leq 0,1$$

$$Usl_1 = \text{"Условие применимости формул выполняется"}$$

Применение данных расчетных формул и методики верно. Толщина корпуса ректификационной колонны в 10 мм обеспечивает прочность в рабочем состоянии и в состоянии гидравлических испытаний.

3.3 Расчет толщины днища и крышки

Все расчетные параметры определены в пунктах выше. В целом, расчетная схема этих элементов будут совпадать, однако на днище будет приходиться большая нагрузка, поэтому следует рассчитать толщину стенки днища.

Расчетная схема представлена на рисунке 11.

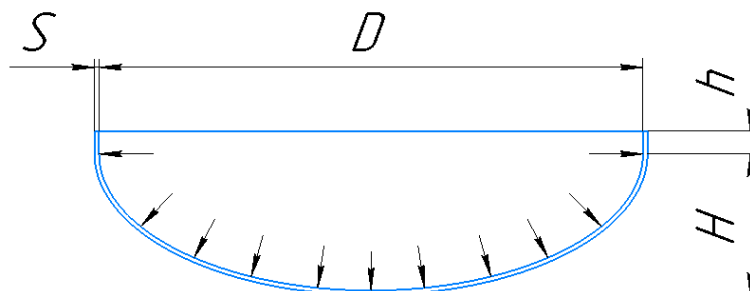


Рисунок 11 – Расчетная схема днища

Расчетная толщина днища определяется по формуле:

$$s_R := \max \left(\frac{P_{\text{расч}} \cdot D_B}{2 \cdot \sigma_D \cdot \phi_p - 0.5 \cdot P_{\text{расч}}}, \frac{P_{\text{пр}} \cdot D_B}{2 \cdot \sigma_{II} \cdot \phi_p - 0.5 \cdot P_{\text{пр}}} \right) = 1.235 \text{ мм} \quad (3.12)$$

$$s_d := s_R + c = 2.235 \text{ мм}$$

Принимаем толщину днища стандартного значения, равной толщине обечайки:

$$s_{\text{дн}} := 10_{\text{мм}}$$

Допускаемое давление для днища:

$$P_{\text{доп.}} = \frac{2 \cdot \sigma_D \cdot \phi_p \cdot (s_{\text{дн}} - c)}{D_B + 0.5 \cdot (s_{\text{дн}} - c)} = \frac{2 \cdot 172.5 \cdot 1 \cdot (10 - 1)}{[1200 + 0.5 \cdot (10 - 1)]} = 2.578 \text{ МПа} \quad (3.13)$$

Проверка условия прочности:

$$P_{\text{расч}} \leq P_{\text{доп}}$$

Следовательно:

$$0,1 \leq 2,578 \text{ МПа.}$$

Проверка условий применимости формул:

$$Us_2 := \begin{cases} \text{"Условие применимости формул выполняется"} & \text{if } 0.002 \leq \frac{s_{\text{дн}} - c}{D_B} \leq 0.1 \\ \text{"Условие применимости формул не выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

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

3.4 Расчет фланцевых соединений

Расчет проведем согласно [11].

Параметрами, влияющими на выбор фланцевого соединения, являются: диаметр аппарата, рабочее давление, температура, а также среда. Если из учета диаметра, рабочего давления и температуры можно сделать вывод, что наиболее подходящим типом фланцевого соединения с плоской уплотнительной поверхностью, то при учете среды, которая является взрыво- и пожароопасной, следует выбрать плоский приварной фланец с уплотнительной поверхностью шип-паз.

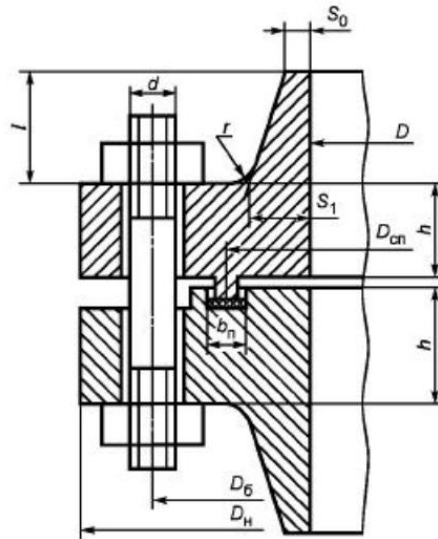


Рис. 11 – Фланцевое соединение с уплотнительной поверхностью шип-паз

Расчет проводим для имеющегося наибольшего диаметра, то есть для люка-лаза:

Крепежным элементом во фланцевом соединении будут выступать болты.

Проведем расчет диаметра болтовой окружности:

$$D_{\text{б}} = D + 2(s_1 + d_{\text{б}} + u) = 500 + 2 \cdot (20 + 20 + 5) = 590.0 \text{ мм}$$

С помощью диаметра болтовой окружности получим наружный диаметр прокладки:

$$D_{\text{н.п}} = D_{\text{б}} - e = 590.0 - 30 = 560.0 \text{ мм}$$

Определение среднего диаметра прокладки:

$$D_{\text{сп}} = D_{\text{н.п}} - b = 560.0 - 20 = 540.0 \text{ мм}$$

Число болтов, обеспечивающее герметичность соединения

$$n_{\text{б}} = \frac{\pi \cdot D_{\text{б}}^2}{t_{\text{ш}}} \quad (3.14)$$

Шаг расположения болтов:

$$t_{\text{ш}} = 4.6 \cdot d_{\text{б}} = 92 \text{ мм}$$

Тогда число болтов:

$$n_{\sigma} = \frac{\pi \cdot D_{\sigma}}{t_{III}} = \frac{\pi \cdot 590.0}{92} = 20.0$$

Определим ориентировочную толщину фланца:

$$h_{\Phi} = \lambda_{\Phi} \cdot \sqrt{D \cdot s_{\text{ЭК}}} \quad (3.15)$$

Коэффициент λ_{Φ} определяется по рисунку 1.40 [12]:

$$\lambda_{\Phi} = 0.38$$

Эквивалентная толщина втулки определяется формулой:

$$s_{\text{ЭК}} = s_0 \cdot \left[1 + \frac{h_{\text{В}} \cdot (\beta_1 - 1)}{h_{\text{В}} + 0.25 \cdot (\beta_1 + 1)} \right] \quad (3.16)$$

Высота втулки фланца:

$$h_{\text{В}} = \left(\frac{1}{i} \right) \cdot (s_1 - s_0) \quad (3.17)$$

Уклон втулки:

$$i = \frac{1}{3}$$

Отсюда:

$$h_{\text{В}} = \left(\frac{1}{i} \right) \cdot (s_1 - s_0) = \frac{1}{\left(\frac{1}{3} \right)} \cdot (20 - 10) = 30.0 \text{ мм} \quad (3.18)$$

$$s_{\text{ЭК}} = s_0 \cdot \left[1 + \frac{h_{\text{В}} \cdot (\beta_1 - 1)}{h_{\text{В}} + 0.25 \cdot (\beta_1 + 1)} \right] = 10 \cdot \left[1 + \frac{30.0 \cdot (2 - 1)}{[30.0 + 0.25 \cdot (2 + 1)]} \right] = 19.0 \text{ мм} \quad (3.19)$$

$$h_{\Phi} = \lambda_{\Phi} \cdot \sqrt{D \cdot s_{\text{ЭК}}} = 0.38 \cdot \sqrt{500 \cdot 19.0} = 37.0 \text{ мм}$$

Материалом фланцевых соединений стоит принять сталь 12Х18Н10Т, материалом болтов – 35Х, для прокладки материалом будет выступать паронит ПОН.

В нашем случае из-за токсичной, взрыво- и пожароопасной среды следует применять фланцы с уплотнительной поверхностью шип-паз.

Определим необходимые расчетные параметры.

Определение расчетных температур:

- для неизолированных плоских фланцев $t_{\phi} = 0,96 t$

$$t_{\phi} = 0.96 \cdot t = 0.96 \cdot 109.25 = 104.9$$

- для болтов

$$t_{\sigma} = 0.85 \cdot t = 0.85 \cdot 109.25 = 92.9$$

Допускаемые напряжения подбираются из таблиц по рекомендациям [11] для стали 35Х

Расчет в рабочем состоянии:

$$t = \begin{pmatrix} 100 \\ 150 \end{pmatrix}$$

$$\sigma_{\text{д}} = \begin{pmatrix} 230 \\ 225 \end{pmatrix}$$

$$\sigma_{\text{д.б}} = (\text{linterp}(t, \sigma_{\text{д}}, t_{\phi})) = 229.51 \text{ МПа}$$

Определение модуля упругости болтов при рабочей температуре

$$E = \begin{pmatrix} 2.15 \\ 2.08 \end{pmatrix}$$

$$E_{\sigma} = (\text{linterp}(t, E, t_{\phi})) \cdot 10^5 = 2.143 \times 10^5 \text{ МПа}$$

Определим допускаемые напряжения болтов при температуре испытаний:

$$\sigma_{20\sigma} = 230 \text{ МПа}$$

Модуль упругости для болтов при температуре испытания 20 °С

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

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

$$\alpha_{\sigma} = 13.4 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{K}}$$

Допускаемые напряжения для фланцев и обечаек стали 12Х18Н10Т

$$\sigma = \begin{pmatrix} 174 \\ 168 \end{pmatrix}$$

$$\sigma = \text{Floor}(\text{linterp}(t, \sigma, t_{\phi}), 0.5)$$

$$\sigma = 173 \text{ МПа}$$

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

$$\sigma_{\text{д.ф}} = \eta \cdot \sigma$$

$$\sigma_{\text{д.ф}} = 173 \text{ МПа}$$

Модуль упругости для стали 12Х18Н10Т при рабочей температуре

$$E = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

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

$$\sigma_{20} = 184 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{\text{д}20} = \eta \cdot \sigma_{20} = 1 \cdot 184 = 184.0 \text{ МПа}$$

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

$$E_{20} = 20 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

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

$$\alpha_{\text{ф}} = 16.6 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{K}}$$

Усилия, которые необходимы для того, чтобы смять прокладку и обеспечить герметичность фланцевого соединения определяются следующим образом:

Определение так называемой эффективной ширины плоской прокладки выполняется с помощью:

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

$$b_{0.} = 17 \text{ мм}$$

Зададимся характеристиками прокладки согласно [11, с. 98]:

$$k_{\text{цр}} = 2.5$$

$$q_{\text{обж}} = 20 \text{ МПа}$$

Усилие смятия прокладки при затяжке, вычисляется по формуле:

$$P_{обж} = 0.5\pi \cdot D_{сп} \cdot b_0 \cdot q_{обж} = 0.5 \cdot \pi \cdot 524.0 \cdot 17 \cdot 20 = 279853.0 \text{ Н} \quad (3.20)$$

Усилие на прокладке, обеспечивающее герметичность фланцевого соединения:

$$R_{II} = \begin{cases} \pi \cdot D_{сп} \cdot b_0 \cdot k_{пр} \cdot P \cdot 10^{-6} & \text{if } P \geq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$R_{II} = \pi \cdot 524.0 \cdot 17 \cdot 2.5 \cdot 0.361 = 25256.0 \text{ Н} \quad (3.21)$$

Усилие, необходимое для смятия прокладки при затяжке

Площадь поперечного сечения болтов определим по таблице Д.1 [4, с.25]

$$f_6 = 225 \text{ мм}^2$$

Общая площадь сечения болтов по внутреннему диаметру резьбы или нагруженному сечению наименьшего диаметра определяется из формулы:

$$A_6 = n \cdot f_6 = 16 \cdot 225 = 3600.0 \text{ мм}^2 \quad (3.22)$$

Равнодействующая нагрузка от давления

$$Q_d = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{сп})^2 \cdot P = \frac{\pi}{4} \cdot 540.0^2 \cdot 0.361 = 82676.0 \text{ Н} \quad (3.23)$$

Приведенную нагрузку, вызванную воздействием внешней силы и изгибающего момента, вычисляют по формуле

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

$$Q_{FM} = 0 \text{ Н}$$

Податливость прокладки вычисляют по формуле:

$$y_{II} = \frac{h_{II} \cdot K_{обж}}{E_{II} \cdot \pi \cdot D_{сп} \cdot b_{II}} \quad (3.24)$$

Коэффициент обжатия прокладки для паронита равен:

$$K_{обж} = 1$$

Модуль упругости материала прокладки примем:

$$E_{II} = 2000 \text{ МПа}$$

$$y_{\Pi} = \frac{h_{\Pi} \cdot K_{\text{обж}}}{E_{\Pi} \cdot \pi \cdot D_{\text{сП}} \cdot b} = \frac{2 \cdot 1}{(2000 \cdot \pi \cdot 524.0 \cdot 20)} = 3.0373 \cdot 10^{-8} \text{ мм/Н}$$

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

$$L_{\text{б0}} = 100 \text{ мм}$$

Эффективная длина болта при определении податливости

$$L_{\text{б}} = L_{\text{б0}} + 0.28 \cdot d = 100 + 0.28 \cdot 20 = 105.0 \text{ мм} \quad (3.25)$$

Податливость болтов

$$y_{\text{б}} = \frac{L_{\text{б}}}{E_{20\text{б}} \cdot A_{\text{б}}} = \frac{105.0}{(2.18 \cdot 10^5 \cdot 3600.0)} = 1.34 \cdot 10^{-7} \text{ мм/Н} \quad (3.26)$$

Расчетные параметры фланцев:

- параметр длины обечайки

$$l_0 = \sqrt{D \cdot S_0} = \sqrt{500 \cdot 10} = 70.7 \text{ мм} \quad (3.27)$$

- наружный диаметр фланца:

$$D_{\text{н}} = D_{\text{б}} + a \quad (3.28)$$

Конструктивная добавка для размещения гаек по диаметру [12, с. 95]

$$a = 40 \text{ мм}$$

Отсюда:

$$D_{\text{н}} = D_{\text{б}} + a = 580 + 40 = 620.0 \text{ мм} \quad (3.29)$$

- отношение наружного диаметра тарелки фланца к внутреннему диаметру

$$K = \frac{D_{\text{н}}}{D} = \frac{620.0}{500} = 1.24 \quad (3.30)$$

- коэффициенты, зависящие от соотношения размеров тарелки фланца,

$$\beta_{\text{T}} = \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \log(K)) - 1}{(1.05 + 1.945 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} = \frac{[1.24^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \log(1.24)) - 1]}{[(1.05 + 1.945 \cdot 1.24^2) \cdot (1.24 - 1)]} = 1.82 \quad (3.31)$$

$$\beta_U = \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \log(K)) - 1}{1.36(K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = \frac{[1.24^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \log(1.24)) - 1]}{[1.36 \cdot (1.24^2 - 1) \cdot (1.24 - 1)]} = 10.06$$

$$\beta_Y = \frac{1}{(K - 1)} \cdot \left[0.69 + 5.72 \cdot \frac{K^2 \cdot \log(K)}{(K^2 - 1)} \right] = \frac{1}{(1.24 - 1)} \cdot \left[0.69 + 5.72 \cdot \frac{1.24^2 \cdot \log(1.24)}{(1.24^2 - 1)} \right] = 9.24$$

$$\beta_Z = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = \frac{(1.24^2 + 1)}{(1.24^2 - 1)} = 4.72$$

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

$$\beta_F = 0.91;$$

$$\beta_V = 0.55;$$

$$f = 1.$$

- коэффициент λ :

$$\lambda = \frac{\beta_F \cdot h + l_0}{\beta_T \cdot l_0} + \frac{\beta_V \cdot h^3}{\beta_U \cdot l_0 \cdot (S_0)^2} = \frac{(0.84 \cdot 80 + 70.7)}{(1.82 \cdot 70.7)} + \frac{0.23 \cdot 80^3}{(10.06 \cdot 70.7 \cdot 10^2)} = 5.074 \quad (3.32)$$

Угловая податливость фланца при затяжке

$$y_{\Phi} = \frac{0.91 \cdot \beta_V}{E_{20} \cdot \lambda \cdot l_0 \cdot (S_0)^2} = \frac{0.91 \cdot 0.23}{(20 \cdot 10^5 \cdot 2.727 \cdot 70.7 \cdot 10^2)} = 6.98e-12 \text{ мм/Н} \quad (3.33)$$

Угловая податливость фланца, нагруженного внешним изгибающим моментом,

$$y_{\Phi H} = \left(\frac{\pi}{4} \right)^3 \cdot \frac{D_{\phi}}{E_{20} \cdot h^3 \cdot D_H} = \left(\frac{\pi}{4} \right)^3 \cdot \left[\frac{580}{(20 \cdot 10^5 \cdot 80^3 \cdot 620.0)} \right] = 4.43e-13 \text{ мм/Н} \quad (3.34)$$

Коэффициент, учитывающий изгиб тарелки фланца между болтами:

$$C_F = \max \left[1, \sqrt{\frac{\pi \cdot D_{\phi}}{n \cdot \left(2 \cdot d + \frac{6 \cdot h}{k_{\text{пр}} + 0.5} \right)}} \right] \quad (3.45)$$

$$C_F = 1$$

Приведенный диаметр плоского фланца

$$D_{пр} = D$$

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

$$b = 0.5(D_{\phi} - D_{сп}) = 0.5 \cdot (580 - 524.0) = 28.0 \text{ мм} \quad (3.46)$$

Плечо усилия от действия давления на фланец для всех типов фланцев

$$e = 0.5 \cdot (D_{сп} - D - S_0) = 0.5 \cdot (524.0 - 500 - 10) = 7.0 \text{ мм} \quad (3.47)$$

Эквивалентная толщина плоских фланцев

$$S_{\phi} = S_0 \quad (3.48)$$

Коэффициент жесткости фланцевого соединения для приварных встык и плоских фланцев

$$\gamma = \frac{1}{y_{II} + y_{\phi} \cdot \frac{E_{20\phi}}{E_{\phi}} + 2 \cdot b^2 \cdot y_{\phi} \cdot \frac{E_{20}}{E}} \text{ float,4} = 3.622e6 \quad (3.49)$$

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

$$\alpha = 1 - \frac{y_{II} - 2 \cdot e \cdot y_{\phi} \cdot b}{y_{II} + y_{\phi} + 2 \cdot b^2 \cdot y_{\phi}} \quad (3.50)$$

$$\alpha = 1 - \frac{(3.0373e-8 - 2 \cdot 7.0 \cdot 6.98e-12 \cdot 28.0)}{(3.0373e-8 + 1.34e-7 + 2 \cdot 28.0^2 \cdot 6.98e-12)} = 0.842$$

Коэффициент жесткости фланцевого соединения, нагруженного внешним изгибающим моментом

$$\alpha_M = \frac{y_{\phi} + 2 \cdot y_{\phi H} \cdot b \cdot \left(b + e - \frac{e^2}{D_{сп}} \right)}{y_{\phi} + y_{II} \cdot \left(\frac{D_{\phi}}{D_{сп}} \right)^2 + 2 \cdot y_{\phi H} \cdot b^2} \quad (3.51)$$

$$\alpha_M = \frac{\left[1.34e-7 + 2.4.43e-13 \cdot 28.0 \cdot \left(28.0 + 7.0 - \frac{7.0^2}{524.0} \right) \right]}{\left[1.34e-7 + 3.0373e-8 \cdot \left(\frac{580}{524.0} \right)^2 + 2.4.43e-13 \cdot 28.0^2 \right]} = 0.785$$

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

$$Q_t = \gamma \cdot \left[2\alpha_{\phi} \cdot h \cdot (t_{\phi} - 20) - 2\alpha_{\sigma} \cdot h \cdot (t_{\sigma} - 20) \right] \quad (3.52)$$

$$Q_t = 3.622e6 \cdot \left[2 \cdot (16.6 \cdot 10^{-6}) \cdot 80 \cdot (104.9 - 20) - 2 \cdot (13.4 \cdot 10^{-6}) \cdot 80 \cdot (92.9 - 20) \right] = 2.506 \times 10^5$$

Н

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

$$P_{\sigma 1} = \max \left[\begin{array}{l} \alpha \cdot (Q_d + F) + R_{\Pi} + \frac{4 \cdot \alpha_M \cdot |M|}{D_{\text{сп}}} \\ \alpha \cdot (Q_d + F) + R_{\Pi} + \frac{4 \cdot \alpha_M \cdot |M|}{D_{\text{сп}}} - Q_t \end{array} \right]$$

$$P_{\sigma 1} = 9.083 \times 10^4 \text{ Н}$$

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

$$P_{\sigma 2} = \max(P_{\text{обж}}, 0.4 \cdot A_{\sigma} \cdot \sigma_{20\sigma}) \quad (3.53)$$

$$P_{\sigma 2} = 3.312 \times 10^5 \text{ Н}$$

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

$$P_{\sigma M} = \max(P_{\sigma 1}, P_{\sigma 2}) \quad (3.54)$$

$$P_{\sigma M} = 3.312 \times 10^5 \text{ Н}$$

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

$$P_{\bar{b}p} = P_{\bar{b}M} + (1 - \alpha) \cdot (Q_d + F) + Q_t + \frac{4 \cdot (1 - \alpha_M) \cdot |M|}{D_{\text{сп}}} \quad (3.55)$$

$$P_{\bar{b}p} = 5.941 \times 10^5 \text{ Н}$$

Проверка прочности болтов (шпилек) и прокладки

Расчетные напряжения в болтах (шпильках)

- при затяжке

$$\sigma_{\bar{b}1} = \frac{P_{\bar{b}M}}{A_{\bar{b}}} \quad (3.56)$$

$$\sigma_{\bar{b}1} = 92 \text{ МПа}$$

- в рабочих условиях

$$\sigma_{\bar{b}2} = \frac{P_{\bar{b}p}}{A_{\bar{b}}} \quad (3.57)$$

$$\sigma_{\bar{b}2} = 165.029 \text{ МПа}$$

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

$$Us1_1 = \begin{cases} \text{"Условия прочности в при затяжке НЕ выполняются"} & \text{if } \sigma_{\bar{b}1} > \sigma_{206} \\ \text{"Условия прочности в рабочих условиях НЕ выполняются"} & \text{if } \sigma_{\bar{b}2} > \sigma_{д.б} \\ \text{"Условия прочности выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Us1_1 = \text{"Условия прочности выполняются"}$$

$$\sigma_{\bar{b}1} = 92 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{206} = 230 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{\bar{b}2} = 165.029 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{д.б} = 229.51 \text{ МПа}$$

Удельное давление на прокладку

$$q = \frac{\max(P_{\bar{b}M}, P_{\bar{b}p})}{\pi \cdot D_{\text{сп}} \cdot b} \quad (3.58)$$

$$q = 18.045 \text{ МПа}$$

Условие прочности прокладки (проверяется для мягких прокладок)

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

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

$$q = 18.045 \text{ МПа}$$

$$q_{обж.Д} = 130 \text{ МПа}$$

Расчет фланцев на статическую прочность

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

$$M_M = C_F \cdot P_{бм} \cdot b \quad (3.59)$$

$$M_M = 9.274 \times 10^6 \text{ Н*мм}$$

Расчетный изгибающий момент, действующий на фланец в рабочих условиях

$$M_p = C_F \cdot \max [P_{бп} \cdot b + (Q_d + Q_{FM}) \cdot e, |Q_d + Q_{FM}| \cdot e] \quad (3.60)$$

$$M_p = 1.787 \times 10^7 \text{ Н*мм}$$

Расчетные напряжения во фланце при затяжке:

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

$$\sigma_{0M} = \frac{M_M}{\lambda \cdot (S_0 - c_0)^2 \cdot D_{пр}} \quad (3.61)$$

$$\sigma_{0M} = 57.115 \text{ МПа}$$

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

- радиальное напряжение

$$\sigma_{RM} = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + l_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot l_0 \cdot D} \cdot M_M \quad (3.62)$$

$$\sigma_{RM} = 1.353 \text{ МПа}$$

- - окружное напряжение

$$\sigma_{ТМ} = \frac{\beta \cdot Y \cdot M_M}{h^2 \cdot D} - \beta \cdot Z \cdot \sigma_{RМ} \quad (3.63)$$

$$\sigma_{ТМ} = 20.39 \text{ МПа}$$

Расчетные напряжения во фланце в рабочих условиях:

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

$$\sigma_{0p} = \frac{M_p}{\lambda \cdot (S_0 - c_o)^2 \cdot D_{пр}} \quad (3.64)$$

$$\sigma_{0p} = 105.808 \text{ МПа}$$

- максимальные меридиональные мембранные напряжения в обечайке плоского фланца

$$\sigma_{0mp} = \max \left[\frac{Q_d + F + \frac{4|M|}{D_{сп}}}{\pi \cdot (D + S_0) \cdot (S_0 - c_o)}, \frac{Q_d + F - \frac{4|M|}{D_{сп}}}{\pi \cdot (D + S_0) \cdot (S_0 - c_o)} \right] \quad (3.65)$$

$$\sigma_{0mp} = 6.074 \text{ МПа}$$

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

- радиальное напряжение

$$\sigma_{Rp} = \frac{1.33 \cdot \beta \cdot F \cdot h + l_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot l_0 \cdot D} \cdot M_p \quad (3.66)$$

$$\sigma_{Rp} = 2.507 \text{ МПа}$$

- окружное напряжение

$$\sigma_{Tp} = \frac{\beta \cdot Y \cdot M_p}{h^2 \cdot D} - \beta \cdot Z \cdot \sigma_{Rp} \quad (3.67)$$

$$\sigma_{Tp} = 37.773 \text{ МПа}$$

Проверка условий статической прочности фланцев

$$\sigma_{Pmax} = \max \left(\left(\left(\left| \sigma_{0p} - \sigma_{0mp} + \sigma_{Tp} \right| \right) \right) \right. \\ \left. \left(\left(\left| \sigma_{0p} - \sigma_{0mp} + \sigma_{Rp} \right| \right) \right) \right. \\ \left. \left(\left| \sigma_{0p} + \sigma_{0mp} \right| \right) \right) \\ \sigma_{3max} = \max \left(\left| \sigma_{0M} + \sigma_{RM} \right|, \left| \sigma_{0M} + \sigma_{TM} \right| \right)$$

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

PR_3 = "Условия статической прочности НЕ выполняются"

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

$$K_T = 1.3$$

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

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

$$\sigma_{3max} = 77.504 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{Pmax} = 137.508 \text{ МПа}$$

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

$$K_T \cdot \sigma_{д.ф} = 224.9 \text{ МПа}$$

Проверка углов поворота фланцев

Угол поворота приварного встык фланца, плоского фланца

$$\Theta = M_p \cdot y_{ф} \cdot \frac{E_{20}}{E}$$

$$\Theta = 0.0012$$

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"

Аналогичным образом необходимо провести расчеты для остальных фланцевых соединений.

Результатом расчетов являются определенные геометрические размеры фланцевых соединений. Обеспечена статическая прочность и герметичность всех фланцевых соединений в рабочих условиях, условиях испытаний и при затяжке

3.5 Определение необходимости укрепления отверстий

Расчет ведем по [13].

Проведем расчет для люков-лазов, которые предусмотрены в ректификационной колонне для осмотра, монтажа и демонтажа тарелок, а также для засыпания насадки.

Определим расчетный диаметр для цилиндрической оболочки:

$$D_p := D \quad (3.68)$$

Определим расчетный диаметр круглого отверстия люка-лаза:

$$d_p := d + 2 \cdot c = 500 + 2 \cdot 1 = 502.0 \text{ мм} \quad (3.69)$$

Определим расчетный диаметр отверстия, не требующего укрепления при отсутствии избыточной толщины стенки:

$$d_{0p} := 0.4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0.4 \cdot \sqrt{1200 \cdot (10 - 1)} = 41.57 \text{ мм} \quad (3.70)$$

Расчетная толщина стенок укрепляемых элементов:

$$s_p := \frac{P_B \cdot D_p}{2 \cdot \phi \cdot \sigma_D - P_B} = \frac{0.355 \cdot 10^6 \cdot 1200}{\left[2 \cdot 1 \cdot (172.5 \cdot 10^6) - 0.355 \cdot 10^6 \right]} = 1.236 \text{ мм} \quad (3.71)$$

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

$$d_0 := 2 \cdot \left[\left(\frac{s - c}{s_p} \right) - 0.8 \right] \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} \quad (3.72)$$

$$d_0 = 2 \cdot \left[\frac{(10 - 1)}{1.236} - 0.8 \right] \cdot \sqrt{1200 \cdot (10 - 1)} = 1347.0 \text{ мм}$$

Проведем проверку на необходимость укрепления отверстий:

$$\text{Пров2} := \begin{cases} \text{"необходимо укрепление отверстия"} & \text{if } d_0 < d_p \\ \text{"укрепление отверстия не требуется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Пров2} = \text{"укрепление отверстия не требуется"}$$

Исходя из проведенных расчётов, укрепление отверстий для люков-лазов не имеет необходимости.

Для штуцера вывода паров дистиллята диаметром 350 мм, находящегося на эллиптической крышке проведем аналогичный расчет.

Определим расчетный диаметр для стандартной эллиптической крышки:

$$D_p = 2 \cdot D \cdot \sqrt{1 - 3 \left(\frac{r}{D} \right)^2} = 2 \cdot 1200 \cdot \sqrt{1 - 3 \cdot \left(\frac{0}{1200} \right)^2} = 2400.0 \text{ мм}$$

Определим расчетный диаметр круглого отверстия штуцера:

$$d_p = d + 2 \cdot c = 350 + 2 \cdot 2 = 354.0 \text{ мм}$$

Определим расчетный диаметр отверстия, не требующего укрепления при отсутствии избыточной толщины стенки:

$$d_{0p} = 0.4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0.4 \cdot \sqrt{2400.0 \cdot (10 - 2)} = 55.43 \text{ мм}$$

Расчетная толщина стенок укрепляемых элементов:

$$s_p = \frac{P_B \cdot D_p}{2 \cdot \phi \cdot \sigma_D - P_B} = \frac{0.355 \cdot 10^6 \cdot 2400.0}{\left[2 \cdot 1 \cdot (176 \cdot 10^6) - 0.355 \cdot 10^6 \right]} = 2.423 \text{ мм}$$

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

$$d_0 = 2 \cdot \left[\left(\frac{s - c}{s_p} \right) - 0.8 \right] \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 2 \cdot \left[\frac{(10 - 2)}{2.423} - 0.8 \right] \cdot \sqrt{2400.0 \cdot (10 - 2)} = 693.0 \text{ мм}$$

Проведем проверку на необходимость укрепления отверстий:

$$\text{Пров2} = \begin{cases} \text{"необходимо укрепление отверстия"} & \text{if } d_0 < d_p \\ \text{"укрепление отверстия не требуется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Пров2 = "укрепление отверстия не требуется"

Проведем расчет для штуцера ввода паров кубовой смеси диаметром 350 мм на цилиндрической обечайке.

Определим расчетный диаметр для цилиндрической оболочки:

$$D_p = D = 1.2 \times 10^3 \text{ мм}$$

Определим расчетный диаметр круглого отверстия штуцера:

$$d_p = d + 2 \cdot c = 350 + 2 \cdot 2 = 354.0 \text{ мм}$$

Определим расчетный диаметр отверстия, не требующего укрепления при отсутствии избыточной толщины стенки:

$$d_{0p} = 0.4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0.4 \cdot \sqrt{2400.0 \cdot (10 - 2)} = 39.19 \text{ мм}$$

Расчетная толщина стенок укрепляемых элементов:

$$s_p = \frac{P_B \cdot D_p}{2 \cdot \phi \cdot \sigma_d - P_B} = \frac{0.355 \cdot 10^6 \cdot 1200}{2 \cdot 1 \cdot (176 \cdot 10^6) - 0.355 \cdot 10^6} = 1.211 \text{ мм}$$

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

$$d_0 = 2 \cdot \left[\left(\frac{s - c}{s_p} \right) - 0.8 \right] \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 2 \cdot \left[\left(\frac{10 - 2}{1.211} \right) - 0.8 \right] \cdot \sqrt{1200 \cdot (10 - 2)} = 1137.0 \text{ мм}$$

Проведем проверку на необходимость укрепления отверстий:

$$\text{Пров2} = \begin{cases} \text{"необходимо укрепление отверстия"} & \text{if } d_0 < d_p \\ \text{"укрепление отверстия не требуется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Пров2 = "укрепление отверстия не требуется"

Определим расчетный диаметр для цилиндрической оболочки:

$$D_p := D = 1.2 \times 10^3 \text{ мм}$$

Определим расчетный диаметр круглого отверстия штуцера:

$$d_p := d + 2 \cdot c = 65 + 2 \cdot 2 = 67.0 \text{ мм}$$

Определим расчетный диаметр отверстия, не требующего укрепления при отсутствии избыточной толщины стенки:

$$d_{0p} := 0.4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0.4 \cdot \sqrt{1200 \cdot (10 - 1)} = 41.57 \text{ мм}$$

Расчетная толщина стенок укрепляемых элементов:

$$s_p := \frac{P_B \cdot D_p}{2 \cdot \phi \cdot \sigma_D - P_B} = \frac{0.355 \cdot 10^6 \cdot 1200}{\left[2 \cdot 1 \cdot (176 \cdot 10^6) - 0.355 \cdot 10^6 \right]} = 1.211 \text{ мм}$$

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

$$d_0 := 2 \cdot \left[\left(\frac{s - c}{s_p} \right) - 0.8 \right] \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 2 \cdot \left[\left(\frac{10 - 1}{1.211} \right) - 0.8 \right] \cdot \sqrt{1200 \cdot (10 - 1)} = 1378.0 \text{ мм}$$

Проведем проверку на необходимость укрепления отверстий:

$$\text{Пров2} := \begin{cases} \text{"необходимо укрепление отверстия"} & \text{if } d_0 < d_p \\ \text{"укрепление отверстия не требуется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Пров2} = \text{"укрепление отверстия не требуется"}$$

Для штуцеров вывода кубового остатка и отвода жидкости из куба необходимо провести проверку на минимальное расстояние между наружными поверхностями, чтобы определить, можно ли считать отверстия одиночными.

Так как расчетные внутренние диаметры оболочки в месте расположения штуцеров равны, как и расчетные толщины укрепляющих накладных колец, можно воспользоваться формулой:

$$\Delta := 2 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s_2 + s - c)}$$

Отсюда получаем:

$$\Delta := 2 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s_2 + s - c)} = 2 \cdot \sqrt{1200 \cdot (2 + 10 - 1)} = 230.0 \text{ мм}$$

Конструктивно можно принять расстояние между штуцерами больше минимального, чтобы отверстия считались одиночными. Проведем проверку на необходимость укрепления одного из штуцеров, после чего будет понятно, нужно ли укреплять отверстие для второго штуцера, находящегося на эллиптическом днище.

Определим расчетный диаметр для цилиндрической оболочки:

$$D_p := 2D \cdot \sqrt{1 - 3 \left(\frac{r}{D} \right)^2} = 2.4 \times 10^3 \text{ мм}$$

Определим расчетный диаметр круглого отверстия штуцера:

$$d_p := d + 2 \cdot c = 65 + 2 \cdot 1 = 67.0 \text{ мм}$$

Определим расчетный диаметр отверстия, не требующего укрепления при отсутствии избыточной толщины стенки:

$$d_{0p} := 0.4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 0.4 \cdot \sqrt{1200 \cdot (10 - 1)} = 58.79 \text{ мм}$$

Расчетная толщина стенок укрепляемых элементов:

$$s_p := \frac{P_B \cdot D_p}{2 \cdot \phi \cdot \sigma_D - P_B} = \frac{0.355 \cdot 10^6 \cdot 2400}{\left[2 \cdot 1 \cdot (176 \cdot 10^6) - 0.355 \cdot 10^6 \right]} = 2.423 \text{ мм}$$

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

$$d_0 := 2 \cdot \left[\left(\frac{s - c}{s_p} \right) - 0.8 \right] \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 2 \cdot \left[\frac{(10 - 1)}{2.423} - 0.8 \right] \cdot \sqrt{2400 \cdot (10 - 1)} = 857.0 \text{ мм}$$

Проведем проверку на необходимость укрепления отверстий:

$$\text{Пров2} := \begin{cases} \text{"необходимо укрепление отверстия"} & \text{if } d_0 < d_p \\ \text{"укрепление отверстия не требуется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Пров2} = \text{"укрепление отверстия не требуется"}$$

В результате расчетов можно сделать вывод, что в укреплении отверстий в аппарате нет необходимости, избыточная толщина аппарата обеспечивает механическую устойчивость конструкции.

3.6 Подбор опор

Проектируемый аппарат устанавливается на опору. Подбор ведем по [14]. Конструкция цилиндрической опоры с местными косынками приведена на рисунке

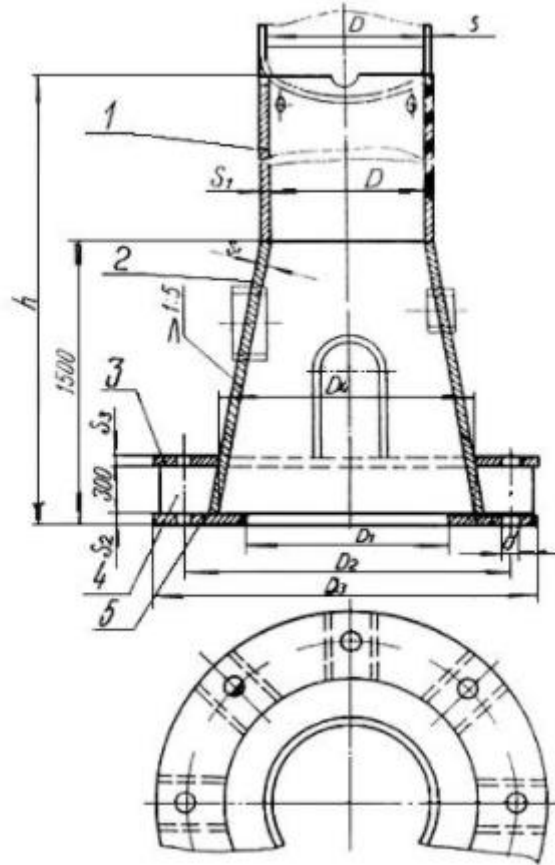


Рис. 12 – Опоры конические с кольцевым опорным поясом

Определим расчетные размеры опорного кольца по следующим формулам:

Внутренний расчетный диаметр кольца определяется выражением:

$$D_{1в} := D_2 \cdot (1 - 0.65 \cdot k_0) = 1.083 \times 10^3 \text{ м} \quad (3.73)$$

Наружный диаметр кольца можно определить с помощью уравнения:

$$D_{3в} := D_2 \cdot (1 + 1.35 \cdot k_0) = 1.443 \times 10^3 \text{ м} \quad (3.74)$$

Опорная площадь кольца находится:

$$F_k := \left(\frac{\pi \cdot D_{3в}^2}{4} \right) - \left(\frac{\pi \cdot D_{1в}^2}{4} \right) = 7.138 \times 10^5 \text{ м}^2 \quad (3.75)$$

Ширину фундаментного кольца найдем:

$$L_{\phi} := D_{3B} - D_{1B} = 360 \text{ м} \quad (3.76)$$

Вычислим момент инерции фундаментного кольца:

$$I_k := \frac{\pi \cdot D_2^3}{8} \cdot L_{\phi} = 2.442 \times 10^{11} \text{ м}^4 \quad (3.77)$$

Рассчитаем момент инерции подошвы фундамента относительно центральной оси:

$$I_{\phi} := 1.3 \cdot I_k = 3.174 \times 10^{11} \text{ м}^4 \quad (3.78)$$

Момент сопротивления опорной площадки кольца определяется по формуле:

$$W_k := \frac{\pi}{32} \cdot \left(\frac{D_{3B}^4 - D_{1B}^4}{D_{3B}} \right) = 2.013 \times 10^8 \text{ м}^3 \quad (3.79)$$

Максимальное напряжение сжатие на опорной поверхности опорного кольца можно определить по:

$$\sigma_{\max} := \frac{M_{\text{ап}}}{F_k} = 7.767 \times 10^{-3} \text{ Па} \quad (3.80)$$

Допускаемая удельная нагрузка на опорной поверхности:

$$q_{\text{дл}} := 23 \cdot 10^6 \text{ Па} \quad (3.81)$$

Проведем проверку выполнения условий:

$$\text{Усл}_{\text{расчета}} := \begin{cases} \text{"Не требуется вносить изменения"} & \text{if } \sigma_{\max} \leq q_{\text{дл}} \\ \text{"Внести изменения в размеры внутреннего кольца"} & \text{otherwise} \end{cases}$$
$$\text{Усл}_{\text{расчета}} = \text{"Не требуется вносить изменения"}$$

Временное сопротивление материала 12X18H10T

$$\sigma_B := 540 \cdot 10^6 \text{ Па}$$

Предел выносливости вычислим по:

$$\sigma_{-1} := 0.44 \cdot \sigma_B = 2.376 \times 10^8 \text{ Па} \quad (3.82)$$

Номинальную расчетная толщина опорного кольца определим по формуле:

$$l := \frac{D_{3B} - D_2}{2} = 121.5 \text{ м} \quad (3.83)$$

$$s_k := 1.73 \cdot l \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{-1}}} = 1.202 \times 10^{-3} \text{ м} \quad (3.84)$$

Принимаем толщину опорного кольца (конструктивно):

$$s_k := 0.04 \text{ м}$$

Определим наибольшее напряжение на опорную поверхность кольца:

$$\sigma := \max\left(\frac{M_{\text{ап}}}{F_k} + \frac{M_{B_max}}{W_k}, \frac{M_{\text{ап}}}{F_k} - \frac{M_{B_min}}{W_k}\right) = 0.189 \text{ Па} \quad (3.85)$$

Общую условную расчетную нагрузку на фундаментные болты определим по:

$$P_{\sigma} := 0.785 \cdot (D_{3B}^2 - D_{1B}^2) \cdot \sigma = 1.346 \times 10^5 \text{ Па} \quad (3.86)$$

Количество анкерных болтов (Задаем конструктивно):

$$n_{\sigma} := 24$$

Нагрузка на один болт:

$$P_{\sigma 1} := \frac{P_{\sigma}}{n_{\sigma}} = 5.608 \times 10^3 \text{ Па} \quad (3.87)$$

Расчетный внутренний диаметр резьбы болта:

Материал для болта Сталь 12Х18Н10Т при температуре 20 градусов.

$$\sigma_{\sigma} := 184 \cdot 10^6 \text{ Па}$$

Расчетный диаметр болтов:

$$d_{\text{рас_болт}} := \sqrt{\frac{4 \cdot P_{\sigma 1}}{\pi \cdot \sigma_{\sigma}}} + c = 0.016 \text{ м} \quad (3.88)$$

Расчетный диаметр болтовой окружности:

$$D_{2B} := (D_2 + 2 \cdot s_{\text{ст}} + 4 \cdot d_{\sigma}) = 1.201 \times 10^3 \text{ м} \quad (3.89)$$

Подобрана опора для аппарата, рассчитаны основные геометрические размеры проверены нагрузки на фундамент, определены наибольшие напряжения на опорную поверхность кольца, нагрузки на фундаментные болты.

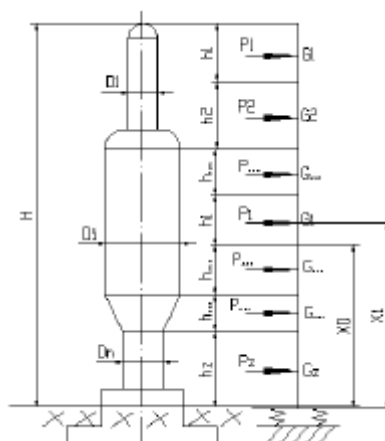
3.7 Поверочный расчет колонны

Поверочному расчету колонного аппарата на прочность, подверженного воздействиям ветровых и сейсмических нагрузок подлежат аппараты, устанавливаемые на открытой площадке или устанавливаемые в районах с сейсмичностью 7 и более баллов по MSK-64 шкале.

3.6.1 Определение расчетных усилий от ветровых нагрузок

В этой главе проведены расчеты на прочность и устойчивость колонны, работающей под действием избыточного внутреннего давления, собственного веса, а также подверженной действию изгибающих моментов от ветровых нагрузок.

Расчет аппарата на ветровую нагрузку ведем согласно [15]



КоРис. 9 – Расчетная схема аппарата

Все расчетные сечения и высоты выбираются в соответствии с расчетной схемой

Колонну поделим на количество участков равных: $hr_z := 6$

Высотой опоры зададимся конструктивно $H_{оп} := 4$ м

Высота аппарата вместе с опорой:

$$H_{ап} := h + H = 30 \text{ м}$$

Проверим необходимость проведения расчета аппарата на ветровую нагрузку:

$$K := \begin{cases} 5 & \text{if } H_{ап} < 10 \\ 1.5 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Усл_{ветр} := \begin{cases} \text{"расчет на ветровые нагрузки необходим"} & \text{if } \frac{H_{ап}}{D} > K \\ \text{"расчет на ветровые нагрузки не обязателен"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Усл_{ветр} = \text{"расчет на ветровые нагрузки необходим"}$$

Аппарат размещен на улице:

Условно разобьём колонну по высоте на 6 участков.

Зададимся высотой участков колонны:

$$h_1 := 5 \text{ м}$$

$$h_2 := 5 \text{ м}$$

$$h_3 := 5 \text{ м}$$

$$h_4 := 5 \text{ м}$$

$$h_5 := 6 \text{ м}$$

$$h_6 = 1.5 \text{ м}$$

Высота центров масс разбитых участков от фундамента:

$$x_6 = \frac{h_6}{2} = 0.75 \text{ м} \quad (3.90)$$

Аналогично определяем центры других участков:

$$x_5 := h_6 + \frac{h_5}{2} = 7 \text{ м}$$

$$x_4 := h_6 + h_5 + \frac{h_4}{2} = 12.5 \text{ м}$$

$$x_3 := h_6 + h_5 + h_4 + \frac{h_3}{2} = 17.5 \text{ м}$$

$$x_2 := h_6 + h_5 + h_4 + h_3 + \frac{h_2}{2} = 22.5 \text{ м}$$

$$x_1 := h_6 + h_5 + h_4 + h_3 + h_2 + \frac{h_1}{2} = 27.5 \text{ м}$$

Определение периода собственных колебаний: (минимальный и максимальный)

Модуль упругости материала в рабочих условиях:

$$E := \text{Floor} \left[\text{linterp} \left[\begin{pmatrix} 100 \\ 150 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 2 \cdot 10^5 \\ 2 \cdot 10^5 \end{pmatrix}, t_{\text{раб}}, 0.5 \right], 0.5 \right] = 2 \times 10^5 \text{ МПа}$$

Модуль упругости при гидроиспытаниях:

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

Прибавки к расчетным толщинам конструктивных элементов:

$$c := 0.01 \text{ м}$$

Момент инерции верхнего основного металлического сечения аппарата относительно центральной оси:

$$I_1 := \left(\frac{\pi \cdot D_1^3}{8} \right) \cdot (s_1 - c) = 2.713 \times 10^{-3} \text{ м}^4 \quad (3.91)$$

Момент инерции нижнего основного металлического сечения аппарата относительно центральной оси:

$$I_2 := \left(\frac{\pi \cdot D_1^3}{8} \right) \cdot (s_1 - c) = 2.713 \times 10^{-3} \text{ м}^4 \quad (3.92)$$

Период основного тона собственных колебаний аппарата постоянного сечения с приблизительно равномерно распределенной по высоте аппарата массой следует определять по формуле

$$T = T_0 \cdot \sqrt{1 + \frac{4 \cdot E \cdot I}{H \cdot C_{\phi} \cdot I_{\phi}}} \quad \text{м}^4 \quad (3.93)$$

$$T_0 = 1.8 \cdot H \cdot \sqrt{\frac{G_{\text{к.}}}{g} \cdot \frac{H}{E \cdot I}} \quad \text{м}^4 \quad (3.94)$$

Момент инерции верхнего основного металлического сечения аппарата относительно центральной оси:

$$I_1 = \left(\frac{\pi \cdot D_{\text{вн}}^3}{8} \right) \cdot (s - C) \quad \text{м}^4 \quad (3.95)$$

$$I_1 = \frac{\pi \cdot 1.2^3}{8} \cdot (0.010 - 0.001) = 0.006107 \text{ м}^4$$

Момент инерции нижнего основного металлического сечения аппарата относительно центральной оси:

$$I_2 = \left(\frac{\pi \cdot D_{\text{вн}}^3}{8} \right) \cdot (s - C) \quad \text{м}^4 \quad (3.96)$$

$$I_2 = \frac{\pi \cdot 1.2^3}{8} \cdot (0.010 - 0.001) = 0.006107 \text{ м}^4$$

Минимальный период собственных колебаний в пустом аппарате

$$T_{0.\text{min}} = 1.8 \cdot H \cdot \sqrt{\frac{G_{\text{к.п.}}}{g} \cdot \frac{H}{E \cdot I_1}} = 688.919 \text{ с}$$

Максимальный период собственных колебаний при гидравлических испытаниях:

$$T_{0.\text{max}} = 1.8 \cdot H \cdot \sqrt{\frac{G_{\text{к.г.}}}{g} \cdot \frac{H}{E \cdot I_1}} = 1.358 \times 10^3 \text{ с}$$

В условиях гидроиспытания

$$T_{0.\text{max}} = 1.358 \times 10^3 \text{ с}$$

В условиях монтажа

$$T_{0.\text{min}} = 688.919 \text{ с}$$

Определим коэффициент Q для каждого участка:

$$\Theta_1 = \left(\frac{x_1}{10} \right)^{0.32} = 1.382 \quad \text{м}^4 \quad (3.97)$$

$$\Theta_2 = \left(\frac{x_2}{10} \right)^{0.32} = 1.296$$

$$\Theta_3 = \left(\frac{x_3}{10} \right)^{0.32} = 1.196$$

$$\Theta_4 = \left(\frac{x_4}{10} \right)^{0.32} = 1.074$$

$$\Theta_5 = \left(\frac{x_5}{10} \right)^{0.32} = 0.892$$

$$\Theta_6 = \left(\frac{x_6}{10} \right)^{0.32} = 0.597$$

$\underline{K} = 0.7$ аэродинамический коэффициент для кругового цилиндра согласно таблице 2 [15]

Нормативное значение статической составляющей для i-го участка аппарата

$$q_{1ст} = q_0 \cdot \Theta_1 \cdot K = 367.678 \quad \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \quad (3.98)$$

$$q_{2ст} = q_0 \cdot \Theta_2 \cdot K = 344.81 \quad \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$$

$$q_{3ст} = q_0 \cdot \Theta_3 \cdot K = 318.166 \quad \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$$

$$q_{4ст} = q_0 \cdot \Theta_4 \cdot K = 285.689 \quad \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$$

$$q_{5ст} = q_0 \cdot \Theta_5 \cdot K = 237.308 \quad \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$$

$$q_{6ст} = q_0 \cdot \Theta_6 \cdot K = 158.932 \quad \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$$

Статическая составляющая ветровой нагрузки на i-м участке аппарата

$$P_{1ст} = q_{1ст} \cdot D_{нар1} \cdot h_1 = 2.243 \times 10^3 \quad \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \quad (3.99)$$

$$P_{2ст} = q_{2ст} \cdot D_{нар2} \cdot h_2 = 2.103 \times 10^3 \frac{H}{M^2}$$

$$P_{3ст} = q_{1ст} \cdot D_{нар2} \cdot h_1 = 2.243 \times 10^3 \frac{H}{M^2}$$

$$P_{4ст} = q_{2ст} \cdot D_{нар2} \cdot h_2 = 2.103 \times 10^3 \frac{H}{M^2}$$

$$P_{5ст} = q_{1ст} \cdot D_{нар2} \cdot h_1 = 2.243 \times 10^3 \frac{H}{M^2}$$

$$P_{6ст} = q_{2ст} \cdot D_{нар2} \cdot h_2 = 2.103 \times 10^3 \frac{H}{M^2}$$

Пульсационную составляющую ветровой нагрузки на i -м участке определяют по формуле

$$P_{ид} = v \cdot G_i \cdot \xi \cdot \eta_i^2 \quad (3.100)$$

где: v - коэффициент, учитывающий корреляцию пульсации скорости ветра (табл. 3).

G_i – массы участков

$$v = 0.968 - 0.025 \cdot \sqrt{H} = 0.953 \quad (3.101)$$

$$\xi_{ww} = \frac{T_{0.min} \cdot \sqrt{q_0}}{790} = 16.999 \quad (3.102)$$

Аналогично рассчитаем:

$$\xi_{ГИ} = \frac{T_{0.max} \cdot \sqrt{q_0}}{790} = 33.515$$

$$\xi_M = \frac{T_{0.min} \cdot \sqrt{q_0}}{790} = 16.999$$

Коэффициент динамичности определяют по рисунку 5 или формуле:

$$\xi = 1.1 + \sqrt{15.5 \cdot \xi_M} = 17.332 \quad (3.103)$$

Аналогично:

$$\xi_{ГИ} = 1.1 + \sqrt{15.5 \cdot \xi_{ГИ}} = 23.892$$

$$\xi_M = 1.1 + \sqrt{15.5 \cdot \xi_M} = 17.332$$

η_i - приведенное относительное ускорение центра тяжести i -го участка

$$\eta_i = \alpha_i \cdot \frac{\sum_{i=1}^3 (\alpha_i \cdot m_i \cdot P_{iCT})}{\sum_{i=1}^3 (\alpha_i^2 \cdot G_i)} \quad (3.104)$$

где: α_i - относительное перемещение центра тяжести i -го участка

m_i - коэффициент пульсации скоростного напора ветра для середины i -го участка (определяется по чертежу 8).

$$\alpha_i = \gamma \cdot \beta_i \cdot \frac{H}{2 \cdot E \cdot \Pi} + \frac{x_i}{H \cdot C\phi \cdot I\phi} \quad (3.105)$$

Рассчитаем коэффициент β :

$$\beta_1 = \frac{1}{2} \cdot \left[3 \cdot \left(\frac{x_1}{H} \right)^2 - \left(\frac{x_1}{H} \right)^2 \right] = 6.173 \times 10^3$$

$$\beta_2 = \frac{1}{2} \cdot \left[3 \cdot \left(\frac{x_2}{H} \right)^2 - \left(\frac{x_2}{H} \right)^2 \right] = 4.133 \times 10^3$$

$$\beta_3 = \frac{1}{2} \cdot \left[3 \cdot \left(\frac{x_3}{H} \right)^2 - \left(\frac{x_3}{H} \right)^2 \right] = 2.5 \times 10^3$$

$$\beta_4 = \frac{1}{2} \cdot \left[3 \cdot \left(\frac{x_4}{H} \right)^2 - \left(\frac{x_4}{H} \right)^2 \right] = 1.276 \times 10^3$$

$$\beta_5 = \frac{1}{2} \cdot \left[3 \cdot \left(\frac{x_5}{H} \right)^2 - \left(\frac{x_5}{H} \right)^2 \right] = 400$$

$$\beta_6 = \frac{1}{2} \cdot \left[3 \cdot \left(\frac{x_6}{H} \right)^2 - \left(\frac{x_6}{H} \right)^2 \right] = 32.653$$

Диаметр фундамента должен быть кратным 300 мм, соответственно примем конструктивно с запасом диаметр фундамента:

$$d\phi = 1.8 \text{ м}$$

Момент инерции фундамента тогда:

$$I_{\phi} = \frac{\pi}{64} \cdot d\phi^4 \quad (3.106)$$

Подставляя значения получим:

$$I_{\phi} = 0.515 \text{ м}^4$$

Относительное перемещение центра тяжести i -го участка тогда:

$$\alpha_1 = \gamma \cdot \beta_1 \cdot \frac{H}{2 \cdot E \cdot I_1} + \frac{x_1}{H \cdot C_{\phi} \cdot I_{\phi}} \quad (3.107)$$

Для остальных участков:

$$\alpha_2 = \gamma \cdot \beta_2 \cdot \frac{H}{2 \cdot E \cdot I_1} + \frac{x_2}{H \cdot C_{\phi} \cdot I_{\phi}}$$

$$\alpha_3 = \gamma \cdot \beta_3 \cdot \frac{H}{2 \cdot E I_1} + \frac{x_3}{H \cdot C_{\phi} \cdot I_{\phi}}$$

$$\alpha_4 = \gamma \cdot \beta_4 \cdot \frac{H}{2 \cdot E \cdot I_1} + \frac{x_4}{H \cdot C_{\phi} \cdot I_{\phi}}$$

$$\alpha_5 = \gamma \cdot \beta_5 \cdot \frac{H}{2 \cdot E \cdot I_1} + \frac{x_5}{H \cdot C_{\phi} \cdot I_{\phi}}$$

$$\alpha_6 = \gamma \cdot \beta_6 \cdot \frac{H}{2 \cdot E I_1} + \frac{x_6}{H \cdot C_{\phi} \cdot I_{\phi}}$$

Коэффициент пульсации скоростного напора ветра для середины i -го участка рассчитаем по уравнению:

$$m_1 = 0.76 \cdot \left(\frac{x_1}{10} \right)^{-0.15} = 0.653 \quad (3.108)$$

Аналогично для остальных участков:

$$m_2 = 0.76 \cdot \left(\frac{x_2}{10} \right)^{-0.15} = 0.673$$

$$m_3 = 0.76 \cdot \left(\frac{x_3}{10} \right)^{-0.15} = 0.699$$

$$m_4 = 0.76 \cdot \left(\frac{x_4}{10} \right)^{-0.15} = 0.735$$

$$m_5 = 0.76 \cdot \left(\frac{x_5}{10} \right)^{-0.15} = 0.802$$

$$m_6 = 0.76 \cdot \left(\frac{x_6}{10} \right)^{-0.15} = 0.968$$

Приведенное относительное ускорение центра тяжести *i*-го участка

$$\eta_1 = \alpha_1 \cdot \frac{\alpha_1 \cdot m_1 \cdot P_{1CT} + \alpha_2 \cdot m_2 \cdot P_{2CT} + \alpha_3 \cdot m_3 \cdot P_{3CT} + \alpha_4 \cdot m_4 \cdot P_{4CT} + \alpha_5 \cdot m_5 \cdot P_{5CT} + \alpha_6 \cdot m_6 \cdot P_{6CT}}{\alpha_1^2 \cdot G_1 + \alpha_2^2 \cdot G_2 + \alpha_3^2 \cdot G_3 + \alpha_4^2 \cdot G_4 + \alpha_5^2 \cdot G_5 + \alpha_6^2 \cdot G_6} \quad (3.109)$$

Аналогично для других условий и сечений. Результаты приведены ниже.

В рабочих условиях

$$\eta_1 = 1.315 \times 10^5$$

$$\eta_2 = 8.805 \times 10^4$$

$$\eta_3 = 5.326 \times 10^4$$

$$\eta_4 = 2.717 \times 10^4$$

$$\eta_5 = 8.522 \times 10^3$$

$$\eta_6 = 695.719$$

В условиях гидроиспытания

$$\eta_{ги1} = 3.044 \times 10^4$$

$$\eta_{ги2} = 2.038 \times 10^4$$

$$\eta_{ги3} = 1.233 \times 10^4$$

$$\eta_{ги4} = 6.29 \times 10^3$$

$$\eta_{ги5} = 1.973 \times 10^3$$

$$\eta_{ги6} = 161.038$$

В условиях монтажа

$$\eta_{м1} = 6.535 \times 10^4$$

$$\eta_{M2} = 4.375 \times 10^4$$

$$\eta_{M3} = 2.647 \times 10^4$$

$$\eta_{M4} = 1.35 \times 10^4$$

$$\eta_{M5} = 4.235 \times 10^3$$

$$\eta_{M6} = 345.698$$

Динамическая составляющая ветровой нагрузки определяется по уравнению:

$$P_{1д} = v \cdot G_1 \cdot \xi \cdot \eta_1 \quad (3.110)$$

Аналогично для всех испытаний и сечений. Результаты расчета:

В рабочих условиях

$$P_{1д} = 3.477 \times 10^4$$

$$P_{2д} = 2.327 \times 10^4$$

$$P_{3д} = 1.408 \times 10^4$$

$$P_{4д} = 3.477 \times 10^4$$

$$P_{5д} = 2.909 \times 10^4$$

$$P_{6д} = 1.232 \times 10^4$$

В условиях гидроиспытания

$$P_{ги1д} = 5.2 \times 10^4$$

$$P_{ги2д} = 3.481 \times 10^4$$

$$P_{ги3д} = 2.106 \times 10^4$$

$$P_{ги4д} = 1.074 \times 10^4$$

$$P_{ги5д} = 3.369 \times 10^3$$

$$P_{ги6д} = 51.346$$

В условиях монтажа

$$P_{M1д} = 3.671 \times 10^4$$

$$P_{M2д} = 2.458 \times 10^4$$

$$P_{M3д} = 1.487 \times 10^4$$

$$P_{M4д} = 7.585 \times 10^3$$

$$P_{M5д} = 2.379 \times 10^3$$

$$P_{M6д} = 79.96$$

Ветровая нагрузка на i -м участке рассчитывается по формуле:

$$P_1 = P_{1ст} + P_{1д} = 3.701 \times 10^4 \quad (3.111)$$

В рабочих условиях

$$P_2 = P_{2ст} + P_{2д} = 2.538 \times 10^4$$

$$P_3 = P_{3ст} + P_{3д} = 1.632 \times 10^4$$

$$P_4 = P_{4ст} + P_{4д} = 3.687 \times 10^4$$

$$P_5 = P_{5ст} + P_{5д} = 3.134 \times 10^4$$

$$P_6 = P_{6ст} + P_{6д} = 1.442 \times 10^4$$

В условиях гидроиспытания

$$P_{1ги} = P_{1ст} + P_{ги1д} = 5.424 \times 10^4$$

$$P_{2ги} = P_{2ст} + P_{ги2д} = 3.691 \times 10^4$$

$$P_{3ги} = P_{3ст} + P_{ги3д} = 2.33 \times 10^4$$

$$P_{4ги} = P_{4ст} + P_{ги1д} = 5.41 \times 10^4$$

$$P_{5ги} = P_{5ст} + P_{ги5д} = 5.612 \times 10^3$$

$$P_{6ги} = P_{6ст} + P_{ги6д} = 2.155 \times 10^3$$

В условиях монтажа

$$P_{1м} = P_{1ст} + P_{M1д} = 3.895 \times 10^4$$

$$P_{2M} = P_{2CT} + P_{M2D} = 2.668 \times 10^4$$

$$P_{3M} = P_{3CT} + P_{M3D} = 1.711 \times 10^4$$

$$P_{4M} = P_{4CT} + P_{M4D} = 9.688 \times 10^3$$

$$P_{5M} = P_{5CT} + P_{M5D} = 4.622 \times 10^3$$

$$P_{6M} = P_{6CT} + P_{M6D} = 2.183 \times 10^3$$

Изгибающий момент от действия ветровой нагрузки на обслуживающие площадки.

Изгибающий момент в расчетном сечении на высоте x_0 от действия ветровой нагрузки на обслуживающую площадку рассчитывается по формуле:

$$M_{vj} = 1.4 \cdot q_0 \cdot e_j \cdot (x_j - x_0) \cdot (1 + 0.75 \cdot \xi \cdot \chi_j \cdot m_j) \cdot A_j^2 \quad (3.112)$$

На колонне предусмотрены шесть площадки обслуживания для каждой секции.

Их площади:

$$A_1 = 2.5 \text{ м}^2$$

$$A_2 = 2.5 \text{ м}^2$$

$$A_3 = 2.5 \text{ м}^2$$

$$A_4 = 2.5 \text{ м}^2$$

$$A_5 = 2.5 \text{ м}^2$$

$$A_6 = 2.5 \text{ м}^2$$

Их координаты принимаем конструктивно:

$$x_{j1} = 23.5 \text{ м}$$

$$x_{j2} = 19.5 \text{ м}$$

$$x_{j3} = 15.5 \text{ м}$$

$$x_{j4} = 11.5 \text{ м}$$

$$x_{j5} = 7.5 \text{ м}$$

$$x_{j6} = 3.5 \text{ м}$$

Коэффициент m_j определяется по чертежу 8 или по формуле:

$$m_{j1} = 0.76 \cdot \left(\frac{x_{j1}}{10}\right)^{-0.15} = 0.659 \quad (3.113)$$

Аналогично для остальных участков:

$$m_{j2} = 0.76 \cdot \left(\frac{x_{j2}}{10}\right)^{-0.15} = 0.675$$

$$m_{j3} = 0.76 \cdot \left(\frac{x_{j3}}{10}\right)^{-0.15} = 0.696$$

$$m_{j4} = 0.76 \cdot \left(\frac{x_{j4}}{10}\right)^{-0.15} = 0.723$$

$$m_{j5} = 0.76 \cdot \left(\frac{x_{j5}}{10}\right)^{-0.15} = 0.76$$

$$m_{j6} = 0.76 \cdot \left(\frac{x_{j6}}{10}\right)^{-0.15} = 0.821$$

Коэффициент χ_j определяется по формуле:

$$\chi_{j1} = 1.56 \cdot \left(\frac{x_{j1}}{H}\right)^{1.6} = 1.537 \times 10^3 \text{ м}^4 \quad (3.114)$$

Аналогично для остальных участков

$$\chi_{j2} = 1.56 \cdot \left(\frac{x_{j2}}{H}\right)^{1.6} = 1.176 \times 10^3$$

$$\chi_{j3} = 1.56 \cdot \left(\frac{x_{j3}}{H}\right)^{1.6} = 853.202$$

$$\chi_{j4} = 1.56 \cdot \left(\frac{x_{j4}}{H}\right)^{1.6} = 570.717$$

$$\chi_{j5} = 1.56 \cdot \left(\frac{x_{j5}}{H}\right)^{1.6} = 333.132$$

$$\chi_{j6} = 1.56 \cdot \left(\frac{x_{j6}}{H}\right)^{1.6} = 147.115$$

Определим коэффициент Q_j для каждой обслуживающей площадки.
(черт.6)

$$\vartheta_{j1} = \left(\frac{x_{j1}}{10} \right)^{0.37} = 1.424 \quad (3.115)$$

Аналогично:

$$\vartheta_{j2} = \left(\frac{x_{j2}}{10} \right)^{0.37} = 1.339$$

$$\vartheta_{j3} = \left(\frac{x_{j3}}{10} \right)^{0.37} = 1.243$$

$$\vartheta_{j4} = \left(\frac{x_{j4}}{10} \right)^{0.37} = 1.133$$

$$\vartheta_{j5} = \left(\frac{x_{j5}}{10} \right)^{0.37} = 1$$

$$\vartheta_{j6} = \left(\frac{x_{j6}}{10} \right)^{0.37} = 0.828$$

Изгибающий момент от каждой площадки в отдельности для основания колонны:

$$M_{vj1} = 1.4 \cdot q_0 \cdot \vartheta_{j1} \cdot (x_{j1} - x_0) \cdot (1 + 0.75 \cdot \xi \cdot \chi_{j1} \cdot m_{j1}) \cdot A_1 m^4 \quad (3.116)$$

Аналогично определяется и для других площадок.

Результаты:

В рабочих условиях:

$$M_{vj1} = 5.482 \times 10^8$$

$$M_{vj2} = 3.309 \times 10^8$$

$$M_{vj3} = 1.786 \times 10^8$$

$$M_{vj4} = 8.077 \times 10^7$$

$$M_{vj5} = 2.627 \times 10^7$$

$$M_{vj6} = 3.457 \times 10^6$$

В условиях гидроиспытания:

$$M_{vj1ги} = 7.556 \times 10^8$$

$$M_{vj2ги} = 4.562 \times 10^8$$

$$M_{vj3ги} = 2.462 \times 10^8$$

$$M_{vj4ги} = 1.113 \times 10^8$$

$$M_{vj5ги} = 3.621 \times 10^7$$

$$M_{vj6ги} = 4.765 \times 10^6$$

В условиях монтажа:

$$M_{vj1м} = 5.482 \times 10^8$$

$$M_{vj2м} = 3.309 \times 10^8$$

$$M_{vj3м} = 1.786 \times 10^8$$

$$M_{vj4м} = 8.077 \times 10^7$$

$$M_{vj5м} = 2.627 \times 10^7$$

$$M_{vj6м} = 3.457 \times 10^6$$

Суммарный изгибающий момент для основания колонны:

В рабочих условиях

$$M_{vj} = M_{vj1} + M_{vj2} + M_{vj3} + M_{vj4} + M_{vj5} + M_{vj6} \quad (3.117)$$

В результате получим:

$$M_{vj} = 1.168 \times 10^9 \text{ МН*м}$$

В условиях гидроиспытания:

$$M_{vjги} = 1.61 \times 10^9 \text{ МН*м}$$

В условиях монтажа:

$$M_{vjм} = 1.168 \times 10^9 \text{ МН*м}$$

Суммарный изгибающий момент для сечения (I - I)

В рабочих условиях:

$$M_{vjI} = 0.14 \text{ МН*м}$$

В условиях гидроиспытания:

$$M_{vjгиI} = 0.144 \text{ МН*м}$$

В условиях монтажа:

$$M_{vjмI} = 0.134 \text{ МН*м}$$

Суммарный изгибающий момент для сечения (Z - Z)

В рабочих условиях:

$$M_{vjZ} = 0.142 \text{ МН*м}$$

В условиях гидроиспытания:

$$M_{vjгиZ} = 0.146 \text{ МН*м}$$

В условиях монтажа:

$$M_{vjмZ} = 0.136 \text{ МН*м}$$

Данный аппарат не подлежит расчету на сейсмические воздействия, так как он установлен в районе с сейсмичностью 5 баллов.

Проведен расчет на ветровую нагрузку, определены изгибающие моменты в различных сечениях для рабочих условий, условий испытания и условий монтажа.

3.6.2 Расчет аппарата на прочность

Расчет ведем по ГОСТ 51274-99 "Сосуды и аппараты колонного типа. Нормы и методы расчета на прочность."

Расчетные сечения.

При расчете колонного аппарата устанавливаются следующие расчетные сечения:

1. (I - I) - поперечное сечение корпуса колонны в месте присоединения обечайки к нижнему днищу.

2. (Z - Z) - место соединения опорной обечайки с днищем.

3. (X - X) - поперечное сечение опорной обечайки в месте расположения отверстия.

4. (Y - Y) - поперечное сечение опорной обечайки в месте присоединения опорного кольца.

Расчетные нагрузки и расчетная температура.

Расчетные давления.

1. Расчетное давление в рабочих условиях $P=0,455$ МПа

2. Гидростатическое давление $P_H=g*(H - x_0)$

Нагрузки от собственного веса.

G_p - вес колонны в рабочих условиях, включая вес обслуживающих площадок, изоляции, внутренних устройств и рабочей среды.

$G_{ги}$ - вес колонны при гидроиспытании, включая вес жидкости, заполняющей колонну.

G_m - вес колонны в условиях монтажа

$$P_H = 10^{-2} \cdot (H - 3.1)$$

$$P_H = 0.269 \text{ МПа}$$

$$G_p = 0.098 \text{ МН}$$

$$G_{ги} = 0.387 \text{ МН}$$

$$G_m = 0.183 \text{ МН}$$

Расчетные изгибающие моменты.

M_g - максимальный изгибающий момент от действия эксцентрических весовых нагрузок.

К ним относятся нагрузки от площадок обслуживания, подводящих трубопроводов.

По данным технологических служб принимаем для всех расчетных сечений $M_g=0.2$ МН*м

M_v - изгибающие моменты от действия ветровых нагрузок.

M_r - изгибающий момент от сейсмических воздействий.

$$M_g = 0.2$$

Сочетание нагрузок.

Колонный аппарат должен быть рассчитан для трех условий работы:

1. рабочие условия;
2. условия испытания;
3. условия монтажа.

3.6.2.1 Расчет на прочность корпуса аппарата

Стенка колонного аппарата должна быть рассчитана на прочность и устойчивость. Ниже представлена расчетная схема корпуса на прочность:

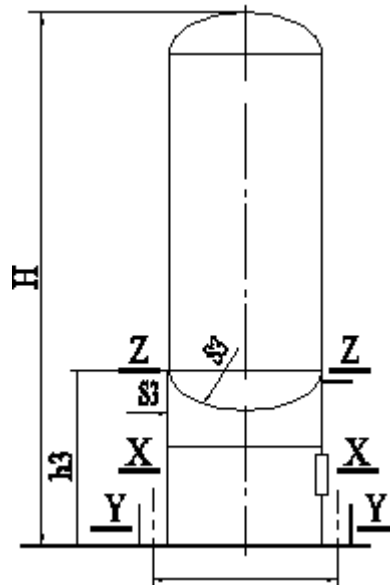


Рис. 13 – Расчетная схема корпуса аппарата

Расчет напряжений для данной колонны производят для нижнего сечения корпуса (сечение I - I) для рабочих условий и условий монтажа.

Продольные напряжения σ_x .

- на наветренной стороне:

$$\sigma_{x1} = \frac{P \cdot (D + S)}{4 \cdot (S - C)} - \frac{F}{\pi \cdot D1 \cdot (S - C)} + \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D1^2 \cdot (S - C)} \quad (3.118)$$

- на подветренной стороне:

$$\sigma_{x2} = \frac{P \cdot (D + S)}{4 \cdot (S - C)} - \frac{F}{\pi \cdot D1 \cdot (S - C)} - \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D1^2 \cdot (S - C)}$$

где $F_p = G_p$ осевое сжимающее усилие для рабочих условий;

$F_M = G_M$ осевое сжимающее усилие для условий монтажа;

$M_p = M_{vjI} + M_g$ изгибающий момент для рабочих условий;

$M_m = M_{vjmI} + M_g$ изгибающий момент для условий монтажа.

Итого на наветренной стороне:

$$\sigma_{x1p} = \frac{P \cdot (D + S)}{4 \cdot (S - C)} - \frac{F_p}{\pi \cdot D \cdot (S - C)} + \frac{4 \cdot M_p}{\pi \cdot D^2 \cdot (S - C)}$$

$$\sigma_{x1m} = \frac{F_M}{\pi \cdot D \cdot (S - C)} + \frac{4 \cdot M_m}{\pi \cdot D^2 \cdot (S - C)}$$

На подветренной стороне:

$$\sigma_{x2p} = \frac{P \cdot (D + S)}{4 \cdot (S - C)} - \frac{F_p}{\pi \cdot D \cdot (S - C)} - \frac{4 \cdot M_p}{\pi \cdot D^2 \cdot (S - C)}$$

$$\sigma_{x2m} = \frac{F_M}{\pi \cdot D \cdot (S - C)} - \frac{4 \cdot M_m}{\pi \cdot D^2 \cdot (S - C)}$$

Подставляя в формулы эти значения получим:

на наветренной стороне:

$$\sigma_{x1p} = 42.446 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{x1m} = 38.207 \text{ МПа}$$

на подветренной стороне:

$$\sigma_{x2p} = -24.359 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{x2m} = -27.42 \text{ МПа}$$

Кольцевые напряжения σ_y

$$\sigma_y = \frac{P \cdot (D + S)}{2(S - C)} \quad (3.119)$$

Получим:

$$\sigma_y = 23.864 \text{ МПа}$$

Так как продольные напряжения в рабочих условиях значительно превышают продольные напряжения в условиях монтажа, эквивалентные напряжения в сечении I - I рассчитываем для рабочих условий.

Эквивалентные напряжения.

- на наветренной стороне:

$$\sigma_{E1} = \sqrt{\sigma_{x1p}^2 - \sigma_{x1p} \cdot \sigma_y \cdot \frac{\phi_t}{\phi_p} + \left(\sigma_y \cdot \frac{\phi_t}{\phi_p} \right)^2}$$

- на подветренной стороне:

$$\sigma_{E2} = \sqrt{\sigma_{x2p}^2 - \sigma_{x2p} \cdot \sigma_y \cdot \frac{\phi_t}{\phi_p} + \left(\sigma_y \cdot \frac{\phi_t}{\phi_p} \right)^2}$$

где: $\phi_t = 1$ - коэф. прочности кольцевого сварного шва

$\phi_p = 1$ - коэф. прочности продольного сварного шва

Подставляем значения напряжений в формулы и получаем:

$$\sigma_{E1} = 36.854 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{E2} = 41.763 \text{ МПа}$$

Проверка условий прочности.

Должны выполняться следующие условия

на наветренной стороне:

$$\max \{ |\sigma_{x1}| ; \sigma_{E1} \} \leq [\sigma]_k \cdot \phi_t$$

на подветренной стороне:

$$\max \{ |\sigma_{x2}| ; \sigma_{E2} \} \leq [\sigma]_k \cdot \phi_t$$

где $[\sigma]_k = 172,5$ МПа - допускаемое напряжение для корпуса колонны.

Условие прочности выполняется.

Исходя из проведенных расчетов, можно сделать вывод, что прочность и устойчивость стенки корпуса обеспечена при рабочих условиях и условиях монтажа

3.6.2.2. Расчет опорной обечайки.

Проводят проверку опорной обечайки на прочность и устойчивость. Расчет опорной обечайки производят для рабочих условий и условий гидроиспытания. В качестве материала примем Ст. 3 сп, толщину примем $s_3 = 10 \text{ мм} = 0.01 \text{ м}$. Расчетная схема представлена на рисунке

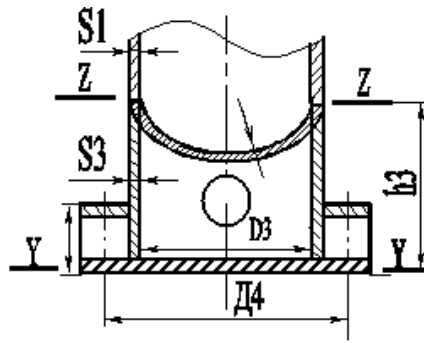


Рис. 14 – Расчетная схема опорной обечайки

Проверка прочности сварного шва, соединяющего корпус колонны с опорной обечайкой (сечение Z - Z):

$$\sigma_x = \frac{1}{\pi \cdot D_3 \cdot a_1} \cdot \left(\frac{4M_z}{D_3} + F_z \right)^2 \quad (3.120)$$

Зададимся:

$$M_{zp} = M_g + M_{vjz}$$

$$M_{zги} = M_g + M_{vjгиz}$$

$$F_{zp} = G_p$$

$$F_{zги} = G_{ги}$$

Получаем:

$$\sigma_{xp} = 16.419 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{xги} = 20.429 \text{ МПа}$$

$$\phi_s \cdot (\sigma_o) = 123.2 \text{ МПа}$$

Условие прочности выполняется.

Проверка устойчивости опорной обечайки в зоне отверстия под люк-лаз (сечение X - X). Для доступа к нижнему днищу и участкам трубопроводов внутри опорной обечайки в ней предусмотрено отверстие. В ней есть также и отверстия для вывода трубопроводов, но так как отверстие под люк-лаз самое большое, то проверка устойчивости производится для этого сечения.

Расчетные нагрузки принимаются как для основания колонны.

Проверка устойчивости производится по формуле:

$$\frac{F_y}{\psi_1 \cdot (F)} + \frac{M_y F_y \cdot \psi_3 \cdot D_3}{\psi_2 \cdot (M)} \leq 1.0 \quad (3.121)$$

Определяем допускаемые осевое сжимающее усилие и изгибающий момент.

Допускаемые осевое сжимающее усилие определяется по формуле:

$$(F) = \frac{(F_{\Pi})}{\sqrt{1 + \left[\frac{(F_{\Pi})}{(F_e)} \right]^2}} \quad (3.123)$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия прочности:

$$(F_{\Pi}) = \pi \cdot (D_3 + s_3 - C) \cdot (s_3 - C) \cdot (\sigma_0) \text{ м}^4 \quad (3.124)$$

$$(F_{\Pi}) = 12.806 \text{ МН}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия местной устойчивости в пределах упругости принимается равным меньшему из значений:

$$(F_e) = \min ((F_{e1}) ; (F_{e2})) \quad (3.125)$$

$$(F_{e1ги}) = \frac{310 \cdot 10^{-6} \cdot E}{\text{пуги}} \cdot D_3^2 \cdot \left[\frac{100(s_3 - C)}{D_3} \right]^{2.5}$$

$$(F_{e1}) = \frac{310 \cdot 10^{-6} \cdot E}{\text{пу}} \cdot D_3^2 \cdot \left[\frac{100(s_3 - C)}{D_3} \right]^{2.5}$$

где $\text{пу}=2.5$ - коэффициент устойчивости колонны для рабочих условий.

$\text{пу}=1.8$ - коэффициент устойчивости колонны для условий испытания.

Для рабочих условий.

$$(F_{e1}) = 117.347 \text{ МН}$$

Для условий испытания.

$$(F_{e1ги}) = 156.463 \text{ МН}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия общей устойчивости в пределах упругости рассчитывают по формуле:

$$L_0 = 1$$

- приведенная длина.

$$L_{пр} = 2 \cdot L_0$$
$$\lambda_1 = \frac{2.83 \cdot L_{пр}}{D_3 + s_3 - C} \quad (3.126)$$

Получаем

$$\lambda_1 = 4.643$$
$$(Fe_2) = \frac{\pi \cdot (D_3 + s_3 - C) \cdot (s_3 - C) \cdot E}{\pi y} \cdot \left(\frac{\pi}{\lambda_1} \right)^2 \quad (3.127)$$

где λ_1 - гибкость колонны.

Получим:

$$(Fe_2) = 2.776 \times 10^3 \text{ МН}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия местной устойчивости в пределах упругости принимаем

$$(Fe) = (Fe_1)$$

$$(Fe) = 117.347 \text{ МН}$$

$$(Fe_{ги}) = (Fe_{ги})$$

$$(Fe_{ги}) = 156.463 \text{ МН}$$

Допускаемые осевое сжимающее усилие:

$$(F) = \frac{(F_{п})}{\sqrt{1 + \left[\frac{(F_{п})}{(Fe)} \right]^2}} \quad (3.128)$$

Подставляя значения:

$$(F) = 12.731 \text{ МН}$$

$$(F_{ги}) = 12.764 \text{ МН}$$

Допускаемый изгибающий момент рассчитывается по формуле:

$$(M) = \frac{(M_{п})}{\sqrt{1 + \left[\frac{(M_{п})}{(Me)} \right]^2}} \quad (3.129)$$

где: $[M]_{п}$ - допускаемый изгибающий момент из условия прочности;

[M]E - допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости.

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности:

$$(M_{\Pi}) = \frac{\pi}{4} \cdot D_3 \cdot (D_3 + s_3 - C) \cdot (s_3 - C) \cdot (\sigma_0) \quad (3.130)$$

$$(M_{\Pi}) = 3.842 \text{ МН*м}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости:

$$(M_e) = \frac{89 \cdot 10^{-6} \cdot E}{\nu_y} \cdot D_3^3 \cdot \left[\frac{100(s_3 - C)}{D_3} \right]^{2.5} \quad (3.131)$$

Получаем:

$$(M_e) = 40.428 \text{ МН*м}$$

$$(M_{eги}) = \frac{89 \cdot 10^{-6} \cdot E}{\nu_{ги}} \cdot D_3^3 \cdot \left[\frac{100(s_3 - C)}{D_3} \right]^{2.5} \quad (3.132)$$

В результате расчетов получим:

$$(M_{eги}) = 53.904 \text{ МН*м}$$

Допускаемый изгибающий момент:

$$(M) = \frac{(M_{\Pi})}{\sqrt{1 + \left[\frac{(M_{\Pi})}{(M_e)} \right]^2}} \quad (3.133)$$

Подставив значения:

$$(M) = 3.825$$

Аналогично для гидроиспытаний:

$$(M_{ги}) = 3.832$$

Условие устойчивости для рабочих условий:

$$\frac{F_{ур}}{\psi_1 \cdot (F)} + \frac{M_{ур} \cdot F_{ур} \cdot \psi_3 \cdot D_3}{\psi_2 \cdot (M)} = 7.971 \times 10^{-3} < 1$$

Условие устойчивости для условий испытания:

$$\frac{F_{ги}}{\psi_1 \cdot (F_{ги})} + \frac{M_{ги} \cdot F_{ги} \cdot \psi_3 \cdot D_3}{\psi_2 \cdot (M_{ги})} = 0.031 < 1$$

В результате расчетов определили, что условие прочности и устойчивости опорной обечайки выполняется.

3.6.2.3. Расчет нижнего опорного узла и анкерных болтов.

Коэффициент устойчивости аппарата:

$$Y = \frac{F_{\min} \cdot R1}{M_y} \quad (3.134)$$

Так как опорный узел работает на сжатие, то расчет его ведем для условий гидроиспытания.

Расчетная ширина нижнего опорного кольца:

$$b_{1p} = \frac{1}{\pi \cdot D4 \cdot (\sigma_b)} \cdot \left(\frac{4 \cdot M_y}{D4} + F_y \right) \quad (3.135)$$

Получим:

$$b_{1p} = 7.128 \times 10^{-3} \text{ м}$$

Выступающая ширина нижнего опорного кольца должна удовлетворять условию

$$2 \cdot d2 + 0.03 \leq b2 \leq \frac{2}{3} \cdot b1$$

Примем: выступающая ширина нижнего опорного кольца

$$b2 = 0.095 \text{ м}$$

ширина опорного кольца

$$b1 = 0.15 \text{ м}$$

Напряжение сжатия в бетоне:

$$\sigma_b = (\sigma_b) \cdot \frac{b_{1p}}{b1} \quad (3.136)$$

Получаем:

$$\sigma_b = 0.38 \text{ МПа}$$

Опорный узел примем исполнением В.

Толщину нижнего опорного кольца:

$$s4 = \chi1 \cdot b2 \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot \sigma_b}{(\sigma_a)}} + C \quad (3.137)$$

где

$$\chi_1 = \left[\frac{1 + 1.81 \cdot \left(\frac{b_2}{b_7}\right)^3}{1 + 2.97 \left(\frac{b_2}{b_7}\right)^3} \right]^2 \quad (3.138)$$

b_7 - это максимальное расстояние между двумя смежными ребрами.

Определим это расстояние.

Согласно [16] при внутреннем диаметре аппарата $D_1 > 2200$ мм болты диаметром М36 устанавливают с шагом 1200 мм, но во всех случаях число болтов должно быть не более 12.

Длина окружности фундаментных болтов $\Pi_4 = D_4 \cdot \pi = 12.032$ м

Найдем количество болтов $N = 10$

Расстояние $(b_6 + b_7) = \Pi_4 / 10 = 1200$ мм

Расстояние b_6 можно принять равным удвоенному внешнему диаметру болтов плюс толщина ребра (или толщина опорной обечайки).

Отсюда находим b_7 и определяем χ_1

$$\Pi_4 = D_4 \cdot \pi$$

$$\Pi_4 = 12.032$$

$$\frac{\Pi_4}{1.2} = 10.027$$

$$(\sigma_a) = 160$$

$$b_6 = 2 \cdot 0.036 + 0.02$$

$$b_6 = 0.092$$

$$b_7 = 1.2 - b_6$$

$$b_7 = 1.108 \text{ м}$$

$$\chi_1 = 0.999$$

Толщина нижнего опорного кольца:

$$s_4 = \chi_1 \cdot b_2 \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot \sigma_b}{(\sigma_a)}} + C \quad (3.139)$$

Получим:

$$s_4 = 9.009 \times 10^{-3} \text{ м}$$

$$s_4 = 1.5 \cdot s_3$$

$$s_4 = 0.03 \text{ м}$$

Из двух значений выбираем наибольшее

$$s_4 = 0.03$$

Толщину верхней опорной пластины определяют по формуле:

$$A_b = \frac{\pi \cdot 0.0317^2}{4} \quad (3.140)$$

Рассчитаем:

$$s_5 = \chi^2 \cdot \sqrt{\frac{A_b^2 \cdot (\sigma_b)}{(\sigma_a)}} + C \quad (3.141)$$

$$s_5 = 1.575 \times 10^{-3}$$

$$s_5 = 1.5s_3 = 0.03 \text{ м}$$

Принимаем

$$s_5 = 0.03 \text{ м}$$

Толщина ребра

$$s_7 = \frac{A_b \cdot (\sigma_b)}{\chi^3 \cdot b^2 \cdot (\sigma_a)} + C$$

для исполнения В

$$s_7 = 3.44 \times 10^{-3}$$

$$\text{м} \quad s_7 = 0.012 \text{ м}$$

Принимаем

$$s_7 = 0.015 \text{ м}$$

Проведен расчет элементов опорного узла, определены основные размеры, определяющие конструкцию.

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

Студенту:

Группа	ФИО
4К41	Нутфуллин Рустам Радифович

Школа	ИШНПТ	Отделение школы (НОЦ)	НОЦ им. Н.М.Кижнера
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	Машины и аппараты химических производств

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Анализ расходов действующего предприятия
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Расчет затрат

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Анализ конкурентных технических решений рынка. Выявление потенциальных потребителей и результатов исследования. Выполнение SWOT-анализа проекта
2. Планирование научно-исследовательских работ и бюджета на их выполнение	Определение структуры работ. Определение трудоемкости выполнения работ. Разработка графика проведения научных исследований. Расчет затрат
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	Расчет интегрального показателя эффективности научного исследования

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Матрица SWOT
2. План-график проведения НИ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Верховская М.В.	к.э.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4К41	Нутфуллин Р.Р.		

4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

В дипломном проекте представлен расчет насадочной ректификационной колонны непрерывного действия для разделения бинарной смеси бензол-толуол.

4.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Для определения потребителей результатов исследования необходимо провести анализ целевого рынка и его сегментирование

Продуктом данной бакалаврской работы является насадочная ректификационная колонна. Насадочные ректификационные колонны являются одними из самых распространенных в России, так как, согласно [17] около 40% аппаратов, изготавливаемых для адсорбции и ректификации, представляют собой насадочные ректификационные колонны.

Целевым рынком являются: АО «СДС Азот», ПАО «Нижнекамскнефтехим», ООО «Самараоргсинтез», ПАО «Куйбышевазот», ПАО «Омский каучук», ОАО «Салаватнефтеоргсинтез».

Областью применения аппаратов данного типа является нефтегазовая, химическая, пищевая промышленности и т.д.

4.2 Анализ конкурентных технических решений

Расчет ведем по [18]

С помощью анализа конкурентных технических решений можно дать оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить направление её будущего повышения с точки зрения ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Конкурентной разработкой является аппарат уже установленный на НПЗ, но из-за устаревших технологий, применяемых при разработке данного аппарата, модернизируемый в данной бакалаврской работе.

Целесообразно проводить данный анализ с помощью оценочной карты, пример которой приведен в табл. 4.

Критерии для сравнения и оценки ресурсоэффективности и ресурсосбережения, приведенные в табл. 4, подбираются, исходя из выбранных объектов сравнения с учетом их технических и экономических особенностей разработки, создания и эксплуатации.

Таблица представляет наглядную характеристику для сравнения ректификационных колонн.

Таблица 4 – Характеристика ректификационных колонн

Характеристика	Рассчитанная ректификационная колонна (К ₁)	Импортная ректификационная колонна (К ₂)
Производительность по дистилляту, тонн/сутки	200	150
Минимальный срок эксплуатации, лет	15	10
Доступность запасных частей	Запасные части доступны	Запасные части доступны
Склонность к загрязнению	Обладает устойчивостью к загрязнению	Обладает устойчивостью к загрязнению
Рыночная ситуация	Получил распространение на российском рынке	Распространен на рынке

Все перечисленные критерии необходимо раскрыть.

Производительность – количество продукта, полученного в единицу времени.

Минимальный срок эксплуатации – продолжительность работы аппарата с учетом перерывов на капитальный ремонт, но без полного выхода из строя.

Доступность запасных частей – возможность в кратчайшие сроки приобрести недорогие и качественные детали.

Склонность к загрязнению – критерий, отображающий насколько склонна рабочая поверхность к загрязнению во время эксплуатации.

Рыночная ситуация – это степень свободы выбора действий для производителей (продавцов) и потребителей (покупателей).

Далее следует провести оценку конкурентоспособности ректификационной колонны

Таблица 8. – Оценка конкурентоспособности колонны

Критерий оценки	Вес критерия	Баллы		Конкурентоспособность	
		Б _Ф	Б _{К1}	К _Ф	К _{К1}
Технические критерии оценки ресурсоэффективности					
Производительность	0,12	5	4	0,60	0,48
Удобство эксплуатации	0,1	5	5	0,50	0,50
Надежность	0,1	5	4	0,50	0,40
Уровень шума	0,06	4	4	0,24	0,24
Безопасность	0,08	5	5	0,40	0,40
Ремонтопригодность	0,08	5	4	0,40	0,32
Доступность запасных частей	0,08	5	5	0,40	0,40
Простота эксплуатации	0,08	5	4	0,40	0,32
Габариты	0,1	4	5	0,40	0,50
Экономические критерии оценки эффективности					
Предполагаемый срок эксплуатации	0,1	5	5	0,50	0,50

Продолжение таблицы8

Цена	0,1	5	4	0,50	0,4
Итого	1			4,84	4,46

Изучая значения, полученные в таблице, можно твердо заявить, что проектируемая ректификационная колонна предпочтительнее импортной. Производительность проектируемой колонны выше, в связи с введением более новых технологий, надежность аппарата значительно выше, использование отечественной стали 12X18H10T практически устраняет вопрос о проблеме загрязнения колонны, её коррозии и выхода из строя из-за нее. Рассчитанная ректификационная колонна проста в ремонте и эксплуатации, цена, с учетом производительности, ниже, чем на импортную колонну.

4.2.1 SWOT-анализ

SWOT-анализ – определение сильных и слабых сторон, возможностей и угроз проекта и является комплексным анализом научно-исследовательской работы, который применяется для исследования внешней и внутренней среды проекта.

SWOT – анализ состоит из трех этапов. В первом этапе мы анализируем сильные и слабые стороны исследовательской работы (внутренняя среда), а также возможности и угрозы (внешняя среда). Описание выполняется с помощью факторов, не имеющих количественной оценки (таблица 6).

Таблица 9 – Матрица SWOT

	Сильные стороны научно-исследовательского проекта	Слабые стороны научно-исследовательского проекта
	<p>С1. Наличие квалифицированного персонала, имеющего опыт работы в данной области</p> <p>С2. Актуальность проекта</p> <p>С3. Использование новых автоматизированных технологий</p> <p>С4. Заявленная экономичность и энергоэффективность технологии</p> <p>С5. Высокое качество продукции, соответствующее мировым стандартам</p>	<p>Сл1. Невозможность провести испытания</p> <p>Сл2. Большое количество материала для изготовления аппарата</p> <p>Сл3. Уменьшение размеров аппарата при неизменной производительности</p>
<p>Возможности:</p> <p>В1. Постоянное повышение квалификации персонала</p>		

Продолжение таблицы 9

<p>В2. Дополнительный спрос на результаты расчетов.</p> <p>В3. Выход на всероссийский и международный рынок</p>		
<p>Угрозы:</p> <p>У1. Появление новых конкурентов</p> <p>У2. Риск невозможности импорта товаров из-за введения секторальных санкций</p> <p>У3. Модификация уже существующих технологий</p> <p>У4. Необходимость развития широкой логистической сети по транспортировке аппарата, по подаче сырья и отправлении продукта</p>		

Построим интерактивную матрицу проекта

Таблица 10 – Интерактивная матрица проекта

Сильные стороны проекта						
Возможности проекта		C1	C2	C3	C4	C5
	B1	+	-	+	+	+
	B2	+	+	+	+	-
	B3	+	-	-	+	+
Сильные стороны проекта						
Угрозы проекта		C1	C2	C3	C4	C5
	У1	-	-	+	+	-
	У2	-	-	-	-	-
	У3	+	-	0	-	0
	У4	-	+	0	-	-
Слабые стороны проекта						
Возможности проекта		Сл1	Сл2	Сл3		
	B1	-	0	-		
	B2	-	+	-		
	B3	-	+	-		
Слабые стороны проекта						
Угрозы проекта		Сл1	Сл2	Сл3		
	У1	-	+	-		
	У2	-	0	-		
	У3	-	+	+		
	У4	-	+	-		

Таблица 11 – Итоговый SWOT-анализ

	<p>Сильные стороны научно-исследовательского проекта</p> <p>С1. Наличие квалифицированного персонала, имеющего опыт работы в данной области</p> <p>С2. Актуальность проекта</p> <p>С3. Использование новых автоматизированных технологий</p> <p>С4. Заявленная экономичность и энергоэффективность технологии</p> <p>С5. Высокое качество продукции, соответствующее мировым стандартам</p>	<p>Слабые стороны научно-исследовательского проекта</p> <p>Сл1. Невозможность провести испытания</p> <p>Сл2. Большое количество материала для изготовления аппарата</p> <p>Сл3. Уменьшение размеров аппарата при неизменной производительности</p>
<p>Возможности:</p> <p>В1. Постоянное повышение квалификации персонала</p> <p>В2. Дополнительный</p>	<p>Постоянное повышение квалификации персонала положительно скажется на эксплуатации аппарата персоналом, внедрении возможных</p>	<p>Выход на всероссийский и международный рынок повлечет за собой необходимость развития широкой логистической сети по подаче сырья и</p>

спрос на результаты расчетов. В3. Выход на всероссийский и международный рынок	модификаций в конструкцию, получение продукта высокого качества, привлечение более экономичных и энергоэффективных решений	транспортировке продукта, так же, в результате выхода на мировую арену вырастет спрос на результаты расчетов
Угрозы: У1. Появление новых конкурентов У2. Риск невозможности импорта товаров из-за введения секторальных санкций У3. Модификация уже существующих технологий	Появление новых конкурентов и риск невозможности импорта товаров из-за введения секторальных санкций может негативно сказаться на желании квалифицированного специалиста работать на предприятии, а так же модификация уже существующих технологий может подорвать компетентность некоторых специалистов.	Риск невозможности импорта товаров из-за введения секторальных санкций может отбросить необходимость развития широкой логистической сети по подаче сырья и транспортировки продукта, а также поставить под угрозу поставки материалов, которые по свойствам могут превосходить отечественные

SWOT-анализ показывает, что для увеличения конкурентоспособности продукта, необходимо осуществить переход на отечественное оборудование, поддерживать технологии, соответствующие современным запросам, а так же, в перспективе способные привлечь покупателей из-за рубежа.

4.3 Планирование научно-исследовательских работ

4.3.1 Структура работ в рамках научного исследования

Для планирования комплекса предполагаемых работ необходимо выполнить следующие шаги:

- определить структуру работ в рамках изучаемого научного исследования;
- определить участников всех имеющихся работ;
- определить необходимую продолжительность работ;
- построить график проведения научного исследования.

Для выполнения бакалаврской работы была сформирована рабочая группа, в состав которой входят инженер и научный руководитель. Первичная последовательность составления этапов и работ, распределение имеющихся исполнителей по видам работ, необходимых к выполнению, представлен в таблице 8.4

Таблица 12 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Научный руководитель
Выбор направления исследований	2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер
	3	Проведение патентных исследований	Инженер
	4	Выбор направления исследований	Научный руководитель, инженер
	5	Календарное планирование работ	Инженер

Продолжение таблицы 12

Теоретические и экспериментальные исследования	6	Проведение теоретических расчетов и обоснований	Инженер
	7	Утверждение лучшего результата	Научный руководитель
Обобщение и оценка результатов	8	Оценка эффективности полученных результатов	Научный руководитель, инженер
	9	Определение целесообразности проведения ВКР	Инженер
Проведение ВКР			
Разработка технической документации и проектирование	10	Разработка чертежа аппарата в среде КОМПАС 3D	Инженер
	11	Проверка чертежей	Научный руководитель
Оформление отчета по НИР (комплекта документации по ВКР)	12	Оформление пояснительной записки и чертежей аппарата	Инженер

4.3.2 Определение трудоемкости выполнения работ

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости $t_{ож_i}$ используется следующая формула:

$$t_{ож_i} = \frac{3t_{min_i} + 2t_{max_i}}{5},$$

Где $t_{ож_i}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы чел.-дн.;

t_{min_i} – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;

t_{max_i} – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

На выполнение данного проекта выделено 4 месяца (февраль-май), что в календарных днях по шестидневной рабочей неделе с учетом всех праздников составляет 96 дней. Кратчайший срок выполнения проекта – 62 дня.

Минимальная и максимальная трудоемкости выполнения работы

t_{min}	1	4	4	1	4	12	1	1	4	13	1	16
t_{max}	1	9	7	1	7	23	1	1	7	18	1	20

Определим ожидаемую трудоемкость для запланированных работ с округлением до целого числа.

Ожидаемая трудоемкость

$t_{ож}$	1	6	5	1	5	16	1	1	5	9	1	18
----------	---	---	---	---	---	----	---	---	---	---	---	----

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях T_p , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями:

$$T_p = \frac{t_{ож_i}}{Ч_i},$$

где T_p – продолжительность одной работы, раб.дн.;

$t_{ож_i}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел. – дн;

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

Продолжительность каждой работы

T_p	1	6	5	1	5	16	1	1	5	9	1	18
-------	---	---	---	---	---	----	---	---	---	---	---	----

4.3.3 Разработка графика проведения научного исследования

При выполнении дипломных работ студенты становятся участниками сравнительно небольших по объему научных тем, поэтому наиболее удобным и наглядным является построение ленточного графика проведения научных работ в форме диаграммы Ганта. Диаграмма Ганта – это горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ. 44 Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться формулой:

$$T_{k_i} = T_{p_i} * k_{\text{кал}},$$

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

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

$k_{\text{кал}}$, – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}},$$

где $T_{\text{кал}}$ - количество календарных дней в году;

$T_{\text{вых}}$ - количество выходных дней в году;

$T_{\text{пр}}$ - количество праздничных дней в году.

Следовательно:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} = \frac{365}{365 - 92 - 26} = 1,49$$

Рассчитанные значения в календарных днях по каждой работе T_{k_i} необходимо округлить до целого числа. Все рассчитанные значения сводим в таблицу.

Таблица 13 – Временные показатели проведения работы

Номер работы	Трудоемкость работ			Исполнители	Длительность работ в рабочих днях T_{p_i}	Длительность работ в календарных днях T_{k_i}
	t_{min} , чел-дни	t_{max} , чел-дни	$t_{ож_i}$, чел-дни			
1	1	1	1	Рук-ль	1	1
2	4	9	6	Инженер	6	8
3	4	8	6	Инженер	6	8
4	1	1	1	Рук-ль, Инженер	1	1
5	4	8	6	Инженер	6	8
6	12	21	16	Инженер	16	23
7	1	1	1	Рук-ль	1	1
8	1	1	1	Рук-ль, Инженер	1	1
9	4	7	5	Инженер	5	7
10	13	18	9	Инженер	9	13
11	1	1	1	Рук-ль	1	1
12	16	20	18	Инженер	18	26
Итого	62	96	71		71	98

Следующим шагом построим календарный план-график, на котором будет показана продолжительность работы исполнителей.

Таблица 14 – План-график проведения работы по теме «Проектирование насадочной ректификационной колонны для разделения бинарной смеси бензол-толуол»

№ работы	Вид работы	Исполнители	T_{k_i} , кал. дн.	Продолжительность проведения работ											
				февраль			март			апрель			май		
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	Составление технического задания	Рук-ль	1	█											
2	Изучение материалов	Инженер	8	█											
3	Проведение патентных исследований	Инженер	8		█										
4	Выбор направления исследований	Рук-ль, Инженер	1			█									
5	Планирование работ	Инженер	8			█									
6	Проведение расчётов	Инженер	23			█	█	█	█						
7	Утверждение результатов	Рук-ль	1						█						
8	Оценка полученных результатов	Рук-ль, Инженер	1						█						

Продолжение таблицы 14

9	Целесообразность ВКР	Инженер	7																	
10	Разработка чертежей	Инженер	13																	
11	Проверка чертежей	Рук-ль	1																	
12	Составление ПЗ и оформление чертежей	Инженер	26																	

 – руководитель

 – инженер

4.3.4 Расчет затрат

В процессе формирования бюджета НТИ используется следующая группировка затрат по статьям:

- материальные затраты НТИ;
- затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- накладные расходы.

4.3.4.1 Материальные затраты

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_M = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{\text{расх}_i},$$

где m – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования;

$N_{\text{расх}_i}$ – количество материальных ресурсов i -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, м² и т.д.);

C_i – цена приобретения единицы i -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./м² и т.д.);

k_T – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

Таблица 15 – Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, (Z_M), руб.
Фракция бензол-толуольная (бентол)	т	1	38	43700
Катализатор риформинга	т	0,03	47	1621,5
Итого, руб.	45312,5			

4.3.4.2 Расчет амортизационных отчислений

Для расчета суммы амортизационных отчислений необходимо учесть время, которое используется оборудование его полную стоимость и норму амортизационных отчислений.

$$A_0 = \frac{C_{\text{п}} \cdot H_0}{100 \cdot T_{\text{раб.дн.год}}} \cdot T_{\text{раб.}}$$

где A_0 – амортизационные отчисления, руб;

$C_{\text{п}}$ – стоимость оборудования, руб;

H_0 – норма амортизационных отчислений, для каждого оборудования, %

$T_{\text{раб.дн.год}}$ – рабочие дни в 2018 году, 247 дней;

$T_{\text{раб}}$ – дни эксплуатации в проекте;

Норму амортизационных отчислений вычисляем по формуле:

$$H_0 = \frac{1}{n} \cdot 100,$$

где n – срок эксплуатации оборудования на производстве, лет.

Дни в эксплуатации будут приняты в количестве 5 дней в соответствии с экспериментальными данными. Все результаты расчетов представлены в таблице 11.

Таблица 11 – Амортизационные отчисления

Наименование основных средств	Количество основных средств, шт.	Срок эксплуатации, лет	Норма амортизации, %	$C_{\text{п}}$, тыс. руб	A_0 , руб.
Колонна	1	15	6,67	4000	5401
Конденсатор	1	15	6,67	800	1080
Подогреватель	1	15	6,67	800	1080
Емкость	4	20	5	466	1887
Кипятильник	1	15	6,67	812	1096
Теплообменник	2	15	6,67	800	2159
Итого					15402

4.3.4.3 Затраты на электроэнергию, потребляемую насосами

Затраты на электроэнергию рассчитывают по формуле:

$$Z_{\text{э}} = T_{\text{э}} \cdot M \cdot T_{\text{раб}},$$

где $Z_{\text{э}}$ – затраты на электроэнергию, руб;

$T_{\text{э}}$ – тариф электроэнергии 1кВт/ч, руб/(кВт/ч);

M – мощность, потребляемая двигателями насосов, кВт;

$T_{\text{раб}}$ – число рабочих часов оборудования для исследования, ч

Отсюда следует:

$$Z_{\text{э}} = 5,8 \cdot 176 \cdot 5 \cdot 24 = 122496,0 \text{ руб.}$$

4.3.4.4 Основная заработная плата исполнителей темы

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, рабочих макетных мастерских и опытных производств, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20–30 % от тарифа или оклада.

Основная заработная плата инженера и руководителя рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_{\text{р}}$$

где $Z_{\text{осн}}$ – основная заработная плата одного работника;

$T_{\text{р}}$ – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.;

$Z_{\text{дн}}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная 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 течение года:

при отпуске в 24 раб. дня $M = 11,2$ месяца, 5-дневная неделя;

при отпуске в 48 раб. дней $M = 10,4$ месяца, 6-дневная неделя;

F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн.

Таблица 16 – Заработная плата

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
календарное количество дней	365	365
Количество не рабочих дней: - выходные дни - праздничные дни	66	118
Издержки рабочего времени: - отпуск - невыходы по болезни	48	24
Действительный фонд рабочего времени	251	223

Месячный должностной оклад исполняющего работу:

$$Z_m = Z_{ок} \cdot k_p,$$

где $Z_{ок}$ – оклад, руб.;

k_p – районный коэффициент города Томска, равный 1,3.

Оклад руководителя (преподавателя ТПУ) с учетом должности доцента и степени кандидата технических наук составляет 33664 руб., а инженера в роли студента 9489 руб.

Таблица 17 – Расчет основной заработной платы

Исполнители	$Z_{ок}$, руб.	k_p	Z_m , руб.	$Z_{дн}$, руб.	T_p , раб. дн.	$Z_{осн}$, руб.
Руководитель	33664	1,3	43763,2	1813,3	5	9066,5
Инженер	9489		12335,7	575,3	66	37969,8
Итого						47036,3

Основная заработная плата рабочих:

- при 5 рабочих днях руководителя: 9066,5 руб.;
- при 65 рабочих днях инженера: 37969,8 руб.

4.3.4.5 Дополнительная заработная плата исполнителей темы

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ [19] доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций (при исполнении государственных и общественных обязанностей, при совмещении работы с обучением, при предоставлении ежегодного оплачиваемого отпуска и т.д.).

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн}$$

где $k_{доп}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,12 – 0,15).

Дополнительная заработная плата для руководителя составляет 1178,6 руб., а для инженера 4814,7 руб.

Итоговая заработная плата:

$$Z_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп}$$

Для руководителя 10245,1 руб., а для инженера 42784,5 руб.

4.3.4.6 Отчисления во внебюджетные фонды

В данной статье расходов отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$З_{внеб} = k_{внеб} \cdot (З_{осн} + З_{доп}),$$

$k_{внеб}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

Таблица 18 – Отчисления во внебюджетные фонды представлены в таблице.

Исполнитель	Основная заработная плата, руб.	Дополнительная заработная плата, руб.
Руководитель	9066,5	1178,6
Инженер	37969,8	4814,7
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	27,1 %	
Итого, руб.	Руководитель: 2776,5 Инженер: 11594,5	
Суммарно	14371 руб.	

4.3.4.7 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы (темы) является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции.

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в таблице

Таблица 19 – Бюджет НИ проекта

Наименование статьи	Сумма, руб.
1. Материальные затраты	45312,5
2. Амортизация оборудования	15402
3. Затраты на электроэнергию	166201,6
4. Затраты по основной заработной плате	47036,3
5. Затраты по дополнительной заработной плате	5993,3
6. Отчисления во внебюджетные фонды	14371
7. Бюджет затрат НИ	294316,7

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

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется по формуле:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}},$$

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

Φ_{pi} – стоимость каждого варианта исполнения;

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения проекта.

$$I_{\text{финр}}^{\text{P}} = \frac{294316,7}{338566,2} = 0,869,$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{A1}} = \frac{338566,2}{338566,2} = 1,$$

Все результаты расчетов сводим в таблицу.

Таблица 20 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Объект исследования Критерии	Весовой коэффициент параметра	Р	А.1
1. Производительность	0,2	4	5
2. Доступность запчастей	0,1	5	3
3. Помехоустойчивость	0,2	5	4
4. Конкурентоспособность	0,15	4	5
5. Надежность	0,25	4	4
6. Цена	0,1	5	3

Продолжение таблицы 20

Итого	1		
-------	---	--	--

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_{p.исп1.} = \sum a_i \cdot b_i,$$

Соответственно:

$$I_{p.P} = 0,2 * 4 + 0,1 * 5 + 0,2 * 5 + 0,15 * 4 + 0,25 * 4 + 0,1 * 5 = 4,4$$

$$I_{p.A1} = 0,2 * 5 + 0,1 * 3 + 0,2 * 4 + 0,15 * 5 + 0,25 * 4 + 0,1 * 3 = 4,15$$

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

$$I_p = \frac{I_{p.P}}{I_{финр}^P} = \frac{4,4}{0,869} = 5,063,$$

$$I_{A1} = \frac{I_{p.A1}}{I_{финр}^{A1}} = \frac{4,15}{1} = 4,15,$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных. Сравнительная эффективность проекта:

$$\mathcal{E}_{cp} = \frac{I_p}{I_{A1}}$$

Все результаты внесены в таблицу.

Таблица 21 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	P	A1
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,869	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности	4,4	4,15
3	Интегральный показатель эффективности	5,063	4,15

Продолжение таблицы 21

4	Сравнительная эффективность разновидностей исполнения	1	0,82
---	---	---	------

Анализируя проделанную работу в данном разделе, можно сделать вывод, что разрабатываемый аппарат является самым удачным по сравнению с аналогом, достигается максимальная эффективность проектируемого аппарата. В данном исполнении достигается максимально оптимальное обеспечение материалами и необходимым спецоборудованием. В результате расчетов становится понятно, что продукт конкурентоспособен в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
4К41	Нутфуллин Рустам Радифович

Школа	ИШНПТ	Отделение школы (НОЦ)	НОЦ им. Н.М. Кижнера
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	Машины и аппараты химических производств

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<p>1. Описание рабочего места (рабочей зоны, технологического процесса, механического оборудования) на предмет возникновения:</p> <ul style="list-style-type: none"> – вредных проявлений факторов производственной среды (метеоусловия, вредные вещества, освещение, шумы, вибрации, электромагнитные поля, ионизирующие излучения) – опасных проявлений факторов производственной среды (механической природы, термического характера, электрической, пожарной и взрывной природы) – негативного воздействия на окружающую природную среду (атмосферу, гидросферу, литосферу) – чрезвычайных ситуаций (техногенного, стихийного, экологического и социального характера) 	<p>Нефтеперерабатывающий завод, ректификационная колонна на линии перегонки нефти. Рабочая зона оператора, открытая площадка, центральный пульт управления. В ходе производственных процессов возможно возникновение вредных и опасных факторов производственной среды, таких как утечка вредных и опасных веществ, поражение электрическим током, получение термических ожогов, падение с высоты, наличие вредных шумов, возможность возникновения пожара и взрыва, негативное влияние компьютера на организм человека, нарушение микроклимата производственных помещений</p>
<p>2. Перечень законодательных и нормативных документов по теме</p>	<p>Конституция Российской Федерации от 12.12.1993 Федеральный закон № 426-ФЗ от 28 декабря 2013 года «О специальной оценке условий труда» Федеральный закон №184-ФЗ «О техническом регулировании от 27 декабря 2002 года. Федеральный закон № 123-ФЗ от 22.07.2008 г (ред. от 10.07 2012г) «Технический регламент о требованиях к пожарной безопасности» Федеральный закон от 21.07.97 г. № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов»</p>

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p>1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой; – действие фактора на организм человека; – приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); – предлагаемые средства защиты (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства) 	<p>1. Опасность взрыва или пожара 2. Наличие шума в рабочих помещениях 3. Работа с вредными и опасными веществами 4. Микроклимат рабочих помещений 5. Вредное влияние компьютера 6. Воздействие электрического тока</p>
<p>2. Охрана окружающей среды:</p> <ul style="list-style-type: none"> – защита селитебной зоны – анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы); – анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы); – анализ воздействия объекта на литосферу (отходы); 	<p>Мероприятия по устранению выброса в окружающую среду отходов и вредных веществ: 1) Совершенствование технологического процесса</p>

<ul style="list-style-type: none"> – разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды. 	<p>2) Снижение потребления энергии без увеличения количества выбросов</p> <p>3) Установка дополнительных систем очисток, либо замена существующих или их усовершенствование</p>
<p>3. Защита в чрезвычайных ситуациях:</p> <ul style="list-style-type: none"> – перечень возможных ЧС на объекте; – выбор наиболее типичной ЧС; – разработка превентивных мер по предупреждению ЧС; – разработка мер по повышению устойчивости объекта к данной ЧС; – разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий 	<p>Типичная ЧС - возможность накопления в них взрывоопасных примесей, содержащихся в перерабатываемом воздухе.</p> <p>Взрывобезопасность должна обеспечиваться мерами взрывопреупреждения и взрывозащиты, осуществлением специальных организационных и организационно-технических мероприятий в объеме требований, установленных действующими нормами взрывобезопасности.</p>
<p>4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны 	<p>Для работников, занятых на работе с вредными или опасными условиями труда, законодатель установил сокращенную продолжительность рабочего времени – не более 36 часов в неделю (ст.92 ТК РФ, п.1 Постановления Правительства РФ от 20.11.2008 N 870 (далее – Постановление N 870)).</p>
<p>Перечень графического материала:</p>	
<p>При необходимости представить эскизные графические материалы к расчётному заданию (обязательно для специалистов и магистров)</p>	

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
---	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Штейнле А.В.	К.М.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4К41	Нутфуллин Рустам Радифович		

5 Социальная ответственность

Введение

Объектом исследования в данной выпускной квалификационной работе является насадочная ректификационная колонная для разделения бинарной смеси бензол-толуол. В работе рассмотрена модернизация уже существующего аппарата, находящегося в городе Омск, на предприятии АО «ГАЗПРОМНЕФТЬ-ОНПЗ».

Проектируемый аппарат используется на нефтеперерабатывающих предприятиях, а целевым рынком для него являются: АО «СДС Азот», ПАО «Нижнекамскнефтехим», ООО «Самараоргсинтез», ПАО «Куйбышевазот», ПАО «Омский каучук», ОАО «Салаватнефтеоргсинтез».

На разрабатываемой рабочей площадке будет располагаться следующее оборудование: ректификационная колонна, насосы, конденсаторы, подогреватели и т.д. Данное оборудование и его эксплуатация создает опасные и вредные факторы. При работе с представленным оборудованием необходимо строго соблюдать технику безопасности, должны применяться всевозможные меры для обеспечения безопасных условий труда для рабочего персонала.

Данный раздел выпускной квалификационной работы предусматривает собой анализ условий труда, выявление вредных и опасных факторов, определение порядка проведения мероприятий по технике безопасности, мероприятия по противопожарной профилактике на рабочем месте сотрудников предприятия.

5.1 Производственная безопасность

В данном пункте анализируются вредные и опасные факторы, которые могут возникать при разработке или эксплуатации проектируемого решения

Исходя из [20], составим таблицу, содержащую перечень опасных и вредных факторов, характерных для проектируемого аппарата.

Каждый фактор рассматривается в последовательности: источник возникновения фактора; физико-химическая природа фактора; приведение допустимых норм с необходимой размерностью; предлагаемые средства защиты (коллективные и индивидуальные) для минимизации воздействия фактора.

5.1.1 Выявление вредных факторов при разработке и эксплуатации научного исследования

Проектируемый аппарат находится в Омской области на предприятии АО «ГАЗПРОМНЕФТЬ-ОНПЗ». В качестве сырья для разделения используется смесь бензол-толуол. И бензол, и толуол являются токсичными веществами. Подробнее вопрос о предельно допустимых концентрациях рассмотрен ниже. При эксплуатации аппарата необходимо применять индивидуальные средства защиты, такие как респиратор, каска, спецодежда, перчатки.

К вредным факторам можно отнести:

- повышенный уровень шума;
- воздействие вредных и опасных веществ;
- изменение микроклимата рабочей зоны
- вредное влияние компьютера

К опасным факторам можно отнести:

- электрический ток;
- пожароопасность

Следует разобрать каждый из факторов подробнее.

9.1.1.1 Повышенный уровень шума

Шум, в общем случае, можно разделить на внешний и внутренний. Источниками внутреннего шума могут являться насосы, технологическое оборудование, вентиляционные установки и т.д. Источниками внешнего шума могут являться люди, автомобили, животный мир, погодные условия.

Нормальным уровнем шума при работе в помещении считается 60 дБ. Под воздействием шума, превышающего 85-90 дБ, снижается слуховая чувствительность. Сильный шум вредно отражается на здоровье и работоспособности людей. Человек, работая при шуме, привыкает к нему, но продолжительное действие сильного шума вызывает общее утомление, может привести к ухудшению слуха.

Для снижения шума можно использовать следующие методы:

1. уменьшение шума в источнике;
2. изменение направленности излучения;
3. рациональная планировка предприятий и цехов;
4. акустическая обработка помещений;
5. уменьшение шума на пути его распространения.

9.1.1.2 Воздействие вредных и опасных веществ

Выполнение различных видов производственных работ может сопровождаться выделением в воздушную среду вредных веществ. Вредное вещество - это вещество, которое в случае нарушения требований безопасности может вызвать производственные травмы, профессиональные заболевания или отклонения в состоянии здоровья, обнаруживаемые как в процессе работы, так и в последующей жизни. При проведении различных технологических процессов в воздух выделяются твердые и жидкие частицы, а также пары и газы. Пары и газы образуют с воздухом смеси, а твердые и жидкие частицы – аэродисперсные системы - аэрозоли. Существуют различные классификации вредных веществ, в

основу которых положено их действие на человеческий организм. По характеру результирующего химического воздействия на организм человека химические вещества подразделяют:

- - на токсические (ядовитые);
- - раздражающие;
- - сенсibiliзирующие;
- - канцерогенные;
- - мутагенные;
- - влияющие на репродуктивную функцию.

В целях обеспечения нормального функционирования производственной площадки необходимо предусмотреть ряд мер по контролю содержания опасных и вредных веществ в рабочей зоне в допустимых пределах ПДК. Обеспечение заключается в снижении производственных выбросов; совершенствовании производственных фильтров; защита расстоянием (расположение факелов на большом удалении от производственной площадки, на большой высоте); использование индивидуальных средств защиты.

9.1.1.3 Изменение микроклимата рабочей зоны

Микроклимат — климатические условия, созданные в ограниченном пространстве искусственно или обусловленные природными особенностями. Микроклимат закрытых помещений создается искусственно для того, чтобы обеспечить наиболее благоприятные условия для людей и предохранить их от неблагоприятных климатических воздействий. Микроклимат в рабочей зоне определяется действующими на организм человека сочетаниями температуры, влажности и скорости движения воздуха, а также температурой окружающих поверхностей. Повышенная влажность затрудняет теплоотдачу организма путем испарений при высокой температуре воздуха и способствует перегреву, а при низкой температуре, наоборот, усиливает теплоотдачу, способствуя переохлаждению. Оптимальны такие параметры микроклимата, которые при

длительном и систематическом воздействии на человека обеспечивают сохранение нормального функционального и теплового состояния организма без напряжения реакций терморегуляции, что создает ощущение теплового комфорта и служит предпосылкой для высокой работоспособности. Поддержание оптимального микроклимата возможно только в том случае, если предприятие оснащено установкам кондиционирования микроклимата. В остальных случаях следует обеспечивать допустимые микроклиматические условия, т.е. такие, при которых хотя и могут возникать напряжения терморегуляции организма, но не выходят за пределы его физиологических приспособительных возможностей. При этом не возникают нарушения состояния здоровья, но может наблюдаться ухудшение самочувствия и понижение работоспособности. Микроклимат производственных помещений определяется назначением помещения и характером технологического процесса. Для нормализации условий труда проводится ряд мероприятий: отопление и вентиляция производственных помещений, механизация производственного процесса, теплоизоляция нагретых поверхностей, защита рабочих от источников излучения и т. д. Для исключения вредного влияния микроклиматических факторов на организм человека и создания нормальных условий труда в рабочей зоне параметры воздушной среды должны соответствовать [21].

Измерение температуры воздуха в помещении проводится ртутными термометрами. Так как температура воздуха в лаборатории не является постоянной величиной, ее измеряют в нескольких точках в разное время на высоте 1,3...1,5 м от уровня пола и на расстоянии не менее 1...1,5 м от приборов и аппаратов, излучающих тепло, а также от наружных стен.

Параметры микроклиматических условий на производстве должны соответствовать [21].

Температура, влажность и скорость движения воздуха нормированы по времени года и категории выполняемых работ. При эксплуатации ректификационной колонны обслуживающий персонал проводит свою производственную деятельность стоя, множество операций связано с ходьбой,

перемещением и переносом инструментов, деталей общей массой до 10 кг и сопровождается умеренным физическим напряжением, следовательно, работу необходимо отнести к работам средней тяжести категории 26.

Следует привести таблицу с допустимыми нормами микроклимата в рабочей зоне производственных помещений.

Таблица 22 – Допустимые величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений

Период года	Категория работ по уровню энергозатрат, Вт	Температура воздуха, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	Пб (233-290)	19,1-22,0	15-75	0,2-0,4
Теплый		21,1-27,0	15-75	0,2-0,5

Исследуемое помещение оснащено системой действующей вентиляции и водяного отопления, вследствие чего нормы, установленные [21] выполняются.

9.1.1.4 Вредное воздействие компьютера

Проектирование и расчет ректификационной колонны сводится к работе за компьютером, который оказывает на организм немало вредных воздействий:

- проблемы с мышцами. Длительное сидячее положение негативно сказывается на циркуляции крови в теле;
- сидячее положение может в будущем привести к болям в спине, проблемам с позвоночником;
- длительная работа с монитором компьютера может привести к проблемам со зрением, так как глаза находятся в постоянном напряжении;

- снижение внимательности и увеличивающаяся умственная усталость вследствие поиска и обработки информации на компьютере наступают намного быстрее, чем при работе с другими источниками информации;
- влияние компьютера на нервную систему.

Для уменьшения пагубного влияния компьютера необходимо сокращать время работы за ним, делать перерывы в работе, увеличить нагрузки, способствующие поддержанию физической формы человека.

5.1.2 Выявление опасных факторов при разработке и эксплуатации научного исследования

5.1.2.1 Электрический ток

На современном производстве применяется большое количество электрических приборов, агрегатов, установок, соответственно появляется электрическая опасность. Ввиду опасности, создаваемой электрическим током, необходимо соблюдать требования электробезопасности. Они представляют собой систему организационных и технических мероприятий и средств, которые обеспечивают защиту людей от вредного и опасного действия электрического тока.

Во время эксплуатации ректификационной колонны может нарушиться прочность изоляции, неправильное выполнение или обрыв заземления.

Электрический ток при определенных условиях может оказывать повреждающее действие не только при непосредственном соприкосновении с ним, но и через предметы, которые человек держит в руках, и даже на расстоянии; разрядом через воздух и через землю (например, при падении высоковольтного провода на землю) ток повреждает ткани не только в месте его входа и выхода, но и на всем пути прохождения через тело человека.

Действие электрического тока на организм человека носит многообразный характер. Проходя через организм человека, электрический ток

вызывает термическое, электролитическое и биологическое действие. Термическое действие тока проявляется в ожогах тела, нагреве до высокой температуры внутренних органов человека (кровеносных сосудов, сердца, мозга). Электролитическое действие тока проявляется в разложении органических жидкостей тела (воды, крови) и нарушении их физико-химического состава. Биологическое действие тока проявляется в раздражении и возбуждении живых тканей организма и сопровождается непроизвольными судорожными сокращениями мышц (сердца, лёгких)

Исследуемое рабочее место относится к помещениям без повышенной электроопасности, которое характеризуется отсутствием условий, создающих повышенную или особую опасность.

Основные способы и средства электрозащиты:

- изоляция токопроводящих частей и ее непрерывный контроль;
- установка оградительных устройств;
- предупредительная сигнализация и блокировки;
- использование знаков безопасности и предупреждающих плакатов;
- использование малых напряжений;
- электрическое разделение сетей;
- защитное заземление;
- выравнивание потенциалов;
- зануление;
- защитное отключение;
- средства индивидуальной электрозащиты.

9.1.2.2 Пожароопасность

Обеспечение пожарной безопасности и пожаротушения возлагается на руководителя предприятия. Оснащение производственных зданий и территории промплощадки первичными средствами пожаротушения и мероприятия по пожарной безопасности должны производиться в соответствии с [22]

Местоположение первичных средств пожаротушения и пожарного инвентаря должно быть согласовано с органами пожарного надзора. Пожарные щиты с набором инвентаря (огнетушителями ОП-10, ОУ-5 для тушения электрооборудования, ведра, лопаты, топор), и ящиками для песка $V=1,0$ м³ предусматриваются на выходе из помещений и здания цеха таким образом, чтобы не препятствовать вынужденной эвакуации людей.

5.2 Экологическая безопасность

Эксплуатация разрабатываемой ректификационной колонны оказывает негативное влияние на окружающую среду. В данном разделе нет надобности приводить описание мероприятий по защите гидросферы и литосферы, так как при эксплуатации отсутствуют отводы сточных воды и отходы в литосферу.

Решения по обеспечению экологической безопасности и охрана окружающей среды достигается комплексом мероприятий, которые направлены на предотвращения утечек нефти, нефтепродуктов и уменьшения потерь, которые возникают при испарении. Для уменьшения воздействия на окружающую среду, необходимо проводить комплекс следующих мероприятий:

- принятие герметичных схем приема-откачки нефти, нефтепродуктов;
- обеспечение сбора утечек нефти с оборудования в подземные дренажные емкости с дальнейшим возвратом в технологический процесс;
- подъём на оптимальную высоту труб выбросов организованных источников для улучшения рассеивания;
- закрытый дренаж трубопроводов и оборудования;
- закрытый сброс охлажденных загрязненных стоков;
- применение бессальниковых герметичных насосов;
- отбортовку площадок наружных установок с устройством твёрдого покрытия;

- сбор проливов продуктов из отбортованных площадок в дренажные ёмкости с последующим возвратом на переработку;
- лабораторный контроль за соблюдением нормативов выбросов вредных веществ в атмосферу;
- переработку сырья и нефтепродуктов при минимально возможных (по технологическим параметрам) температурах.

5.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

После ввода аппарата в эксплуатацию на производстве могут возникнуть следующие чрезвычайные ситуации:

- возникновение пожара и взрыва (ввиду пожаро- и взрывоопасности разделяемой фракционной смеси жидких углеводородов);
- возникновение производственных аварий техногенного характера (нарушение герметичности оборудования, разрыв трубопроводов);
- природные ЧС (ввиду больших габаритных размеров, а именно высоты проектируемой колонны существует опасность возникновения ЧС под действием ветровой нагрузки).

Для предотвращения воздействия ветровой нагрузки в бакалаврской работе приведены расчеты на действие ветровых нагрузок в разделе «конструктивно-механический расчет». Для ликвидации последствий возникновения аварий такого характера необходимо провести мероприятия в следующей последовательности:

- эвакуация персонала из зоны поражения;
- локализация источника аварии;
- ремонтные работы;
- устранение причин аварии.

Наиболее опасной чрезвычайной ситуацией на данном производстве следует принять возникновение пожара и взрывов. Причинами возникновения данных ЧС могут являться:

- технические неполадки, в результате которых происходит отклонение технологических параметров, с последующим разрушением оборудования;
- неосторожное обращение с огнем при производстве ремонтных работ;
- события, связанные с человеческим фактором;
- внешнее воздействие техногенного или природного характера;
- повышенная температура воздуха и предметов;
- пониженная концентрация кислорода в воздухе.

Для предотвращения пожара рабочее место должно быть обеспечено системой предотвращения пожара, направленная на минимизацию ущерба на людей от пожара и ограничения ущерба от него, проведены организационные мероприятия, обеспечено наличие технических средств, уменьшающих риск возникновения пожара.

Мероприятия, которые должны проводиться для обеспечения пожаробезопасности:

- предотвращение распространения пожара за пределы очага;
- применение конструкций производственных объектов с регламентированным пределом их огнестойкости и горючести;
- эвакуацию людей в случае пожара;
- применение средств индивидуальных и коллективных средств защиты от огня;
- применение средств пожарной сигнализации и средств извещения о пожаре;
- организацию пожарной охраны объекта.

Необходимо, чтобы на блочном щите управления находили пенные, порошковые и водные огнетушители.

На участках с непосредственным контактом с водой необходимо следить за тем, чтобы вода не попадала на электропроводку и распределительные коробки для избегания короткого замыкания и возникновения пожара.

Все проходы должны быть свободными и иметь хотя бы два выхода, необходимо избегать длинных тупиковых проходов.

Средства тушения применять с учетом того, что является источником пожара. Для тушения горячей одежды использовать воду, для горящих электроустановок – углекислые огнетушители, для тушения воспламененных установок, закрепленных штативом – асбестовое одеяло.

5.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

5.4.1. Специальные правовые нормы трудового законодательства.

В данном пункте приводятся особенности трудового законодательства применительно к конкретным условиям проекта. Например, виды компенсаций при работе во вредных условиях труда, запрещение использования труда женщин и подростков, особенности обязательного социального страхования и пенсионного обслуживания и т.д.

При эксплуатации ректификационной колонны, согласно Трудовому кодексу РФ, ограничивается применение труда женщины на работах с вредными и (или) опасными условиями труда, а также на подземных работах, за исключением нефизических работ или работ по санитарному и бытовому обслуживанию, а также, запрещается применение труда лиц в возрасте до восемнадцати лет на работах с вредными и (или) опасными условиями труда, на подземных работах, а также на работах, выполнение которых может причинить вред их здоровью и нравственному развитию. Также, работнику в обязательном порядке предоставляются краткосрочные внеплановые и ежегодные дополнительные оплачиваемые отпуска.

Предприятие работает 24 часа в сутки, рабочий процесс осуществляется попеременно двумя сменами по двенадцать часов: с 8 до 20 часов – дневная смена, с 20 до 8 часов – ночная смена. После 4 часов работы с начала смены каждому работнику предоставляется часовой обеденный перерыв.

Машины, механизмы и другое производственное оборудование, химические вещества, средства индивидуальной и коллективной защиты работников, должны соответствовать государственным нормативным требованиям охраны труда и иметь декларацию о соответствии или сертификат соответствия.

Рабочие и служащие, занятые на тяжелых и вредных работах, а также на работах, связанных с движением транспорта, проходят обязательные предварительные при поступлении и периодические медицинские осмотры для определения пригодности их к поручаемой работе и предупреждения профессиональных заболеваний.

Каждый работник имеет право на рабочее место, соответствующее требованиям охраны труда, обязательное социальное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний в соответствии с федеральным законом, получение достоверной информации от работодателя, соответствующих государственных органов и общественных организаций об условиях и охране труда на рабочем месте, о существующем риске повреждения здоровья, а также о мерах по защите от воздействия вредных и (или) опасных производственных факторов, отказ от выполнения работ в случае возникновения опасности для его жизни и здоровья вследствие нарушения требований охраны труда, за исключением случаев, предусмотренных федеральными законами, до устранения такой опасности, обеспечение средствами индивидуальной и коллективной защиты в соответствии с требованиями охраны труда за счет средств работодателя, обучение безопасным методам и приемам труда за счет средств работодателя, личное участие или участие через своих представителей в рассмотрении вопросов, связанных с обеспечением безопасных условий труда на его рабочем месте, и в расследовании происшедшего с ним несчастного случая на производстве или профессионального заболевания, внеочередной медицинский осмотр в соответствии с медицинскими рекомендациями с сохранением за ним места работы (должности) и среднего заработка во время прохождения указанного медицинского осмотра, гарантии и компенсации,

установленные в соответствии с настоящим Кодексом, коллективным договором, соглашением, локальным нормативным актом, трудовым договором, если он занят на работах с вредными и (или) опасными условиями труда, повышенные или дополнительные гарантии и компенсации за работу на работах с вредными и (или) опасными условиями труда могут устанавливаться коллективным договором, локальным нормативным актом с учетом финансово-экономического положения работодателя.

5.4.2. Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны

Основным объектом в производственных условиях является рабочее место, представляющее собой в общем случае пространство, в котором может находиться человек при выполнении производственного процесса. Рабочее место является основной подсистемой производственного процесса

Эргономические требования к производственному оборудованию должны устанавливаться его соответствие антропометрическим, физиологическим, психофизиологическим и психологическим свойствам человека и обусловленным этими свойствами гигиеническим требованиям с целью сохранения здоровья человека и достижения высокой эффективности труда, к тем его элементам, которые сопряжены с человеком при выполнении им трудовых действий в процессе эксплуатации, монтажа, ремонта, транспортирования и хранения производственного оборудования.

При установлении эргономических требований к производственному оборудованию необходимо рассматривать оборудование в комплексе со средствами технологической и в необходимых случаях организационной оснастки.

Безопасность эксплуатации колонны обеспечивается надежным и верно изготовленным фундаментом под колонну, который способен выдерживать все необходимые нагрузки.

Перед запуском в работу проводится осмотр основного оборудования с целью устранения возможных проблем и неполадок.

Уровни физических, химических и биологических опасных и вредных производственных факторов, генерируемых производственным оборудованием в рабочую зону, а также воздействующих на работающего при непосредственном контакте с элементами конструкции, должны соответствовать требованиям безопасности, установленным нормативно-технической документацией, утвержденной в установленном порядке.

Для обеспечения доступа персонала ко всему оборудованию, расположенному на различной высоте, на рабочем участке предусмотрены лестницы с перилами, в соответствии с [23], а также многоуровневые сеточные полы с бортиками, во избежание падения различных инструментов или предметов с высоты. Также предусмотрена установка лестничных маршей с целью обезопасить работу обслуживающему персоналу. Необходимо обязательно предусмотреть проходы на площадке более 0,8 м в ширину.

Рабочее место должно обеспечивать возможность удобного выполнения работ в положении стоя. При выборе положения работающего необходимо учитывать:

- - физическую тяжесть работ;
- - размеры рабочей зоны и необходимость передвижения в ней работающего в процессе выполнения работ;
- - технологические особенности процесса выполнения работ (требуемая точность действий, характер чередования по времени пассивного наблюдения и физических действий, необходимость ведения записей и др.).

На предприятии разработаны санитарные требования к территории, водоснабжению, канализации, зданиям и помещениям, оборудованию, инвентарю, тарам, сырью и технологическому процессу.

Заключение

Результатом выполненной работы является спроектированная и рассчитанная ректификационная колонна насадочного типа для разделения бинарной смеси бензол-толуол.

Во введении кратко были рассказаны и пояснены теоретические основы массообменных процессов, представлена типичная технологическая схема.

Технологический расчет подразумевал под собой расчет теплового и материального балансов, определение оптимального и рабочего флегмового чисел.

В конструктивном расчете определены скорости паров, жидкостей, находящихся в колонне, основные геометрические характеристики аппарата – диаметр и высота. Диаметр определен исходя из уравнения расхода, а высота определена исходя из расчета чисел переноса в верхней и нижней частях колонны. Определены материалы для изготовления колонны, контактных устройств и т.д.

В механическом разделе проведены расчеты на прочность, жесткость, устойчивость, герметичность элементов аппарата. Определены толщины стенок аппарата, укреплять отверстия в аппарате необходимости нет, избыточная толщина стенки компенсирует все нагрузки, подобран и рассчитан опорный узел, проведены проверки на устойчивость и прочность при действии ветровых нагрузок на колонну.

В разделе финансового менеджмента определена ресурсоэффективность производимого аппарата.

В разделе социальной ответственности определены возможные опасные и вредные факторы, которые могут влиять на здоровье обслуживающего персонала. Приведены необходимые мероприятия по минимизации воздействия факторов на персонал и окружающую среду, рассмотрены законодательные стороны вопроса.

Список использованной литературы

1. Расчет и конструирование основного оборудования отрасли: учебное пособие / В.М. Беляев, В.М. Миронов. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 288 с.
2. Леонтьев В.С. Инновации в области разработки высокоинтенсивных массообменных устройств для модернизации ректификационных комплексов // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2012. №1. С.178-186. URL: http://ogbus.ru/authors/Leontiev/Leontiev_1.pdf
3. Лебедев Ф. С., Чернышов Е. Р., Ануфриев А. В., Пугачева Н. В., Реутов В. А. Проблема построения модели колонны реактивной ректификации на примере мономеризации дициклопентадиена // Молодой ученый. — 2017. — №2.1. — С. 14-18. — URL <https://moluch.ru/archive/136/39054/> (дата обращения: 13.05.2018).
4. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии: Учебник для вузов: В 2 книгах / Ю. И. Дытнерский.— М. : Химия, 1995.
5. Павлов К.Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии : учебное пособие для вузов / К. Ф. Павлов, П. Е. Романков, А. А. Носков ; под ред. П. Е. Романкова .— 10-е изд., перераб. и доп., репринт, изд. — М. : Альянс, 2013 .— 576 с..
- 6.
7. АТК 24.218.06-90 Штуцера для сосудов и аппаратов стальных сварных. Типы, основные параметры, размеры и общие технические требования – М.: Минтяжмаш СССР, 1990. - 46 с.
8. Лацинский А.А., Толчинский А.Р. Основы конструирования и расчёта химической аппаратуры: Справочник. Под ред. Н.Н. Логинова - Л.: Машиностроение, 1970. 752 с.
9. ГОСТ 52857.2. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчёта на прочность. - М.: Изд-во стандартов, 2007. - 80 с.

- 10.ГОСТ Р 52857.4-2007 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет на прочность и герметичность фланцевых соединений
- 11.Рабирек 11 // Электронный ресурс. — 2015 — 9 с. — URL <http://www.chem-eng.ru/programs/RAB11.pdf>
- 12.Расчет и конструирование машин и аппаратов химических производств: Примеры и задачи / М.Ф. Михалев [и др.].- Л.: Машиностроение, 1984- 301 с.
- 13.ГОСТ Р 52857.3-2007 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Укрепление отверстий в обечайках и днищах при внутреннем и внешнем давлениях. Расчет на прочность обечаек и днищ при внешних статических нагрузках на штуцер
- 14.АТК 24.200.04-90 Опоры цилиндрические и конические вертикальных аппаратов. Типы и основные размеры
- 15.ГОСТ Р 51273-99 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Определение расчетных усилий для аппаратов колонного типа от ветровых нагрузок и сейсмических воздействий
- 16.
- 17.Семакина О.К. Машины и аппараты химических, нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств: учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2016. – 154 с
- 18.ОСТ Р 51274-99 Сосуды и аппараты. Аппараты колонного типа. Нормы и методы расчета на прочность
- 19.Трудовой кодекс Российской Федерации
- 20.ГОСТ 12.0.002-2014 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Термины и определения
- 21.СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений
- 22.Об утверждении Правил пожарной безопасности в Российской Федерации (ППБ 01-03)

23.ГОСТ 12.2.003-91 Система стандартов безопасности труда (ССБТ).
Оборудование производственное. Общие требования безопасности