

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

---

Школа Инженерная школа новых производственных технологий  
Направление подготовки 18.04.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии

ООП «Технология и оборудование химических и нефтехимических производств»

Отделение школы (НОЦ) имени Н.М. Кижнера

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Тема работы
<b>Установка охлаждения и отмывки нитрозных газов с разработкой основного оборудования</b>

УДК 661.566.7.045.5.074.3.002.5

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4КМ61	Чернов Александр Владимирович		

Руководитель

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

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Креницына Зоя Васильевна	к.т.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Ахмеджанов Рафик Равильевич	д.б.н		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Краснокутская Елена Александровна	доктор химических наук		

Томск -2018г.

Запланированные результаты обучения по ООП 18.04.02 в 2018 г.

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

Код результата	Формулировка цели
P19	Способность разрабатывать мероприятия по комплексному использованию сырья, по замене дефицитных материалов
P20	Способность создавать технологии утилизации отходов и системы обеспечения экологической безопасности производства
P21	Способность оценивать экономические и экологические последствия принимаемых организационно-управленческих решений
P22	Готовность к организации работы коллектива исполнителей, принятию решений и определению приоритетности выполняемых работ
P23	Способность находить оптимальные решения при создании продукции с учетом требований качества, надежности, стоимости и экологической безопасности производств
P24	Способность использовать современные системы управления качеством в конкретных условиях производства на основе международных стандартов
P25	Готовность разрабатывать информационные системы планирования и управления предприятием
P26	Способность к проектной деятельности в профессиональной сфере на основе системного подхода и использования моделей для описания и прогнозирования ситуаций, осуществления качественного и количественного анализа процессов в целом и отдельных технологических стадий
P27	Способность формулировать задания на разработку проектных решений
P28	Готовность к проведению патентных исследований с целью обеспечения патентной чистоты новых проектных решений и определения показателей технического уровня проекта
P29	Способность проводить технические и технологические расчеты по проектам, технико-экономической, функционально-стоимостной и эколого-экономической эффективности проекта
P30	Готовность к оценке инновационного потенциала проекта
P31	Способность использовать пакеты прикладных программ при выполнении проектных работ
P32	Способность разрабатывать методические и нормативные документы, техническую документацию, а также предложения и мероприятия по реализации разработанных проектов и программ
P33	Готовность к разработке учебно-методической документации для обеспечения учебного процесса
P34	Готовность к постановке новых лабораторных работ и проведению практических занятий

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

---

**Инженерная школа новых производственных технологий**

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

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

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

УТВЕРЖДАЮ:  
Руководитель ООП

\_\_\_\_\_  
(Подпись)      (Дата)      (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ**

**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Магистерской диссертации

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

Студенту:

Группа	ФИО
4КМ61	Чернову Александру Владимировичу

Тема работы:

**Установка охлаждения и отмывки нитрозных газов с разработкой основного оборудования**

Утверждена приказом директора (дата, номер)

Срок сдачи студентом выполненной работы:

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

**Исходные данные к работе**

*(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.).*

Установка охлаждения и отмывки нитрозных газов на ОАО "Азот". Проектная мощность 378,5 тыс.т/год. Режим работы-непрерывный.

Вид сырья - кислота азотная неконцентрированная

Технологические параметры:

-температура рабочей среды в аппарате от +25 до +80 °С;

Рабочее давление от 0,3 до 1 МПа

<p align="center"><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b></p> <p align="center"><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<p>Реферат</p> <p>Введение</p> <p>1. Литературный обзор</p> <p>2. Исследовательская работа</p> <p>3. Описание технологической схемы</p> <p>4. Расчет абсорбционной колонны</p> <p>3. Расчет теплообменника</p> <p>6. Социальная ответственность.</p> <p>7. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p> <p>Заключение</p> <p>Список литературы</p> <p>Приложение</p>
<p><b>Перечень графического материала</b></p> <p align="center"><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>Лист 1. Технологическая схема. (А1)</p> <p>Лист 2. Абсорбционная колонна. Чертеж общего вида. (А1х2)</p> <p>Лист 3-4. Абсорбционная колонна. Выносные элементы. (А1)</p> <p>Лист 5. Теплообменник. Чертеж общего вида. (А2х3)</p> <p>Лист 6-7. Теплообменник. Выносные элементы. (А1)</p> <p>Лист 8. Техничко-экономические показатели. (А1)</p>
<p align="center"><b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b></p> <p align="center"><i>(с указанием разделов)</i></p>	
<p align="center"><b>Раздел</b></p>	<p align="center"><b>Консультант</b></p>
<p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>	<p>к.т.н., доцент Криницына З.В.</p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Ассистент кафедры ЭБЖ Раденков Т.А.</p>
<p>Иностранный язык</p>	<p>Доктор пед.наук, доцент Игна Ольга Николаевна</p>
<p><b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b></p>	
<p>1. Литературный обзор</p>	

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

**Задание выдал руководитель:**

<p align="center">Должность</p>	<p align="center">ФИО</p>	<p align="center">Ученая степень, звание</p>	<p align="center">Подпись</p>	<p align="center">Дата</p>
<p align="center">Доцент</p>	<p align="center">Тихонов В.В.</p>	<p align="center">к.т.н</p>		

**Задание принял к исполнению студент:**

<p align="center">Группа</p>	<p align="center">ФИО</p>	<p align="center">Подпись</p>	<p align="center">Дата</p>
<p align="center">4КМ61</p>	<p align="center">Чернов Александр Владимирович</p>		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
4КМ61	Чернов Александр Владимирович

Школа	ИШНПТ	Отделение школы (НОЦ)	НОЦ имени Н.М. Кижнера
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии

**Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:**

<p>1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения</p>	<p><i>Объектом исследования является установка охлаждения и отмывки нитрозных газов;</i></p> <p><i>Рабочее место -Компьютерная аудитория 127 2ого корпуса ТПУ.</i></p> <p><i>Область применения - химическая промышленность</i></p>
---	---

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

<p><b>1. Производственная безопасность</b></p> <p>1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой;</li> <li>– действие фактора на организм человека;</li> <li>– приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ);</li> <li>– предлагаемые средства защиты;</li> <li>– (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства).</li> </ul> <p>1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– механические опасности (источники, средства защиты);</li> <li>– термические опасности (источники, средства защиты);</li> </ul>	<p>1.1.Выявление вредных факторов при эксплуатации объекта исследования:</p> <p><i>- вредные вещества, действие вредных веществ на организм: двуокись азота, тетроксид, ангидрид азотной кислоты(класс опасности 3), пары и аэрозоль азотной кислоты(класс опасности 3);(СИЗ- перчатки, очки защитные, маска)</i></p> <p><i>- производственный шум, Уровень- не превышает 85 дБ (СИЗ- беруши, шумопоглощающие наушники )</i></p> <p><i>- предлагаемые средства защиты для работы на установке производства азотной кислоты: (коллективная защита – шумоизолирующие конструкции, индивидуальные средства защиты – костюм, ботинки, перчатки, каска, очки защитные, маска)</i></p>
--	--

<p>электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты)</p>	<p>1.2.Выявление опасных факторов при разработке и эксплуатации установок:  - электричество(токоведущие части электрооборудования);  - подвижные части производственного оборудования;  -повышенная температура поверхности оборудования.  1.3. Мероприятия по предотвращению воздействия опасных и вредных факторов.  1.4.Средства индивидуальной защиты работающих  Средства защиты: хлопчатобумажные костюмы, защитные очки, ботинки кожаные, перчатки, фильтрующие противогазы, каска, наушники.  ГОСТ 12.2.003–91 ССБТ  ГОСТ 12.1.012–90 ССБТ.  СанПиН 2.2.4.548–96.  ГОСТ 12.1.003–83 ССБТ.  ГОСТ 12.2.007.0-75  СанПиН 2.2.4.548-96 12  СанПиН 2.2.4.1191-  ГОСТ 12.1.007-76</p>
<p><b>2. Экологическая безопасность:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– защита селитебной зоны</li> <li>– анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы);</li> <li>– анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы);</li> <li>– анализ воздействия объекта на литосферу (отходы);</li> </ul> <p>разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды.</p>	<p>2.Вредные воздействия, которые возникают при эксплуатации оборудования:  -Выбросы в атмосферу выхлопных газов, вентиляционных выбросов  -Сточные воды  -Твердые и жидкие отходы</p>
<p><b>3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– перечень возможных ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения;</li> <li>– выбор наиболее типичной ЧС;</li> <li>– разработка превентивных мер по предупреждению ЧС;</li> <li>– разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий.</li> </ul>	<p><i>Возникновение ЧС, требующих обеспечение электро- и пожаровзрывобезопасности на рабочем месте.</i></p> <p><i>Перечень возможных ЧС:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-пожар;</li> <li>-взрыв;</li> </ul> <p><i>разрушения зданий в результате разрядов атмосферного электричества; ураган; землетрясения;</i></p> <p><i>Для обеспечения безопасной эксплуатации предусмотрена рациональная технологическая схема с комплексной автоматизацией технологи-</i></p>

	<p>ческого процесса, которая позволяет обеспечить непрерывный процесс производства и стабильную работу оборудования. Также предусмотрено отключение электрооборудования со щита операторной.</p>
<p><b>4.Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– специальные(характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны)правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul>	<p>К нормативным актам, регулирующим вопросы охраны труда, в первую очередь относится Трудовой кодекс Российской Федерации. Для обеспечения безопасности на рабочем месте необходимо руководствоваться санитарными нормами и правилами. Для снижения вредного воздействия химических факторов работникам производства выдается молоко питьевое в количестве 0,5 л за смену для выведения из организма токсичных веществ.</p> <p>Конституция РФ, ГОСТ Р 12.1.009-2009.</p>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Ахмеджанов Р.Р.	д.б.н., профессор		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4кмб1	Чернов Александр Владимирович		



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

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
4КМ61	Чернов Александр Владимирович

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

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

<i>1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	<i>Стоимость ПО 33 047 руб.; Размер оклада руководителя проекта 31000 руб.; Размер стипендии дипломника 2100.</i>
<i>2. Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	<i>Число календарных дней в году – 365; Продолжительность выполнения проекта – 24 месяца; Дополнительная заработная плата – 15 % от основной; Накладные расходы - 10% от суммы всех расходов.</i>
<i>3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	<i>Отчисления на социальные нужды во внебюджетные фонды – 27,1 %</i>

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

<i>1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	<i>Построение оценочной карты для сравнения конкурентных разработок</i>
<i>2. Разработка устава научно-технического проекта</i>	<i>Планирование комплекса работ на создание проекта, построение графика выполнения работ</i>
<i>3. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	<i>Расчет материальных затрат на ПО, заработную плату, дополнительные расходные материалы</i>
<i>4. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	<i>Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности</i>

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

<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Карта сегментирования рынка услуг</li> <li>2. Оценка конкурентоспособности технических решений</li> <li>3. Диаграмма Исикава</li> <li>4. Оценка степени готовности научного проекта к коммерциализации</li> <li>5. Перечень заинтересованных сторон проекта</li> <li>6. Цели и результаты проекта</li> <li>7. Контрольные события проекта</li> </ol>	
--	--

8. Рабочая группа проекта
9. Ограничения проекта
10. Сырье, материалы, комплектующие изделия и покупные полуфабрикаты
11. Затраты на спецоборудование для научных работ
12. Расчет основной заработной платы
13. Организационная структура проекта
14. Матрица ответственности
15. План управления коммуникациями проекта
16. Реестр рисков проекта
17. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИИ

**Дата выдачи задания для раздела по линейному графику**

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Креницына Зоя Ва- силевна	К.Т.Н		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4КМ61	Чернов Александр Владимирович		

## Реферат

Выпускная квалификационная работа содержит 207 страниц, 30 рисунков, 31 таблица, 30 источников, 2 приложения, 7 листов графического материала формата А1.

ОХЛАЖДЕНИЕ, ОТМЫВКА, АЗОТНАЯ КИСЛОТА, НИТРОЗНЫЕ ГАЗЫ АБСОРБЦИЯ, ТЕПЛООБМЕН

Объектом исследования является установка охлаждения и отмывки нитрозных газов с разработкой основного оборудования.

Цель работы заключается в проектировании и модернизации основного оборудования по отмывке и охлаждению нитрозных газов.

Для достижения поставленных целей были решены следующие задачи:

1. Теоретическое исследование промышленного процесса отмывки и охлаждения нитрозных газов, изучение схемы и оборудования ОАО "АЗОТ" по производству азотной кислоты.

2. Проведена исследовательская работа по модернизации абсорбционной колонны.

3. Были рассчитаны и спроектированы абсорбционная колонна и кожухотрубный теплообменник.

4. Были рассмотрены вопросы социальной ответственности и посчитаны затраты на исследования.

## Оглавление

Введение .....	15
<b>1. Литературный обзор .....</b>	<b>17</b>
<b>2. Исследовательская работа .....</b>	<b>25</b>
<b>3 Описание технологического процесса и схемы .....</b>	<b>31</b>
3.1. Краткое описание всей технологической схемы производства:.....	31
3.2. Охлаждение, промывка, сжатие нитрозных газов.....	31
3.3. Сущность процесса абсорбции .....	34
3.4. Конструкции абсорберов.....	34
<b>4. Расчет абсорбционной колонны.....</b>	<b>41</b>
4.1 Технологический расчет абсорбционной колонны .....	41
4.1.1. Исходные данные к расчету: .....	41
4.1.2. Расчет плотности сырья:.....	42
4.1.3. Расчет расхода поглотителя: .....	44
4.1.4. Материальный баланс колонны:.....	45
4.1.5. Тепловой баланс абсорбера: .....	46
4.1.6. Определение скорости газа и диаметра абсорбера: .....	47
4.1.7. Определение числа тарелок и высоты аппарата:.....	49
4.1.8. Расчет диаметров основных штуцеров колонны:.....	53
4.2 Расчетно-конструкторский раздел .....	53
4.2.1. Описание конструкции аппарата: .....	55
4.2.2. Выбор материала:.....	56
4.2.3. Расчет обечайки: .....	58
4.2.4. Расчет днища: .....	60
4.2.5. Укрепление отверстий в обечайке и днищах: .....	61
4.2.6. Расчет фланцевого соединения: .....	66
4.2.7. Механический расчет тарелки: .....	77
4.2.8. Расчет аппарата на действие ветровой нагрузки: .....	80
4.2.8.1. Определение расчетных усилий от ветровых нагрузок:.....	80
4.2.8.2. Расчет опорной обечайки: .....	90

4.2.8.3. Расчет опоры: .....	93
4.2.9. Расчет тепловой изоляции: .....	94
<b>5. Расчет теплообменного аппарата .....</b>	<b>97</b>
5.1 Технологический расчет теплообменного аппарата .....	97
5.1.1. Ориентировочный расчет и подбор теплообменника: .....	100
5.1.2. Уточненный расчет теплообменника: .....	101
5.2 Конструктивный расчет теплообменника. ....	107
5.2.1. Определение Высоты аппарата: .....	107
5.2.2. Определение температурных напряжений в трубах и корпусе: ...	108
5.2.3. Расчет и подбор патрубков: .....	109
5.3 Механический расчет кожухотрубчатого теплообменного аппарата .....	111
5.3.1. Расчетные параметры: .....	112
5.3.1.1. Расчетное напряжение: .....	112
5.3.1.2. Прибавки к расчетным толщинам конструктивных элементов: .....	113
5.3.1.3. Расчет давлений: .....	114
5.3.2. Расчет толщины стенки цилиндрической обечайки: .....	114
5.3.3. Расчет толщины стенки распределительной камеры: .....	116
5.3.4. Расчёт толщины стенки эллиптической крышки: .....	117
5.3.5. Расчет фланцевого соединения для фланцев кожуха аппарата: ...	118
5.3.6. Расчет штуцеров: .....	134
5.3.7. Расчет диаметра отверстия, не требующего укрепления: .....	139
5.3.8. Расчет трубной решетки: .....	140
5.3.9. Расчет массы аппарата: .....	154
5.3.10. Расчет седловых опор: .....	156
<b>6 Социальная ответственность .....</b>	<b>160</b>
6.1 Производственная безопасность .....	160
6.1.1. Анализ вредных выявленных факторов при эксплуатации оборудования: .....	160
6.1.2. Анализ опасных выявленных факторов при эксплуатации оборудования: .....	162
6.2 Экологическая безопасность .....	170

6.3	Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	173
6.4	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .....	175
<b>7</b>	<b>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение..</b>	<b>178</b>
7.1	Потенциальные потребители результатов исследование .....	178
7.2	Диаграмма Исикавы.....	178
7.3	Оценка готовности проекта к коммерциализации.....	180
7.4	Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования	182
7.5	Инициация проекта.....	183
7.6	Организационная структура проекта .....	185
7.7	Ограничения и допущения проекта.....	185
7.8	Контрольные события проекта .....	186
7.9	План проекта.....	186
7.10	Бюджет научного исследования .....	189
7.11	Организационная структура проекта .....	194
7.12	Матрица ответственности .....	194
7.13	План управления коммуникациями проекта.....	195
7.14	Реестр рисков проекта .....	195
7.15	Оценка сравнительной эффективности исследования .....	196
	<b>Заключение</b> .....	<b>198</b>
	Список используемой литературы: .....	199
	Приложение А. Раздел ВКР, выполненный на иностранном языке. ....	202

## Введение

Азотная кислота, относящаяся к одним из самых важных многотоннажных продуктов химической промышленности, занимает второе место по объему производства после серной кислоты. Ее применение достаточно обширно в производстве многих продуктов, которые используются в промышленности и в сельском хозяйстве. Около 40% азотной кислоты уходит на получение азотных минеральных удобрений; ее используют для производства взрывчатых веществ, синтетических красителей, пластических масс, лекарственных синтетических веществ, нитролаков и других важнейших продуктов.

Для получения продуктов в азотной промышленности используется атмосферный воздух и другие виды водородосодержащего сырья такие как уголь, сланцы и газ. Около 78 процентов воздуха составляет азот, используемый в процессах получения аммиака, цианамиды кальция и других продуктов азотной промышленности [1].

Так как количество азота, которое мы можем получить из атмосферы, огромны, то сырьевая база азотной промышленности главным образом определяется другим видом сырья – углеводородами, которое применяется для получения водорода или газа, содержащего водород. До 1950ых годов на заводах нашей страны использовались в качестве сырья главным образом твердые топлива.

С середины XXого века процент твердого топлива как для получения водорода резко начал снижаться. В настоящее же время сырьем для производства аммиака в основном является природный газ. В 1980ые годы XXого века более 90% всего аммиака, выпускаемого в нашей стране, получали на производствах, которые использовали в качестве сырья природный газ [1].

При производстве азотной кислоты сначала получают нитрозные газы ( $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ), которые затем вступают в реакцию с водой с образованием 60% азотной кислоты. Реакция оксида азота с водой идет в абсорбере.

Магистерская диссертация посвящена проектированию абсорбционной колонны и кожухотрубного теплообменника, работающим в составе установки производства азотной кислоты.



## 1. Литературный обзор

### Сырье для получения азотной кислоты

Сырьем, которое в основном участвует в получении азотной кислоты, являются такие вещества как аммиак, воздух и вода. Аммиак синтетический почти всегда загрязнен примесями, такими как катализаторная пыль и смазочные масла. Чтобы получить чистый газообразный аммиак используются испарительные станции и дистилляционные отделения для жидкого аммиака.

Атмосферный воздух, который применяется в производстве азотной кислоты, берется на территории предприятия или недалеко от него. Такой воздух загрязнен примесями, мелкой грязью и пылью. Чтобы избавиться от них, он тщательно очищается во избежание отравления катализатора окисления аммиака. Очистка воздуха проводится в скруббере, а после на двухступенчатом фильтре.

Вода, применяемую в технологических нуждах, подвергают специальной подготовке: отстаивают от механических примесей, фильтруют и подвергают химической очистке от солей, которые в ней растворены. Чтобы получить реактивную азотную кислоту нужен чистый паровой конденсат.

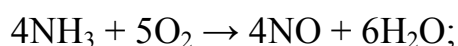
### Методы получения азотной кислоты

Первые заводы для производства азотной кислоты из аммиака были построены запущены в России в 1916ом году. А уже в 1928ом кислоту стали производить из синтетического аммиака [1].

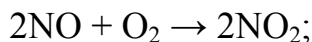
Различают два производства азотной кислоты: слабой (разбавленной) и концентрированной.

Процессы производства разбавленной азотной кислоты содержат в себе три стадии:

1) конверсии аммиака для получения оксида азота



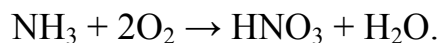
2) окисления оксида азота до диоксида азота



3) абсорбции оксидов азота водой



Суммарная реакция образования азотной кислоты выражается формулой



*Производство азотной кислоты по схеме АК-72.* В основе схемы АК-72, лежит замкнутые энерготехнологические циклы с двухступенчатой конверсией аммиака а также с охлаждением нитрозных газов под давлением 0,43–0,48 МПа и абсорбцией оксидов азота под давлением 1,1–1,25 МПа; продукция после этих операций выходит в виде 60%-ной азотной кислоты. Первый такой агрегат мощностью 380 тысяч тонн в год был запущен в 1976 г [1].

Принципиальная технологическая схема процесса показана на рис. 1.

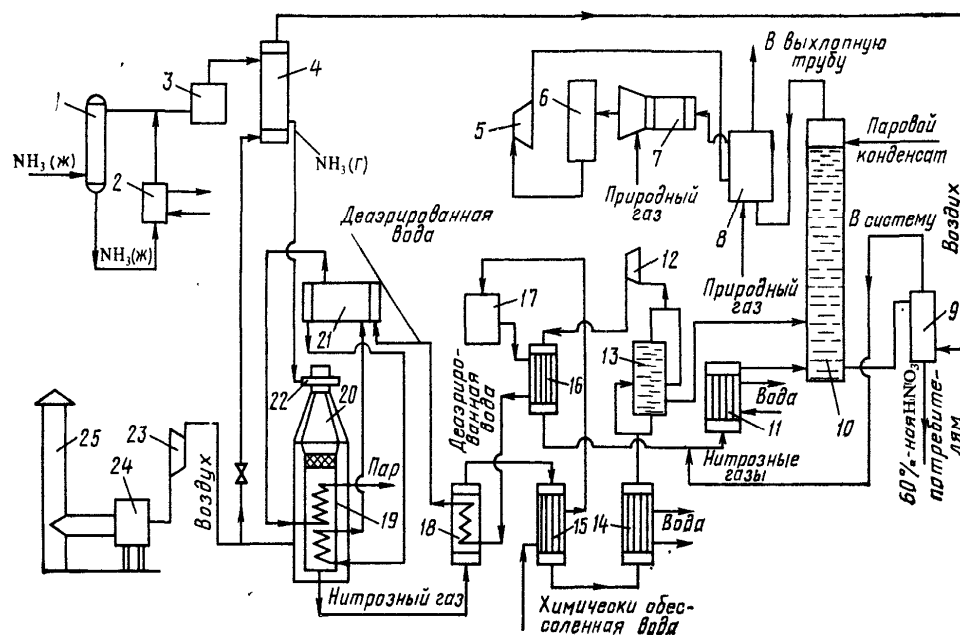


Рис. 1. –Технологическая схема производства азотной кислоты АК-72:

1 – ресивер; 2 – испаритель; 3, 24 – фильтры; 4, 15 – подогреватели; 5 – рекуперационная турбина; 6 – реактор каталитической очистки; 7 – смеситель; 8 – топочное устройство; 9 – продувочная колонна; 10 – абсорбционная колонна, II, 14 – водяные холодильники; 12, 23 – компрессоры; 13 – газовый промыватель; 16, 18 – холодильники нитрозных газов; 17 – деаэрационная колонна; 19

– котел-утилизатор; 20 – контактный аппарат; 21 – барабан с сепарационным устройством; 22 – смесительная камера; 25 – труба для забора воздуха

Воздух забираемый в атмосфере через трубу 25, очищают в фильтре 24 от пыли, далее сжимают воздушным компрессором с 23 до 0,42 МПа и, поделив на 2 потока, отправляют на подогреватель аммиака и контактные аппараты. Жидкий аммиак (смесь пара и жидкости) через ресивер 1 отправляют в кожухотрубный испаритель-2, где он испаряется под температурой 10–15 °С и при давлении 0,6 МПа.

После газообразный аммиак проходит очистку от масел и других механических примесей на фильтре 3, а после направляются в подогреватель аммиака 4, где его нагревают до температуры 80–120 °С горячим воздухом.

Очищенный воздух и аммиак направляют в смесительную камеру 22 находящегося в контактном аппарате 20. Аммиачно-воздушная смесь, образующаяся здесь, содержит 9,5–10%  $\text{NH}_3$ . После этого смесь проходит тонкую очистку в фильтре, который встроен в контактный аппарат, и поступает в двухступенчатый катализатор, состоящий из трех платиноидных сит и одного слоя неплатинового катализатора. Далее нитрозные газы при 830–850 °С идут на котел-утилизатор-19, находящийся под контактным аппаратом, в котором за счет охлаждения получается пар с давлением 4 МПа и температурой около 450 °С. Котел заправляют водой, деаэрированной на колонне 17. Деаэрированная вода идет через теплообменник 16, нагреваясь нитрозными газами до температуры 150 °С, и экономайзер 18 а после направляется на барабан котла-утилизатора 21.

После котла-утилизатора нитрозные газы охлаждают в экономайзере 18, отдают теплоту в подогревателе 15 и направляются в водяной холодильник 14, чтобы охладиться до 55 °С. При этом происходит конденсация паров воды и образование 40–45%-ной  $\text{HNO}_3$ , подаваемой в газовый промыватель 13. Также сюда поступают и нитрозные газы.

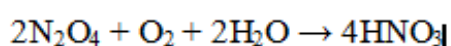
В промывателе проходит одновременное охлаждение и промывка нитрозных газов от нитрит-нитратных солей а также конденсация  $\text{HNO}_3$ . Азотная кислота из нижней части промывателя подается непосредственно на абсорбционную колонну-10, а нитрозные газы сжимаемые в компрессоре 12 до давления 1,1–1,25 МПа, нагреваются до 210–230 °С. Далее нитрозные газы охлаждаются в холодильнике 16 до температуры 155–165 °С. а в холодильнике 11 на второй ступени до 60–65 °С, а после подаются на абсорбционную колонну 10. На тарелках абсорбционной колонны находятся земеевики для охлаждения азотной кислоты. Наверху в колонну отправляется паровой конденсат с температурой не более 40 °С. Внизу колонны выходит 58–60%-ная кислота, поступающая в продувочную колонну 9, чтобы удалить растворенные в ней оксиды азота. Далее кислота проходит в хранилище.

Отходящие газы из абсорбционной колонны нагревают в подогревателе 8, смешиваются в смесителе 7 с природным газом. Далее подогретый до температуры 480 °С идет в реактор на каталитическую очистку от оксидов азота. Катализатором очистки является алюмопалладиевый катализатор АПК-2. После каталитического разложения выхлопные газы, которые содержат до 0,008% оксидов азота при 750 °С, направляются на рекуперационную турбину 5, являющаяся частью газотурбинного агрегата. Тепловая энергия выхлопных газов переходит в механическую энергию, понижая давление газа до 0,95–1 МПа. Энергия, которая вырабатывается в газовой турбине, далее используется для привода компрессоров 12 и 23.

*Производство слабой азотной кислоты под повышенным давлением.* В 1960-х годах был разработан агрегат для производства кислоты с мощностью 120 тысяч тонн в год под давлением 0,716 МПа с использованием высокотемпературной каталитической очистки выхлопных газов, который выпускает 53-58%-ную азотную кислоту [1]. В результате разработки схемы были пересмотрены проблемы экономической эффективности производства схемы АК-72, после чего мощность установки уменьшилась с 380 тыс. тонн до 120 тыс. тонн и

при этом было снижено давление по всей схеме. К примеру, абсорберы стали работать при давлении от 0,5 до 0,7 МПа. Была улучшена схема очистки хвостовых газов [1].

*Производство концентрированной азотной кислоты прямым синтезом из оксидов азота.* Прямой синтез азотной кислоты основывается на взаимодействии жидких оксидов азота с водой а также кислородом с давлением до 5 МПа по уравнению



Стопроцентный NO с атмосферным давлением и температурой равной 21,5 °С переходит в жидкое состояние полностью. После окисления аммиака полученный NO окисляется до NO<sub>2</sub> с содержанием в газовой смеси около 11%. Перевести диоксид азота с такой концентрацией в жидкое состояние под атмосферном давлением невозможно. В связи с этим, чтобы сжидить оксиды азота применяют повышенные давления.

*Концентрирование азотной кислоты с помощью водоотнимающих веществ.* Получение концентрированной азотной кислоты перегонкой разбавленной не представляется возможным. А при перегонке и кипении разбавленной кислоты ее можно лишь упарить не более чем до 68,4 % , так как после концентрация HNO<sub>3</sub> в перегоняемой смеси меняться не будет [1].

В промышленном масштабе перегонка разбавленных водных растворов HNO<sub>3</sub> осуществляются с присутствием в ней водоотнимающих веществ (концентрированные H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> , H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, концентрированные растворы нитратов и т.д.). С помощью водоотнимающих веществ можно уменьшить содержание водяных паров над кипящей смесью и повысить концентрацию паров HNO<sub>3</sub>, конденсация которых позволяет получить с 98%-ную азотную кислоту.

Ниже представлена схема концентрирования HNO<sub>3</sub> с применением H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> показанная на рисунке 2. Разбавленная азотная кислота из напорного бака 1 направляется на абсорбционную колонну 6 и через два расходомера 2,

включенных параллельно. Один из потоков азотной кислоты идет на испаритель 3 и в виде смеси жидкости и пара направляется на 10-ую тарелку колонны 6, а второй без подогрева идет на тарелку, тарелку находящуюся выше.

$H_2SO_4$  из напорного бака 4 и через регулятор 5 направляется на верхнюю часть колонны 6, которая находится выше, чем ввод холодного потока  $HNO_3$ . В нижнюю же часть колонны направляется острый пар, при нагреве которым из тройной смеси азотная кислота испаряется.

Пары  $HNO_3$  при температурах от 70 до 85 °С, поднимаются вверх и выходят через штуцер в крышке колонны. Далее они поступают на холодильник-конденсатор 7. Даже после этого в парах остаются примеси оксидов азота и воды.

Внутри холодильника-конденсатора пары кислоты при температуре 30°С конденсируются и образовывается 98–99%-ная азотная кислоты (при этом оксиды азота частично поглощаются).

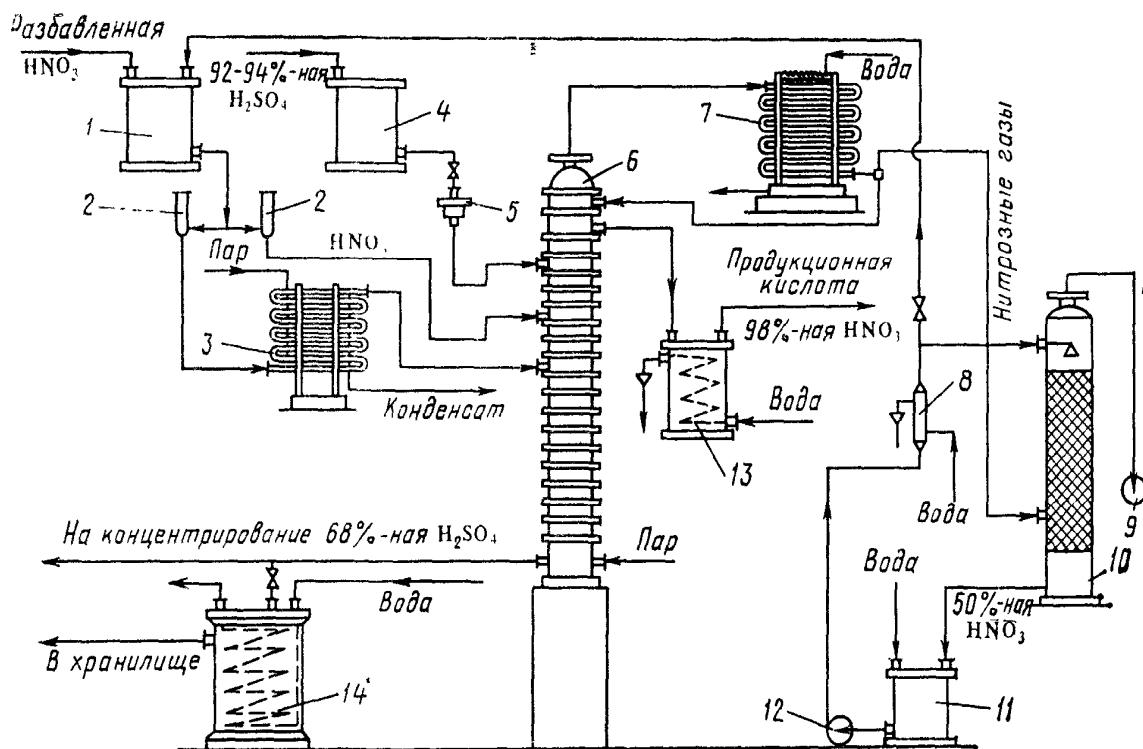


Рис. 2. Схема концентрирования разбавленной азотной кислоты в присутствии серной кислоты

1, 4 – напорные баки для азотной и серной кислоты; 2 – контрольные фонари; 3 – испаритель разбавленной азотной кислоты; 5 – коробка для регулирования подачи кислоты; 6 – концентрационная колонна, 7 – холодильник конденсатор; 8 – холодильник кислоты, циркулирующей в башне; 9 – вентилятор; 10 – поглотительная башня; 11 – сборник; 12 – насос; 13 – холодильник концентрированной азотной кислоты, 14 – холодильник отработанной серной кислоты

Концентрированная  $\text{HNO}_3$ , в которой присутствуют оксиды азота, проходит на две верхние тарелки и далее поступает на них последовательно, при этом оксиды азота выдуваются из раствора паром  $\text{HNO}_3$ , поступающим в конденсатор 7. Пары несконденсированной кислоты а также выделившиеся оксиды азота проходят на абсорбцию до башни 10, которая орошается водой. Здесь полученная 50%-ная азотная кислота направляется в сборник 11 и вновь идет на концентрирование. Уже концентрированную  $\text{HNO}_3$  после охлаждения направляется в склад готового продукта.

Отработанная же серная кислота с концентраций 65–85% направляется на повторное концентрирование. После концентрирования  $\text{HNO}_3$  с применением 92–93%-ной  $\text{H}_2\text{SO}_4$  расход последней в значительной степени уменьшается при подаче на концентрирование 59–60%-ной азотной кислоты вместо 48–50%-ной. В связи с этим в некоторых случаях более выгодно провести предварительное концентрирование 50%-ной азотной кислоты до содержания 60% путем упаривания.

Самый выраженный недостаток концентрирования  $\text{HNO}_3$  при помощи  $\text{H}_2\text{SO}_4$  это высокая концентрация паров серной кислоты в выхлопных газах идущих после электрофильтров (около 0,3–0,8 г/м<sup>3</sup> газа). В связи с этим серную кислоту часто заменяют нитратом цинка или магния.

*Концентрирование азотной кислоты с помощью нитрата магния.* Такой способ концентрирования дает возможность получить чистую концентрированную азотную кислоту и при этом во много раз уменьшить вредные выбро-

сы в атмосферу. Но у него также есть и ряд существенных недостатков, которые не позволяют использовать этот способ всегда. Один из них связан с повышенной себестоимостью получаемого продукта а также с проблемой утилизации плохо перерабатываемых твердых отходов [1].



## **2. Исследовательская работа: Оптимизация режима процесса кислотообразования в производстве азотной кислоты на базе компьютерного моделирования**

Процессы образования кислоты в результате абсорбции нитрозных газов для производства неконцентрированной азотной кислоты состоит из большого количества простых физико-химических процессов. Такая тесная связь в процессе окисления оксида азота (II) до оксида азота (IV) и абсорбции последнего растворами азотной кислоты обуславливает необходимость комплексного подхода в изучении и первой и второй стадии. Для реализации этих процессов на предприятиях была изучена литература о лимитирующих реакциях. Однако две точки зрения о лимитирующей в данном процессе реакции по влиянию факторов довольно сильно разнятся и несовместимы друг с другом. С одной стороны, процесс зависит от окисления оксид азота (II) в оксид азота (IV), а с другой – от диспропорционирования  $\text{HNO}_2$  и десорбции образующегося  $\text{NO}$  [5]. Такое неправильное определение режима протекающих превращений приводит к тому, что повышается потери оксидов азота а также снижается концентрация азотной кислоты, получаемой в результате процесса.

В литературных источниках можно найти информацию о необычном влиянии температур на процесс кислотообразования в абсорбционных колоннах. Сложные химизм и механизм идущих процессов дают технологам задачу по определению реакции, которая лимитирует все процессы. Температура, которая положительно влияет на окисление в газовой фазе, в тоже время отрицательно влияет на окисление в жидкой [6]. Чтобы изучить влияние температур на абсорбцию оксидов азота была разработана математическая модель, которая основывается на кинетических зависимостях протекающих в физико-химических процессах. Эта модель была реализована в среде MathCAD. При изотермическом режиме по высоте колонны наблюдается понижение концен-

трации оксидов  $\text{NO}_x$  в «хвостовом» газе при температуре  $35\text{ }^\circ\text{C}$ . Эта зависимость представлена ниже на рис. 3.

Но такие изменения температур на тарелках по всей высоте колонны приведет к оптимизации всего технологического режима, цель которого получение азотной кислоты более высоких концентраций при одновременном понижении потерь оксидов азота с выхлопными газами. Разработанная математическая модель дает возможность провести эксперимент.

После использования итерационных вычислений были получены зависимости по изменению суммарных концентраций оксидов азота (II) и оксида азота (IV) от температуры на исследуемой тарелке (рис. 4). Расчетные зависимости имеют экстремальное значение на кривых, причем значение минимума по концентрационным значениям от тарелки к другой получается при низкой температуре.

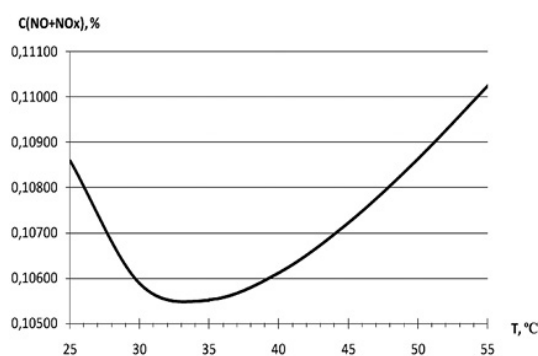


Рис. 3. Влияние температуры на концентрацию оксидов азота в отходящих газах

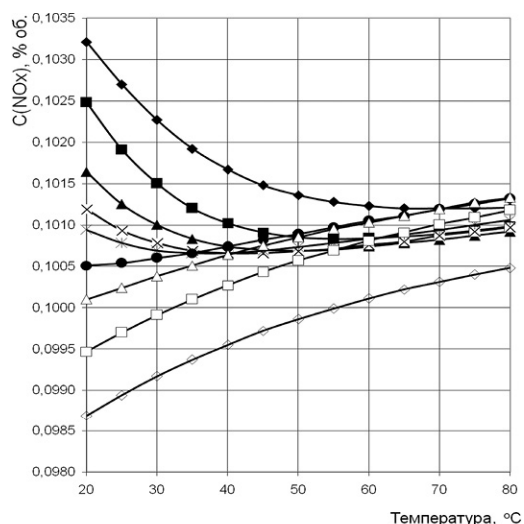


Рис. 4. Зависимость концентрации оксидов азота от температуры на отдельно взятой тарелке (1-6, 10, 20)

В таблице приведенной ниже представлены значения температур, при которых концентрации оксидов азота в «хвостовом» газе достигают минимальных значений.

Температура, при которой достигаются минимальные значения концентрации оксидов азота, остаются также постоянными после изменения начальных условий. Но значение концентрации оксидов азота зависит от множества факторов: начальной температуры нитрозного газа на входе в колонну, режима орошения колонны по концентрации и по объему и других. По ходу проведения исследования было определено, что закрепление повышенной температуры от 60 до 80 °C на первой тарелке и ее понижение до 20 °C с десятой тарелки и выше позволяет понизить концентрацию NO<sub>x</sub> в выхлопном газе, что позволяет снизить затраты на ее очистку перед выбросом в атмосферу.

Таблица 1- Оптимальный температурный режим колонны

Номер тарелки	1	2	3	4	5	6	10	Выше 10
Температура, °C	70	55	50	45	35	25	20	<20

Приведенный выше температурный режим колонны является возможным только в зимнее время. А при высоких температурах окружающего воздуха охлаждение реакционной массы колонны будет происходить только до 35 °С.

Чтобы изучить температурный режим абсорбционной колонны по высоте нужно исследовать влияние таких параметров как:

- режим орошения растворами кислоты разного объема и концентрации (кратность отбора с n-ной тарелки);
- температуру на тарелках по всей высоте колонны;
- температуру оборотной воды (в зимний и летний режимы).

На рис. 3, а показана зависимость концентраций NO<sub>x</sub> от температуры на 20ой тарелке в летнее время:

- 1) проведение охлаждения без изменений;
- 2) проведение охлаждения с учетом оптимальных температур на тарелках (см. выше);
- 3) проведение охлаждения и с учетом оптимальных температур на тарелках и с использованием измененного режима орошения (отбор жидкости в отношении 0,4 с 19 тарелки). На рис. 4, б изображены эти же зависимости для зимнего времени года.

Из полученных ниже зависимостей можно заметить, что концентрация оксидов азота в выхлопном газе ниже чем с изотермическим режимом при поддержании оптимального температурного режима на тарелках. Если внести дополнительные изменения в количество и состав абсорбента, который подается в процессе абсорбции, можно достигнуть дополнительного поглощения оксидов растворами неконцентрированной HNO<sub>3</sub>.

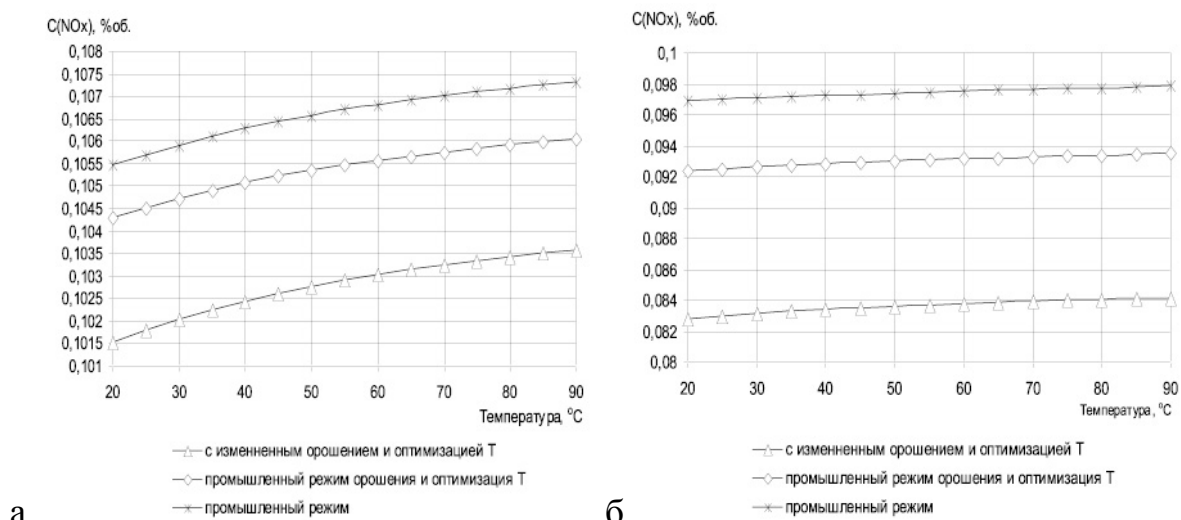


Рис. 4. Зависимость концентрации NOx в выхлопном газе после абсорбционной колонны от температуры на 20ой тарелке в летнее время (а) и зимнее время (б)

В летнее время года понижение концентраций оксидов азота в отходящих газах составляет около 1,1 и 3,6 % для 2ого и 3ого режимов исследования соответственно. В зимнее же время эти значения увеличиваются до 4,6 и 14,4 %. Эти изменения связаны с тем, что основное количество оксидов азота (80–90 %) переходит в азотную кислоту еще на 7–15ых тарелках (рис. 4), в связи с этим оптимизация температурного режима на нижних тарелках существенно изменяет процесс.

При изучении влияния оказываемого давлением на процессы, происходящие при хемосорбции нитрозного газа, привели к тому, что одним из факторов, изучаемых на основе математической модели, стало давление.

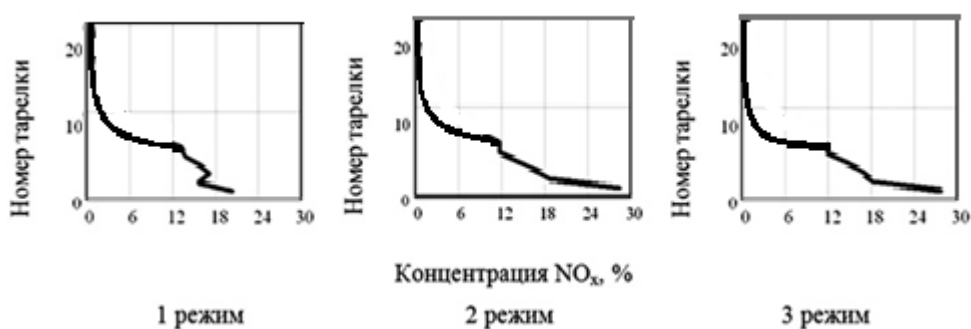


Рис. 5. Количество оксидов азота, превращенное в азотную кислоту

Результаты расчетов показали, что давление оказывает положительное влияние на абсорбцию оксидов азота, путем смещения равновесия в прямом направлении. Если повысить давление до 0,63 МПа, то это приведет к понижению концентраций оксидов азота на выходе абсорбционной колонны до 0,105 % об. Такая кривая зависимости концентраций оксидов азота в выхлопном газе присуща и для NO и для NO<sub>2</sub> при рассмотрении математической модели процесса.

После проведения оптимизационной работы узла абсорбции нитрозных газов в производстве неконцентрированной азотной кислоты можно сделать следующие выводы:

– температура оказывает неоднозначное влияние на образование азотной кислоты, вследствие чего выяснилось оптимальное значение температуры, находящееся от 20 до 35 °С, при которых в изотермическом режиме концентрация оксидов азота в «хвостовом» газе минимально [6];

– оптимизации температурных режимов ведения процесса абсорбции можно добиться путем повышения концентрации азотной кислоты, одновременно понижая концентрацию NO<sub>x</sub> на выходе из абсорбционной колонны [5];

– при повышении давления прохождение процесса улучшается, смещая равновесие в прямом направлении.

В связи с этим было принято решение повысить давление в аппарате с 0,5 МПа до 0,63 МПа

### 3. Описание технологического процесса и схемы

#### 3.1 Краткое описание всей технологической схемы производства

Процесс получения неконцентрированной азотной кислоты состоит из следующих стадий:

- испарение жидкого аммиака – блок №3;
- подготовка аммиачно-воздушной смеси и окисление газообразного аммиака – блок №1;
- утилизация тепла реакции окисления аммиака – блок №1;
- охлаждение и промывка нитрозных газов блок №5, сжатие нитрозных газов – блок №2;
- абсорбция окислов азота – блок № 4;
- каталитическая очистка и рекуперация энергии хвостовых газов – блок № 6;
- водооборотный цикл – к 737;
- склад кислоты – к.735.
- оборудование (маслосистема КМА-2).

#### 3.2 Охлаждение, промывка, сжатие нитрозных газов

Нитрозные газы после котла-утилизатора поз. Э-13 с температурой не более 420 оС поступают в экономайзер поз. Э-21, где охлаждаются питательной водой до температуры не более 280 оС и направляются в теплообменник поз. Т-25, в котором охлаждаются частично обессоленной водой до температуры не более 180 оС (см. схему, стр. 184).

После теплообменника поз.Т-25 нитрозные газы, охладившись в теплообменнике поз. Т-34 оборотной водой до температуры не более 65 оС, поступают под первую тарелку газового промывателя поз. К-27.

Газовый промыватель поз. К-27 представляет собой однопоточный (по жидкости) аппарат колонного типа, снабженный четырьмя ситчатыми

тарелками. В верхней части газового промывателя установлен брызгоотбойник.

Охлаждение и отмывка нитрозных газов от солей аммония в газовом промывателе поз. К-27 производится азотной кислотой, циркулирующей по схеме:

К-27 → Т-28 → Т-22 → Н-36 → К-27

Циркуляция кислоты через газовый промыватель поз. К-27 осуществляется насосом поз. Н-36. Охлаждение кислоты циркуляционного контура производится оборотной водой в теплообменнике поз. Т-22 и захлажденной водой в теплообменнике поз. Т-28.

Вода, образовавшаяся в результате реакции окисления аммиака в контактном аппарате поз. Р-12, конденсируется в теплообменнике поз. Т-34 и абсорбирует двуокись азота. Образовавшаяся неконцентрированная азотная кислота закрепляется в газовом промывателе поз. К-27 до массовой доли (20-50) %.

Уровень кислоты в газовом промывателе поз. К-27 поддерживается автоматически регулятором поз. LIRCA-2 в пределах (30-70) % с выдачей избытка кислоты насосом поз. Н-35 в абсорбционную колонну поз. К-31 на 6-7-8 тарелки. При достижении минимального – 20 % и максимального – 70 % значений уровня кислоты в газовом промывателе поз. К-27 включается светозвуковая сигнализация.

Охлажденные в газовом промывателе поз. К-27 до температуры н/б 65 оС нитрозные газы поступают на всас нитрозного нагнетателя поз. М-10в.

Нитрозный нагнетатель поз. М-10в – это центробежный компрессор типа 1150-42-1. Нагнетатель одноцилиндровый, четырехступенчатый с колесами компрессорного типа и состоит из корпуса, направляющего аппарата,



диафрагм с диффузорами ротора.

Для удаления отложений солей аммония в проточную часть нитрозного нагнетателя поз. М-10в периодически 1 раз в смену (8 часов) в течение часа подается паровой конденсат насосом поз. Н-46. С этой же целью конденсат подается также в трубопроводы обвязки нитрозного нагнетателя и в антипомпажный клапан нитрозного нагнетателя Ду 300. Дренаж конденсата со 2, 3, 4-й ступени сжатия нитрозного нагнетателя производится в газовый промыватель поз. К-27, а с линии всаса и 1 ступени - в дренажную емкость поз. Е-48/2.

Для предотвращения утечки нитрозного газа в машинный зал из нитрозного нагнетателя поз. М-10в предусмотрены лабиринтные уплотнения. В качестве запирающего элемента на концевые лабиринтные уплотнения подается воздух с нагнетания воздушного компрессора поз.М-10а или из сети сжатого воздуха.

Минимальный перепад давления «нитрозный газ – воздух» 0,05 кгс/см<sup>2</sup>.

Нитрозные газы с давлением (6,5 – 11,0) кгс/см<sup>2</sup> и температурой (190–230) оС, охладившись в теплообменнике поз. Т-54 питательной водой до температуры (155 – 165) оС, поступают в теплообменник поз. Т-29, где охлаждаются оборотной водой до температуры не более 65 оС.

Охлажденные до температуры не более 65 оС нитрозные газы с давлением (6,5 – 11,0) кгс/см<sup>2</sup> поступают под первую тарелку абсорбционной колонны поз. К-31 (см. схему, стр. 185), а азотную кислоту направляют на 6–7-ю тарелку. Сверху в колонну подают охлажденный паровой конденсат.

Образующаяся в верхней части колонны азотная кислота низкой концентрации перетекает на нижележащие тарелки. За счет поглощения оксидов азота концентрация кислоты постепенно увеличивается и на выходе достигает 55–58%, причем содержание растворенных в ней оксидов азота достигает ~1%. Поэтому кислота направляется в продувочную колонну 10, где подогре-

тым воздухом из нее отдувают оксиды азота, и отбеленная азотная кислота поступает на склад. Воздух после продувочной колонны подается в нижнюю часть абсорбционной колонны 9.

Степень абсорбции оксидов азота достигает 99%. Выходящие из колонны хвостовые газы с содержанием оксидов азота до 0,11% при температуре 35 °С проходят подогреватель 11.

### 3.3 Сущность процесса абсорбции

Абсорбция – процесс выделения одного или нескольких компонентов из газовой или парогазовой смеси путем их поглощения селективным жидким поглотителем – абсорбентом [7].

Разновидностью процесса абсорбции является хемосорбция. При хемосорбции происходит химическая реакция между поглотителем и адсорбируемым газом. Часто при этом происходит значительное выделение тепла, поэтому аппараты, в которых идет хемосорбция, снабжаются специальными устройствами для отвода тепла. В проектируемом аппарате идет реакция оксидов азота с водой с образованием азотной кислоты.

В промышленных установках абсорбция сочетается с десорбцией – выделением поглощенного вещества. Этим обеспечивается возможность получения целевого продукта и многократного использования абсорбента.

### 3.4 Конструкции абсорберов

Аппараты, внутри которых происходят абсорбционные процессы, называются абсорберами. Как и все остальные процессы массопередачи, абсорбция осуществляется на поверхности раздела фаз. В связи с этим во всех абсорберах должна быть достаточно развита поверхность взаимодействия между газом и жидкостью. Все абсорберы по способу образования поверхности соприкосновения можно разделить на группы: 1- пленочные и поверхностные; 2- барботажные или тарельчатые; 3- насадочные; 4- распыляющие. Большую распро-

страненность в промышленности получили насадочные и тарельчатые абсорберы [7].

Тарельчатые абсорберы (см. рисунок 5, а) представляют собой вертикальные аппарата, внутри верхней части корпуса 1 которого устанавливают каплеотбойник 2, который предотвращает уносы абсорбента потоками газа.

Контакт абсорбента и газового потока проходит на контактных тарелках 3 той или другой конструкции. Чтобы проводить ремонт или монтаж устройств внутри абсорбера через каждые 4 – 5 тарелок устанавливают люки-лазы 4 с условным диаметром более 450 мм. А в нижней части корпус аппарата приваривают к опорной обечайке 5.

В настоящее время большую распространенность получили конструкции тарельчатых колонн. Все барботажные абсорберы по способу слива жидкости из тарелок делятся на колонны с тарелками без и со сливными устройствами.

На тарельчатых абсорберах со сливными устройствами переливы жидкости из тарелки в тарелку происходит при помощи таких устройств как сливные трубки, карманы и др. Нижние концы трубок погружают в стакан на тарелках расположенных ниже. Далее образуются гидравлические затворы, которые исключают возможность прохождения газа через сливные устройства.

В зависимости от плотности орошения и скорости газа можно выделить три следующие гидродинамические режимы работы барботажных тарелок: 1)пузырьковый;2) пенный;3) струйный. Все три режима отличаются друг от друга структурами барботажного слоя.

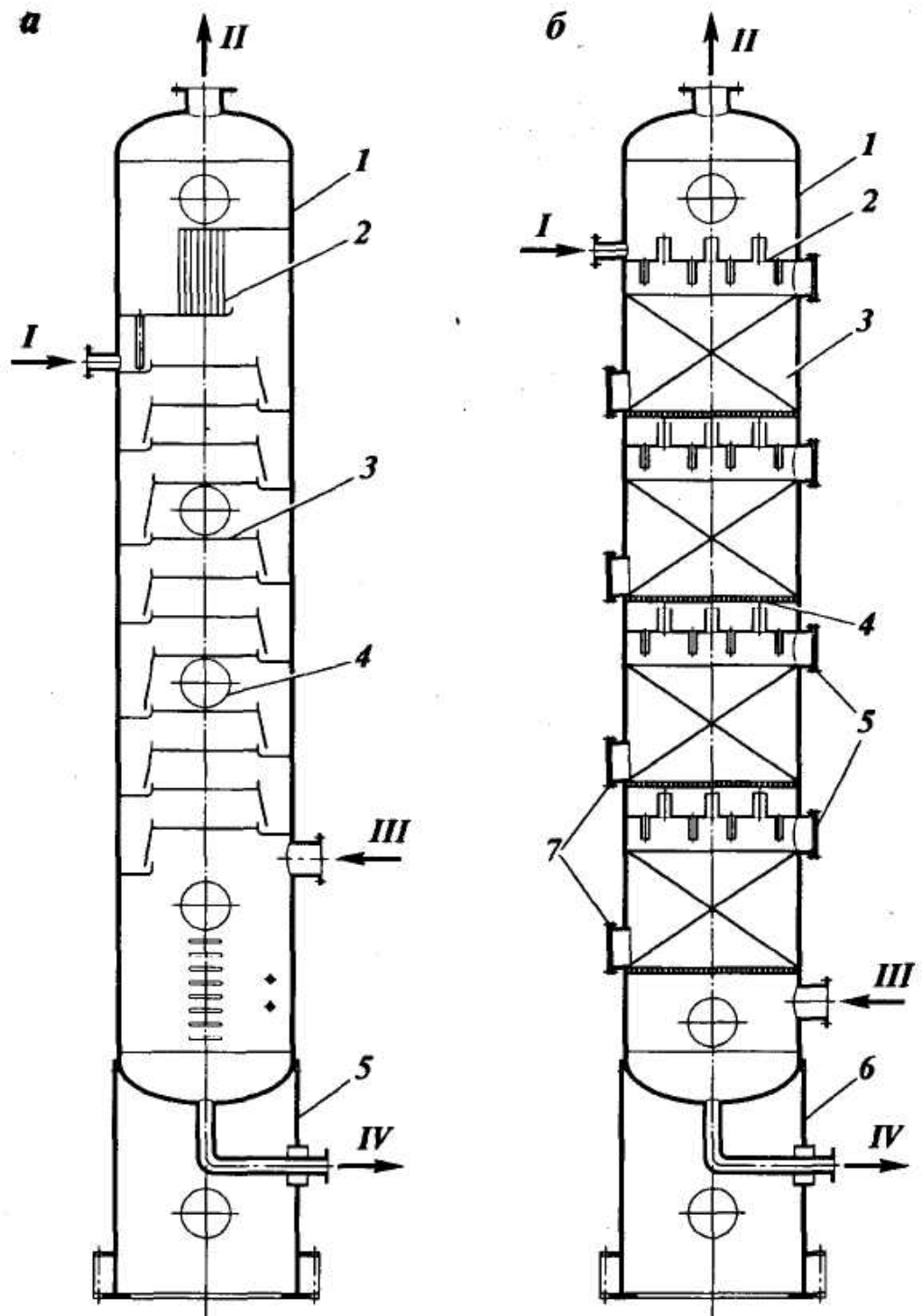


Рис. 6. – Абсорберы

а – тарельчатый: 1 – корпус; 2 – каплеотбойник; 3 – тарелка; 4 – люк; 5 – опорная обечайка;

б – насадочный: 1 – корпус; 2 – распределительная тарелка; 3 – насадка; 4 – опорная решетка; 5 – загрузочные люки; 6 – опора; 7 – люки выгрузки насадки.

Потоки: I – ненасыщенный абсорбент; II – сухой газ; III – сырой газ; IV – насыщенный абсорбент

Насадочный абсорбер (см. рисунок 5, б) в верхней части имеет распределитель 2 регенерированного абсорбента. Слой регуляторной или насыпной насадки опирается сверху на опорную решетку 4. Чтобы можно было производить загрузку и выгрузку насадки колонна оснащена люками 5 и 7.

Жидкость в насадочных колоннах течет по элементу насадки в большей степени в виде тонкой пленки. В связи с этим поверхностью контакта фаз является смоченная поверхность насадки, и в следствие все насадочные колонны можно рассматривать как разновидность пленочных. Но не следует забывать, что в последних пленочное течение жидкости идет по всей высоте колонны, а в насадочных, напротив, только по высоте элемента насадки.

При переходе жидкости из одного элемента насадки колонны на другую пленка жидкости разрушается и на элементе, лежащем ниже, образовывается новая пленка. Одновременно с этим одна часть жидкости переходит через нижерасположенные слои насадки в виде струй, капель или брызг. А другая часть поверхности насадки смачивается застойной жидкостью.

В качестве насадки могут использоваться и засыпаемые навалом в колонну кокс или кварц. Однако из-за малой удельной поверхности, высокого гидравлического сопротивления и других недостатков кусковые насадки в настоящее время применяются достаточно редко.

Чтобы оценить конструкцию и устройство тарелок обычно принимаются во внимание такие показатели как [8]:

- металлоемкость;
- производительность;
- гидравлическое сопротивление  $\Delta p$ ;

- эффективность  $\eta$  при разных рабочих нагрузках;
- диапазон рабочих нагрузок при достаточно высокой эффективности;
- сопротивление тарелки ( $\Delta p/\eta$ ) при различных рабочих нагрузках;
- возможность работы на средах, склонных к полимеризации, образованию инкрустаций и т.п.;
- простоту конструкции, проявляющуюся в трудоемкости изготовления, монтажа, ремонтов;

В большинстве случаев для оценки конструкции решающее значение имеют первые четыре показателя.

На основании представленного обзора конструкций разрабатываемого технологического оборудования можно определить наиболее предпочтительную конструкцию абсорбционной колонны: это колонна с ситчатыми или колпачковыми тарелками.

Выбор ситчатых тарелок обусловлен простотой конструкции и удобством монтажа. Колпачковые тарелки допускают большее колебание нагрузки по газу и обеспечивают лучшую степень контакта фаз, чем ситчатые, но сложнее в обслуживании.

Конструкция колпачковой тарелки приведена на рисунке 6.

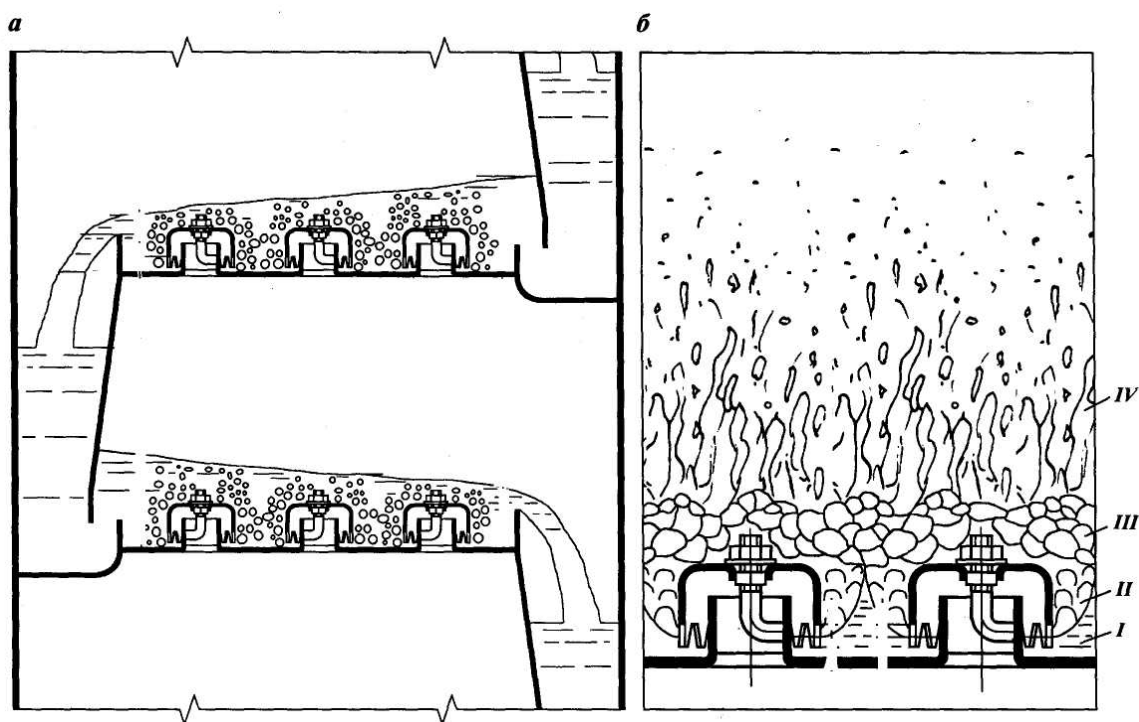


Рис.7.— Конструкция колпачковой тарелки

а — общий вид тарелки; б — схема барботажа газа в зоне контакта.

I — зона небарботируемой жидкости; II — зона недеформируемых струй; III — зона деформируемых струй — пены; IV — зона парового пространства с взвешенными каплями жидкости.

Поток газа при поступлении в слой жидкости прорезями колпачков разбивается на большое число отдельных струй, которые с большой скоростью входят в жидкость. В пространстве между смежными колпачками паровые и жидкостные струи, сталкиваясь, деформируются, образуя слой газожидкостной системы (пены) с сильно развитой поверхностью контакта фаз (рисунок 1.4, б).

В проектируемом аппарате идет химическая реакция со значительным выделением тепла [1], поэтому необходимо предусмотреть устройства для отвода тепла. Конструкции ситчатых тарелок позволят разместить змеевики прямо над полотном тарелки.

Принимаем колонну с ситчатыми тарелками, на нижних тарелках, где реакция идет наиболее сильно, устанавливаем несколько змеевиков.

Оба типа тарелок оснащены переливными устройствами. Жидкость поступает на полотно тарелки из переливного устройства и течет от приточной стороны тарелки к сточной, при этом на тарелке возникает градиент уровня жидкости.

Стенка переливного устройства погружена в жидкость, находящуюся на нижележащей тарелке, что обеспечивает в колонне соответствующий гидравлический затвор, исключающий возможность прохождения паров через переливное устройство. Уровень жидкости в переливном устройстве выше уровня жидкости на тарелке, что обеспечивает необходимый расход жидкости.



#### 4. Технологический расчет абсорбционной колонны

##### 4.1.1 Исходные данные к расчету

Согласно заданию на проектирование, исходными данными для расчета абсорбера являются следующие величины, сведенные в таблицу 1.

Таблица 2 – Исходные данные к расчету колонны

Наименование показателя	Обозначение	Величина
Расход газовой смеси при рабочих условиях	$V_r$	11 м <sup>3</sup> /с
Температура газовой смеси	$t_r$	50 °С
Давление газовой смеси	$P_r$	0,63 МПа
Состав газовой смеси (об.)		
NO <sub>2</sub>	$Y_1$	7,66 %
NO	$Y_2$	0,64 %
O <sub>2</sub>	$Y_3$	6,35 %
N <sub>2</sub>	$Y_4$	82,2 %
H <sub>2</sub> O	$Y_5$	3,15 %
Степень окисления оксидов азота в кислоту	$\alpha$	0,92
Концентрация продукционной азотной кислоты	$\psi$	58%
Рабочая температура	$t_p$	30 °С

В типовой технологической схеме присутствуют 5 одинаковых колонн. Примем по аналогии с производством 5 аппаратов. Тогда расход газа в каждом аппарате

$$V_r = 11 / 5 = 2.2 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (4.1)$$

Схема к технологическому расчету приведена на рисунке 8а.

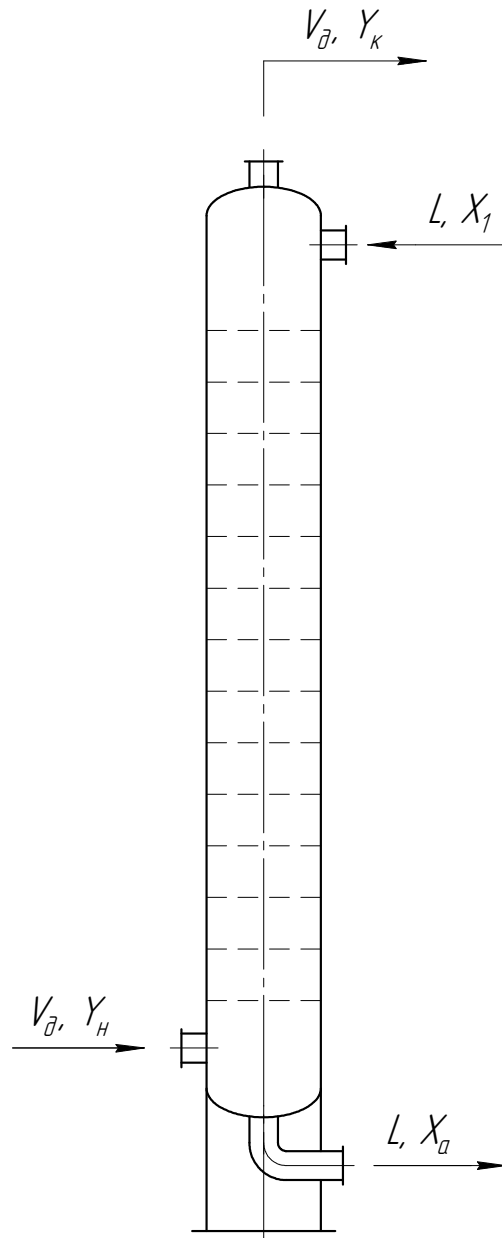


Рис. 8а. – Схема к технологическому расчету абсорбера

#### 4.1.2 Расчет плотности сырья

Выполним перерасчет объемного расхода в мольный

$$G_{\Gamma} := \frac{V_{\Gamma} \cdot P_{\Gamma} \cdot T_{\text{н.у.}}}{V_0 \cdot P_{\text{н.у.}} \cdot T_{\Gamma}}, \quad (4.2)$$

где  $V_0 = 22.4$  л/моль – молярный объем идеального газа при н.у.;

$T_{\text{н.у.}} = 273$  К – температура н.у.;

$P_{\text{н.у.}} = 0,1013$  МПа – давление н.у.;

$T_r = t_r + 273 = 30 + 273 = 303 \text{ K}$  – температура газовой смеси.

$$G_r = \frac{2,2}{22,4} \frac{0,63 \times 273}{0,1013 \times 303} = 516 \text{ моль/с} = 1858 \text{ кмоль/ч.}$$

Расход каждого компонента

$$VG_H := G_r \cdot Y_{VH} = 1858 \times \begin{pmatrix} 0,0766 \\ 0,0064 \\ 0,0635 \\ 0,8220 \\ 0,0315 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 142 \\ 12 \\ 118 \\ 1527 \\ 59 \end{pmatrix} \text{ кмоль/ч.} \quad (4.3)$$

Массовый расход

$$G_M = VG_H M, \quad (4.4)$$

где  $M$  – мольная масса вещества.

$$M(\text{NO}_2) = 14 + 16 \times 2 = 46 \text{ кг/кмоль};$$

$$M(\text{NO}) = 14 + 16 = 30 \text{ кг/кмоль};$$

$$M(\text{O}_2) = 16 \times 2 = 32 \text{ кг/кмоль};$$

$$M(\text{N}_2) = 14 \times 2 = 28 \text{ кг/кмоль};$$

$$M(\text{H}_2\text{O}) = 1 \times 2 + 16 = 18 \text{ кг/кмоль.}$$

Тогда

$$G_M(\text{NO}_2) = 142 \times 46 = 6547 \text{ кг/ч};$$

$$G_M(\text{NO}) = 12 \times 30 = 357 \text{ кг/ч};$$

$$G_M(\text{O}_2) = 118 \times 32 = 3776 \text{ кг/ч};$$

$$G_M(\text{N}_2) = 1527 \times 28 = 42765 \text{ кг/ч};$$

$$G_M(\text{H}_2\text{O}) = 59 \times 18 = 1054 \text{ кг/ч.}$$

Общий массовый расход смеси

$$G_M = G_M(\text{NO}_2) + G_M(\text{NO}) + G_M(\text{O}_2) + G_M(\text{N}_2) + G_M(\text{H}_2\text{O}) = \quad (4.5)$$
$$6547 + 357 + 3776 + 42765 + 1054 = 54498 \text{ кг/ч} = 15,14 \text{ кг/с.}$$

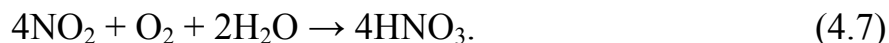
Плотность исходного газа

$$\rho_r = \frac{G_M}{V_r} = 15,14 / 2,2 = 6,88 \text{ кг/м}^3. \quad (4.6)$$

### 4.1.3. Расчет расхода поглотителя

Для проектируемого аппарата сырье вступает в химическую реакцию с поглотителем (хемосорбция). Расход поглотителя равен сумме расходов на проведение двух реакций с оксидом азота (IV) и на разбавление.

Реакция оксида азота с водой



Мольный расход прореагировавшего оксида азота

$$n(\text{NO}_2) = \alpha V G_n(\text{NO}_2) = 0.98 \times 142 = 131 \text{ кмоль/ч}. \quad (4.8)$$

Мольные расходы остальных компонентов реакции

$$n(\text{H}_2\text{O}) = 0.5n(\text{NO}_2) = 0.5 \times 131 = 65.5 \text{ кмоль/ч}; \quad (4.9)$$

$$n(\text{O}_2) = 0.25n(\text{NO}_2) = 0.25 \times 131 = 32.8 \text{ кмоль/ч}; \quad (4.10)$$

$$n(\text{HNO}_3) = n(\text{NO}_2) = 131 \text{ кмоль/ч}. \quad (4.11)$$

Мольные массы компонентов

$$M(\text{NO}_2) = 14 + 16 \times 2 = 46 \text{ кг/кмоль}; \quad (4.12)$$

$$M(\text{H}_2\text{O}) = 1 \times 2 + 16 = 18 \text{ кг/кмоль}; \quad (4.13)$$

$$M(\text{HNO}_3) = 1 + 14 + 16 \times 3 = 63 \text{ кг/кмоль}; \quad (4.14)$$

$$M(\text{O}_2) = 2 \times 16 = 32 \text{ кг/кмоль}. \quad (4.15)$$

Массовые расходы компонентов

$$G(\text{NO}_2) = n(\text{NO}_2) \times M(\text{NO}_2) = 131 \times 46 = 6023 \text{ кг/ч}; \quad (4.16)$$

$$G(\text{H}_2\text{O}) = n(\text{H}_2\text{O}) \times M(\text{H}_2\text{O}) = 65.5 \times 18 = 1179 \text{ кг/ч}; \quad (4.17)$$

$$G(\text{HNO}_3) = n(\text{HNO}_3) \times M(\text{HNO}_3) = 131 \times 63 = 8250 \text{ кг/ч}; \quad (4.18)$$

$$G(\text{O}_2) = n(\text{O}_2) \times M(\text{O}_2) = 32.8 \times 32 = 1048 \text{ кг/ч}. \quad (4.19)$$

Проверка материального баланса реакции

$$G(\text{NO}_2) + G(\text{H}_2\text{O}) + G(\text{O}_2) = G(\text{HNO}_3); \quad (4.20)$$

$$6023 + 1179 + 1048 = 8250;$$

$$8250 = 8250.$$

Материальный баланс выполняется.

Расход воды на реакцию

$$G_{\text{вр}} = G(\text{H}_2\text{O}) = 1179 \text{ кг/ч.} \quad (4.21)$$

Расход 100% азотной кислоты

$$G_{\text{к}} = G(\text{HNO}_3) = 8250 \text{ кг/ч.} \quad (4.22)$$

Расход воды на разбавление

$$G_{\text{вз}} := G_{\text{к}} \cdot \left( \frac{1}{\psi} - 1 \right) = 8250 \times \left( \frac{1}{0.58} - 1 \right) = 5974 \text{ кг/ч.} \quad (4.23)$$

Мольный расход воды на разбавление

$$G_{\text{Мвз}} = G_{\text{вз}} / M(\text{H}_2\text{O}) = 5974 / 18 = 332 \text{ кмоль/ч.} \quad (4.24)$$

Полный расход воды

$$G_{\text{в}} := G_{\text{вз}} + G_{\text{вр}} = 1179 + 5974 = 7153 \text{ кг/ч.} \quad (4.25)$$

Мольный расход

$$G_{\text{Мв}} = G_{\text{в}} / M(\text{H}_2\text{O}) = 7153 / 18 = 397 \text{ кмоль/ч.} \quad (4.26)$$

Мольный расход оксида азота (IV) в газе, покидающем адсорбер

$$n_{\text{NO}_2\text{вых}} = n_{\text{NO}_2\text{вх}} - n_{\text{NO}_2\text{р}} = 142 - 131 = 11 \text{ кмоль/ч.} \quad (4.27)$$

Мольный расход кислорода в газе, покидающем адсорбер

$$n_{\text{O}_2\text{вых}} = n_{\text{O}_2\text{вх}} - n_{\text{O}_2\text{р}} = 118 - 33 = 85 \text{ кмоль/ч.} \quad (4.28)$$

Расход газа, выходящего из абсорбера

$$G_{\text{вых}} = n_{\text{NO}_2\text{вых}} + n_{\text{NO}_\text{вх}} + n_{\text{O}_2\text{вых}} + n_{\text{N}_2\text{вх}} + n_{\text{H}_2\text{O}_\text{вх}} = \\ 11 + 12 + 85 + 1527 + 59 = 1694 \text{ кмоль/ч.} \quad (4.29)$$

#### 4.1.4 Материальный баланс колонны

Расход вещества, подаваемого в колонну

$$\text{сырье: } G_{\text{г}} = 1858 \text{ кмоль/ч;} \quad (4.30)$$

$$\text{вода: } G_{\text{Мв}} = 397 \text{ кмоль/ч.} \quad (4.31)$$

Расход сырья, покидающего колонну

$$\text{кислота + вода: } G_{\text{ост}} = G_{\text{Мвз}} + G_{\text{к}} = 397 + 131 = 528 \text{ кмоль/ч;} \quad (4.32)$$

$$\text{газ: } G_{\text{вых}} = 1694 \text{ кмоль/ч.} \quad (4.33)$$

Баланс по веществу

$$G_{\text{г}} + G_{\text{Мв}} = G_{\text{ост}} + G_{\text{вых}}; \quad (4.34)$$

$$1858 + 397 = 528 + 1694$$

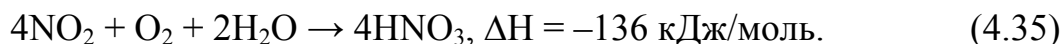
$$2235 = 2222$$

Незначительное расхождение связано с погрешностями в расчетах при округлении величин.

#### 4.1.5 Тепловой баланс абсорбера

Реакция оксида азота с водой идет со значительным выделением тепла.

Суммарная реакция получения азотной кислоты в абсорбере [1, стр. 408]



Согласно расчету материального баланса, в абсорбере образуется азотная кислота в количестве (по безводной кислоте)

$$G_k = 528 \text{ кмоль/ч.}$$

При этом выделяется количество теплоты

$$Q_k = \Delta H G_k = 136 \times 528000 = 7180800 \text{ кДж/ч.} \quad (4.36)$$

Для отбора теплоты применяют змеевики, устанавливаемые над тарелками колонны. Принимаем отбор тепла за счет испарения жидкого аммиака в змеевиках. Температура среды в аппарате составляет 50 °С. Принимаем температуру испарения жидкого аммиака  $t_{\text{ам}} = 30$  °С, следовательно, давление образовавшихся паров аммиака при этой температуре [8, табл. XLV]

$$P_{\text{ам}} = 11.8 \text{ ат} = 11,8 \times 0,1013 = 1,20 \text{ МПа.} \quad (4.37)$$

Теплота парообразования аммиака при  $t_{\text{ам}} = 30$  [8, табл. XLV]

$$r_{\text{ам}} = 1146 \text{ кДж/кг.}$$

Тогда массовый расход аммиака

$$G_{\text{ам}} = \frac{Q_k}{r_{\text{ам}}} = \frac{7180800}{1146} = 627 \text{ кг/ч.} \quad (4.38)$$

Объемный расход образовавшихся паров

$$V_{\text{ам}} = \frac{G_{\text{ам}}}{\rho_{\Gamma}} = \frac{627}{9.08} = 69,1 \text{ м}^3/\text{ч} = 1,92 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}, \quad (4.39)$$

где  $\rho_r$  – плотность насыщенного пара аммиака при 30 °С,  $\rho_r = 9,08$  кг/м<sup>3</sup> [8, табл. XLV]. Принимаем для труб змеевика размеры  $d \times s = 25 \times 2$ . Принимаем скорость движения испарившегося аммиака в трубах  $\omega = 6.0$  м/с. Тогда расчетное число змеевиков

$$n_3 = \frac{4V_{ам}}{\omega \pi d^2} = \frac{4 \times 1,92 \cdot 10^{-2}}{6.0 \times 3.14 \times 0.025^2} = 6.5. \quad (4.40)$$

Принимаем количество тарелок со змеевиками

$$n_{тз} = 7.$$

#### 4.1.6 Определение скорости газа и диаметра абсорбера

В аппарате установлены два типа тарелок – ситчатые и колпачковые. Выполним расчет допустимой скорости газа для колпачковой тарелки.

Для колпачковых тарелок предельно допустимую скорость рекомендуется рассчитывать по уравнению [8]

$$w_{lim} = \frac{0,0155}{d_k^{2/3}} \sqrt{\frac{\rho_{ж}}{\rho_r} h_k}, \quad (4.41)$$

где  $d_k$  – диаметр колпачка, принимаем  $d_k = 80$  мм [9, табл. 24.1];

$\rho_{ж}$  – плотность жидкости на тарелке, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_r$  – плотность газовой фазы на тарелке, кг/м<sup>3</sup>;

$h_k$  – расстояние от верхнего края колпачка до вышележащей тарелки, м.

Плотность поглотителя (воды) примем в соответствии со справочными данными [3, табл. XXXIX]

$$\rho_{ж} = 1000 \text{ кг/м}^3.$$

Расстояние от верхнего края колпачка до вышележащей тарелки ориентировочно

$$h_k = h_T - d_k, \quad (4.42)$$

где  $h_T$  – расстояние между тарелками колонны, принимаем в соответствии со справочными данными  $h_T = 800$  мм [9, табл. 24.1].

Тогда

$$h_k = 800 - 80 = 720 \text{ мм.}$$

Соответственно, предельно допустимая скорость газа

$$w_{\text{lim}} = \frac{0,0155}{0,080^{2/3}} \sqrt{\frac{1000}{6,88} \times 0,72} = 0,854 \text{ м/с.}$$

Выбор рабочей скорости газа обусловлен многими факторами. В общем случае ее находят путем технико-экономического расчета для каждого конкретного процесса. Транспортировка больших объемов газа через них требует повышенного избыточного давления и, следовательно, значительных энергозатрат.

В большинстве случаев рабочую скорость газа принимают равной 0,7 ÷ 0,9 от предельной [9]. Рабочая скорость газа в колонне

$$w = 0,8 w_{\text{lim}} = 0,8 \times 0,854 = 0,683 \text{ м/с.} \quad (4.43)$$

Тогда диаметр колонны

$$D := \sqrt{\frac{4 \cdot V_D}{\pi \cdot w}} = \sqrt{\frac{4 \times 2,2}{3,14 \times 0,683}} = 2,16 \text{ м.} \quad (4.44)$$

Принимаем диаметр колонны

$$D = 2,2 \text{ м.}$$

Тогда действительная скорость газа

$$w := \frac{4 \cdot V_G}{\pi \cdot D^2} = \frac{4 \times 2,2}{3,14 \times 2,2^2} = 0,650 \text{ м/с.} \quad (4.45)$$

Доля от предельной скорости

$$\frac{w}{w_{\text{lim}}} = \frac{0,650}{0,854} = 0,76. \quad (4.46)$$

Полученное значение лежит в допустимых пределах.

Для выбранного диаметра колонны значения параметров тарелок берем из таблицы [9, табл. 24.11]. В таблице 2 сведены используемые при дальнейших расчетах величины.



Таблица.3 – Характеристики выбранной тарелки

Наименование параметра	Обозначение	Величина
Высота прорези колпачка	$h_{пр}$	20 мм
Высота подъема колпачка	$h_k$	55 мм
Высота перелива	$h_{пер}$	55 мм
Периметр слива	$L_c$	685 мм
Площадь слива	$F_c$	0,051 м <sup>2</sup>
Ширина прорези	$b_{пр}$	10 мм

#### 4.1.7 Определение числа тарелок и высоты аппарата

Расчет числа тарелок для хемосорбции представляет собой трудную задачу. Поэтому принимаем число тарелок в аппарате по аналогии с промышленным объектом  $N_{Тс} = 18$  шт. ситчатых тарелок и две колпачковых  $N_{Тк} = 2$  шт. Общее число тарелок

$$N_T = N_{Тс} + N_{Тк} = 18 + 2 = 20. \quad (4.47)$$

Определим высоту абсорбера. Схема к расчету приведена на рисунке 8б.

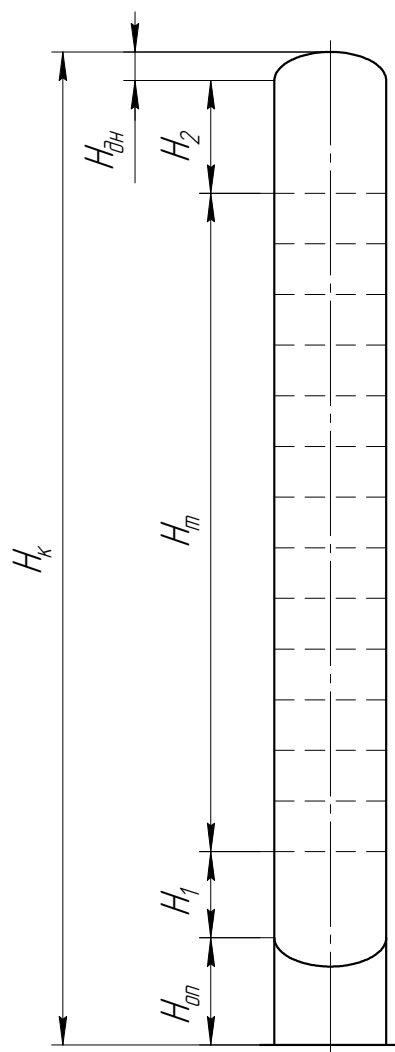


Рис. 8б. – Схема к расчету высоты абсорбера

Высота, занимаемая тарелками

$$H_T = (N_T - 1) h_T = (20 - 1) \times 0,800 = 15,2 \text{ м.} \quad (4.48)$$

Принимаем высоту от верхней тарелки до верхнего днища

$$H_2 = 1,8 \text{ м.}$$

Принимаем высоту от нижнего днища до нижней тарелки

$$H_1 = 1,8 \text{ м.}$$

Принимаем высоту опоры

$$H_{оп} = 2,7 \text{ м.}$$

Высота стандартного эллиптического днища

$$H_{дн} = D/4 = 2.2 / 4 = 0.6 \text{ м.} \quad (4.49)$$

Тогда ориентировочная высота аппарата

$$H = H_{\text{оп}} + H_1 + H_T + H_2 + H_{\text{дн}} = 2,7 + 1,8 + 15,2 + 1,8 + 0,6 = 22,1 \text{ м.} \quad (4.50)$$

Расчет гидравлического сопротивления абсорбера

Гидравлическое сопротивление абсорбера в основном складывается из двух величин: сопротивления тарелок и местных сопротивлений ввода-вывода газа. Определим сопротивление одной колпачковой тарелки.

Гидравлическое сопротивление колпачковой тарелки

$$\Delta P_T = \Delta P_{\text{ст}} + \Delta P_{\sigma} + \Delta P_{\text{ГЖ}}, \quad (4.51)$$

где  $\Delta P_{\text{ст}}$  – сопротивление сухой тарелки, Па;

$\Delta P_{\sigma}$  – сопротивление от сил поверхностного натяжения, Па.

Сопротивление сухой тарелки

$$\Delta P_{\text{ст}} := \xi \cdot \frac{w_{\text{пр}}^2 \cdot \rho_{\text{Г}}}{2}, \quad (4.52)$$

где  $\xi = 4,7$  – коэффициент сопротивления для колпачковых тарелок [9];

$w_{\text{пр}}$  – скорость газа в прорезях колпачков

$$w_{\text{пр}} := 0,6 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot g \cdot h_{\text{пр}}}{\rho_{\text{Г}}}} = 0,6 \times \sqrt{\frac{2 \times 1000 \times 9,81 \times 0,020}{6,88}} = 4,53 \text{ м/с}; \quad (4.53)$$

$$\Delta P_{\text{ст}} = 4,7 \times \frac{4,53^2 \times 6,88}{2} = 331 \text{ Па.}$$

Гидравлическое сопротивление от сил поверхностного натяжения

$$\Delta P_{\sigma} := \frac{4 \cdot \sigma}{d_3}, \quad (4.54)$$

где  $\sigma$  – поверхностное натяжение воды,  $\sigma = 7,28 \times 10^{-3}$  Н/м;

$d_3$  – эквивалентный диаметр прорези, для  $h_{\text{пр}} / b_{\text{пр}} = 20 / 10 = 2$

$$d_3 = 1,3 \times b_{\text{пр}} = 1,3 \times 10 = 13 \text{ мм}; \quad (4.55)$$

$$\Delta P_{\sigma} = \frac{4 \times 72,8 \times 10^{-3}}{0,013} = 22 \text{ Па.}$$

Гидравлическое сопротивление газожидкостного слоя на тарелке, определяемое по формуле

$$\Delta P_{ГЖ} := 1.3 \cdot g \cdot k \cdot \rho_{ж} \cdot \left( h_{пп} + \frac{e}{2} + \Delta h \right), \quad (4.56)$$

где  $k$  – отношение плотности пены к плотности чистой жидкости, при расчетах принимают  $k = 0,5$  [4];

$\rho_{ж}$  – плотность жидкости на тарелке,  $\text{кг/м}^3$ ;

$e = h_{к} - h_{пп} = 55 - 20 = 35$  мм – расстояние от верхнего края прорезей до сливного порога;

$\Delta h = h_{п} - h_{пер}$  – высота перепада уровня жидкости, м;

$h_{п}$  – высота газожидкостного слоя

$$h_{п} := \frac{h_0}{1 - \varepsilon}, \quad (4.57)$$

где  $h_0$  – высота уровня спокойной (невспененной жидкости), м;

$\varepsilon$  – газосодержание слоя

$$\varepsilon := \frac{\sqrt{Fr}}{1 + \sqrt{Fr}}, \quad (4.58)$$

где  $Fr$  – критерий Фруда

$$Fr := \frac{w^2}{g \cdot h_0}. \quad (4.59)$$

Высота уровня спокойной жидкости определяется по эмпирической формуле, приведенной в [9]

$$h_0 = 0,0419 + 0,19 h_{пер} - 0,0135 \sqrt{\rho_{г}} + 2,46q, \quad (4.60)$$

где  $q = 1,70 \text{ м}^3/(\text{м} \times \text{ч})$  – расход поглотителя на единицу длины периметра слива.

Высота уровня спокойной жидкости

$$\begin{aligned} h_0 &= 0,0419 + 0,19 \times 0,055 - 0,0135 \sqrt{6,88} + 2,46 \times 1,70 = \\ &= 0,0417 \text{ м} = 42 \text{ мм} \end{aligned} \quad (4.61)$$

Критерий Фруда

$$Fr = \frac{0,851^2}{9,81 \times 0,0417} = 1,771.$$

Газосодержащие слоя

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{1,771}}{1 + \sqrt{1,771}} = 0,571.$$

Высота газожидкостного слоя (пены)

$$h_{\text{п}} = \frac{0,0417}{1 - 0,571} = 0,0971 \text{ м} = 98 \text{ мм.}$$

Высота перепада уровня жидкости

$$\Delta h = 98 - 55 = 43 \text{ мм.}$$

Гидравлическое сопротивление газожидкостного слоя на тарелке

$$\Delta P_{\text{гж}} = 1,3 \times 9,81 \times 0,5 \times 1000 \times \left( 0,020 + \frac{35}{2} + 43 \right) = 507 \text{ Па.}$$

Общее сопротивление тарелки

$$\Delta P_{\text{к}} = 331 + 22 + 507 = 860 \text{ Па.}$$

Расчет сопротивления ситчатой тарелки ведется аналогично. В результате расчета было получено

$$\Delta P_{\text{с}} = 480 \text{ Па.}$$

Гидравлическое сопротивление тарелок абсорбера

$$\Delta P_{\text{т}} = N_{\text{Тк}} \Delta P_{\text{к}} + N_{\text{Тс}} \Delta P_{\text{с}} = 2 \times 860 + 18 \times 480 = 10360 \text{ Па.} \quad (4.62)$$

Местные сопротивления учтем 10% надбавкой

$$\Delta P_{\text{мс}} = 0,1 \Delta P_{\text{т}} = 0,1 \times 10360 = 1036 \text{ Па.} \quad (4.63)$$

Гидравлическое сопротивление абсорбера

$$\Delta P_{\text{А}} = \Delta P_{\text{т}} + \Delta P_{\text{мс}} = 10360 + 1036 = 11396 \text{ Па.} \quad (4.64)$$

#### 4.1.8 Расчет диаметров основных штуцеров колонны

К основным штуцерам колонны относят штуцера ввода сырьевого газа, поглотителя, вывода соростного газа и готового продукта. Расчет этих штуцеров проводится автоматически с помощью программы Microsoft Excel, поэтому ниже приводится только алгоритм расчета и результаты.

Расчетный диаметр штуцера определяется следующим образом:

$$D_{\text{шт}} = \sqrt{\frac{4V}{\pi w_p}}, \quad (4.65)$$

где  $V$  – объемный расход среды,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$w_p$  – рекомендуемая скорость среды в штуцере,  $\text{м}/\text{с}$ .

Объемный расход находится через мольный и плотность:

$$V = \frac{GM}{3600\rho}, \quad (4.66)$$

где  $G$  – мольный расход смеси,  $\text{кмоль}/\text{ч}$ ;

$M$  и  $\rho$  – соответственно мольная масса и плотность всего потока, определяемые по алгоритму, приведенному выше.

После определения  $D_{\text{шт}}$  осуществляется подбор стандартного диаметра  $D_{\text{шт}}$  и определение действительной скорости потока среды в штуцере:

$$w = \frac{4V}{\pi D_{\text{шт}}^2}, \quad (4.67)$$

При выходе действительной скорости за границы допустимой осуществляют выбор другого диаметра и повторный расчет действительной скорости потока.

Таблица 4– Характеристика основных штуцеров колонны

Расчетный параметр	Ввод газа	Вывод газа	Ввод поглотителя	Вывод кислоты
Расход потока, $\text{кмоль}/\text{ч}$	1858	1694	397	528
Объемный расход, $\text{м}^3/\text{с}$	1,156	1,055	0,00199	0,00484
Рекомендуемая скорость, $\text{м}/\text{с}$	15,00	10,00	1,0	0,50
Рассчитанный диаметр, $\text{м}$	0,413	0,466	0,151	0,211
Принятый диаметр, $\text{м}$	0,500	0,550	0,200	0,250

## 4.2 Расчетно-конструкторский раздел

### 4.2.1 Описание конструкции аппарата

Конструкция аппарата показана на рисунке 9.

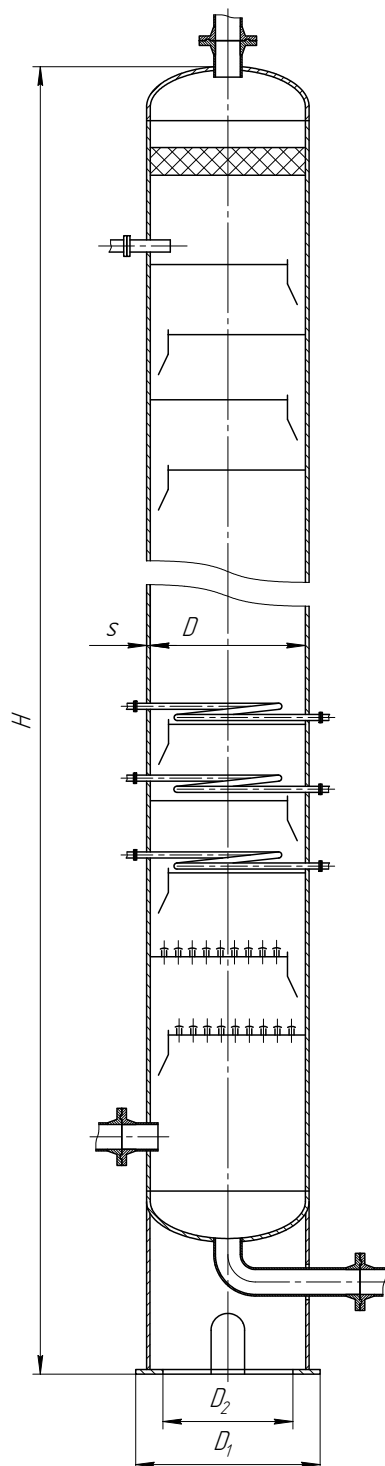


Рис. 9. – Конструкция аппарата

Давление в аппарате 0,63 МПа, температура 50 °С.

Принимаем цилиндрическую обечайку с приварными эллиптическими днищами. Для установки колонны на открытой площадке принимаем цилиндрическую опору (см. рисунок 2.1). Размеры опоры определяются по результатам расчета на ветровую нагрузку.

Для ввода-вывода потоков принимаем штуцера, приварные встык с уплотнением типа шип-паз и прокладкой прямоугольного сечения из паронита. Выбранное фланцевое соединение допускает работу при давлениях до 10 МПа и температуре до 400 °С, что удовлетворяет условиям работы аппарата [10].

Для вывода азотной кислоты в опоре колонны предусмотрено специальное отверстие для трубопровода. Для обслуживания колонны в опоре также предусмотрены технологические отверстия.

Змеевики для отбора теплоты устанавливаем на нижних тарелках колонны, штуцера для ввода жидкого аммиака и вывода паров размещаем в обечайке на уровне расположения змеевиков (см. рисунок 2.1).

Для улавливания паров сверху колонны предусмотрен отбойник.

Расчету подлежат толщина обечайки и днищ, размеры штуцеров, опора аппарата. Вследствие установки колонны на открытой площадке и большой высоты (более 10 м) необходимо выполнить расчет на ветровую нагрузку.

#### 4.2.2 Выбор материала

В данном разделе произведен выбор материала из которого будет изготовлен аппарат. Цель расчета определить факторы, которые на практике могут повлиять на работу аппарата и помешать его работе, а также выбрать марку стали, которая наилучшим образом могла бы избежать вредное воздействие.

Для сосудов и аппаратов, работающих с азотной кислотой, выбираем сталь 12Х18Н10Т [11, стр. 328]. Для выбранного материала при 50 °С [11, стр. 97]

$$\sigma_B = 532 \text{ МПа}; \sigma_{B20} = 540 \text{ МПа};$$

$$\sigma_T = 292 \text{ МПа}; \sigma_{T20} = 300 \text{ МПа}.$$



Определим номинальное допускаемое напряжение. Согласно [11, табл. 14.5] расчет для легированной стали при рабочей температуре менее 525 °С необходимо вести по формулам

$$\sigma^* = \min \left\{ \frac{\sigma_B}{n_B}; \frac{\sigma_T}{n_T} \right\}, \quad (4.68)$$

где  $n_B$  – запас прочности по пределу прочности, для стального проката из легированной стали  $n_B = 2,6$  [11, табл. 14.6];

$n_T$  – запас прочности по пределу текучести, для стального проката из легированной стали при давлении в аппарате не более 0,63 МПа  $n_T = 1,65$  [11, табл. 14.6].

Соответственно нормативное допускаемое напряжение при расчетной температуре и при 20 °С:

$$\sigma^* = \min \left\{ \frac{532}{2,6}; \frac{292}{1,65} \right\} = \min \{205; 177\} = 177 \text{ МПа}; \quad (4.69)$$

$$\sigma_{20}^* = \min \left\{ \frac{540}{2,6}; \frac{300}{1,65} \right\} = \min \{208; 182\} = 182 \text{ МПа}. \quad (4.70)$$

Допускаемое напряжение при статических однократных нагрузках для рабочего состояния выбранного материала составляют

$$[\sigma] = \eta \sigma^*; \quad (4.71)$$

$$[\sigma]_{20} = \eta \sigma_{20}^*, \quad (4.72)$$

где  $\eta$  – поправочный коэффициент, учитывающий вид заготовки, для листового проката  $\eta = 1,0$  [7, с. 10]. Подставляя числовые значения, получим

$$[\sigma] = 1,0 \cdot 177 = 177 \text{ МПа}; \quad [\sigma]_{20} = 1,0 \cdot 182 = 182 \text{ МПа}.$$

Допускаемое напряжение при гидроиспытаниях

$$[\sigma]_{и} = \sigma_{T20} / 1,1 = 300 / 1,1 = 273 \text{ МПа}. \quad (4.73)$$

Значение модуля упругости и коэффициента линейного расширения для такой стали составят

$$E = 2,0 \cdot 10^5 \text{ МПа}, \quad \alpha = 1,2 \cdot 10^{-5}.$$

**Вывод:** для расчетов используем марку стали 12X18H10T.

#### 4.2.3 Расчет обечайки

В данном разделе произведен расчет толщины стенки обечайки, а также допускаемое давление в рабочем состоянии и при испытаниях.

Схема к расчету обечайки на прочность приведена ниже на рисунке 10

Исполнительную толщину стенки  $s$  цилиндрической обечайки определяют по формуле

$$s = s_p + c + c_0; \quad (4.14)$$

$$s_p = \max \left( \frac{p_p D}{2\varphi[\sigma] - p_p}, \frac{p_{и} D}{2\varphi[\sigma]_{и} - p_{и}} \right), \quad (4.75)$$

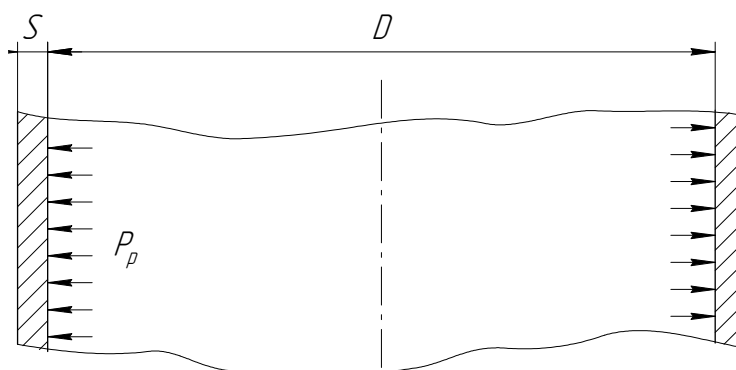


Рис. 10. – Схема к расчету обечайки колонны

где  $p_p = p_t + p_r$  – расчетное давление в аппарате, МПа;

$p_t$  – технологическое давление в аппарате, согласно заданию  $p_t = 0,63$  МПа

$p_r$  – гидростатическое давление столба жидкости в аппарате, МПа. В силу конструктивных особенностей абсорбционной колонны  $p_r = 0$  МПа, поскольку давление столба жидкости распределено по контактными устройствам.

$p_{и}$  – давление при гидроиспытаниях, МПа;

$D$  – внутренний диаметр аппарата,  $D = 2200$  мм;

$\varphi$  – коэффициент прочности сварных швов стальных аппаратов, для автоматической сварки под слоем флюса  $\varphi = 1,0$  [11, т. 1.7];

$s_p$  – расчетная толщина стенки цилиндрической обечайки, мм;

$c$  – прибавка к расчетной толщине, мм;

$c_0$  – прибавка на округление размера до стандартного значения, мм.

Расчетное давление в аппарате

$$p_p = 0,63 + 0 = 0,63 \text{ МПа.}$$

Давление при испытаниях

$$p_{\text{и}} = \max \left( \frac{1,25 p_{\text{т}} [\sigma]_{20} / [\sigma]}{p_{\text{т}} + 0,3} \right) = \quad (4.76)$$
$$= \max \left( \frac{1,25 \times 0,63 \times 182 / 177}{0,63 + 0,3} \right) = \max \left( \frac{0,81}{0,93} \right) = 0,93 \text{ МПа.}$$

В силу конструктивной особенности аппарата (давление столба жидкости распределено по тарелкам) гидростатическим давлением столба жидкости можно пренебречь.

Соответствующая расчетная толщина стенки

$$s_p = \max \left( \frac{\frac{0,63 \cdot 2200}{2 \cdot 1,0 \cdot 177 - 0,63}}{0,93 \cdot 2200}, \frac{0,63 \cdot 2200}{2 \cdot 1,0 \cdot 273 - 0,93} \right) = \max \left( \frac{5,90}{5,11} \right) = 5,90 \text{ мм.}$$

Прибавка к расчетной толщине обечайки определяется по формуле

$$c = c_1 + c_2 + c_3, \quad (4.77)$$

где  $c_1 = \Pi \tau + c_3$  – прибавка для компенсации коррозии и эрозии, мм;

$\Pi$  – скорость коррозии, для выбранного материала  $\Pi = 0,05$  мм/год;

$c_3$  – прибавка для компенсации эрозии,  $c_3 = 0$  мм.

$c_2$  – прибавка для компенсации минусового допуска, мм;

$c_3$  – технологическая прибавка, мм.

Прибавка для компенсации коррозии и эрозии

$$c_1 = 0,05 \cdot 15 + 0 = 0,75 \text{ мм.}$$

При листовом прокате и сварной обечайке  $c_2 = 0$  мм и  $c_3 = 0$  мм [12, с. 16]. Поэтому

$$c = 0,75 + 0 + 0 = 0,75 \text{ мм.}$$

Прибавку  $c_0$  примем равной 0,35 мм. Соответственно исполнительная толщина стенки цилиндрической обечайки составит

$$s = 5,90 + 0,75 + 0,35 = 8,0 \text{ мм.}$$

В отечественном машиностроении абсорбционные колонны диаметром более 2000 мм с толщиной стенки менее 10 мм не используются из соображений жесткости. Примем исполнительную толщину стенки  $s = 10$  мм.

Допускаемое давление в рабочем состоянии и при испытаниях

$$[p] = \frac{2\varphi[\sigma](s - c)}{D + s - c} = \frac{2 \cdot 1,0 \cdot 177 \cdot (10 - 0,75)}{2200 + 10 - 0,75} = 1,41 \text{ МПа;} \quad (4.78)$$

$$[p]_{\text{и}} = \frac{2\varphi[\sigma]_{\text{и}}(s - c)}{D + s - c} = \frac{2 \cdot 1,0 \cdot 273 \cdot (10 - 0,75)}{2200 + 10 - 0,75} = 2,17 \text{ МПа.} \quad (4.79)$$

Как видно, оно не меньше соответствующих расчетных давлений.

#### 4.2.4 Расчет днища

В данном разделе произведен расчет толщины стенки днища, а также допускаемое давление в рабочем состоянии и при испытаниях.

Схема к расчету эллиптического днища приведена на рисунке 11.

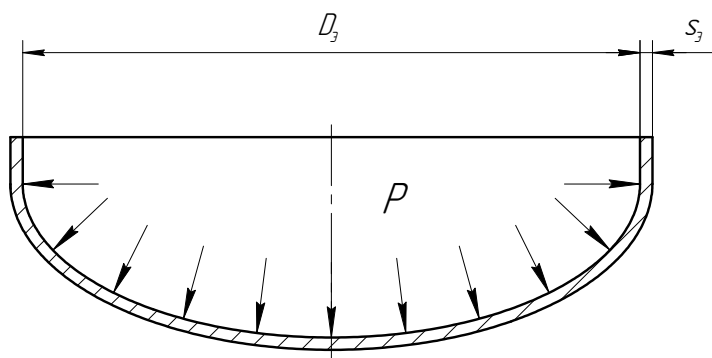


Рис. 11. – Схема к расчету эллиптического днища.

Исполнительную толщину стенки стандартного эллиптического днища рассчитывают по формуле

$$s_{эп} = \max \left( \frac{p_p D}{2\varphi[\sigma] - 0,5p_p}, \frac{p_{и} D}{2\varphi[\sigma]_{и} - 0,5p_{и}} \right) = \quad (4.80)$$

$$= \max \left( \frac{0,63 \times 2200}{2 \cdot 1,0 \cdot 177 - 0,5 \times 0,63}, \frac{0,93 \cdot 2200}{2 \cdot 1,0 \cdot 273 - 0,5 \cdot 0,93} \right) = \max \begin{pmatrix} 5,90 \\ 5,10 \end{pmatrix} = 5,90 \text{ мм};$$

$$s_3 = s_{эп} + c + c_0 = 5,90 + 0,75 + 0,51 = 7,16 \text{ мм}. \quad (4.81)$$

Толщина стенки днища не должна быть менее толщины стенки обечайки, поэтому

$$s_3 = 10 \text{ мм}$$

Допускаемое давление в рабочем состоянии и при испытаниях

$$[p] = \frac{2\varphi[\sigma](s - c)}{D + 0,5(s - c)} = \frac{2 \cdot 1,0 \cdot 177 \cdot (10 - 0,75)}{2200 + 0,5(10 - 0,75)} = 1,41 \text{ МПа}; \quad (4.82)$$

$$[p]_{и} = \frac{2\varphi[\sigma]_{и}(s - c)}{D + 0,5(s - c)} = \frac{2 \cdot 1,0 \cdot 273 \cdot (10 - 0,75)}{2200 + 0,5(10 - 0,75)} = 2,17 \text{ МПа}. \quad (4.83)$$

Как видно, оно не меньше соответствующих расчетных давлений.

#### 4.2.5 Укрепление отверстий в обечайке и днищах

Ведем расчет согласно ГОСТ Р 52857.3 – 2007, [13].

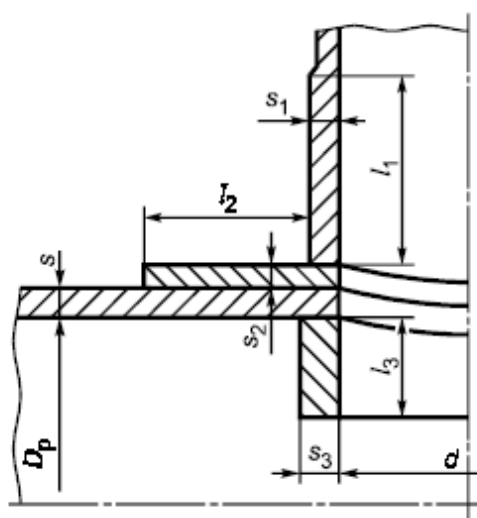


Рис. 12. – Основная расчетная схема соединения штуцера со стенкой сосуда

Условные обозначения:

$$D_{\text{вн}}=2200 \text{ мм}$$

$h = 550$  мм – высота стандартного эллиптического днища

$r = 0$  – расстояние от центра укрепления отверстия до оси оболочки

$d = 500$  мм – внутренний диаметр штуцера

$l_1, l_3 = 280/50$  длины внешней и внутренней частей штуцера

$l_2 = 0$  исполнительная ширина накладного кольца

$s_1 = 10$  мм - толщина стенки штуцера

$s_2 = 0$  исполнительная толщина накладного кольца

$\varphi=1$  коэффициент прочности сварных швов

$\sigma_{\text{тР}}=138$  МПа допусковое напряжение

Ведем расчет в среде автоматизированного проектирования MathCAD

15.

Рассчитаем необходимость укрепления отверстия под люк-лаз, так как штуцер для него он имеет наибольший внутренний диаметр – 500 мм.

$$n := \begin{cases} \text{цилиндрическая} \\ \text{эллиптическая} \end{cases} \quad n = 1$$

$$\text{Тип} := \begin{cases} \text{"цилиндрическая оболочка"} & \text{if } n = 1 \\ \text{"эллиптическая оболочка"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Тип} = \text{"цилиндрическая оболочка"}$$

Согласно выбранной оболочки, находим диаметры укрепляемых элементов по формулам:

$$D_p := \begin{cases} D_p \leftarrow D_{\text{вн}} & \text{if } n = 1 \end{cases} \quad (4.84)$$

$$D_p \leftarrow \frac{D_{\text{вн}}^2}{2 \cdot h} \cdot \sqrt{1 - 4 \cdot \left( \frac{D_{\text{вн}}^2 - 4 \cdot h^2}{D_{\text{вн}}^4} \right) \cdot r^2} \quad \text{otherwise} \quad (4.85)$$

Определяем расчетный диаметр отверстия в стенке оболочки:

$$d_p := \begin{cases} d_p \leftarrow d + 2 \cdot c & \text{if } n = 1 \end{cases} \quad (4.86)$$

$$d_p := \begin{cases} \frac{d + 2 \cdot c}{\sqrt{1 - \left(\frac{2 \cdot r}{D_p}\right)^2}} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.87)$$

$$d_p = 506 \text{ мм}$$

Проверка условий применения формул для расчета укрепления отвер-

стей:

$$\text{Прим} := \begin{cases} \text{"Отношение диаметров НЕ выполняется"} & \text{if } \left( \frac{d_p - 2 \cdot c}{D_{\text{BH}}} > 1 \right) \text{ if } n = 1 \\ \left( \left( \frac{d_p - 2 \cdot c}{D_{\text{BH}}} > 0.6 \right) \right) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.88)$$

$$\text{"Отношение толщины к диаметру НЕ выполняется"} \text{ if } \left( \frac{s - c}{D_{\text{BH}}} > 0.1 \right) \text{ if } n = 1 \quad (4.89)$$

$$\left( \left( \frac{s - c}{D_{\text{BH}}} > 0.1 \right) \right) \text{ otherwise} \quad (4.90)$$

$$\text{"Условия применения формул выполняются"} \text{ otherwise} \quad (4.91)$$

Тип = "цилиндрическая оболочка"

Прим = "Условия применения формул выполняются"

Расчетные толщины стенок укрепляемых элементов определяем в соответствии с ГОСТ 52857.2 – 2007, [14]:

$$s_p := \begin{cases} \frac{P_{\text{расч}} \cdot D_p}{2 \cdot \varphi \cdot \sigma_{tR} - P_{\text{расч}}} & \text{if } n = 1 \end{cases} \quad (4.92)$$

$$\begin{cases} \frac{P_{\text{расч}} \cdot D_p}{4 \cdot \varphi \cdot \sigma_{tR} - P_{\text{расч}}} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.93)$$

$$s_p = 3.662 \text{ мм}$$

Расчетная толщина стенки штуцера определяется по формуле:

$$s_{p1} := \frac{P_{\text{расч}} \cdot (d + 2 \cdot c)}{2 \cdot \sigma_{tR} \cdot \varphi - P_{\text{расч}}} = 1.323 \text{ мм} \quad (4.94)$$

Находим расчетные длины внешней и внутренней частей штуцера соответственно:

$$l_{1p} := \min \left[ 11, \sqrt{(d + 2 \cdot c) \cdot (s_1 - c)} \right] = 59.515 \text{ мм} \quad (4.95)$$

$$l_{3p} := \min \left[ 13, 0.5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c) \cdot (s - 2c)} \right] = 22.494 \text{ мм} \quad (4.96)$$

Расчетная ширина накладного кольца:

$$l_{2p} := \min\left[12, \sqrt{D_p \cdot (s + s_2 - c)}\right] = 0 \text{ мм} \quad (4.97)$$

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

$$l_p := \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 98.995 \text{ мм} \quad (4.98)$$

Отношения допускаемых напряжений:

для внешней части штуцера -  $\chi_1 := 1$

для накладного кольца -  $\chi_2 := 1$

для внутренней части штуцера -  $\chi_3 := 1$

Находим расчетный диаметр одиночного отверстия, не требующий дополнительного укрепления по формуле:

$$d_{op} := 0.4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 56.285 \text{ мм} \quad (4.99)$$

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

$$d_o := 2 \cdot \left[ \left( \frac{s - c}{s_p} \right) - 0.8 \right] \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 4.01 \times 10^3 \text{ мм} \quad (4.100)$$

Проверка условия необходимости укрепления отверстия:

$$\begin{array}{l}
 \text{Usl4} := \left\{ \begin{array}{l} \text{"Укрепление отверстия НЕ требуется"} \text{ if } d_p < d_o \\ \text{"Укрепление отверстия НЕОБХОДИМО"} \text{ otherwise} \end{array} \right. \\
 \text{Тип} = \text{"цилиндрическая оболочка"} \\
 \text{Usl4} = \text{"Укрепление отверстия НЕ требуется"} \quad +
 \end{array}$$



Так как условие выполнилось, находим внутреннее избыточное:  
коэффициент понижения прочности:

$$K := \begin{cases} K \leftarrow 1 & \text{if } n = 1 \\ K \leftarrow 2 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$K = 1$$

$$V := \frac{1 + \frac{l_{1p} \cdot (s_1 - c) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_2 - c - c) \cdot \chi_3}{l_p \cdot (s - c)}}{1 + 0.5 \cdot \frac{d_p - d_{op}}{l_p} + K \cdot \frac{d + 2 \cdot c}{D_p} \cdot \frac{l_{1p}}{l_p}} = 0.888 \quad (4.101)$$

Допускаемое давление:

$$P_{дв} := \frac{2 \cdot K \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot \sigma_{tR} \cdot V}{D_p + (s - c) \cdot V} = 1.228 \text{ МПа} \quad (4.102)$$

Аналогично выполняем расчет для остальных отверстий.

Результаты запишем таблицу 5:

Таблица 5 – Результаты расчета укреплений отверстий

Назначение	Диаметр штуцера, мм	Длина внутр. части штуцера, мм	Длина внеш. части штуцера, мм	Укрепление отверстий, мм	Толщина стенки штуцера, мм	Допускаемое внутреннее давление, МПа
Вход азотной кислоты	300	30	410	-	10	1,4
Вывод газа	500	30	480	-	10	1,228
Ввод газа	500	30	280	+	12	1,2
Выход слабой азотной кислоты	250	30	560	-	10	1,5
Ввод поглотителя	200	30	550	-	10	1,6
Отбор проб	50	30	120	-	10	2
Технологический	250	30	300	-	10	1,5
Люк-лаз	500	30	235	+	12	1,3

В результате проведенного расчета установили, что требуется укрепление отверстия под штуцер для ввода газа и для люка-лаза. Путем увеличения толщины стенок штуцеров исключили необходимость установки накладных колец.

#### 4.2.6 Расчет фланцевого соединения

В данном разделе произведем механический расчет фланцевого соединения (см. рисунок 13), который сводится к определению следующих критериев надежности: обеспечению герметичности, обеспечению прочности втулки фланца, обеспечению прочности болтов, что и является целью данного расчета.

Расчет ведем по ГОСТ Р 52857.4 – 2007, [15]

Исходя из рабочих условий и в соответствии с рекомендациями [11, с 213], выбираем приварные встык фланцы с уплотнительной поверхностью типа выступ - впадина.

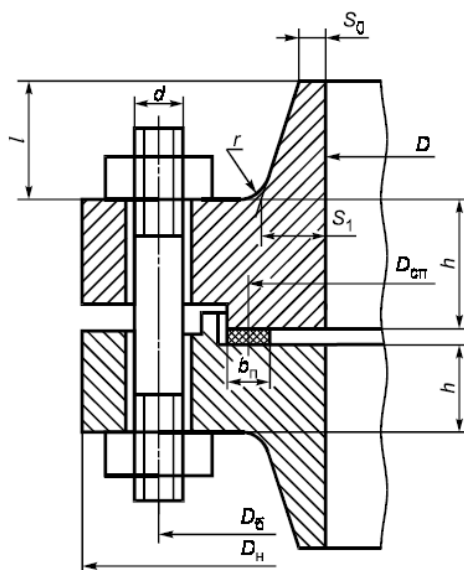


Рисунок 13 – Фланцевое соединение с уплотнительной поверхностью типа выступ - впадина

Расчет проведем для наибольшего диаметра фланцевого соединения, т.е. для люка-лаза.

Данные:

$D := 500$     внутренний диаметр фланца, мм  
 $D_H := 670$     наружный диаметр фланца, мм  
 $D_6 := 620$     диаметр болтовой окружности, мм  
 $D_{сп} := 550$  <sup>a</sup> расчетный диаметр прокладки, мм    X18H10T  
 $b_{п} := 20$     a ширина прокладки, мм  
 $h := 30$     ширина тарелки фланца, мм  
 $h_{п} := 2$     a толщина прокладки, мм  
 $S_0 := 10$     толщина стенки штуцера, мм  
 $d := 24$     диаметр болта, мм  
 $n := 20$     количество болтов

Выбор крепежных элементов:

Расчетная температура неизолированных плоских фланцев определяется по формуле:

$$t_{\phi} := 0.96 \cdot t = 48 \quad \text{C} \quad (4.103)$$

Расчетная температура шпилек:

$$t_6 := 0.85 \cdot t = 42.5 \quad \text{C} \quad (4.104)$$

Допускаемые напряжения для шпилек из стали 35Х:

$$t_{\text{w}} := \begin{pmatrix} 20 \\ 100 \end{pmatrix} \quad \sigma := \begin{pmatrix} 222 \\ 222 \end{pmatrix}$$

$$\sigma_{д.6} := \text{Floor}(\text{linterp}(t, \sigma, t_6), 0.5) = 222 \quad \text{МПа}$$

Модуль упругости для шпилек при рабочей температуре:

$$E_6 := 2.05 \cdot 10^5 \quad \text{МПа}$$

Допускаемое напряжение для шпилек при  $t = 20$  C:

$$\sigma_{206} := 183.3 \quad \text{МПа}$$

Коэффициент линейного расширения стали 35Х при  $t = 20-100$  °С

$$\alpha_{\sigma} := 14.8 \cdot 10^{-6} \text{ 1/К}$$

Допускаемые напряжения для фланцев и обечаек стали  
12Х18Н10Т

$$t := \begin{pmatrix} 20 \\ 100 \end{pmatrix} \quad \sigma := \begin{pmatrix} 184 \\ 174 \end{pmatrix}$$

$$\sigma := \text{Floor}(\text{linterp}(t, \sigma, t_{\phi}), 0.5) = 180.5 \text{ МПа}$$

Коэффициент линейного расширения стали 12Х18Н10Т при  $t = 20 -100$  °С

$$\alpha_{\text{дн}} := 1.6 \cdot 10^{-6} \text{ 1/К}$$

Эффективная ширина плоской прокладки

$$b_0 := \begin{cases} b_0 \leftarrow b_{\Pi} & \text{if } b_{\Pi} \leq 15 \\ b_0 \leftarrow \text{Ceil}(3.8 \sqrt{b_{\Pi}}, 1) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.105)$$

$$b_0 = 17 \text{ мм} \quad (4.106)$$

Характеристики прокладки:

$m = 2.5$  – прокладочный коэффициент

$q_{\text{обж}} = 20$  МПа – удельное давление обжатия прокладки

$K_{\text{обж}} = 0,9$  – коэффициент обжатия прокладки

$E_n = 200$  МПа – условный модуль сжатия прокладки

***Усилия, необходимые для смятия прокладки и обеспечения герметичности фланцевого соединения***

Усилие, необходимое для смятия прокладки находим по формуле:

$$P_{\text{обж}} := 0.5 \pi \cdot D_{\text{сп}} \cdot b_0 \cdot m \cdot |P| = 4.006 \times 10^4 \text{ Н} \quad (4.107)$$

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

$$R_{\Pi} := \begin{cases} \pi \cdot D_{\text{сп}} \cdot b_0 \cdot m \cdot P & \text{if } P \geq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.108)$$

$$R_{\Pi} = 8.011 \times 10^4 \text{ Н}$$

**Усилие в болтах (шпильках) фланцевого соединения при затяжке и в рабочих условиях**

Площадь поперечного сечения болтов (шпилек):

$$f_6 = 324 \text{ мм}^2$$

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

$$A_6 := n \cdot f_6 = 6.48 \times 10^3 \text{ мм}^2 \quad (4.109)$$

Равнодействующая нагрузка от давления:

$$Q_{\text{д}} := \frac{\pi}{4} \cdot (D_{\text{сп}})^2 \cdot P = 2.827 \times 10^5 \text{ Н} \quad (4.110)$$

Приведенная нагрузка, вызванная воздействием внешней силы и изгибающего момента:

$$Q_{\text{FM}} := \max \left( \left| F + \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{сп}}} \right|, \left| F - \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{сп}}} \right| \right) = 0 \text{ Н} \quad (4.111)$$

Найдем податливость прокладки:

$$y_{\Pi} := \frac{h_{\Pi} \cdot K_{\text{обж}}}{E_{\Pi} \cdot \pi \cdot D_{\text{сп}} \cdot b_{\Pi}} = 2.387 \times 10^{-7} \text{ мм/Н} \quad (4.112)$$

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

$$L_{60} := 70 \text{ мм} \quad (4.113)$$

Эффективная длина болта (шпильки) при определении податливости по формуле:

$$L_6 := \begin{cases} L_{60} + 0.28 \cdot d & \text{if } bs = 1 \\ L_{60} + 0.56 \cdot d & \text{if } bs = 2 \end{cases} \quad (4.114)$$

$$L_6 = 76.72 \text{ мм} \quad (4.115)$$

Податливость шпилек рассчитывается по формуле:

$$y_6 := \frac{L_6}{E_{206} \cdot A_6} = 5.431 \times 10^{-8} \text{ мм/Н} \quad (4.116)$$

Расчетные параметры фланцев

- параметр длины обечайки

$$l_0 := \sqrt{D \cdot S_0} = 67.082 \text{ мм} \quad (4.117)$$

- отношение наружного диаметра фланца к внутреннему:

$$K := \frac{D_H}{D} = 1.34 \quad (4.118)$$

- коэффициенты, зависящие от соотношения размеров тарелки фланца

$$\beta_T := \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \log(K)) - 1}{(1.05 + 1.945 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} = 1.779 \quad (4.119)$$

$$\beta_U := \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \log(K)) - 1}{1.36 \cdot (K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = 7.467 \quad (4.120)$$

$$\beta_Y := \frac{1}{(K - 1)} \cdot \left[ 0.69 + 5.72 \cdot \frac{K^2 \cdot \log(K)}{(K^2 - 1)} \right] = 6.855 \quad (4.121)$$

$$\beta_Z := \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = 3.514$$

(4.122)

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

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

- коэффициент  $\lambda$

$$\lambda := \frac{\beta_F \cdot h + l_0}{\beta_T \cdot l_0} + \frac{\beta_V \cdot h^3}{\beta_U \cdot l_0 \cdot (S_0)^2} = 1.157$$

(4.123)

Угловая податливость фланцев

Угловая податливость фланцев при затяжке

$$y_{\phi H} := \left(\frac{\pi}{4}\right)^3 \cdot \frac{D_{\phi}}{E_{20} \cdot h^3 \cdot D_H} = 8.386 \times 10^{-11}$$

(4.124)

Угловая податливость фланца, нагруженного внешним изгибающим моментом, считается по формуле:

$$y_{\phi H} := \left(\frac{\pi}{4}\right)^3 \cdot \frac{D_{\phi}}{E_{20} \cdot h^3 \cdot D_H} = 7.759 \times 10^{-11}$$

(4.125)

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

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

(4.126)

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

$$b := 0.5(D_{\phi} - D_{сп}) = 10 \text{ мм}$$

(4.127)

Плечо усилия от действия давления на фланец для всех типов фланцев

$$e := 0.5 \cdot (D_{\text{сп}} - D - S_0) = 45.5$$

Эквивалентная толщина плоских фланцев

$$S_э := S_0$$

Коэффициент жесткости фланцевого соединения для приварных встык и плоских фланцев по формуле:

$$\gamma := \frac{1}{y_{\text{п}} + y_{\text{б}} \cdot \frac{E_{20\text{б}}}{E_{\text{б}}} + 2 \cdot b^2 \cdot y_{\text{ф}} \cdot \frac{E_{20}}{E}} = 3.173 \times 10^6 \quad (4.128)$$

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

$$\alpha := 1 - \frac{y_{\text{п}} - 2 \cdot e \cdot y_{\text{ф}} \cdot b}{y_{\text{п}} + y_{\text{б}} + 2 \cdot b^2 \cdot y_{\text{ф}}} = 0.448 \quad (4.129)$$

Коэффициент жесткости фланцевого соединения, нагруженного внешним изгибающим моментом:

$$\alpha_{\text{М}} := \frac{y_{\text{б}} + 2 \cdot y_{\text{фн}} \cdot b \cdot \left( b + e - \frac{e^2}{D_{\text{сп}}} \right)}{y_{\text{б}} + y_{\text{п}} \cdot \left( \frac{D_{\text{б}}}{D_{\text{сп}}} \right)^2 + 2 \cdot y_{\text{фн}} \cdot b^2} = 0.228 \quad (4.130)$$

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

$$Q_t := \gamma \cdot [2\alpha_{\text{ф}} \cdot h \cdot (t_{\text{ф}} - 20) - 2\alpha_{\text{б}} \cdot h \cdot (t_{\text{б}} - 20)] = -5.385 \times 10^5 \text{ Н} \quad (4.131)$$



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

$$P_{\bar{6}1} := \max \left[ \begin{array}{l} \alpha \cdot (Q_d + F) + R_{\Pi} + \frac{4 \cdot \alpha_M \cdot |M|}{D_{\text{сп}}} \\ \alpha \cdot (Q_d + F) + R_{\Pi} + \frac{4 \cdot \alpha_M \cdot |M|}{D_{\text{сп}}} - Q_t \end{array} \right] \quad (4.132)$$

$$P_{\bar{6}1} = 7.452 \times 10^5 \text{ Н} \quad (4.133)$$

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

$$P_{\bar{6}2} := \max(P_{\text{обж}}, 0.4 \cdot A_{\bar{6}} \cdot \sigma_{206}) = 4.751 \times 10^5 \text{ Н} \quad (4.134)$$

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

$$P_{\bar{6}M} := \max(P_{\bar{6}1}, P_{\bar{6}2}) = 4.751 \times 10^5 \text{ Н} \quad (4.135)$$

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

$$P_{\bar{6}p} := P_{\bar{6}M} + (1 - \alpha) \cdot (Q_d + F) + Q_t + \frac{4 \cdot (1 - \alpha_M) \cdot |M|}{D_{\text{сп}}} \quad (4.136)$$

$$P_{\bar{6}p} = 5.703 \times 10^5 \text{ Н} \quad (4.137)$$

### **Проверка прочности болтов (шпилек) и прокладки**

Расчетные напряжения в болтах (шпильках)

- при затяжке:

$$\sigma_{\sigma 1} := \frac{P_{\sigma M}}{A_{\sigma}} = 73.31 \text{ МПа} \quad (4.138)$$

- в рабочих условиях:

$$\sigma_{\sigma 2} := \frac{P_{\sigma p}}{A_{\sigma}} = 88.017 \text{ МПа} \quad (4.139)$$

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

$$Us1\_1 := \begin{cases} \text{"Условия прочности в при затяжке НЕ выполняются"} & \text{if } \sigma_{\sigma 1} > \sigma_{206} \\ \text{"Условия прочности в рабочих условиях НЕ выполняются"} & \text{if } \sigma_{\sigma 2} > \sigma_{д,б} \\ \text{"Условия прочности выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Us1\_1 = \text{"Условия прочности выполняются"}$$

Удельное давление на прокладку находим по формуле:

$$q := \frac{\max(P_{\sigma M}, P_{\sigma p})}{\pi \cdot D_{\sigma \Pi} \cdot b_{\Pi}} = 19.767 \text{ МПа} \quad (4.140)$$

Условие прочности прокладки (проверяется для мягких прокладок):

$$Us1\_2 := \begin{cases} \text{"Условие прочности прокладки НЕ выполняется"} & \text{if } q > q_d \\ \text{"Условие прочности прокладки выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Us1\_2 = \text{"Условие прочности прокладки выполняется"}$$

### **Расчет фланцев на статическую прочность**

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

$$M_M := C_F \cdot P_{\bar{\sigma}_M} \cdot b = 4.751 \times 10^6 \text{ Н} \cdot \text{мм} \quad (4.141)$$

Расчетный изгибающий момент, действующий на фланец в рабочих условиях:

$$M_p := C_F \cdot \max[P_{\bar{\sigma}_p} \cdot b + (Q_d + Q_{FM}) \cdot e, |Q_d + Q_{FM}| \cdot e] = 6.472 \times 10^6 \text{ Н} \cdot \text{мм} \quad (4.142)$$

Расчетные напряжения во фланце при затяжке:

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

$$\sigma_{0M} := \frac{M_M}{\lambda \cdot (S_1 - c_0)^2 \cdot D_{пр}} = 28.417 \text{ МПа} \quad (4.143)$$

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

- радиальное напряжение:

$$\sigma_{RM} := \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + l_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot l_0 \cdot D} \cdot M_M = 14.064 \text{ МПа} \quad (4.144)$$

- окружное напряжение:

$$\sigma_{TM} := \frac{\beta_Y \cdot M_M}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_{RM} = 22.962 \text{ МПа} \quad (4.145)$$

Расчетные напряжения во фланце в рабочих условиях:

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

$$\sigma_{0p} := \frac{M_p}{\lambda \cdot (S1 - c_o)^2 \cdot D_{\text{пр}}} = 38.71 \text{ МПа} \quad (4.146)$$

- максимальные меридиональные мембранные напряжения в обечайке плоского фланца:

$$\sigma_{0\text{мр}} := \max \left[ \frac{Q_d + F + \frac{4|M|}{D_{\text{сп}}}}{\pi \cdot (D + S1) \cdot (S1 - c_o)}, \frac{Q_d + F - \frac{4|M|}{D_{\text{сп}}}}{\pi \cdot (D + S1) \cdot (S1 - c_o)} \right] \quad (4.147)$$

$$\sigma_{0\text{мр}} = 10.181 \text{ МПа}$$

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

- радиальное напряжение:

$$\sigma_{Rp} := \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + l_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot l_0 \cdot D} \cdot M_p = 19.158 \text{ МПа} \quad (4.147)$$

- окружное напряжение:

$$\sigma_{Tp} := \frac{\beta_Y \cdot M_p}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_{Rp} = 31.28 \text{ МПа} \quad (4.148)$$

Проверка условий статической прочности фланцев

$$\sigma_{P\text{max}} := \max \left( \left( \left( \left| \sigma_{0p} - \sigma_{0\text{мр}} + \sigma_{Tp} \right| \right) \right) \right) \quad (4.149)$$

$$\left( \left| \sigma_{0p} - \sigma_{0\text{мр}} + \sigma_{Rp} \right| \right) \quad (4.150)$$

$$\left( \left| \sigma_{0p} + \sigma_{0\text{мр}} \right| \right) \quad (4.151)$$

$$\sigma_{3\text{max}} := \max \left( \left| \sigma_{0M} + \sigma_{RM} \right|, \left| \sigma_{0M} + \sigma_{TM} \right| \right) \quad (4.152)$$

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

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

Usl\_3 = "Условия статической прочности при затяжке и в рабочих усло:

$$\sigma_{3max} = 51.379 \text{ МПа} \quad K_T \cdot \sigma_{20} = 239.2 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{Pmax} = 59.809 \text{ МПа} \quad K_T \cdot \sigma_{д.ф} = 234.65 \text{ МПа}$$

### *Проверка углов поворота фланцев*

Угол поворота приварного встык фланца, плоского фланца

$$\Theta := M_p \cdot y_\phi \cdot \frac{E_{20}}{E} = 5.323 \times 10^{-4} \quad (4.153)$$

Допустимый угол поворота плоского фланца  $\Theta_d := 0.013$

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

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

Таким образом, проверили выполнение условия на герметичность.

Аналогично проводим расчет для остальных фланцевых соединений.

**Вывод:** В результате проведенных расчетов определили геометрические размеры фланцевых соединений, необходимых для эксплуатации аппарата. Обеспечили статическую прочность и герметичность всех фланцевых соединений.

#### 4.2.7 Механический расчет тарелки

Механический расчет тарелок в зависимости от их конструкции включает:

- расчет диска и опорного каркаса на прочность и жесткость;
- проверку контактных устройств на жесткость;

- расчет на прочность колосников для тарелок под насадку.

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

Определим вес самой тарелки

Площадь тарелки рассчитаем по формуле:

$$F := \frac{\pi \cdot D_{\text{вн}}^2}{4} = 3.801 \text{ м}^2 \quad (4.154)$$

Отверстия для установки клапанов составляют примерно 15-20% площади диска тарелки. Примем суммарную площадь всех отверстий:

$$F_1 := 0.18 \cdot F = 0.684 \text{ м}^2 \quad (4.155)$$

Вес диска тарелки найдем по формуле:

$$G_{\text{д}} := (F - F_1) \cdot s_{\text{диск}} \cdot \gamma = 1.231 \times 10^{-4} \text{ МН} \quad (4.156)$$

где  $s_{\text{диск}} = 0,005$  м – толщина диска, принимаемая в первом приближении;

$\gamma = 0,079$  МН/м<sup>3</sup> – удельный вес стали.

Вес одного клапана примем рав  $G_{\text{к}} := 10^{-6}$  МН

Число клапанов  $n = 140$

Площадь отверстия под клапан найдем по формуле:

$$f := \frac{\pi \cdot 0.04^2}{4} = 1.257 \times 10^{-3} \text{ м}^2 \quad (4.157)$$

Находим вес тарелки:

$$G_T := G_D + n \cdot G_K = 2.631 \times 10^{-4} \text{ МН} \quad (4.158)$$

Зададимся слоем жидкости (воды) на тарелке 40 мм. Тогда вес ее составит:

$$G_B := 0.01 \cdot 0.04 \cdot (F - n \cdot f) = 1.45 \times 10^{-3} \text{ МН} \quad (4.159)$$

Таким образом, общая нагрузка, на которую рассчитывают тарелку:

$$G := G_T + G_B = 1.713 \times 10^{-3} \text{ МН} \quad (4.160)$$

$$P_{\text{распр}} := \frac{4 \cdot G}{\pi \cdot D_{\text{вн}}} = 9.916 \times 10^{-4} \quad (4.161)$$

Толщину диска тарелки определим по формуле:

$$s_{\text{диска}} := 0.56 \cdot D_{\text{вн}} \cdot \sqrt{\frac{P_{\text{распр}}}{\sigma_{\text{тар}}} + \frac{c}{1000}} = 5.86 \times 10^{-3} \text{ м} \quad (4.162)$$

В первом приближении примем толщину тарелки равной  $s = 5$  мм.

Для нормальной работы тарелки необходимо, чтобы прогиб ее диска не превышал  $1/2000$  от диаметра. Максимальный прогиб в центре тарелки определяют по формуле:

$$\omega := 4.08 \cdot \frac{P_{\text{распр}} \cdot \left(\frac{D_{\text{вн}}}{2}\right)^4}{64 \cdot N} = 0.047 \text{ м} \quad (4.163)$$

где  $N$  – цилиндрическая жесткость

$$N := \frac{E \cdot (s_{\text{диска}})^3}{12 \cdot (1 - \mu^2)} = 1.98 \times 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (4.164)$$

$$\frac{1}{2000} \cdot D_{\text{вн}} = 0.7$$

Проверим необходимость установки каркаса:

$$Us18 := \begin{cases} \text{"Каркас не нужен"} & \text{if } \omega < \frac{1}{2000} \cdot D_{\text{вн}} \\ \text{"Каркас необходим"} & \text{otherwise} \end{cases} \quad 79$$

$$Us18 = \text{"Каркас не нужен"}$$

Так как будем использовать секции тарелки с отгибом, что придаст прочность конструкции, уменьшим первоначальный размер. Примем окончательную толщину  $s = 5$  мм.

#### 4.2.8 Расчет аппарата на действие ветровой нагрузки

##### 4.2.8.1 Определение расчетных усилий от ветровых нагрузок

В данном разделе произведен расчет постоянного сечения а устойчивость от действия ветровых нагрузок. Для этого нужно найти изгибающий момент для расчетных условий, условий монтажа и гидроиспытаний.

Рассчитать колонну постоянного сечения на устойчивость от действия ветровой нагрузки по следующим исходным данным:

Высота колонны:	$H_k := 23.35$	м
Район установки - III:	$q_0 := 450$	Н/м <sup>2</sup>
Высота установки площадки обслуживания - 12 м		;
Диаметр верхней части колонны:	$D_1 := 2.2$	м
Диаметр нижней части колонны:	$D_2 := 2.2$	м
Диаметр опоры:	$D_3 := 2.2$	м
Изоляция в колонны(совелит):		
Высота:	$H_{и} := 23.35$	м
Удельный вес:	$\gamma_{и} := 4000$	Н/м <sup>3</sup>
Температура в нижней части колонны:	$T_2 := 50$	°C
Температура в верхней части колонны:	$T_1 := 50$	°C
Число тарелок:	$n_T := 20$	
Материал колонны - сталь 12X18H10T;		



Разбиваем аппарат на участки высотой  $h \sim 10$  м, как показано на рисунке

14.

Материал опоры - сталь СтЗсп

Толщина:

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

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

Стенки опоры:  $S_o := 0.01$  м

Изоляции:  $S_{и} := 0.032$  м

Модуль упругости материала колонны:  $E := 1.96 \cdot 10^{11}$  Па

Площадь внутренней поверхности эллиптического днища:  $F_d := 5.52$  м<sup>2</sup>

Объем эллиптического днища:  $V_d := 1.539$  м<sup>3</sup>

Вес люка:  $G_{л} := 120$  кг

$D_y := 0.5$  м

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

Коэффициент неравномерности сжатия грунта:  $C_f := 6 \cdot 10^7$   $\frac{Н}{М^3}$

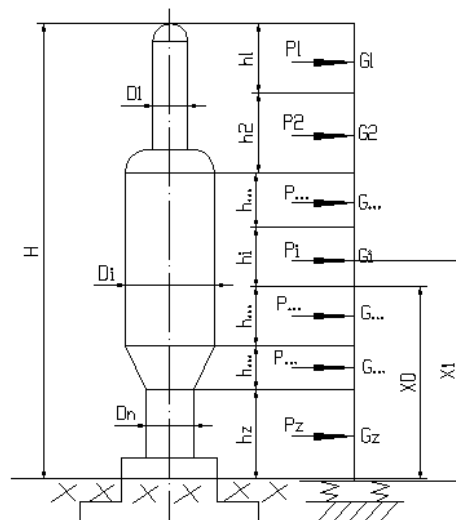


Рис. 14. – Расчетная схема аппарата

Высоту опоры примем равной 2,5 м исходя из условий эксплуатации.

Высота участка № 1, м  $H_1 := 5$

Высота участка № 2, м  $H_2 := 5$

Высота участка № 3, м  $H_3 := 5$

Высота участка № 4, м  $H_4 := 5$

Высота участка № 5, м  $H_5 := 2.5$

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

Участок № 1, м  $x_1 := 20$

Участок № 2, м  $x_2 := 15$

Участок № 3, м  $x_3 := 10$

Участок № 4, м  $x_4 := 5$

Участок № 5, м  $x_5 := 1.25$

Количество тарелок на каждом из участков:

Участок № 1  $n_1 := 9$

Участок № 2  $n_2 := 9$

Участок № 3  $n_3 := 7$

Участок № 4  $n_4 := 6$

Высоты расчетных сечений назначим из расположения люков-лазов, так как они имеют наибольший диаметр.

$$x_0 := \begin{pmatrix} 20.5 \\ 16.7 \\ 12.5 \\ 7.1 \\ 1.25 \end{pmatrix}$$

Расчет ведется для трех состояний аппарата, кроме того, в дальнейших расчетах необходимо будет знать вес каждого участка. Чаще всего вес по высо-

те колонны распределен равномерно (наличие паровых и сепарационных пространств, изоляции на отдельных частях, площадок обслуживания, змеевиков и т. д.), и, чтобы с достаточной точностью просчитать вес каждого участка, можно воспользоваться следующими практическими рекомендациями:

- 1 м<sup>3</sup> стальных площадок – 100 кг;
- 1 погонный метр ограждения лестниц – 15 кг;
- 1 погонный метр лестниц – 37 кг;
- 1 м<sup>2</sup> тарелки, включая жидкость на ней  $G_{т.1кв.м}$  - 120кг.

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

Первый участок включает в себя обечайку, крышку, 6 тарелок, площадку обслуживания и воду при гидроиспытании.

Вес обечайки найдем по формуле:

$$G_{o1} := 10 \cdot \pi \cdot D_1 \cdot S_1 \cdot H_1 \cdot \gamma_{ст} = 17285.0428 \quad (4.165)$$

Вес крышки, Н:

$$G_{к1} := 10 \cdot F_d \cdot S_1 \cdot \gamma_{ст} = 1807.8 \quad (4.166)$$

Вес тарелок, Н:

$$G_{т1} := 10 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_1^2 \cdot G_{т.1кв.м} \cdot n_1 = 16625.3083 \quad (4.167)$$

Вес обслуживающей площадки, Н:

$$G_{пл1} := \frac{\pi}{4} \cdot (D_{н.пл}^2 - D_1^2) \cdot h_{пл} \cdot 1000 = 7539.8224 \quad (4.168)$$

Вес воды, Н:

$$G_{в1} := 10 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_1^2 \cdot H_1 \cdot \gamma_{в} = 76969.02 \quad (4.169)$$

Тогда вес первого участка составит, Н:

$$G_{Г1} := G_{o1} + G_{к1} + G_{т1} + G_{пл1} + G_{в1} = 120226.9935 \quad (4.170)$$

Аналогично считаем массу остальных участков. В итоге получаем:

Вес второго участка, Н:

$$G_{Г2} = 118419.1935$$

Вес третьего участка, Н:

$$G_{Г3} = 114724.6805$$

Вес четвертого участка, Н:

$$G_{Г4} = 121673.8835$$

Вес пятого участка, Н:

$$G_{Г6} = 8642.5214$$

Таким образом, общий вес аппарата при гидроиспытании составит, Н:

$$G_{Г.max} := G_{Г1} + G_{Г2} + G_{Г3} + G_{Г4} + G_{Г5} = 483687 \quad (4.172)$$

$$G_{Г.max} := 48368.7 \quad \text{кг}$$

Масса аппарата в **рабочих** условиях, Н:

$$G_{р.max} = 242923.1512$$

Масса аппарата в условиях **монтажа**, Н:

$$G_{м.max} = 231613.4177$$

### *Определение периода собственных колебаний*

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

$$T_0 := 1.8 \cdot H_k \cdot \sqrt{\frac{G_{Г.max}}{g} \cdot \frac{H_k}{E \cdot I_1}} = 0.9178 \quad (4.173)$$

где  $I$  – момент инерции верхнего металлического сечения аппарата относительно оси,  $\text{м}^4$

$E$  – модуль упругости стали 12Х18Н10Т –  $1,96 \cdot 10^{11}$  Па

Найдем момент инерции по формуле:

$$I_1 := \pi \cdot \frac{(D_1 + S_1 - c)^3 \cdot (S_1 - c)}{8} = 0.0088 \quad (4.174)$$

*Определение расчетного изгибающего момента от действия ветровых нагрузок*

Определение статической составляющей.

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

Нормативное значение средней составляющей ветровой нагрузки на середине i-го участка, Н/м<sup>2</sup>:

$$q_i := q_0 \cdot \Theta_i \cdot K \quad (4.175)$$

где K – аэродинамический коэффициент, для круглых аппаратов равен 0,7;

$q_0$  – нормативное значение ветрового давления;

$\Theta$  - коэффициент, учитывающий изменение ветрового давления по высоте аппарата

$$\Theta_i := \begin{cases} \left(\frac{x_i}{10}\right)^{0.32} & \text{if } x_i > 10 \\ 1 & \text{if } x_i \leq 10 \end{cases} \quad (4.176)$$

В итоге получаем:

$\Theta_j =$

1.2483
1.1385
1
1
1

В итоге получаем:

$q_i =$

393.2241
358.6409
315
315
315

Тогда пульсационная составляющая ветровой нагрузки на каждом участке будет равна,  $H$ :

$$P_{st_i} := q_i \cdot D_{H_i} \cdot H_i \quad (4.177)$$

где  $D_H$  – наружный диаметр по участкам, м.

$$D_{H1} := D_1 + 2 \cdot S_1 + 2 \cdot S_H \quad D_{H1} = 1.62$$

$$D_{H2} := D_1 + 2 \cdot S_1 + 2 \cdot S_H \quad D_{H2} = 1.62$$

$$D_{H3} := D_2 + 2 \cdot S_2 + 2 \cdot S_H \quad D_{H3} = 1.62$$

$$D_{H4} := D_2 + 2 \cdot S_2 + 2 \cdot S_H \quad D_{H4} = 1.62$$

$$D_{H5} := D_2 + 2 \cdot S_2 \quad D_{H5} = 1.42$$

$H_i$  – высота участка

Подставив значения в формулу (177) получим:

$$P_{st_i} =$$

3185.1154
2904.9909
2551.5
2551.5
1118.25

Определение коэффициентов для расчета средней составляющей:

$$\epsilon_{ww} := \frac{T_r \cdot \sqrt{q_0}}{840} = 0.0232 \quad (4.178)$$

С помощью программы MathCAD определяем коэффициент динамичности при ветровой нагрузке:

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

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

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

$$O(t) := interp(ww, xx, y, t)$$

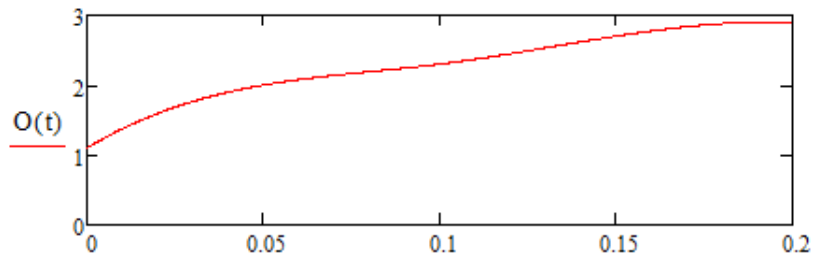


Рис. 15. – коэффициент  $\xi$

$$O(\varepsilon) = 1.6424$$

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

$$\xi = 1.6424$$

Коэффициент пульсации скоростного напора для середины участка :

$$m_i := \begin{cases} 0.6 \cdot \left(\frac{x_i}{10}\right)^{-0.16} & \text{if } x_i > 10 \\ 0.6 & \text{if } x_i \leq 10 \end{cases} \quad m_i = \begin{array}{|c|} \hline 0.537 \\ \hline 0.5623 \\ \hline 0.6 \\ \hline 0.6 \\ \hline 0.6 \\ \hline \end{array} \quad (4.179)$$

Приведенное относительное ускорение центра тяжести  $i$ -го участка:

$$\eta_{r_i} := \alpha_i \cdot \frac{\sum_{i=0}^{\text{last}(x)} (\alpha_i \cdot m_i \cdot P_{st_i})}{\sum_{i=0}^{\text{last}(x)} [(\alpha_i)^2 \cdot G_{r_i}]} \quad \eta_{r_i} = \begin{array}{|c|} \hline 0.0188 \\ \hline 0.0117 \\ \hline 0.0058 \\ \hline 0.0016 \\ \hline 0.0003 \\ \hline \end{array} \quad (4.180)$$

где  $\alpha$  - относительно перемещение центров тяжести участков,  
 $1/H^*m$ :

$$\alpha := \gamma \cdot \frac{H_k}{2 \cdot E \cdot I_1} \cdot \beta = \begin{pmatrix} 4.7323 \times 10^{-9} \\ 2.9523 \times 10^{-9} \\ 1.467 \times 10^{-9} \\ 4.1332 \times 10^{-10} \\ 7.4112 \times 10^{-11} \end{pmatrix} \quad (4.181)$$

Безразмерный коэффициент  $\gamma$  найдем по формуле:

$$h_1=20.5 \text{ м – вь } \gamma := 2 \cdot \Delta \cdot \left( \frac{h_1}{H_k} \right)^3 = 0.7179 \text{ переменного сечения;}$$

безразмерный коэффициент  $\Delta$  :

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

$h_2=2.5$  м – высота участка колонны переменного сечения.

Средняя составляющая ветровой нагрузки на  $i$ -м участке, Н:

$$P_{r.dyn_i} := \nu \cdot G_{r_i} \cdot \xi \cdot \eta_{r_i}$$

$$P_{r.dyn_i} =$$

2611.8005
1604.8926
772.6033
230.8607
2.9403

Ветровая нагрузка в условиях **гидроиспытаний**

Ветровая нагрузка на  $i$ -м участке, Н:

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

$$P_{r_i} =$$

5796.9159
4509.8835
3324.1033
2782.3607
1121.1903

Коэффициент  $x_j$  в зависимости от  $\left[ \frac{x_j}{H} \right]$ , определяют по расчетному моду-

лю:



```

xx := (0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1)ᵀ
xjgr := (0.04 0.12 0.22 0.36 0.52 0.7 0.88 1.08 1.3 1.56)ᵀ
ww := cspline(xx, xjgr)
β( [ xj ] / [ Hg ] ) := linterp( xx, xjgr, [ xj ] / [ Hg ] )

```

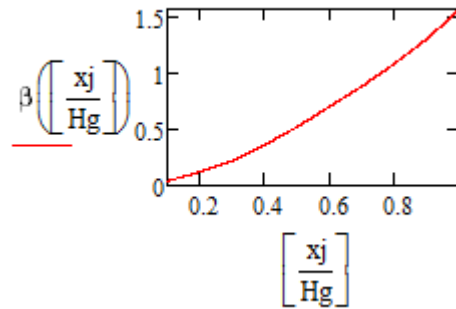


Рисунок 16 – коэффициент  $x_j$

Изгибающий момент в расчетном сечении на высоте  $x_0$  от действия ветровой нагрузки на обслуживающую площадку  $i$ , Н\*м:

$$M_{vj} := K \cdot q_0 \cdot \Theta_j \cdot (x_{j_j} - x_0) \cdot (1 + 0.75 \cdot \xi \cdot \chi_j \cdot m_j) \cdot \sum_{j=0}^4 A_j \quad (4.186)$$

где  $A_j - i$

Получаем:

$$M_{vj} = \begin{pmatrix} -119350.8347 \\ -108854.1685 \\ -95608.3585 \\ -95608.3585 \\ -95608.3585 \end{pmatrix}$$

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

$$M_{v1_n} := \sum_{i=0}^n [P_{\Gamma_i} \cdot (x_i - x_{0_i})] + \sum_{j=0}^4 M_{vj} \quad (4.187)$$

$M_{v1_n} =$

-517928.5368
-525595.3388
-533905.5971
-539748.5546
-539748.5546

Аналогично находятся изгибающие моменты для рабочих условий и условий монтажа.

Результаты занесем в таблицу 5

Таблица 5 – Изгибающие моменты от ветровой нагрузки

Высота расчетного сечения, м	Изгибающий момент в рабочих условиях, Н*м	Изгибающий момент в условиях гидроиспытаний, Н*мм	Изгибающий момент в условиях монтажа, Н*мм
20	252900	252886.9106	252900
15	252900	252886.9106	252900
10	252900	252886.9106	252900
5	252900	252886.9106	252900
1,25	252900	252886.9106	252900

Расчету на сейсмическое воздействие подлежат аппараты, предназначенные для установки в районах с сейсмичностью 7 и более баллов по шкале Рихтера.

Район расположения нашего аппарата имеет сейсмичность 5 баллов, следовательно, расчету на сейсмическое воздействие наш аппарат не подлежит.

#### 4.2.8.2 Расчет опорной обечайки

В данном расчете проводится проверка устойчивости опорной обечайки.

Проверку прочности сварного шва, соединяющего корпус колонны с опорной обечайкой следует проводить по формуле:

$$\frac{1}{\pi \cdot D_3 \cdot a_1} \cdot \left( \frac{4 \cdot |M_{v23}|}{D_3} + F_1 \right) \leq 0.8 \cdot \min((\sigma_{д0} \sigma_{дК})) \quad (4.188)$$

$$0.8 \cdot \min((\sigma_{д0} \sigma_{дК})) = 1.232 \times 10^8$$

$$\frac{1}{\pi \cdot D_3 \cdot a_1} \cdot \left( \frac{4 \cdot |M_{v23}|}{D_3} + F_2 \right) = 4.601 \times 10^7$$

spr7 := "Условие прочности не выполняется"

spr8 := "Условие прочности выполняется"

$$I := \begin{cases} \text{spr7} \\ \text{spr8} \text{ if } \frac{1}{\pi \cdot D_3 \cdot a_1} \cdot \left( \frac{4 \cdot |M_{V2_3}|}{D_3} + F_2 \right) \leq \phi_s \cdot \min((\sigma_{д0} \ \sigma_{дК})) \end{cases}$$

I = "Условие прочности выполняется"

Проверку устойчивости опорной обечайки в зоне отверстия (сечение Д-Д по рис 15.) следует проводить по формуле:

$$\frac{F_2}{\Psi_1 \cdot F_{д2}} + \frac{|M_{V2_4}| + F_2 \cdot \Psi_3 \cdot D_3}{\Psi_2 \cdot M_{д2}} \leq 1.0 \quad (4.189)$$

где  $\Psi_1 = 1$

$\Psi_2 = 0.91$  - коэффициенты, определяемы по рис.16,17

$\Psi_3 = 0.25$

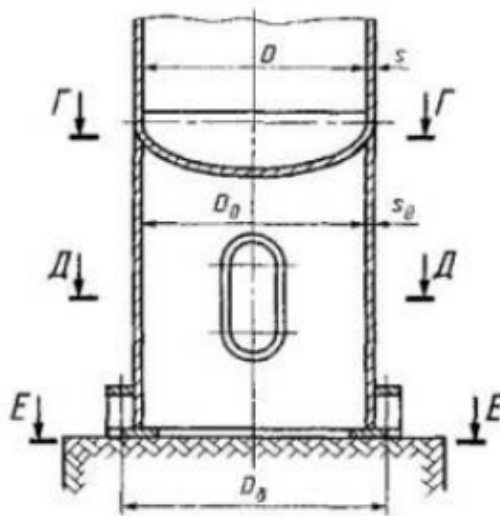


Рисунок 15 – Расчетные сечения опорной обечайки

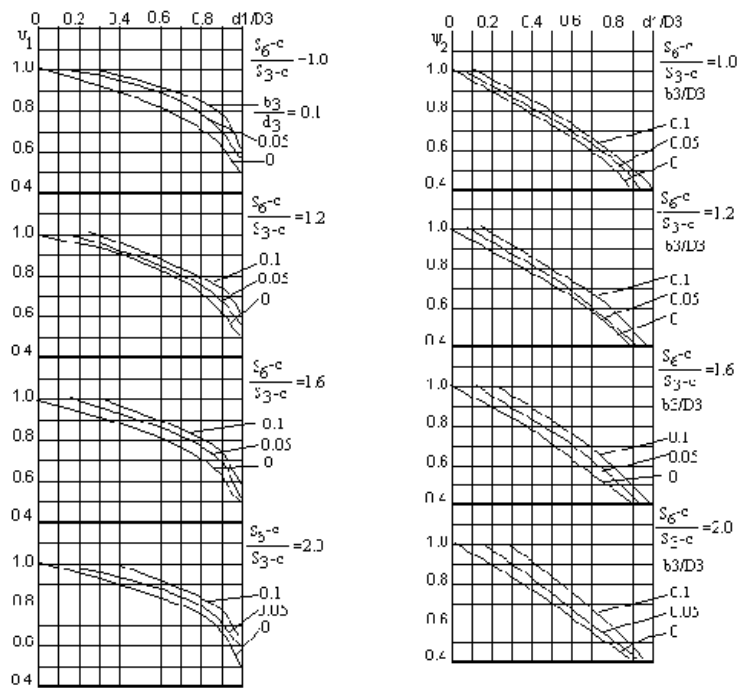


Рисунок 16 – Зависимость  $\psi_1, \psi_2$  от  $D$

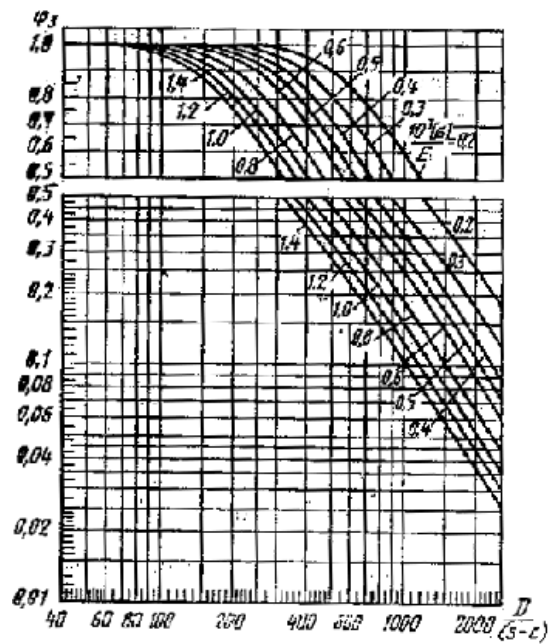


Рис. 17. – Зависимость  $\psi_3$  от  $D$

$$\frac{F_2}{\Psi_1 \cdot F_{д2}} + \frac{|M_{V2_4}| + F_2 \cdot \Psi_3 \cdot D_3}{\Psi_2 \cdot M_{д2}} = 0.437$$

$0,437 < 1$  – условие устойчивости опорной обечайки в зоне отверстий выполняется.

#### 4.2.8.3 Расчет опоры.

В данном разделе производится расчет внутреннего и наружного диаметра опорного кольца, проводится проверка устойчивости аппарата, а также диаметр и количество фундаментных болтов.

Внутренний диаметр опорного кольца

$$D_2 = D - 0.06 = 2.20 - 0.06 = 2.14 \text{ м.} \quad (4.190)$$

Наружный диаметр опорного кольца

$$D_1 = D + 2s + 0.3 = 2,20 + 2 \times 0,01 + 0,3 = 2,52 \text{ м.} \quad (4.191)$$

Площадь опорной поверхности

$$F := \frac{\pi}{4} \cdot (D_1^2 - D_2^2) = 3.14 / 4 \times (2.52^2 - 2.14^2) = 1.391 \text{ м}^2. \quad (4.192)$$

Момент инерции опорного кольца

$$W := \frac{\pi}{32} \cdot \frac{D_1^4 - D_2^4}{D_1} = \frac{3.14}{32} \frac{2.52^4 - 2.14^4}{2.52} = 0.754 \text{ м}^3. \quad (4.193)$$

Напряжение в материале фундамента

$$\sigma := \frac{G_{\max}}{F} + \frac{M_{\max}}{W} = \frac{0.1699}{1.394} + \frac{34.235}{0.754} = 45.525 \text{ МПа.} \quad (4.194)$$

Выбираем установку опоры на стальной фундамент, для которого допускаемое напряжение  $[\sigma]_{\phi} = 200 \text{ МПа}$  [11, табл. 29.1]

Проверка устойчивости аппарата

$$\sigma_x := \frac{G_{\max}}{F} - \frac{M_{\max}}{W} = \frac{0.1699}{1.394} - \frac{34.235}{0.754} = -45.281 \text{ МПа} < 0 \text{ МПа.} \quad (4.195)$$

Т.к. получено отрицательное значение, то аппарат неустойчив, значит необходима его фиксация фундаментными болтами. Нагрузка на фундаментные болты

$$\begin{aligned} P_{\phi} &:= \frac{\pi}{4} \cdot (D_1^2 - D_2^2) \cdot \sigma = \\ &= 3.14 / 4 \times (2.52^2 - 2.14^2) \times 45,525 = 63,315 \text{ МН.} \end{aligned} \quad (4.196)$$

Принимаем число болтов

$$z := 80.$$

Тогда нагрузка на один болт

$$P_{\text{б1}} := \frac{P_{\text{б}}}{z} = 63,315 / 80 = 0.791 \text{ МН.} \quad (4.197)$$

Расчетный диаметр болтов

$$d_{\text{б}} := \sqrt{\frac{4P_{\text{б1}}}{\pi \sigma_{\text{б}}}} + 2\text{мм} = \sqrt{\frac{4 \times 0.791}{3.14 \times 537}} + 0.002 = 0.045 \text{ мм.} \quad (4.198)$$

Принимаем

$$d_{\text{б}} := 48\text{мм.}$$

Диаметр болтовой окружности для  $d_{\text{б}} > 30$  мм

$$D_{\text{б}} := D + 2s + 4d_{\text{б}} = 2,20 + 2 \times 0,01 + 4 \times 0,048 = 2,41 \text{ мм.} \quad (4.199)$$

Тогда уточненный наружный диаметр опорного кольца

$$D_1 := D_{\text{б}} + 3d_{\text{б}} = 2,41 + 3 \times 0,048 = 2,56 \text{ м.} \quad (4.200)$$

**Вывод:** вычислили геометрические размеры опорного узла. Для устойчивости аппарата требуется 80 фундаментных болтов М30.

#### 4.2.9 Расчет тепловой изоляции

В данном разделе производится расчет толщины слоя тепловой изоляции.

В соответствии с рекомендацией [12, с. 341] для уменьшения теплотерь и предохранения персонала от термических ожогов необходимо предусмотреть теплоизоляцию наружной поверхности ректификационной колонны. Цель расчета тепловой изоляции - определение исполнительной толщины слоя тепловой изоляции.

В соответствии рекомендаций [2, с.177] для аппаратов, работающих на открытом воздухе в зимнее время, температура стенки находится в интервале от 0-10°C, примем  $t_{\text{ст2}}=10$  °C. Расчет толщины теплоизоляционного слоя ма-

териала можно проводить по упрощенной схеме, используя следующее уравнение:

$$\delta_{\text{из}} = \frac{\lambda_{\text{из}} \cdot (t_{\text{ст}} - t_{\text{из}})}{\alpha_{\text{н}} \cdot (t_{\text{из}} - t_{\text{окр}})} \quad (4.201)$$

где,  $\lambda_{\text{из}}$ - коэффициент теплопроводности изоляционного слоя;  $t_{\text{ст}}$  - температура наружной стенки корпуса;  $t_{\text{из}}$  - температура поверхности изоляционного слоя;  $\alpha_{\text{н}}$  - коэффициент теплоотдачи от внешней поверхности изоляционного материала в окружающую среду Вт/ К.

Коэффициент теплоотдачи от внешней поверхности изоляционного материала в окружающую среду в соответствии с [2, с.177], Вт/м<sup>2</sup> К:

$$\alpha_{\text{н}} = 9.3 + 0.058 \cdot t_{\text{ст}} = 9,3 + 0,058 \cdot 10 = 9,88 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К} \quad (4.202)$$

В качестве исполнительного материала тепловой изоляции примем совелит (85% магнезии + 15% асбеста), способный сохранять свои теплоизоляционные свойства на протяжении долго времени ( $t_{\text{экс}}=15$  лет), обладающей низкой

горючестью (что особенно важно для данного взрыво- и пожароопасности производства), при этом изоляция из совелит не содержит коррозионных агентов, что является дополнительным преимуществом выбора данного исполнительного материала.

Примем коэффициент теплопроводности в соответствии с [2, с.177], равным  $\lambda_{\text{из}}=0,098$  Вт/м<sup>2</sup>·К. Температуру стенки  $t_{\text{ст}}$  - принимаем равной 52°C.

Температуру изоляционного слоя примем равной 45°C. Температуру окружающей среды принимаем, для самых жестких условий равной -40°C.

Тогда:

$$\delta_{\text{из}} = \frac{0,098 \cdot (52 - 10)}{9,88 \cdot (10 - (-40))} = 0,0083 \text{ м} \quad (4.203)$$

$$\delta_{\text{из}}=8,3 \text{ мм};$$

**Вывод:** Примем исполнительную толщину тепло изоляции равной 10 мм.

В результате проведенного механического расчета ректификационной колонны непрерывного действия:

- Определили толщину стенки цилиндрической обечайки, эллиптических днищ. Она составила 10 мм;
- Выяснили, что необходимо укрепить отверстия в цилиндрической обечайке для штуцера ввода газа и люка-лаза. Сделали это путем увеличения толщины стенки штуцера;
- Обеспечили прочность и герметичность всех фланцевых соединений, необходимых для эксплуатации аппарата;
- Рассчитали аппарат на прочность и устойчивость от действия ветровых нагрузок. Вычислили геометрические размеры опорного узла. Для устойчивости аппарата требуется 80 фундаментных болтов М30.



## 5. Расчет теплообменного аппарата

### 5.1 Технологический расчет теплообменного аппарата

Таблица 6. Исходные данные

Наименование частей сосуда	Пространство	
	Трубное	Межтрубное
Рабочее давление, МПа	0,39	0,7
Расчетное давление, МПа	1,0	1,0
Пробное давление испытания, Мпа	Гидравлического	1,32
	Пневматического	-
Рабочая температура среды, С	На входе	28
	На выходе	35
Наименование рабочей среды	Оборотная вода	Азотная кислота 58-60%

#### Тепловые расчеты

Принимаем для межтрубного пространства индекс «1», для трубного – «2».

Температурная схема процесса:

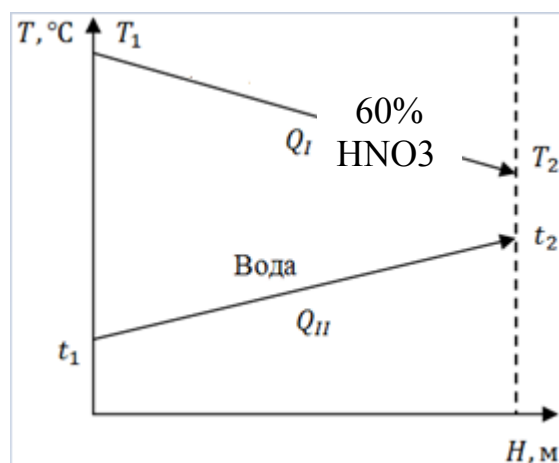


Рис. 18. Температурная схема процесса

Рассчитаем большую и малую разность температур на концах теплоносителей:

$$\Delta t_{\theta} = T_1 - t_1 = 80 - 28 = 52^{\circ}\text{C}; \quad (5.1.1)$$

$$\Delta t_{\pi} = T_2 - t_2 = 60 - 35 = 25^{\circ}\text{C}, \quad (5.1.2)$$

где  $T_1$  – температура азотной кислоты на входе в теплообменник,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$T_2$  – температура азотной кислоты на выходе из теплообменника,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t_1$  – температура воды на входе в теплообменник,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t_2$  – температура воды на выходе из теплообменника,  $^{\circ}\text{C}$ .

Средняя разность температур  $\Delta t_{\text{cp}}$  определим по уравнению 4.78 [8, с. 169]:

$$\Delta t_{\text{cp}} = \frac{\Delta t_{\theta} - \Delta t_{\pi}}{\ln(\Delta t_{\theta}/\Delta t_{\pi})} = \frac{52 - 25}{\ln(52/25)} = 37^{\circ}\text{C}. \quad (5.1.3)$$

Среднюю температуру воды рассчитаем по уравнению 4.82 [8, с. 170]:

$$t_{\text{cp2}} = (t_1 + t_2)/2 = (28 + 35)/2 = 31,5^{\circ}\text{C}. \quad (5.1.4)$$

Средняя температура азотной кислоты по уравнению 4.82a [8, с. 170]:

$$t_{\text{cp1}} = t_{\text{cp2}} + \Delta t_{\text{cp}} = 31,5 + 37 = 68,5^{\circ}\text{C}. \quad (5.1.5)$$

Уравнение теплового баланса:

$$Q_{\text{I}} = Q_{\text{II}} + Q_{\text{v}}, \quad (5.1.6)$$

где  $Q_{\text{I}} = G_1 \cdot C_{p1} \cdot (T_1 - T_2)$  – тепло, отдаваемое азотной кислотой;

$$Q_{\text{II}} = G_2 \cdot C_{p2} \cdot (t_2 - t_1) \text{ – тепло, получаемое водой;}$$

$Q_{\text{v}}$  – тепловые потери (примем 5% от  $Q_{\text{I}}$ );

$G_1$  – массовый расход азотной кислоты, кг/с;

$G_2$  – массовый расход потока воды, кг/с;

$C_{p1}$  – теплоемкость азотной кислоты при средней температуре,

Дж/(кг· $^{\circ}\text{C}$ );

– теплоемкость воды при средней температуре, Дж/(кг·°C).

$$\begin{aligned} G_1 \cdot c_{p1} \cdot (T_1 - T_2) &= G_2 \cdot c_{p2} \cdot (t_2 - t_1) + 0,05 \cdot G_1 \cdot c_{p1} \cdot (T_1 - T_2); \\ 0,95 \cdot G_1 \cdot c_{p1} \cdot (T_1 - T_2) &= G_2 \cdot c_{p2} \cdot (t_2 - t_1). \end{aligned} \quad (5.1.7)$$

Из уравнения теплового баланса выразим расход воды:

$$G_2 = \frac{0,95 \cdot G_1 \cdot c_{p1} \cdot (T_1 - T_2)}{c_{p2} \cdot (t_2 - t_1)}. \quad (5.1.8)$$

Расход азотной кислоты:

$$G_1 = 47,9 \frac{\text{т}}{\text{ч}} = \frac{47,9 \cdot 1000}{3600} = 13,31 \frac{\text{кг}}{\text{с}}, \quad (5.1.9)$$

Теплоемкость воды определим по табл. XXXIX при  $t_{\text{ср2}} = 3$  [8, с. 537]:

$$c_{p2} = 4180 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Теплоемкость азотной кислоты найдем по уравнению 5.11 [8, с. 248]

$$c_{p1} = 4180(1 - x) + c_{\text{HNO}_3} \cdot x, \quad (5.1.10)$$

где  $c_{\text{HNO}_3}$  – удельная теплоемкость безводной азотной кислоты, по рис.

XI [8, с. 562] при  $t_{\text{ср1}} = 68,5^\circ\text{C}$   $c_{\text{HNO}_3} = 1747,23 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{°C)}$ :

$x$  – концентрация азотной кислоты, масс. доли.

$$c_{p1} = 4180(1 - 0,60) + 1747,23 \cdot 0,60 = 2720,3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Расход воды:

$$G_2 = \frac{0,95 \cdot 13,31 \cdot 2720,3 \cdot (80 - 60)}{4180 \cdot (35 - 28)} = 23,51 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Объемные расходы азотной кислоты и воды:

$$V_1 = \frac{G_1}{\rho_1} = \frac{13,31}{1300,3} = 0,0102 \frac{\text{м}^3}{\text{с}};$$

$$V_2 = \frac{G_2}{\rho_2} = \frac{23,51}{994,55} = 0,0236 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}.$$

где  $\rho_{\text{HNO}_3}$  – плотность азотной кислоты при  $t_{\text{ср1}} = 6$  [16];

$\rho_{\text{H}_2\text{O}}$  – плотность воды при  $t_{\text{ср2}} = 3$  из табл. IV[8, с. 512].

Тепловая нагрузка:

$$Q = G_2 \cdot C_{p2} \cdot (t_2 - t_1) = 23,51 \cdot 4180 \cdot (35 - 28) = 687902,6 \text{ Вт.} \quad (5.1.11)$$

### 5.1.1 Ориентировочный расчет и подбор теплообменника

Принимаем диаметр трубы 25х2:

$d_1 = 25$  – наружный диаметр трубок;

$\delta = 2$  – толщина стенок трубок;

$d_2 = d_1 - 2 \cdot \delta = 25 - 2 \cdot 2 = 21$  – внутренний диаметр трубок.

Из табл. VI [8, с.514] определим вязкость воды при средней температуре  $\vartheta$ :

$$\mu_2 = 0,776 \text{ мПа} \cdot \text{с.}$$

Рассчитаем ориентировочную поверхность теплообмена, используя основное уравнение теплопередачи [8, с. 168]:

$$Q = K \cdot F \cdot \Delta t_{\text{ср}} \quad (5.1.12)$$

Ориентировочные значения коэффициентов теплопередачи по табл. 4.8 [8, с. 172]:

- от жидкости к жидкости:

$$K = 140 \text{ Вт/} (\text{м}^2 \cdot \text{К}); K = 340 \text{ Вт/} (\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Пределы ориентировочной поверхности теплообмена:

$$F_{\text{ср}}^{\text{min}} = \frac{Q}{K^{\text{max}} \cdot \Delta t_{\text{ср}}} = \frac{687902,6}{340 \cdot 37} = 55 \text{ м}^2;$$

$$F_{\text{ср}}^{\text{max}} = \frac{Q}{K^{\text{min}} \cdot \Delta t_{\text{ср}}} = \frac{687902,6}{140 \cdot 37} = 133 \text{ м}^2.$$

Опираясь на рассчитанные данные, выберем теплообменник из табл. 6 [8, с.215]:

Таблица 7 – Параметры выбранного теплообменного аппарата

Число ходов, Z	Внутренний диаметр, D <sub>вн</sub> , мм	Общее число труб, N <sub>тр</sub>	Число труб на один ход, n	Поверхность теплообмена, F, м <sup>2</sup>
1	800	465	465	73; 109

Проведем уточненный расчет для выбранного теплообменника.

### 5.1.2 Уточненный расчет теплообменника

Рассчитаем действительную поверхность теплообмена, выражая ее из основного уравнения теплопередачи 4.72 [8, с. 168]:

$$F_{\text{действ}} = \frac{Q}{K_{\text{действ}} \cdot \Delta t_{\text{ср}}}; \quad (5.1.13)$$

$$K_{\text{действ}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \Sigma R}; \quad (5.1.14)$$

где  $\alpha_1$  – коэффициент теплоотдачи от азотной кислоты к стенке;

$\alpha_2$  – коэффициент теплоотдачи от стенки к воде;

$\Sigma R$  – сумма термических сопротивлений стенки и загрязнений.

Коэффициент теплоотдачи от азотной кислоты к стенке

Коэффициент теплоотдачи определим по формуле 4.11 [8, с. 150], выражая :

$$\alpha_1 = \frac{Nu_1 \cdot \lambda_1}{d_1}; \quad (5.1.15)$$

где  $Pr_1$  – критерий Нуссельта;

$\lambda_1$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);

Определим гидродинамический режим потока.

Скорость потока азотной кислоты в межтрубном сечении:

$$\omega_1 = \frac{V_1}{S_1} = \frac{0,0102}{0,079} = 0,13 \frac{\text{м}}{\text{с}}. \quad (5.1.16)$$

Здесь  $S_1$  – проходное сечение межтрубного пространства, табл. 4.12 [8, с. 215].

Критерий Рейнольдса равен:

$$Re_1 = \frac{\omega_1 d_1 \rho_1}{\mu_1} = \frac{0,13 \cdot 0,025 \cdot 1300,3}{0,736 \cdot 10^{-3}} = 5741,8, \quad (5.1.17)$$

где  $d_1$  – наружный диаметр труб, определяющий линейный размер при поперечном обтекании;

$\mu_1$  – коэффициент динамической вязкости азотной кислоты, Па·с, табл. IX[1, с. 516].

$2300 < Re_1 < 10^4$  – в этой области надежных расчетных формул нет.

Приблизительно расчет (с запасом) можно выполнять по графику 4.1 [8, с. 154].

$$f(Re) = \frac{Nu_1}{Pr_1^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_1}{Pr_{см1}}\right)^{0,28}} = 19,5. \quad (5.1.18)$$

Здесь  $Pr_1$  – критерий Прандтля при средней температуре теплоносителя ( ) и при температуре стенки соответственно. Значения критерия определяем по рис. XIII[1, с. 564], либо по формуле 4.12 [8, с. 151]:

$$Pr_1 = \frac{c_{p1} \cdot \mu_1}{\lambda_1} = \frac{2720,3 \cdot 0,736 \cdot 10^{-3}}{0,434} = 4,61 \quad (5.1.19)$$

где  $\lambda_1$  – коэффициент теплопроводности азотной кислоты [17].

Определим значение критерия Прандтля .

Температуру стенки определим по формуле:

$$t_{ст1} = T_1 - 0,1 \cdot \Delta t_{оп} = 80 - 0,1 \cdot 37 = 76,3^\circ\text{C}.$$

Значения теплофизических параметров при :

$$C_{p1} = 2765 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{K}} [4]; \lambda_1 = 0,434 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{K}}; \mu_1 = 0,659 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

$$Pr_{ст1} = \frac{C_{p1} \cdot \mu_1}{\lambda_1} = \frac{2765 \cdot 0,659 \cdot 10^{-3}}{0,434} = 4,20.$$

Таким образом критерий Нуссельта равен:

$$\frac{Nu_1}{Pr_1^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_1}{Pr_{ст1}}\right)^{0,25}} = 19,5$$

$$Nu_1 = 19,5 \cdot Pr_1^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_1}{Pr_{ст1}}\right)^{0,25} = 19,5 \cdot 4,61^{0,43} \cdot \left(\frac{4,61}{4,20}\right)^{0,25} = 38,5.$$

Коэффициент теплоотдачи от азотной кислоты к стенке равен:

$$\alpha_1 = \frac{38,5 \cdot 0,434}{0,025} = 668,5 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{K}}$$

Коэффициент теплоотдачи от стенки к воде

Коэффициент теплоотдачи от стенки к воде:

$$\alpha_2 = \frac{Nu_2 \cdot \lambda_2}{d_2}$$

Скорость потока воды в трубном сечении:

$$\omega_2 = \frac{V_2}{S_2} = \frac{V_2}{0,785 \cdot d_2^2 \cdot N_{тр}} = \frac{0,0236}{0,785 \cdot 0,021^2 \cdot 465} = 0,1466 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Здесь  $S_2$  – проходное сечение трубного пространства.

Критерий Рейнольдса равен:

$$Re_2 = \frac{\omega_2 \cdot d_2 \cdot \rho_2}{\mu_2} = \frac{0,1466 \cdot 0,021 \cdot 994,55}{0,776 \cdot 10^{-3}} = 3945,65,$$

где – внутренний диаметр труб.

$2300 < Re_1 < 1$ –режим течения воды переходный.

Расчет критерия Нуссельта в переходной области можно выполнить по графику (рис. 4.1) [8, с. 154]:

$$\frac{Nu_2}{Pr_2^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_2}{Pr_{ст2}}\right)^{0,25}} = f(Re).$$

Значение берем при температуре стенки

$$t_{ст2} = t_{сп2} + 0,8 \cdot \Delta t_{сп} = 31,5 + 0,8 \cdot 37 = 61,1^\circ\text{C}.$$

По рис. 4.1 находим:

$$\frac{Nu_2}{Pr_2^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_2}{Pr_{ст2}}\right)^{0,25}} = 12.$$

Подставляем найденные значения критерия  $Pr_2 = 5,5$  и  $Pr_{ст2} =$  по рис.

XIII [8, с. 564], вычислим значение критерия Нуссельта:

$$Nu = 12 \cdot 5,5^{0,43} \cdot \left(\frac{5,5}{3,25}\right)^{0,25} = 28,5.$$

Коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha_2 = \frac{28,5 \cdot 0,621}{0,021} = 842,78 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Суммарное термическое сопротивление стенки и загрязнений

Рассчитаем сумму термических сопротивлений стенки и загрязнений [8, с. 195]:

$$\Sigma R = r_{з1} + r_{з2} + \frac{\delta}{\lambda_{ст}} \tag{5.1.20}$$

где  $r_{з1}$  – тепловое сопротивление загрязнения стенки со стороны азотной кислоты;

$r_{з2}$  – тепловое сопротивление загрязнения стенки со стороны воды;



$\delta$  – коэффициент теплопроводности стенки, ;

$\lambda_{ст}$ – толщина стенки трубок, м.

Из табл. XXXI[8, с. 531] выберем тепловые проводимости загрязнений:

- со стороны азотной кислоты

$$\frac{1}{r_{z1}} = 5800 \frac{Вт}{(м^2 \cdot К)};$$

- со стороны воды

$$\frac{1}{r_{z2}} = 5800 \frac{Вт}{(м^2 \cdot К)};$$

Из табл. XXVIII [8, с. 529] для стали:

$$\lambda_{ст} = 17,5 \frac{Вт}{м \cdot К}$$

Для удобства, рассчитаем величину, обратную сумме сопротивлений – тепловую проводимость:

$$\frac{1}{\Sigma R} = \frac{1}{\frac{1}{5800} + \frac{1}{5800} + \frac{2 \cdot 10^{-3}}{17,5}} = 2178,1 \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$$

Коэффициент теплопередачи и поверхность теплообмена

Рассчитаем коэффициент теплопередачи:

$$K_{дейст} = \frac{1}{\frac{1}{668,5} + \frac{1}{842,78} + \frac{1}{2178,1}} = 318,31 \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$$

Тогда площадь теплопередачи составит:

$$F_{дейст} = \frac{687902,6}{318,31 \cdot 37} = 58,41 м^2.$$

Запас поверхности:

$$\Delta F = \frac{73 - 58,41}{58,41} \cdot 100 = 25 \%. \tag{5.1.21}$$

Запас поверхности теплообмена достаточен.

Исходя из полученных результатов по ГОСТ Р 53677-2009 был подобран стандартный кожухотрубный неразборный теплообменник.

Таблица 8 – Предварительные параметры теплообменного аппарата

Число ходов, $Z$	Диаметр, $D$ , мм	Общее число труб, $N$	Длина труб, м	Поверхность теплообмена, $m^2$
1	800	465	2	73

## 5.2 Конструктивный расчет теплообменника

### 5.2.1 Определение высоты аппарата

Определим площадь проходного сечения трубок одного хода [16]:

$$f_2 = \frac{G_2}{\rho_2 \omega_2} = \frac{23,51}{994,55 \cdot 0,1466} = 0,1612 \text{ м}^2. \quad (5.2.1)$$

Отсюда число трубок одного хода:

$$n^1 = \frac{f_2}{0,785d_2^2} = \frac{0,1612}{0,785 \cdot 0,021^2} = 465. \quad (5.2.2)$$

Расчетная длина одной трубки при одном ходе:

$$L = \frac{F_{\text{раб}}}{\pi d_p n^1} = \frac{58,41}{3,14 \cdot 0,025 \cdot 465} = 1,6 \text{ м}, \quad (5.2.3)$$

где  $d_p$  – расчетный диаметр трубки, определяемый в зависимости от соотношения коэффициентов теплоотдачи в трубном и межтрубном пространстве  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ ; при  $\alpha_1 \ll \alpha_2$ :

$$d_p = d_1 = 0,025 \text{ м}.$$

Число ходов трубного пространства:

$$Z = \frac{L}{l} = \frac{1,6}{2} = 0,8 \approx 1, \quad (5.2.4)$$

где  $l$  – рабочая длина труб, 2 м.

Диаметр для многоходового теплообменника найдем из соотношения:

$$D_{\text{ин}} = 1,1t \sqrt{\frac{n}{\eta}} = 1,1 \cdot 32 \cdot \sqrt{\frac{465}{0,9}} = 800 \text{ мм}, \quad (5.2.5.)$$

где  $n = Zn^1 = 1 \cdot 465 =$  – общее число трубок;

$$t = 1,2d_1 + 2 = 1,2 \cdot 25 + 2 = 3.$$

Округляем до ближайшего стандартного размера:

$$D_{\text{ин}} = 800 \text{ мм}.$$

Общая высота кожухотрубчатого теплообменника равна:

$$H = l + 2h = 2000 + 2 \cdot 200 = 2400 \text{ мм,}$$

где  $h=200-400$  мм – высота распределительной камеры.

### 5.2.2 Определение температурных напряжений в трубах и корпусе

Температурные напряжения в трубах и корпусе [16]:

$$\sigma_T = \frac{Q_T}{F_T} = \frac{(\alpha_T t_T - \alpha_K t_K) E_T E_K F_K}{E_T F_T + E_K F_K}, \quad (5.2.6.)$$

$$\sigma_K = \frac{Q_T}{F_K} = \frac{(\alpha_T t_T - \alpha_K t_K) E_T E_K F_T}{E_T F_T + E_K F_K}, \quad (5.2.7.)$$

где  $\alpha_T$ ,  $\alpha_K$  – температурные коэффициенты линейного расширения труб и корпуса,  $1/^\circ\text{C}$ ;

$E_T$ ,  $E_K$  – модули упругости материала труб и кожуха, МПа;

$F_T$ ,  $F_K$  – площади поперечного сечения всех труб и корпуса,  $\text{м}^2$ ;

$t_T$ ,  $t_K$  – температуры труб и кожуха,  $^\circ\text{C}$ .

Материал труб – сталь марки 12Х18Н10Т.

Материал кожуха – сталь марки 12Х18Н10Т.

Температурные коэффициенты линейного расширения и модули упругости материала труб и кожуха взяты из справочников при температурах  $t_T =$

и  $t_K =$

Площади поперечного сечения:

$$F_T = 0,785(d_1^2 - d_2^2)n = 0,785(0,025^2 - 0,021^2) \cdot 465 = 0,0672 \text{ м}^2; \quad (5.2.8.)$$

$$F_K = 0,785(D_{\text{вн}}^2 - D_{\text{вн}}^2) = 0,785(0,812^2 - 0,8^2) = 0,0152 \text{ м}^2. \quad (5.2.9.)$$

Определим температурные напряжения в трубах и корпусе:

$$\sigma_{\tau} = \frac{|(16,3 \cdot 10^{-6} \cdot 35 - 16,6 \cdot 10^{-6} \cdot 80)| \cdot 1,97 \cdot 10^8 \cdot 1,95 \cdot 10^8 \cdot 0,0152}{1,97 \cdot 10^8 \cdot 0,0672 + 1,95 \cdot 10^8 \cdot 0,0152} = 27,3 \text{ МПа.}$$

Допустимое напряжение для стали труб:  $[\sigma_{\tau}] = 183$

$$\sigma_{\tau} < [\sigma_{\tau}].$$

$$\sigma_{\kappa} = \frac{|(16,3 \cdot 10^{-6} \cdot 35 - 16,6 \cdot 10^{-6} \cdot 80)| \cdot 1,97 \cdot 10^8 \cdot 1,95 \cdot 10^8 \cdot 0,0672}{1,97 \cdot 10^8 \cdot 0,0672 + 1,95 \cdot 10^8 \cdot 0,0152} = 120,7 \text{ МПа.}$$

Допустимое напряжение для стали кожуха:  $[\sigma_{\kappa}] = 178$

$$\sigma_{\kappa} < [\sigma_{\kappa}].$$

Следовательно, выбираем кожухотрубчатый одноходовый теплообменник с внутренним диаметром кожуха 800 мм, общим числом труб 465 и длиной корпуса и труб 2000 мм.

Таблица 9. – Основные параметры теплообменного аппарата

Число ходов, Z	Диаметр, D <sub>вн</sub> , мм	Общее число труб, N	Длина труб, м	Поверхность теплообмена, м <sup>2</sup>
1	800	465	2	73

### 5.2.3 Расчет и подбор патрубков

Примем скорость жидкостей в штуцерах межтрубного пространства теплообменника равной 0,5 м/с. [8, с. 17].

1. Диаметр условного прохода (внутренний диаметр) штуцеров для подвода и отвода азотной кислоты по формуле:

$$d_{шт}^{вн} = \sqrt{\frac{4 \cdot G_1}{\pi \cdot \omega_1^{шт} \cdot \rho_1}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 13,31}{3,14 \cdot 0,5 \cdot 1300,3}} = 0,161 \text{ м} = 161 \text{ мм.} \quad (5.2.10.)$$

Принимаем  $d_{шт}^{вн} = 200$

Таблица 10. – Параметры фланцев

$D_y$	$d_n$	$D_\phi$	$D_s$	$D_1$	Болты		Тип фланцев – 1	
					$d_b$	z	ГОСТ 1255-67	
мм							$h, \text{мм}$	Масса, кг
200	219	315	280	258	M16	8	15	4,73

2.Примем скорость хладагента в штуцерах трубного пространства теплообменника равной 1 м/с. [8, с. 17].

Диаметр условного прохода (внутренний диаметр) штуцера для подвода и отводов:

$$d_{\text{шт}}^{\text{шт}} = \sqrt{\frac{4 \cdot G_2}{\pi \cdot \omega_2^{\text{шт}} \cdot \rho_2}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 23,51}{3,14 \cdot 1 \cdot 994,55}} = 0,173 \text{ м} = 173 \text{ мм.} \quad (5.2.11.)$$

Принимаем рассчитанный диаметр равный 200 мм в соответствии с нормализованным диаметром условного прохода штуцеров кожухотрубных т/о [17, с. 547].

Таблица 11. – Параметры фланцев

$D_y$	$d_n$	$D_\phi$	$D_s$	$D_1$	Болты		Тип фланцев – 1	
					$d_b$	z	ГОСТ 1255-67	
мм							$h, \text{мм}$	Масса, кг
200	219	315	280	258	M16	8	15	4,73

### 5.3 Механический расчет кожохотрубчатого теплообменного аппарата (типа ТН)

В данном разделе произведем расчет на проверку выполнения критериев надежности, исходя из нагрузок на рассчитываемый аппарат. Для отдельных узлов теплообменного аппарата критерии надежности будут следующие:

- Прочность
- Жесткость (устойчивость)

#### Исходные данные:

Внутренний диаметр аппарата:

$$D := 800\text{мм}$$

Длина цилиндрической обечайки:

$$l := 3000\text{мм}$$

Основные конструктивные параметры эллиптических крышек определяем согласно [11, стр. 442]:

Диаметр крышки:

$$D_{\text{кр}} := 800\text{мм}$$

Высота отбортованной части крышки:

$$h_2 := 30\text{мм}$$

Высота крышки:

$$H_{\text{к}} := 300 + h_2 = 330 \text{ мм}$$

Длина аппарата согласно [18, стр. 30]:

$$L := 3000\text{мм}$$

### 5.3.1 Расчётные параметры

#### 5.3.1.1 Расчётное напряжение

Основные характеристики стали определяем согласно [19] ГОСТ Р 52857.1-2007: допускаемое напряжение, предел текучести, модуль упругости.

Рабочая температура холодного теплоносителя:

$$t_{\text{хол}} := 28^{\circ}\text{C}$$

Рабочая температура горячего теплоносителя:  $t_{\text{гор}} := 80^{\circ}\text{C}$

Материал корпуса 12X18H10T

Допускаемое напряжение материала 12X18H10T при температуре 20 градусов:  $\sigma_{\text{Доп}20} := 184\text{МПа}$

Допускаемое напряжение материала 12X18H10T при рабочей температуре холодного теплоносителя:  $\sigma_{\text{Д}28} := 183\text{МПа}$

Допускаемое напряжение материала 12X18H10T при рабочей температуре горячего теплоносителя:  $\sigma_{\text{Д}80} := 178\text{МПа}$

Плотность рабочей среды:  $\rho_{\text{ср}} := 1300.3\text{кг/м}^3$

Давление рабочее в межтрубном пространстве  $P_{\text{MT}} := 0.7\text{МПа}$

Давление рабочее в трубном пространстве  $P_{\text{ТР}} := 0.39\text{МПа}$

Сварка аппарата полуавтоматическая, сварной шов стыковой односторонний, контролируемая длина сварных швов 100%.

Коэффициент сварного шва равен:  $\phi := 1$

Коэффициент запаса устойчивости. Для рабочих условий:  $n_{\gamma} := 2.4$

Коэффициент номинального уменьшения допускаемого напряжения:

$$\eta := 0.9$$

Коэффициент запаса прочности по пределу текучести:  $n := 1.1$



Значение предела текучести при температуре 20 °С:  $\sigma_T := 276$

Расчет допускаемого напряжения, МПа:

Для рабочего состояния:

$$\sigma_{Д20} := \sigma_{Доп20} \cdot \eta = 165.6 \quad (5.3.1.)$$

Расчет допускаемого напряжения для условий гидроиспытания:

$$\sigma_{И} := \frac{\sigma_T}{n} = 250.909 \quad (5.3.2.)$$

### 5.3.1.2 Прибавки к расчетным толщинам конструктивных элементов:

Прибавку к расчетным толщинам согласно [19, с.10]

Скорость коррозии материала от действия заданной среды:

$$П := 0.1 \text{ мм/год}$$

Срок эксплуатации аппарата:

$$\tau := 20 \text{ лет}$$

Прибавка для компенсации коррозии и эрозии:

$$c_1 := П \cdot \tau = 2 \text{ мм}$$

Прибавка для компенсации минусового допуска;

$$c_2 := 0 \text{ мм}$$

Технологическая прибавка;

$$c_3 := 0 \text{ мм}$$

Прибавки к расчетным толщинам конструктивных элементов:

$$c := c_1 + c_2 + c_3 = 2 \text{ мм} \quad (5.3.3.)$$

### 5.3.1.3 Расчет давлений:

Давление в трубном пространстве:

Расчетное давление в трубном пространстве в рабочих условиях:

$$P_{рас1} := 1 \text{ МПа}$$

Давление при гидравлических испытаниях:

$$P_{и1} := 1.25 \cdot P_{рас1} \cdot \left( \frac{\sigma_{Д20}}{\sigma_{Д28}} \right) = 1.131 \text{ МПа} \quad (5.3.4.)$$

Условное давление

$$P_{усл1} := P_{рас1} \cdot \frac{\sigma_{Д20}}{\sigma_{Д28}} = 0.905 \text{ МПа} \quad (5.3.5.)$$

Давление в межтрубном пространстве:

Расчетное давление:

$$P_{рас2} := 1 \text{ МПа}$$

Давление при гидравлических испытаниях:

$$P_{и2} := 1.25 \cdot P_{рас2} \cdot \frac{\sigma_{Д20}}{\sigma_{Д.80}} = 1.163 \text{ МПа} \quad (5.3.6.)$$

Условное давление:

$$P_{усл2} := P_{рас2} \cdot \frac{\sigma_{Д20}}{\sigma_{Д.80}} = 0.93 \text{ МПа} \quad (5.3.7.)$$

### 5.3.2 Расчет толщины стенки цилиндрической обечайки:

В данном разделе произведен расчет толщины стенки обечайки, а также допускаемое внутреннее давление.

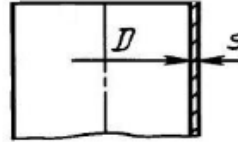


Рисунок 19. Расчетная схема обечайки аппарата.

Согласно [20] ГОСТР52857.2-2007, определяем толщины стенок обечайки, днища, крышки, проводим проверку на прочность стенок корпуса аппарата, рубашки.

Расчетная толщина стенки цилиндрической обечайки при внутреннем избыточном давлении:

$$s_{p1} := \max\left(\frac{P_{рас2} \cdot D}{2 \cdot \phi \cdot \sigma_{Д.80} - P_{рас2}}, \frac{P_{и2} \cdot D}{2 \cdot \phi \cdot \sigma_{и} - P_{и2}}\right) = 2.254 \text{ мм} \quad (5.3.8.)$$

Исполнительная толщина стеки аппарата:

$$s_{и1} := s_{p1} + c = 4.254 \text{ мм} \quad (5.3.9.)$$

Принимаем исполнительную толщину стенки с учётом ряда стандартных толщин

$$s_1 := 10\text{мм}$$

Проверка условий применимости формул безмоментной теории:

$$\text{Пров}_1 := \begin{cases} \text{"Условия применения формул выполняются"} & \text{if } \frac{s_1 - c}{D} \leq 0.1 \\ \text{"Условия применения формул НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Пров}_1 = \text{"Условия применения формул выполняются"}$$

Допускаемого внутреннего избыточного давления:

$$P_{д1} := \frac{2 \cdot \sigma_{Д.80} \cdot \phi \cdot (s_1 - c)}{D + (s_1 - c)} = 3.525 \text{ МПа} \quad (5.3.10.)$$

Проверка условия прочности стенок, цилиндрической обечайки от действия внутреннего давления:

$$\text{Пров}_2 := \begin{cases} \text{"Условие прочности для цилиндрической обечайки выполняется"} & \text{if } P_{д1} > P_{и2} \\ \text{"Условие прочности НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Пров}_2 = \text{"Условие прочности для цилиндрической обечайки выполняется"}$$

### 5.3.3 Расчет толщины стенки распределительной камеры

Расчетная толщина стенки распределительной камеры при внутреннем избыточном давлении:

$$s_{p2} := \max\left(\frac{P_{рас1} \cdot D}{2 \cdot \phi \cdot \sigma_{Д28} - P_{рас2}}, \frac{P_{и1} \cdot D}{2 \cdot \phi \cdot \sigma_{и} - P_{и1}}\right) = 2.192 \text{ мм} \quad (5.3.11.)$$

Исполнительная толщина стенки распределительной камеры:

$$s_{и2} := s_{p2} + c = 4.192 \text{ мм} \quad (5.3.12.)$$

Принимаем исполнительную толщину стенки по рекомендации ОСТ 26291-94 [21, с.59]

$$s_2 := 10 \text{ мм}$$

Проверка условий применимости формул безмоментной теории:

$$\text{Пров}_3 := \begin{cases} \text{"Условие применения формул выполняется"} & \text{if } \frac{s_2 - c}{D} \leq 0.1 \\ \text{"Условие применения формул НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Пров}_3 = \text{"Условие применения формул выполняется"}$$

Допускаемого внутреннего избыточного давления:

$$P_{д2} := \frac{2 \cdot \sigma_{Д28} \cdot \phi \cdot (s_2 - c)}{D + (s_2 - c)} = 3.624 \text{ МПа} \quad (5.3.13.)$$

Проверка условия прочности стенок, распределительной камеры от действия

внутреннего давления:

$$\text{Пров}_4 := \begin{cases} \text{"Условие прочности для цилиндрической обечайки выполняется"} & \text{if } P_{д2} > P_{и1} \\ \text{"Условие прочности НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$\text{Пров}_4 = \text{"Условие прочности для цилиндрической обечайки выполняется"}$

Толщина перегородки распределительной камеры:

$$s_{\text{перегородки}} := 10 \text{ мм}$$

### 5.3.4 Расчёт толщины стенки эллиптической крышки, нагруженной внутренним избыточным давлением межтрубного пространства

В данном разделе произведен расчет радиуса кривизны для эллиптической крышки, а также допускаемое внутреннее избыточное давление.

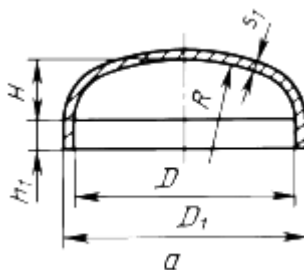


Рис. 20. Основные размеры эллиптической крышки [19]

Радиус кривизны в вершине днища:

$$R := D;$$

для эллиптических днищ:

$$H := 0.25D;$$

$$H = 200 \text{ мм}$$

$$S_{p2} := \max \left( \frac{P_{рас2} \cdot R}{2 \cdot \phi \cdot \sigma_{Д28} - 0.5 P_{рас2}}, \frac{P_{и2} \cdot R}{2 \cdot \phi \cdot \sigma_{и} - 0.5 P_{и2}} \right) = 2.189 \text{ мм} \quad (5.3.14.)$$

$$s_{\text{Э.к}} := \text{ceil}(S_{p2} + c) = 5 \text{ мм} \quad (5.3.15.)$$

Принимаем:

$$s_2 := 10 \text{ мм}$$

Проверка условия применения формул для эллиптической крышки:

$$\text{Пров}_2 := \begin{cases} \text{"условие применения формул выполняется"} & \text{if } 0.002 \leq \frac{s_{\text{Э.к}} - c}{D} \leq 0.1 \\ \text{"условие применения формул НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Пров}_3 = \text{"условие применения формул выполняется"}$$

Допускаемое внутреннее избыточное давление:

$$P_{\text{доп.с}} := \frac{2 \cdot (s_2 - c) \cdot \phi \cdot \sigma_{D28}}{R + 0.5 \cdot (s_2 - c)} = 3.642 \text{ МПа} \quad (5.3.16.)$$

Проверка условия прочности:

$$\text{Пров}_4 := \begin{cases} \text{"условие прочности выполняется"} & \text{if } P_{\text{и2}} \leq P_{\text{доп.с}} \\ \text{"условие прочности НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Пров}_4 = \text{"условие прочности выполняется"}$$

### 5.3.5 Расчет фланцевого соединения для фланцев кожуха аппарата

В данном разделе произведем механический расчет фланцевого соединения который сводится к определению следующих критериев надежности: обеспечению герметичности, обеспечение прочности втулки фланца, обеспечение прочности болтов, что и является целью данного расчета.

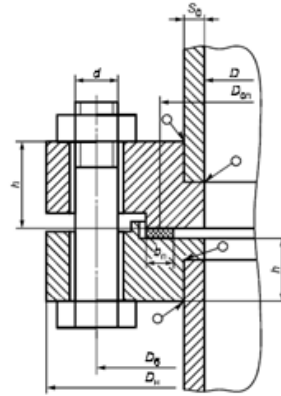


Рис. 21. Фланцевое соединение с уплотнительной поверхностью типа выступ – впадина.

Фланцы с уплотнительной поверхностью выступ - впадина рекомендуется применять для обеспечения герметичности аппарата при условных давлениях среды до 2,5 МПа.

**Исходные данные:**

Материал обечаек и фланцев - сталь 12X18Н10Т

Материал шпилек - сталь 40Х

Материал прокладки - поранит ПОН.

$D := 800\text{MM}$

$D_{\phi} := 945\text{MM}$  [22]

$t := 80^{\circ}\text{C}$

Рабочая температура

материал для шпилек: Сталь 40Х

Допускаемое напряжение материала при рабочей температуре для шпи-

лек:  $\sigma_{д.б} := 228.5\text{МПа}$

Толщина прокладки:

$h_{\text{П}} := 4\text{MM}$

Диаметр шпильки

$d := 20\text{MM}$

Ширина прокладки

$b_{\text{П}} := 25\text{MM}$

Толщина втулки фланцев

$S_0 := 10\text{MM}$

Толщина тарелки фланца	$h := 35\text{MM}$
Диаметр окружности расположения болтов	$D_{\text{б}} := 905\text{MM}$
Расчетный диаметр прокладки	$D_{\text{сп}} := 850\text{MM}$
Количество болтов	$n_{\text{в}} := 26$
Толщина втулки фланка в месте присоединения к тарелке	$S_1 := 18\text{MM}$
Длина конической втулки фланца	$l_{\text{в}} := 90\text{MM}$
Расчетное давление	$P := 1\text{МПа}$
Прибавка на коррозию	$c_o := 2\text{MM}$
$M := 0\text{Н*мм}$	

Определение расчетных параметров.

Расчетная температура неизолированных, приваренных в стык фланцев

$$t_{\text{ф}} = 0,96 t:$$

$$t_{\text{ф}} := 0.96 \cdot t;$$

$$t_{\text{ф}} = 76.8$$

Расчетная температура шпилек:

$$t_{\text{б}} := 0.85 \cdot t;$$

$$t_{\text{б}} = 68$$

Модуль упругости для стали 40Х при рабочей температуре:

$$E_{\text{б}} := 2.15 \cdot 10^5 \text{МПа}$$

$$E := 2.15 \cdot 10^5$$

Допускаемое напряжение для стали 40Х при  $t = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ :

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

$$\sigma_{20} := 196$$

Модуль упругости для стали 40Х при температуре испытания  $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ :



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

$$E_{20} := 2.15 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

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

Для шпилек.

$$\alpha_{\sigma} := 11.8 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$$

Для фланца.

$$\alpha_{\phi} := 11.8 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$$

$$\alpha_{\text{кр}} := 11.8 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$$

$$\sigma_t := 169 \text{ МПа}$$

Так как фланцы изготавливаются из листового проката

$$\eta := 1$$

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

$$\sigma_{\text{д.ф}} = 169 \text{ МПа}$$

Расчет фланцевого соединения

Эффективная ширина плоской прокладки.

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

$$b_0 = 19 \text{ мм}$$

Таблица 12. - Характеристики основных типов прокладок.

Тип и материал прокладки	Прокладочный коэффициент	Удельное давление обжатия прокладки $q_{обж}$ , МПа	Допускаемое удельное давление $q_d$ , МПа	Коэффициент обжатия, $K_{обж}$	Условный модуль сжатия прокладки, $E_p \cdot 10^{-5}$ , МПа
Плоская неметаллическая прокладка из:					
паронита по ГОСТ 481 при толщине не более 2—3 мм	2,5	20	130	0,9	0,02
фторопласта 4 по ТУ 6-05-810 при толщине 1—3 мм	2,5	10	40	1	0,02

По таблице 12, выбираем характеристики прокладки, изготовленной из стали паронита по ГОСТ 481.

$m := 2.5$  - прокладочный коэффициент

$q_{обж} := 10$

МПа - удельное давление обжатия прокладки

$q_d := 130$

МПа - допускаемое удельное давление

$K_{обж} := 0.9$

- коэффициент обжатия

$E_{II} := 0.02 \cdot 10^5$

МПа - условный модуль сжатия прокладки

Усилие, необходимое для смятия прокладки при затяжке:

$$P_{обж} := 0.5\pi \cdot D_{сII} \cdot b_0 \cdot q_{обж} \quad (5.3.17.)$$

$$P_{обж} = 2.537 \times 10^5 \text{ Н}$$

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

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

$$R_{II} = 1.268 \times 10^5 \text{ Н}$$

Площадь поперечного сечений шпилек:

$$f_{\text{ш}} := 760 \text{ мм}^2$$

По ГОСТ 1759.0-87.

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

$$A_{\text{ш}} := n \cdot f_{\text{ш}} \quad (5.3.18.)$$

$$A_{\text{ш}} = 1.976 \times 10^4 \text{ мм}^2$$

Равнодействующая нагрузка от давления:

$$Q_{\text{д}} := \frac{\pi}{4} \cdot (D_{\text{сп}})^2 \cdot P \quad (5.3.19.)$$

$$Q_{\text{д}} = 5.675 \times 10^5 \text{ Н}$$

Осевое сжимающие усилие

$$D_{\text{сп}} = 850$$

$$F_{\text{ш}} := \left[ 0.6 \cdot \left[ \frac{\pi \cdot \left( \frac{D}{1000} \right)^2}{4} \right] \cdot 10^6 \right] = -3.016 \times 10^5 \text{ Н} \quad (5.3.20.)$$

Приведенная нагрузка, вызванная воздействием внешней силы и изгибающего момента:

$$Q_{\text{FM}} := \max \left( \left| F + \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{сп}}} \right|, \left| F - \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{сп}}} \right| \right) = 3.016 \times 10^5 \text{ Н} \quad (5.3.21.)$$

Податливость прокладки:

$$y_{\text{п}} := \frac{h_{\text{п}} \cdot K_{\text{обж}}}{E_{\text{п}} \cdot \pi \cdot D_{\text{сп}} \cdot b_{\text{п}}} \quad (5.3.22.)$$

$$y_{\text{п}} = 2.696 \times 10^{-8} \text{ мм/Н}$$

Расстояние между опорными поверхностями гаек:

$$L_{\text{ш0}} := 68 \text{ мм}$$

Эффективная длина болта (шпильки) при определении податливости:

$$L_{\sigma} := (L_{\sigma 0} + 0.56 \cdot d) \quad (5.3.23.)$$

$$L_{\sigma} = 79.2 \text{ мм}$$

Податливость шпилек:

$$y_{\sigma} := \frac{L_{\sigma}}{E_{20\sigma} \cdot A_{\sigma}} \quad (5.3.24.)$$

$$y_{\sigma} = 1.839 \times 10^{-8} \text{ мм/Н}$$

Параметр длины обечайки:

$$l_0 := \sqrt{D \cdot S_0} \quad (5.3.25.)$$

$$l_0 = 89.443 \text{ мм}$$

Отношение наружного диаметра тарелки фланца к внутреннему диаметру:

$$K := \frac{D_{\phi}}{D} \quad (5.3.26.)$$

$$K = 1.181$$

Коэффициенты, зависящие от соотношения размеров тарелки фланца:

$$\beta_T := \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \log(K)) - 1}{(1.05 + 1.945 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} \quad (5.3.27.)$$

$$\beta_T = 1.845$$

$$\beta_U := \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \log(K)) - 1}{1.36(K^2 - 1) \cdot (K - 1)} \quad (5.3.28.)$$

$$\beta_U = 12.913$$

$$\beta_Y := \frac{1}{(K - 1)} \cdot \left[ 0.69 + 5.72 \cdot \frac{K^2 \cdot \log(K)}{(K^2 - 1)} \right] \quad (5.3.29.)$$

$$\beta_Y = 11.865$$

$$\beta_Z := \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} \quad (5.3.30.)$$

$$\beta_Z = 6.059$$

Коэффициенты для фланцевых соединений, зависящие от соотношения размеров втулки фланца, для фланцевых соединений с приварными встык фланцами с конической втулкой определяем по графикам:

В зависимости от отношений:

$$\beta := \frac{S_1}{S_0} = 1.8 \quad (5.3.31.)$$

$$x := \frac{1}{\sqrt{D \cdot S_0}} = 1.006 \quad (5.3.32.)$$

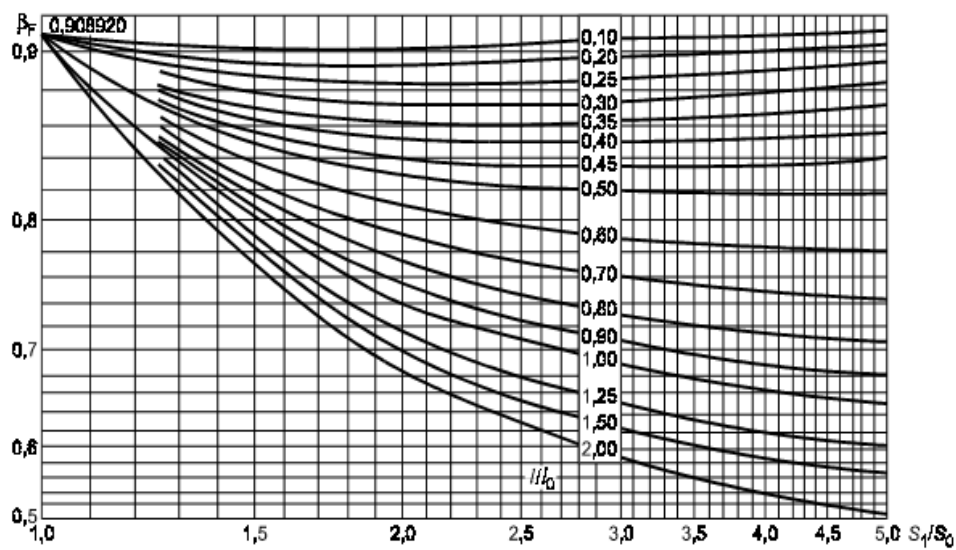


Рис. 22. Определению коэффициента  $\beta_F$

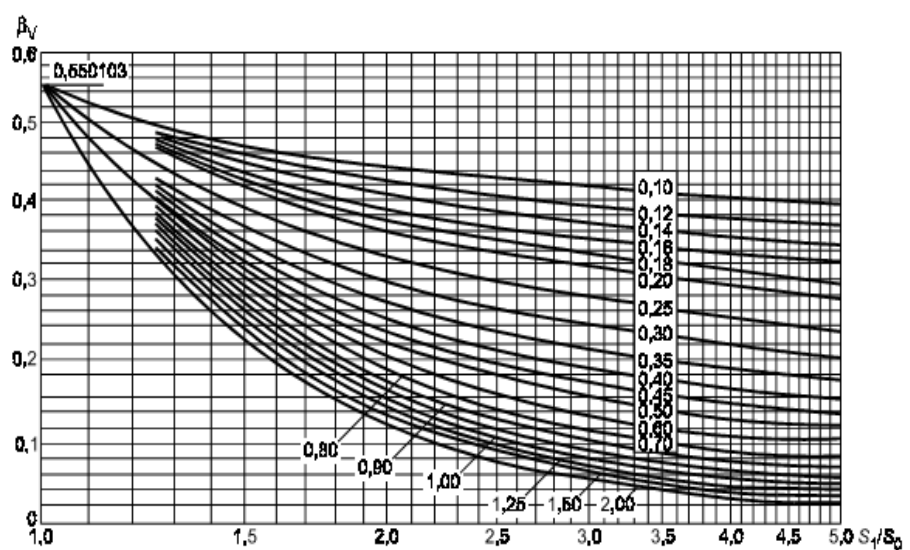


Рис. 23. Определению коэффициента  $\beta_V$

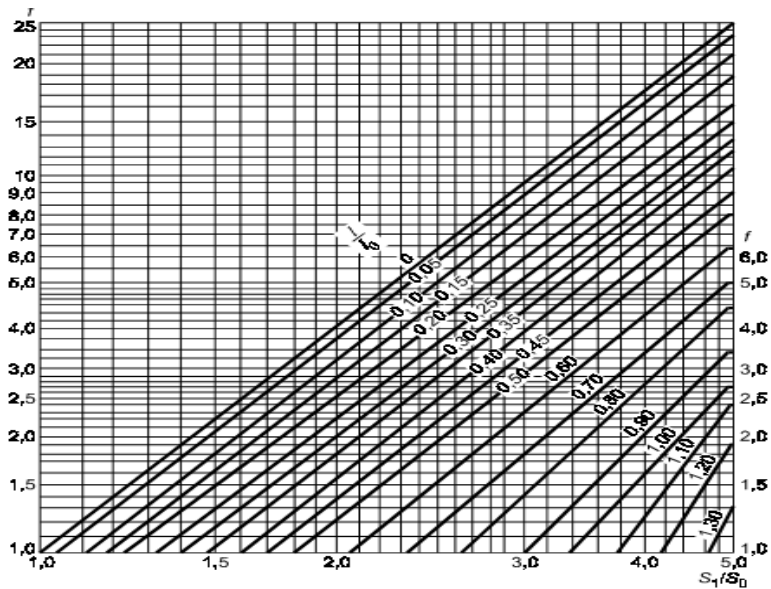


Рис. 24. Поправочный коэффициент для напряжений во втулке фланца

Из рисунков определяем коэффициенты  $\beta_F$  и  $\beta_V$  и поправочный коэффициент  $f$ :

$$\beta_F := 0.85$$

$$\beta_V := 0.22$$

$$f := 2$$

Коэффициент  $\lambda$ :

$$\lambda := \frac{\beta_F \cdot h + l_0}{\beta_T \cdot l_0} + \frac{\beta_V \cdot h^3}{\beta_U \cdot l_0 \cdot (S_0)^2} = 0.804 \quad (5.3.33.)$$

Угловая податливость фланцев

Угловая податливость фланца при затяжке:

$$y_\Phi := \frac{0.91 \cdot \beta_V}{E_{20} \cdot \lambda \cdot l_0 \cdot (S_0)^2} \quad (5.3.34.)$$

$$y_\Phi = 1.295 \times 10^{-10}$$

Угловая податливость фланца, нагруженного внешним изгибающим моментом:

$$y_{\text{фн}} := \left(\frac{\pi}{4}\right)^3 \cdot \frac{D_{\text{б}}}{E_{20} \cdot h^3 \cdot D_{\text{ф}}} \quad (5.3.35.)$$

$$y_{\text{фн}} = 5.033 \times 10^{-11}$$

Угловую податливость плоской крышки вычисляют по формуле:

$$h_{\text{кр}} := 50$$

$$\delta_{\text{кр}} := 39$$

Где,

$$K_{\text{кр}} := \frac{D_{\text{ф}}}{D_{\text{сп}}} = 1.112 \quad (5.3.36.)$$

$$X_{\text{кр}} := 0.67 \cdot \frac{\left[ K_{\text{кр}}^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \log(K_{\text{кр}})) - 1 \right]}{\left( K_{\text{кр}} - 1 \right) \cdot \left[ K_{\text{кр}}^2 - 1 + \left( 1.857 \cdot K_{\text{кр}}^2 + 1 \right) \cdot \frac{h_{\text{кр}}^3}{\delta_{\text{кр}}} \right]} = 4.099 \times 10^{-4} \quad (5.3.37.)$$

$$y_{\text{кр}} := \frac{X_{\text{кр}}}{\delta_{\text{кр}}^3 \cdot E_{20}} = 3.214 \times 10^{-14} \quad (5.3.38.)$$

Коэффициент, учитывающий изгиб тарелки фланца между шпильками:

$$C_{\text{F}} := \max \left[ 1, \sqrt{\frac{\pi \cdot D_{\text{б}}}{n \cdot \left( 2 \cdot d + \frac{6 \cdot h}{m + 0.5} \right)}} \right]; \quad (5.3.39.)$$

$$C_{\text{F}} = 1$$

Приведенный диаметр плоского фланца:

$$D' := D;$$

т.к.

$$D \geq 20 \cdot S_1 = 1$$

Плечо действия усилий в шпильках для приварных встык фланцев:

$$b := 0.5(D_{\text{б}} - D_{\text{сп}}); \quad (5.3.40.)$$

$$b = 27.5$$

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

$$e_{\text{м}} := 0.5 \cdot (D_{\text{сп}} - D - S_0); \quad (5.3.41.)$$

$$e = 20$$

Эквивалентная толщина плоских фланцев:

$$\xi := 1 + (\beta - 1) \cdot \frac{x}{x + \frac{1 + \beta}{4}} = 1.472 \quad (5.3.42.)$$

$$S_3 := \xi \cdot S_0 = 14.718$$

Коэффициент жесткости фланцевого соединения для соединения фланца с крышкой:

$$\gamma := \frac{1}{y_{\text{п}} + y_{\text{б}} \cdot \frac{E_{20\text{б}}}{E_{\text{б}}} + b^2 \cdot \left( y_{\text{ф}} \cdot \frac{E_{20}}{E} + y_{\text{кр}} \cdot \frac{E_{20}}{E} \right)} \quad (5.3.43.)$$

$$\gamma = 6.967 \times 10^6$$

Коэффициент жесткости фланцевого соединения, нагруженного внутренним давлением или внешней осевой силой для соединения фланца с плоской прокладной крышкой:

$$\alpha := 1 - \frac{y_{\text{п}} - (e \cdot y_{\text{ф}} + y_{\text{кр}} \cdot b) \cdot b}{y_{\text{п}} + y_{\text{б}} + b^2 \cdot (y_{\text{ф}} + y_{\text{кр}})} \quad (5.3.44.)$$

$$\alpha = 1.309$$

Коэффициент жесткости фланцевого соединения, нагруженного внешним изгибающим моментом:

$$\alpha_{\text{М}} := \frac{y_{\text{б}} + 2 \cdot y_{\text{фн}} \cdot b \cdot \left( b + e - \frac{e^2}{D_{\text{сп}}} \right)}{y_{\text{б}} + y_{\text{п}} \cdot \left( \frac{D_{\text{б}}}{D_{\text{сп}}} \right)^2 + 2 \cdot y_{\text{фн}} \cdot b^2} \quad (5.3.45.)$$

$$\alpha_{\text{М}} = 1.188$$

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



$$t_{кр} := t = 80$$

$$Q_t := \gamma \cdot \left[ 2\alpha_{\phi} \cdot h \cdot (t_{\phi} - 20) + \alpha_{кр} \cdot h_{кр} \cdot (t_{кр} - 20) - \alpha_{\sigma} \cdot (h + h_{кр}) \cdot (t_{\sigma} - 20) \right] \quad (5.3.46.)$$

$$Q_t = 2.381 \times 10^5 \text{ Н}$$

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

$$Q_d = 5.675 \times 10^5$$

$$P_{\sigma 1} := \max \left[ \begin{array}{l} \alpha \cdot (Q_d + F) + R_{II} + \frac{4 \cdot \alpha_M \cdot |M|}{D_{сп}} \\ \alpha \cdot (Q_d + F) + R_{II} + \frac{4 \cdot \alpha_M \cdot |M|}{D_{сп}} - Q_t \end{array} \right] \quad (5.3.46.)$$

$$P_{\sigma 1} = 4.748 \times 10^5 \text{ Н}$$

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

$$P_{\sigma 2} := \max(P_{обж}, 0.4 \cdot A_{\sigma} \cdot \sigma_{20\sigma}) \quad (5.3.47.)$$

$$P_{обж} = 2.537 \times 10^5$$

$$P_{обж} = 2.537 \times 10^5 \text{ Н}$$

$$P_{\sigma 2} = 1.818 \times 10^6 \text{ Н}$$

Расчетная нагрузка на шпильки фланцевых соединений при затяжке фланцевого соединения:

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

$$P_{\sigma M} = 1.818 \times 10^6 \text{ Н}$$

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

$$P_{бр} := P_{\sigma M} + (1 - \alpha) \cdot (Q_d + F) + Q_t + \frac{4 \cdot (1 - \alpha_M) \cdot |M|}{D_{сп}} \quad (5.3.48.)$$

$$P_{\sigma p} = 1.974 \times 10^6 \text{ Н}$$

Проверка прочности шпилек и прокладки

Расчетные напряжения в шпильках:

при затяжке:

$$\sigma_{\sigma 1} := \frac{P_{\sigma M}}{A_{\sigma}} \quad (5.3.49.)$$

$$\sigma_{\sigma 1} = 92 \text{ МПа}$$

в рабочих условиях:

$$\sigma_{\sigma 2} := \frac{P_{\sigma p}}{A_{\sigma}} \quad (5.3.50.)$$

$$\sigma_{\sigma 2} = 99.891 \text{ МПа}$$

Проверка условий прочности шпилек при затяжке и в рабочих условиях:

$$Usl\_1 := \begin{cases} \text{"Условия прочности в при затяжке НЕ выполняются"} & \text{if } \sigma_{\sigma 1} > \sigma_{20\sigma} \\ \text{"Условия прочности в рабочих условиях НЕ выполняются"} & \text{if } \sigma_{\sigma 2} > \sigma_{д.б} \\ \text{"Условия прочности выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

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

$$\sigma_{\sigma 2} = 99.891 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{\sigma 1} = 92 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{д.б} = 228.5 \text{ МПа}$$

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

Удельное давление на прокладку:

$$q := \frac{\max(P_{\sigma M}, P_{\sigma p})}{\pi \cdot D_{\sigma П} \cdot b_{\sigma П}} \quad (5.3.51.)$$

$$q = 29.567 \text{ МПа}$$

Условие прочности прокладки (проверяется для мягких прокладок):

$$Usl\_2 := \begin{cases} \text{"Условие прочности прокладки НЕ выполняется" if } q > q_d \\ \text{"Условие прочности прокладки выполняется" otherwise} \end{cases}$$

$Usl\_2 = \text{"Условие прочности прокладки выполняется"}$

### Расчет фланцев на статическую прочность

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

$$M_M := C_F \cdot P_{бМ} \cdot b \quad (5.3.52.)$$

$$M_M = 4.999 \times 10^7 \text{ Н*мм}$$

Расчетный изгибающий момент, действующий на фланец в рабочих условиях:

$$M_p := C_F \cdot \max \left[ P_{бр} \cdot b + (Q_d + Q_{FM}) \cdot e, |Q_d + Q_{FM}| \cdot e \right] \quad (5.3.53.)$$

$$M_p = 7.166 \times 10^7 \text{ Н*мм}$$

Расчетные напряжения во фланце при затяжке:

Меридиональное изгибное напряжение во втулке приварного встык фланца, обечайке

плоского фланца:

$$\sigma_{0M} := \frac{f \cdot M_M}{\lambda \cdot (S_1 - c_0)^2 \cdot D'} \div 10 \quad (5.3.54.)$$

$$\sigma_{0M} = 60.714 \text{ МПа}$$

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

радиальное напряжение:

$$\sigma_{RM} := \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + l_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot l_0 \cdot D} \cdot M_M \quad (5.3.55.)$$

$$\sigma_{RM} = 91.504 \text{ МПа}$$

окружное напряжение:

$$\sigma_{TМ} := \frac{\beta \cdot Y \cdot M_M}{h^2 \cdot D} - \beta \cdot Z \cdot \sigma_{RМ} \quad (5.3.56.)$$

$$\sigma_{TМ} = 50.841 \text{ МПа}$$

Расчетные напряжения во фланце в рабочих условиях:

Меридиональные изгибные напряжения для приварных встык фланцев с прямой втулкой и плоских фланцев:

$$\sigma_{0p} := \frac{f \cdot M_p}{\lambda \cdot (S_1 - c_0)^2 \cdot D'} \quad (5.3.57.)$$

$$\sigma_{0p} = 870.299 \text{ МПа}$$

Максимальные меридиональные мембранные напряжения в обечайке плоского фланца:

$$\sigma_{0mmр} := \max \left[ \frac{Q_D + F + \frac{4|M|}{D_{сп}}}{\pi \cdot (D + S_0) \cdot (S_0 - c_0)}, \frac{Q_D + F - \frac{4|M|}{D_{сп}}}{\pi \cdot (D + S_0) \cdot (S_0 - c_0)} \right] \quad (5.3.58.)$$

$$\sigma_{0mmр} = 13.059 \text{ МПа}$$

Максимальные меридиональные мембранные напряжения в обечайке плоского фланца:

$$\sigma_{0мор} := \frac{P \cdot D}{2 \cdot (S_0 - c_0)} = 50 \text{ МПа} \quad (5.3.59.)$$

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

радиальное напряжение:

$$\sigma_{Rp} := \frac{1.33 \cdot \beta \cdot F \cdot h + l_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot l_0 \cdot D} \cdot M_p \quad (5.3.60.)$$

$$\sigma_{Rp} = 131.166 \text{ МПа}$$

окружное напряжение:

$$\sigma_{Tp} := \frac{\beta \cdot Y \cdot M_p}{h^2 \cdot D} - \beta \cdot Z \cdot \sigma_{Rp} \quad (5.3.61.)$$

$$\sigma_{Tp} = 72.878 \text{ Мпа}$$

Проверка углов поворота фланцев

Угол поворота приварного встык фланца, плоского фланца:

$$\Theta := M_p \cdot y_{\Phi} \cdot \frac{E_{20}}{E} \quad (5.3.62.)$$

$$\Theta = 9.278 \times 10^{-3}$$

Допустимый угол поворота плоского фланца

Допускаемый угол поворота приварного встык фланца принимаем 0.007

$$\Theta_{д} := 0.07$$

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

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

**Вывод:** таким образом, подобранный фланец отвечает всем требованиям прочности. Условия прочности болтов выполняются как в условиях монтажа, так и в рабочих условиях. Было выполнено условие прочности втулки фланца. Также фланцевое соединение было посчитано на герметичность, которая определялась углом поворота фланца. Подобным образом рассчитываются все фланцевые соединения.

### 5.3.6 Расчет штуцеров

#### Технологический расчет штуцеров

В данном разделе проводится расчет толщины стенки патрубка холодного и горячего теплоносителя, укрепления отверстий патрубков и длин штуцеров.

Диаметр входного и выходного патрубка для холодного теплоносителя:

$$d_{\text{хол}} := 200\text{мм}$$

Диаметр входного и выходного патрубка для горячего теплоносителя:

$$d_{\text{гор}} := 200\text{мм}$$

Материал для патрубков назначаем конструктивно: 09Г2С (корпус аппарата изготовлен из такого же материала, используя один и тот же материал мы избегаем увеличения скорости коррозии).

Рабочая температура холодного теплоносителя:

$$t_{\text{хол}} = 28 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Рабочая температура горячего теплоносителя:

$$t_{\text{гор}} = 80 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Длину патрубка назначаем конструктивно (чтобы было легко монтировать аппарат, и не было трудностей при его транспортировке)

Длина патрубка для горячего теплоносителя:

$$l_{\text{гор}} := 200\text{мм}$$

Длина патрубка для холодного теплоносителя:

$$l_{\text{хол}} := 200\text{мм}$$

#### Расчет толщины стенки патрубка холодного теплоносителя

Расчетная толщина стенки патрубка холодного теплоносителя при внутреннем избыточном давлении, согласно [20]:

$$s_{p4} := \max\left(\frac{P_{рас1} \cdot d_{хол}}{2 \cdot \phi \cdot \sigma_{Д28} - P_{рас1}}, \frac{P_{и1} \cdot d_{хол}}{2 \cdot \phi \cdot \sigma_{и} - P_{и1}}\right) = 0.548 \text{ мм} \quad (5.3.64.)$$

Исполнительная толщина стеки патрубка:

$$s_{и4} := s_{p4} + c = 2.548 \text{ мм} \quad (5.3.65.)$$

Принимаем толщину патрубка:

$$s_{штуц.Ду200} := 10 \text{ мм}$$

Проверка условий применимости формул безмоментной теории:

$$\text{Пров1} := \begin{cases} \text{"Условия применения формул выполняются"} & \text{if } \frac{s_{штуц.Ду200} - c}{d_{хол}} \leq 0.1 \\ \text{"Условия применения формул НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

**Пров1 = "Условия применения формул выполняются"**

Расчет допускаемого внутреннего избыточного давления:

$$P_{д4} := \frac{2 \cdot \sigma_{Д28} \cdot \phi \cdot (s_{штуц.Ду200} - c)}{d_{хол} + (s_{штуц.Ду200} - c)} = 14.077 \text{ МПа} \quad (5.3.66.)$$

Проверка условия прочности стенок, цилиндрической обечайки от действия

внутреннего давления:

$$\text{Пров2} := \begin{cases} \text{"Условие прочности стенки для патрубка хол. теп. выполняется"} & \text{if } P_{д4} > P_{и2} \\ \text{"Условие прочности НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

**Пров2 = "Условие прочности стенки для патрубка хол. теп. выполняется"**

### Расчет толщины стенки патрубка горячего теплоносителя

Расчетная толщина стенки патрубка горячего теплоносителя, согласно [20]:

$$s_{p5} := \max\left(\frac{P_{рас2} \cdot d_{гор}}{2 \cdot \phi \cdot \sigma_{Д.80} - P_{рас2}}, \frac{P_{и2} \cdot d_{гор}}{2 \cdot \phi \cdot \sigma_{и} - P_{и2}}\right) = 0.563 \text{ мм} \quad (5.3.67.)$$

Исполнительная толщина стенки патрубка:

$$s_{и5} := s_{p5} + c = 2.563 \text{ мм}$$

Принимаем толщину патрубка:

$$s_{\text{штуц. Ду200}} := 10 \text{ мм}$$

Проверка условий применимости формул безмоментной теории:

$$\text{Пров3} := \begin{cases} \text{"Условия применения формул выполняются"} & \text{if } \frac{s_{\text{штуц. Ду200}} - c}{d_{\text{гор}}} \leq 0.1 \\ \text{"Условия применения формул НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Пров3} = \text{"Условия применения формул выполняются"}$$

Расчет допускаемого внутреннего избыточного давления:

$$P_{\text{д5}} := \frac{2 \cdot \sigma_{\text{Д.80}} \cdot \phi \cdot (s_{\text{штуц. Ду200}} - c)}{d_{\text{гор}} + (s_{\text{штуц. Ду200}} - c)} = 13.692 \text{ МПа} \quad (5.3.68.)$$

Проверка условия прочности стенок, цилиндрической обечайки от действия

внутреннего давления:

$$\text{Пров4} := \begin{cases} \text{"Условие прочности стенки патрубка гор. тепло. выполняется"} & \text{if } P_{\text{д5}} > P_{\text{и2}} \\ \text{"Условие прочности НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Пров4} = \text{"Условие прочности стенки патрубка гор. тепло. выполняется"}$$

### Укрепление отверстий патрубков

Расчетный диаметр укрепляемых элементов:

Для цилиндрической оболочки:

$$D_p := D = 800 \text{ мм}$$

Расчетный диаметр отверстий в стенках обечайки, ось которого совпадает с нормалью к поверхности:

$$d_{\text{рхол}} := d_{\text{хол}} + 2 \cdot c_1 = 204 \text{ мм} \quad (5.3.69.)$$

$$d_{\text{ргор}} := d_{\text{гор}} + 2 \cdot c_1 = 204 \text{ мм} \quad (5.3.70.)$$

Расчетные длины внешней части круглого штуцера, участвующие в укреплении отверстий и учитываемые при расчете, определяют по формулам:



Расчетная длина внешней части штуцеров:

$$l_{1\text{хол}} := 1.25 \cdot \sqrt{(d_{\text{хол}} + 2 \cdot c) \cdot (s_{\text{штуц.Ду200}} - c_1)} = 50.498 \text{ мм} \quad (5.3.71.)$$

$$l_{1\text{гор}} := 1.25 \cdot \sqrt{(d_{\text{гор}} + 2 \cdot c) \cdot (s_{\text{штуц.Ду200}} - c_1)} = 50.498 \text{ мм} \quad (5.3.72.)$$

Укрепление отверстий штуцеров.

Укрепление отверстий производим с помощью накладного кольца, толщина которого равняется толщине обечайки.

-для цилиндрической обечайки:

$$s_{2.\text{цилиндр.обеч}} := s_1 = 10$$

мм - толщина накладного кольца.

### Расчетные длины штуцеров

Расчетные длины внешней и внутренней части круглого штуцера, участвующие в укреплении отверстий.

$$l_1 := 200 \text{ мм}$$

мм - принимаем исполнительную длину внешней части штуцера;

$$l_2 := 50 \text{ мм}$$

мм - принимаем исполнительную длину внутренней части штуцера;

-для штуцера Ду200:

$$l_{1\text{р.штуц.Ду200}} := \min[l_1, 1.25 \cdot \sqrt{(d_{\text{рхол}} + 2c_1) \cdot (s_{\text{штуц.Ду200}} - c_1)}] = 50.99 \text{ мм}$$

$$l_{2\text{р.штуц.Ду200}} := \min[l_2, 0.5 \cdot \sqrt{(d_{\text{рхол}} + 2c_1) \cdot (s_{\text{штуц.Ду200}} - c_1)}] = 20.396 \text{ мм}$$

Принимаем:

$$l_{1.\text{штуц.Ду200}} := \text{ceil}(\max(l_{1\text{р.штуц.Ду200}}, l_1)) = 200 \text{ мм.}$$

$$l_{2.\text{штуц.Ду200}} := \text{ceil}(\max(l_{2\text{р.штуц.Ду200}}, l_2)) = 50 \text{ мм.}$$

$$X := l_{1\text{р.штуц.Ду200}} \cdot (s_{\text{штуц.Ду200}} - s_{\text{р4}} - c_1) + l_{2\text{р.штуц.Ду200}} \cdot (s_{\text{штуц.Ду200}} - c_1) = 543$$

Расчетный диаметр одиночного отверстия, не требующий дополнительного укрепления отверстий вычисляются по формуле:

-для цилиндрической обечайки:

$$d_{\text{ор.цилиндр}} := 0.4 \cdot \sqrt{D \cdot (s_1 - c_1)} = 32 \text{ мм. [23]} \quad (5.3.73.)$$

Проверка необходимости проведения расчета на укрепления отверстий для штуцеров холодного теплоносителя:

$$\text{Пров5} := \begin{cases} \text{"Расчет укрепления отверстия штуцера не требуется"} & \text{if } d_{\text{ор.цилиндр}} \geq d_{\text{рхол}} \\ \text{"Необходимо укрепления отверстия штуцера"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

**Пров5 = "Необходимо укрепления отверстия штуцера"**

Так как диаметры штуцеров для подачи холодного и горячего теплоносителя одинаковы, следовательно, штуцер для подачи горячего теплоносителя тоже необходимо укрепить.

### **Расчетная ширина зоны укрепления**

Ширина зоны укрепления в обечайках:

-для цилиндрической обечайки:

$$L_{0.\text{цилиндр}} := \sqrt{D \cdot (s_1 - c_1)} = 80 \text{ мм.} \quad (5.3.74.)$$

В случае укрепления накладным кольцом, ширина зоны укрепления принимается:

-для цилиндрической рубашки:

$$l_{\text{р.цилиндр}} := L_{0.\text{цилиндр}} = 80 \text{ мм.}$$

### **Отношения допускаемых напряжений.**

Исходя из условия, что внешняя часть штуцера и накладное кольцо состоят из одного и того же материала, что и рубашка.

Принимаем:

-для внешней части штуцера

$$\sigma_1 := \sigma_{Д.80} = 178 \text{ МПа;}$$

$$\chi_1 := \min\left(1, \frac{\sigma_1}{\sigma_{Д.80}}\right) = 1$$

-для накладного кольца

$$\sigma_2 := \sigma_{Д.80} = 178 \text{ МПа};$$

$$\chi_2 := \min\left(1, \frac{\sigma_2}{\sigma_{Д.80}}\right) = 1$$

-для внутренней части штуцера

$$\sigma_3 := \sigma_{Д.80} = 178 \text{ МПа};$$

$$\chi_3 := \min\left(1, \frac{\sigma_3}{\sigma_{Д.80}}\right) = 1$$

### 5.3.7 Расчет диаметра отверстия, не требующего укрепления

#### Условие укрепления одиночных отверстий.

В случае укрепления отверстия утолщением стенки сосуда или штуцера либо накладным кольцом, торообразной вставкой, сварным кольцом.

Принимаем укрепление штуцеров накладным кольцом.

Исполнительная толщина накладного кольца (при условии, что толщина накладного кольца равна толщине стенки обечайки) равна:

$$s_{\text{кольца}} := 10 \text{ мм} - \text{толщина накладного кольца.}$$

-для штуцера Ду200:

$$A''_1 := l_{1\text{р.штуц.Ду200}} \cdot (s_{\text{штуц.Ду200}} - s_{\text{и4}} - c_1) \cdot \chi_1 = 278.001 \text{ мм} \quad (5.3.75.)$$

$$A''_2 := L_{0.\text{цилиндр}} \cdot (s_{\text{кольца}}) \cdot \chi_2 = 800 \text{ мм} \quad (5.3.76.)$$

$$A''_3 := l_{2\text{р.штуц.Ду200}} \cdot (s_{\text{штуц.Ду200}} - s_{\text{и4}} - c_1) \cdot \chi_3 = 111.201 \text{ мм} \quad (5.3.77.)$$

$$A''_4 := L_{0.\text{цилиндр}} \cdot (s_1 - s_{\text{р1}} - c_1) = 459.718 \text{ мм} \quad (5.3.78.)$$

$$A''_5 := 0.5 \cdot (d_{\text{хол}} - d_{\text{ор.цилиндр}}) \cdot s_1 = 840 \quad (5.3.79.)$$

$$\text{Усл}_{\text{укр}} := \begin{cases} \text{"Условие выполняется"} & \text{if } A''_1 + A''_2 + A''_3 + A''_4 \geq A''_5 \\ \text{"Требуется увел. толщ. стенки сосуда или штуцера либо накл. кольца"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Усл}_{\text{укр}} = \text{"Условие выполняется"}$$

### 5.3.8 Расчет трубной решетки:

В данном разделе произведем расчет требуемой и исполнительной толщины трубной решетки. Цель расчета заключается в том, чтобы определить минимальную толщину трубной решетки при рабочих нагрузках.

Принимаем длину труб аппарата равной 9 метрам согласно [9, стр. 51]

Поскольку в исходных данных не были указаны параметры для расчета конструктивных размеров аппарата, а именно длины труб, площади поперечного сечения, число труб в аппарате. Задаемся сами этими параметрами, исходя из конструктивных соображений.

$$l_{\text{труб}} := 3000 \text{ мм}$$

Число труб:

$$n_{\text{тр}} := 465 \text{ трубы}$$

Для трубной решетки используем материал 12Х18Н10Т

Допускаемое напряжение трубной решетки:

$$\sigma_{\text{реш35}} := 160 \text{ МПа}$$

Модуль упругости:

$$E_{\text{реш80}} := 186 \cdot 10^3 \text{ МПа}$$

Для труб используется материал: 12Х18Н10Т

Допускаемое напряжение трубного пучка:

$$\sigma_{\text{тр}} := 145.6 \text{ МПа}$$

Модуль упругости:

$$E_{\text{тр5}} := 208.7 \cdot 10^3 \text{ МПа}$$

Внутренний диаметр аппарата:

$$D := 800 \text{ мм}$$

Диаметр трубы внутренний:

$$d_{\text{тр}} := 21 \text{ мм}$$

Толщина стенки трубы:

$$s_{\text{тр}} := 2 \text{ мм}$$

Диаметр отверстия в решетке:

$$d_0 := 26 \text{ мм}$$

Диаметр трубы наружный:

$$d_{\text{нр}} := 25 \text{ мм}$$

Внутренний радиус кожуха:

$$a := \frac{D}{2} = 400 \text{ мм}$$

Расстояние от оси кожуха до оси наиболее удаленной трубы:

$$a_1 := 468 \text{ мм}$$

### **Расчет трубной решетки: согласно ГОСТ Р 52857.7-2007**

Относительную характеристику беструбного края трубной решетки:

$$m_n := \frac{a}{a_1} = 0.855 \quad (5.3.80.)$$

Шаг расположения труб, располагаются по вершинам равносторонних треугольников:

$$t := 1.3 \cdot d_{\text{нр}} = 32.5 \text{ мм} \quad (5.3.81.)$$

Эффективный диаметр отверстия в трубной решетке или задней стенке для решеток с трубами, закреплёнными на всю толщину решетки, мм

$$d_E := d_0 - s_{\text{тр}} = 24 \text{ мм} \quad (5.3.82.)$$

Эффективный коэффициент ослабления

$$\phi_E := 1 - \frac{d_E}{t} = 0.262 \quad (5.3.83.)$$

Коэффициент прочности решетки:

$$\phi_p := \frac{t - 21}{t} = 0.354 \quad (5.3.84.)$$

Толщина трубной решетки:

$$s_{p11} := \frac{D_{сп}}{3.4} \cdot \sqrt{\frac{P_{рас1}}{\phi \cdot E \cdot \sigma_{реш35}}} = 38.647 \text{ мм} \quad (5.3.85.)$$

Принимаем толщину трубной решетки:

$$s_p := 60 \text{ мм}$$

Коэффициенты влияния давления на трубную решетку вычисляют по формулам:

- со стороны межтрубного пространства:

$$\eta_M := 1 - \frac{n_{тр} \cdot d_{нр}^2}{4 \cdot a_1^2} = 0.668 \quad (5.3.86.)$$

- со стороны трубного пространства:

$$\eta_T := 1 - \frac{n_{тр} \cdot (d_{нр} - 2 \cdot s_{тр})^2}{4 \cdot a_1^2} = 0.766 \quad (5.3.87.)$$

Основные характеристики жесткости элементов теплообменного аппарата.

Модуль упругости основания (системы труб) вычисляют по формуле

$$K_y := \frac{E_{тр5} \cdot (\eta_T - \eta_M)}{l_{труб}} = 6.794 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^3} \quad (5.3.88.)$$

Модуль упругости кожуха при температуре 80 градусов:

$$E_{кож} := 206.9 \cdot 10^3 \text{ МПа}$$

Приведенное отношение жесткости труб к жесткости кожуха вычисляют по формуле

$$\rho := \frac{K_y \cdot a_1 \cdot l_{\text{труб}}}{E_{\text{кож}} \cdot s_1} = 4.61 \quad (5.3.89.)$$

Для аппаратов с неподвижными трубными решетками  $K_{p1}=K_{q1}=0$

$$K_{1p} := 0$$

$$K_{1q} := 0$$

$K_q$  - коэффициент изменения жесткости системы трубы - кожух при действии осевой

силы;

$$K_q := 1 + K_{1p} = 1$$

$K_p$  - коэффициент изменения жесткости системы трубы - кожух при действии давления;

$$K_p := 1 + K_{1q} = 1$$

Коэффициент жесткости перфорированной плиты  $\psi_0$

$$\eta_T = 0.766$$

Таблица 13. Коэффициент жесткости перфорированной плиты  $\psi_0$

$\eta_T$	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85
$\psi_0$	0,12	0,15	0,2	0,25	0,3	0,37	0,44	0,51	0,59	0,68

$$\eta_{T\_таб} := \begin{pmatrix} 0.75 \\ 0.8 \end{pmatrix}$$

$$\psi_{0\_таб} := \begin{pmatrix} 0.51 \\ 0.59 \end{pmatrix}$$

$$\psi_0 := \text{Floor}[\text{linterp}[\eta_{T\_таб}, \psi_{0\_таб}, (\eta_T)], 0.005] = 0.535$$

Коэффициент системы решетка - трубы:

$$\beta_{\text{ww}} := \frac{1.82}{s_p} \cdot \sqrt[4]{\frac{K_y \cdot s_p}{\psi_0 \cdot E_{\text{реш80}}}} = 7.674 \times 10^{-3} \quad (5.3.90.)$$

Безразмерный параметр системы решетка — трубы вычисляют по формуле

$$\omega := \beta \cdot a_1 = 3.591 \quad (5.3.91.)$$

### Определение усилий в элементах теплообменного аппарата

- Максимальное давление в трубном пространстве:

$$P_{\text{мак1}} := 1.15 \text{ МПа}$$

- Максимальное давление в межтрубном пространстве,

$$P_{\text{мак2}} := 1.18 \text{ МПа}$$

$R_1$  - радиус центра тяжести тарелки фланца кожуха, мм;

$$R_1 := \frac{D_{\phi} + D}{4} = 436.25 \text{ мм} \quad (5.3.92.)$$

$K_{\phi}$  - коэффициент жесткости фланцевого соединения при изгибе, Н·мм;

$$K_{\phi} := 1 \text{ Н·мм}$$

$m_{\text{ср}}$  — коэффициент влияния давления на продольную деформацию труб:

$$m_{\text{ср}} := 0.15 \cdot \frac{n_{\text{тр}} \cdot (d_{\text{нр}} - 2 \cdot s_{\text{тр}})^2}{4 \cdot a_1^2} = 0.035 \quad (5.3.93.)$$

$\alpha_K$  - коэффициент линейного расширения материала кожуха при температуре 80С, 1/°С;

$$\alpha_K := 13 \cdot 10^{-6}$$

$\alpha_T$  - коэффициент линейного расширения материала труб при температуре 28 °С 1/°С;

$$\alpha_T := 16.6 \cdot 10^{-6}$$

Приведенное давление  $p_0$  вычисляют по формуле:

$$p_{01} := [\alpha_K \cdot (t_{\text{гор}} - 20) - \alpha_T \cdot (t_{\text{хол}} - 20)] \cdot K_y \cdot 1 = 13.191 \quad (5.3.94.)$$

$$p_{02} := [\eta_T - 1 + m_{\text{ср}} + m_n \cdot (m_n + 0.5\rho \cdot K_q)] \cdot P_{\text{мак1}} = 2.877 \quad (5.3.95.)$$

$$p_{03} := [\eta_M - 1 + m_{\text{ср}} + m_n \cdot (m_n + 0.3\rho \cdot K_p)] \cdot P_{\text{мак2}} = 1.907 \quad (5.3.95.)$$



$$p_0 := p_{01} + p_{02} - p_{03} = 14.161 \quad (5.3.96.)$$

Приведенное отношение жесткости труб к жесткости фланцевого соединения вычисляют по формуле

$$p_1 := \frac{K_y \cdot a \cdot a_1}{\beta^2 \cdot K_\phi \cdot R_1} = 4.95 \times 10^7 \text{ МПа} \quad (5.3.97.)$$

Коэффициенты, учитывающие влияние беструбного края и поддерживающие влияние труб  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$ ,  $\Phi_3$  определяют по таблице 5

Таблица 14. Коэффициенты  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$ ,  $\Phi_3$

$\omega$	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
$\Phi_1$	2	2,0	2,06	2,28	2,79	3,58	4,5	5,39
$\Phi_2$	0	0,02	0,19	0,62	1,32	2,16	2,94	3,59
$\Phi_3$	0	0,19	0,76	1,65	2,75	3,76	4,65	5,36

$\omega$	4	5	6	7	8	9	10	> 10
$\Phi_1$	6,19	7,65	9,08	10,51	11,94	13,36	14,78	$\sqrt{2\omega}$
$\Phi_2$	4,13	5,13	6,15	7,17	8,19	9,2	10,21	$\omega$
$\Phi_3$	6,03	7,38	8,81	10,24	11,66	13,08	14,5	$\sqrt{2\omega}$

Безразмерный параметр системы решетка - трубы.

$$\omega = 3.591$$

$$\omega_{-1} := \begin{pmatrix} 3.5 \\ 4 \end{pmatrix}$$

$$\Phi_{1\_таб} := \begin{pmatrix} 5.39 \\ 6.19 \end{pmatrix}$$

$$\Phi_1 := \text{Floor}(\text{interp}(\omega_{-1}, \Phi_{1\_таб}, \omega), 0.05) = 5.5$$

$$\omega_{-2} := \begin{pmatrix} 3.5 \\ 4 \end{pmatrix}$$

$$\Phi_{2\_таб} := \begin{pmatrix} 5.59 \\ 4.13 \end{pmatrix}$$

$$\Phi_2 := \text{Floor}(\text{interp}(\omega_{-2}, \Phi_{2\_таб}, \omega), 0.05) = 5.3$$

$$\omega_{-3} := \begin{pmatrix} 3.5 \\ 4 \end{pmatrix}$$

$$\Phi_{3\_таб} := \begin{pmatrix} 5.36 \\ 6.03 \end{pmatrix}$$

$$\Phi_3 := \text{Floor}(\text{linterp}(\omega_3, \Phi_{3\_таб}, \omega), 0.05) = 5.45$$

Значения  $T_1, T_2, T_3$  вычисляют по формулам:

$$t_1 := 1 + 1.4\omega \cdot (m_n - 1) = 0.269 \quad (5.3.98.)$$

$$T_1 := \Phi_1 \cdot [m_n + 0.5(1 + m_n \cdot t_1) \cdot (t_1 - 1)] = 2.229 \quad (5.3.99.)$$

$$T_2 := \Phi_2 \cdot t_1 = 1.428 \quad (5.3.100.)$$

$$T_3 := \Phi_3 \cdot m_n = 4.658 \quad (5.3.101.)$$

Изгибающий момент и перерезывающую силу, распределенные по краю трубной решетки, вычисляют по формулам:

- для изгибающего момента:

$s_{1k}$  - толщина стенки кожуха в месте соединения с трубной решеткой или с фланцем, мм

$$s_{1k} := 24\text{мм}$$

$$s_{2k} := 24\text{мм}$$

$\beta_{1x}$  - коэффициент системы кожух - решетка, 1/мм;

$$\beta_{1x} := \frac{1.3}{\sqrt{s_{1k} \cdot a}} = 0.013 \text{ 1/мм} \quad (5.3.102.)$$

$\beta_{2x}$  - коэффициент системы обечайка - фланец камеры, 1/мм;

$$\beta_{2x} := \frac{1.3}{\sqrt{s_{2k} \cdot a}} = 0.013 \text{ 1/мм} \quad (5.3.103.)$$

$h_{1\phi}$  - толщина тарелки фланца кожуха, мм;

$$h_{1\phi} := 90\text{мм}$$

$m_1$  - коэффициент влияния давления на изгиб фланца:

$$m_1 := \frac{1 + \beta_{1x} \cdot h_{1\phi}}{\beta_{1x}^2} = 1.246 \times 10^4 \quad (5.3.104.)$$

$t_2$  - коэффициент влияния давления на изгиб 2-го фланца:

$$m_2 := \frac{1 + \beta_{2x} \cdot h_1 \phi}{\beta_{2x}^2} = 1.246 \times 10^4 \quad (5.3.105.)$$

$p_1$  - приведенное давление на фланцы

$$p_1 := \frac{K_y}{\beta \cdot K_\phi} \cdot (m_1 \cdot P_{\text{мак1}} - m_2 \cdot P_{\text{мак2}}) = -3.31 \times 10^5 \text{ МПа} \quad (5.3.106.)$$

расчетное давление воздушного охлаждения в камере аппарата:

$$P_w := P_{\text{мак2}} = 1.18 \text{ МПа}$$

$$M_{\text{II}} := \left( \frac{a_1}{\beta} \right) \cdot \frac{p_1 \cdot (T_1 + \rho \cdot K_q) - p_0 \cdot T_2}{(T_1 + \rho \cdot K_q) \cdot (T_3 + \rho_1) - T_2^2} = -407.799 \text{ Н}\cdot\text{мм} \quad (5.3.107.)$$

- для перерезывающей силы:

$$Q_{\text{II}} := a_1 \cdot \frac{p_0 \cdot (T_3 + \rho_1) - p_1 \cdot T_2}{(T_1 + \rho \cdot K_q) \cdot (T_3 + \rho_1) - T_2^2} = 969.659 \text{ Н} \quad (5.3.108.)$$

Изгибающий момент и перерезывающие силы, распределенные по периметру перфорированной зоны решетки, вычисляют по формулам:

- для изгибающего момента:

$$M_a := M_{\text{II}} + (a - a_1) \cdot Q_{\text{II}} = -6.634 \times 10^4 \text{ Н}\cdot\text{мм} \quad (5.3.109.)$$

- для перерезывающей силы:

$$Q_a := m_n \cdot Q_{\text{II}} = 828.769 \text{ Н} \quad (5.3.110.)$$

Осевую силу и изгибающий момент, действующие на трубу, вычисляют по формулам:

- для осевой силы:

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

$$N_T := \frac{\pi \cdot a_1}{i} \cdot [(\eta_M \cdot P_{\text{мак2}} - \eta_T \cdot P_{\text{мак1}}) \cdot a_1 + \Phi_1 \cdot Q_a + \Phi_2 \cdot \beta \cdot M_a] = 8.013 \times 10^6 \text{ Н} \quad (5.3.111.)$$

- для изгибающего момента:

Внутренний диаметр трубы:

$$d_B := d_{HP} - 2 \cdot s_{TP} = 21 \text{ мм} \quad (5.3.112.)$$

$J_T$  - момент инерции поперечного сечения трубы, мм<sup>4</sup>;

$$J_T := \frac{\pi}{64} \cdot (d_{HP}^4 - d_B^4) = 9.628 \times 10^3 \text{ мм}^4 \quad (5.3.113.)$$

Приведенная длина трубы, используемая при расчете прогиба труб и изгибающего момента, действующего на трубу, мм;

$l_{пр}$  — вычисляют по формулам.

$$l_{пр} := l_{труб} = 3 \times 10^3 \text{ мм}$$

$$M_T := \frac{E_{TP5} \cdot J_T \cdot \beta}{K_y \cdot a_1 \cdot l_{пр}} \cdot (\Phi_2 \cdot Q_a + \Phi_3 \cdot \beta \cdot M_a) = 2.615 \times 10^3 \text{ Н} \cdot \text{мм} \quad (5.3.114.)$$

Усилия в кожухе вычисляют по формулам:

- усилие, распределенное по периметру кожуха:

$$Q_K := \frac{a}{2} \cdot P_{И2} - Q_{II} = -737.075 \text{ Н} \quad (5.3.115.)$$

- изгибающий момент, распределенный по периметру кожуха:

$$K_1 := 1$$

$$M_K := \frac{K_1}{\rho \cdot K_{\phi} \cdot \beta} \cdot (T_2 \cdot Q_{II} + T_3 \cdot \beta \cdot M_{II}) - \frac{P_{мак1}}{2 \cdot \beta \cdot l_X} = 3.546 \times 10^4 \text{ Н} \cdot \text{мм} \quad (5.3.116.)$$

- суммарная осевая сила, действующая на кожух:

$$F := \pi \cdot D \cdot Q_K = -1.852 \times 10^6 \text{ Н} \quad (5.3.117.)$$

Расчетные напряжения в элементах конструкции.

$D_{\Phi}$  - наружный диаметр фланца, м;

$$D_{\Phi} = 945 \text{ мм}$$

$s_p$  - толщина трубной решетки, м;

$$s_p = 60 \text{ мм}$$

$$s_{1p} := s_p = 60 \text{ мм}$$

$b_1$  - ширина тарелки фланца кожуха, м;

$$b_1 := \frac{D_\Phi - D}{2} = 72.5 \text{ мм} \quad (5.3.118.)$$

$R_1$  - радиус центра тяжести тарелки фланца кожуха, м;

$$R_1 = 436.25 \text{ мм}$$

### Расчетные напряжения в трубных решетках.

Напряжения в трубной решетке в месте соединения с кожухом вычисляются по формулам:

- изгибные:

$$\sigma_{p1} := \frac{6 \cdot |M_{II}|}{(s_{1p} - c)^2} = 0.727 \text{ МПа} \quad (5.3.119.)$$

- касательные:

$$\tau_{1p} := \frac{|Q_{II}|}{s_{1p} - c} = 16.718 \text{ МПа} \quad (5.3.120.)$$

$m_A$ ,  $n_B$  - коэффициент для определения максимального изгибающего момента в перфорированной части трубной решетки;

$$\omega = 3.591$$

$$m_A := \frac{\beta \cdot M_a}{Q_a} = -0.614 \quad (5.3.121.)$$

$$n_B := \frac{Q_a}{\beta \cdot M_a} = -1.628 \quad (5.3.122.)$$

$A$  — коэффициент, определяемый по приложению Г ГОСТ Р 52857.7-2007 в зависимости от  $\omega$  и  $m_A$ :

$B$  — коэффициент, определяемый по приложению Г ГОСТ Р 52857.7-2007 в зависимости от  $\omega$  и  $n_B$ :

$$A := 0.765$$

$$B := 1.071$$

$M_{\max}$  — максимальный расчетный изгибающий момент в перфорированной части трубной решетки.

$$M_{\max} := \begin{cases} A \cdot \frac{|Q_a|}{\beta} & \text{if } \begin{cases} m_A \leq 1 \\ -1 \leq m_A \end{cases} \\ B \cdot |M_a| & \text{if } \begin{cases} m_A < -1 \\ m_A > 1 \end{cases} \end{cases} = 8.262 \times 10^4 \text{ Н}\cdot\text{мм}$$

Напряжения в перфорированной части трубной решетки вычисляются по формулам:

- изгибные:

$$\sigma_{p2} := \frac{6 \cdot M_{\max}}{\phi \cdot (s_{1p} - c)^2} = 147.356 \text{ МПа} \quad (5.3.123.)$$

- касательные:

$$\tau_{2p} := \frac{|Q_a|}{\phi \cdot (s_{1p} - c)} = 14.289 \text{ МПа} \quad (5.3.124.)$$

Напряжения в кожухе в месте присоединения к решетке

в меридиональном направлении:

мембранные:

$$\sigma_{Mx} := \frac{|Q_k|}{(s_{1k} - c)} = 33.503 \text{ МПа} \quad (5.3.125.)$$

изгибные:

$$\sigma_{ux} := \frac{6 \cdot |M_k|}{(s_{1k} - c)^2} = 439.587 \text{ МПа} \quad (5.3.126.)$$

в окружном направлении:

мембранные:

$$\sigma_{M\phi} := \frac{P_{\max 1} \cdot a}{(s_{1k} - c)} = 20.909 \text{ МПа} \quad (5.3.127.)$$

изгибные:

$$\sigma_{\text{иф}} := 0.3 \cdot \sigma_{\text{их}} = 131.876 \text{ МПа} \quad (5.3.128.)$$

в окружном направлении:

$$\sigma_{2T} := \frac{(d_{\text{нр}} - s_{\text{тр}}) \max(|P_{\max 2}|, |P_{\max 1}|, |P_{\max 2} - P_{\max 1}|)}{2 \cdot s_{\text{тр}}} = 6.785 \text{ МПа} \quad (5.3.129.)$$

$\sigma_{\text{др}}$  - допускаемое напряжение для материала решетки, МПа;

$$\sigma_{\text{др}} := 147 \text{ МПа}$$

Проверка прочности трубных решёток

Проверка статической прочности

$$\text{Пров}_{\text{труб\_реш}} := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } \max(\tau_{1p}, \tau_{2p}) \leq 0.8 \cdot \sigma_{\text{др}} \\ \text{"Условие прочности НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Пров}_{\text{труб\_реш}} = \text{"Условие прочности выполняется"}$$

Проверка прочности и устойчивости кожуха.

Проверку прочности кожуха в месте присоединения к решетке.

Условие статической прочности кожуха в месте присоединения к решетке:

допускаемое напряжение для материала кожуха теплообменного аппарата или крышки аппарата воздушного охлаждения, МПа;

$$\sigma_{\text{д28}} = 183 \text{ МПа}$$

$$\text{Пров}_{\text{кож}} := \begin{cases} \text{"Условие выполняется"} & \text{if } \sigma_{\text{Мх}} \leq 1.3 \cdot \sigma_{\text{д28}} \\ \text{"Условие НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Пров}_{\text{кож}} = \text{"Условие выполняется"}$$

## Расчёт трубы на прочность, устойчивость и жесткость. Расчет крепления труб к решетке.

Условие статической прочности труб

$$\text{Пров}_{\text{ст\_прочности}} := \begin{cases} \text{"Условие выполняется"} & \text{if } \sigma_{2T} \leq \sigma_{\text{тр}} \\ \text{"Условие НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Пров}_{\text{ст\_прочности}} = \text{"Условие выполняется"}$$

Проверку труб на устойчивость проводят в случае, если:

$K_T$  - коэффициент условий работы при расчете труб на устойчивость;

-Для рабочих условий:

$$K_{T1} := 1.3$$

-Для условий гидроиспытания:

$$K_{T2} := 1.126$$

Задаем конструктивно:

$l_{1R}$  — максимальный пролет трубы между решеткой и перегородкой,

мм;

$$l_{1R} := 540 \text{ мм}$$

$l_{2R}$  — максимальный пролет трубы между перегородками, мм;

$$l_{2R} := 600 \text{ мм}$$

$l_R$  - расчетная длина труб при продольном изгибе, мм;

$$l_R := \max(l_{2R}, 0.7l_{1R}) = 600 \text{ мм}$$

$\lambda$  - параметр, используемый при расчете на продольный изгиб;

-Для рабочих условий:

$$\lambda_1 := K_{T1} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{\text{тр}}}{E_{\text{тр5}}}} \cdot \frac{l_R}{(d_{\text{тр}} - s_{\text{тр}})} = 1.084 \quad (5.3.130.)$$

-Для условий гидроиспытания:

$$\lambda_2 := K_{T2} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{\text{тр}}}{E_{\text{тр5}}}} \cdot \frac{l_R}{(d_{\text{тр}} - s_{\text{тр}})} = 0.939 \quad (5.3.131.)$$



$\phi_T$  -коэффициент уменьшения допускаемого напряжения при продольном изгибе, определяемый по графику на рисунке 6, в зависимости от  $\lambda$ .

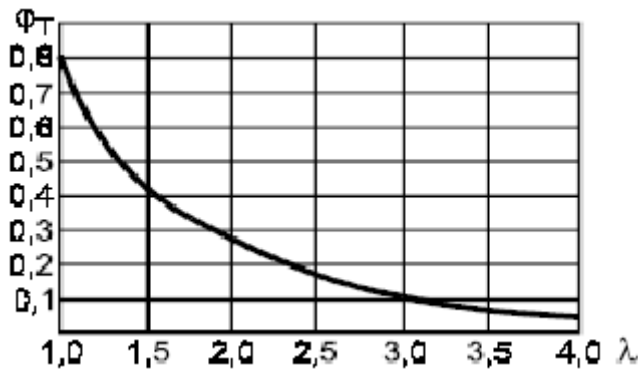


Рис. 25. Коэффициент уменьшения допускаемого напряжения при продольном изгибе

$$\phi_T := 0.1$$

При отсутствии более точных данных допускается вычислять допускаемую нагрузку на вальцовочное соединение трубы с решеткой по формулам:

Для труб завальцованных в гладком отверстии с отбортовкой:

Площадь трубной решетки, заключенной между четырьмя трубами:

$$f_{\text{рр}} := 0.866 \cdot t^2 - \frac{\pi \cdot d_{\text{тр}}^2}{4} = 568.352 \text{ мм}^2 \quad (5.3.132.)$$

Трубная нагрузка:

$$q_{\text{рр}} := P_{\text{рас1}} \cdot f = 568.352 \quad (5.3.133.)$$

$$Q := 6.357 \times 10^4 \text{ Па}$$

$$q_{\text{тр}} := \frac{Q}{n_{\text{тр}}} = 136.71 \text{ Н} \quad (5.3.134.)$$

Температурное напряжение в трубе:

$$\sigma_{\text{тв}} := 8.03 \text{ МПа}$$

Площадь поперечного сечения стенки трубы:

$$d_{\text{н}} := 0.025 \text{ м}$$

$$d_{\text{в}} := 0.021 \text{ м}$$

$$f_T := \frac{\pi}{4} \cdot (d_H^2 - d_B^2) = 1.445 \times 10^{-4} \text{ м}^2 \quad (5.3.135.)$$

$$q_T := \sigma_T \cdot f_T = 1.16 \times 10^{-3} \quad (5.3.136.)$$

Суммарное усилие:

$$q_C := q - q_T = 136.709 \text{ Н} \quad (5.3.137.)$$

Удельная нагрузка от давления на единицу длины окружности:

$$\sigma_0 := \frac{q}{\pi \cdot d_H} = 1.741 \times 10^3 \text{ Н/м} \quad (5.3.138.)$$

$$\sigma_{0д} := 0.04 \cdot 10^6 \text{ Н/м}$$

$$\text{Пров}_{\text{прочности}} := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } \sigma_0 \leq \sigma_{0д} \\ \text{"Условие НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Пров}_{\text{прочности}} = \text{"Условие прочности выполняется"}$$

**Вывод:** в результате расчета пришли к выводу о том, что минимальная толщина трубной решетки составит 60 мм.

### 5.3.9 Расчет массы аппарата

Расчет веса корпуса аппарата:

$D_H$  := 0.81 м - наружный диаметр корпуса;

$D_{BK}$  := 0.8 м - внутренний диаметр аппарата;

$D_{кр}$  := 0.8 м - внутренний диаметр крышки;

$D_{BT}$  := 0.021 м - внутренний диаметр труб;

$D_{HT}$  := 0.025 м - наружный диаметр труб;

$s_{Э.к.м.п}$  := 0.01 мм - толщина стенки эллиптической крышки межтрубного

пространства;

$$\rho_{\text{вод}} := 996 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} - \text{ПЛОТНОСТЬ ВОДЫ};$$

$s_T := 0.002$  мм - толщина стенок труб;

$s_{корп} := 0.01$  мм - толщина стенки корпуса;

$c := 0.003$  мм - прибавка на коррозию;

$L_{корп} := 3$  м - длина корпуса;

$L_{труб} := 3$  м - длина труб;

$n := 465$  - количество труб;

$g := 9,81$  м/с<sup>2</sup> - ускорение свободного падения;

$\rho_{мет} := 7900 \frac{кг}{м^3}$  - плотность стали;

$s_{тр} := 0.6$  мм - толщина трубной решетки;

$D_{т.р1} := 0.8$  м - диаметр трубной решетки 1;

Вес корпуса аппарата:

$$G_{корп} := \pi \cdot \left( \frac{D_H^2 - D_{ВК}^2}{4} \right) \cdot L_{корп} \cdot \rho_{мет} \cdot g = 2.94 \times 10^3 \text{ Н}$$

Вес распределительной камеры аппарата:

$$G_{кам} := \pi \cdot \left( \frac{D_H^2 - D_{ВК}^2}{4} \right) \cdot \rho_{мет} \cdot g = 979.968 \text{ Н}$$

Вес трубного пучка:

$$G_{труб.п} := \pi \cdot \left( \frac{D_{HT}^2 - D_{ВТ}^2}{4} \right) \cdot L_{труб} \cdot \rho_{мет} \cdot g \cdot n = 1.562 \times 10^4 \text{ Н}$$

Вес трубной решетки 1:

$$G_{труб.р1} := \pi \cdot \left( \frac{D_{т.р1}^2}{4} \right) \cdot s_{тр} \cdot \rho_{мет} \cdot g = 2.337 \times 10^4 \text{ Н}$$

Вес эллиптической крышки межтрубного пространства:

Высота эллиптической крышки:

$$H_{э.к.м.п} := 0.25 D_{ВК} = 0.2 \text{ м}$$

Вес эллиптической крышки по ГОСТ 6533-78:

$$G_{\text{Э.к.м.п}} := 73.8 \cdot g = 723.978 \text{ Н}$$

Вес фланцевого соединения с  $D_{\text{вн}}=800$ :

$$G_{\text{фланц}} := 5 \cdot 297.9 \cdot g = 1.461 \times 10^4 \text{ Н}$$

Вес пустого аппарата:

$$A_{\text{www}} := G_{\text{корп}} + G_{\text{кам}} + G_{\text{труб.п}} + G_{\text{труб.р1}} = 4.292 \times 10^4 \quad (5.3.139.)$$

$$A_1 := 2G_{\text{Э.к.м.п}} + 2G_{\text{фланц}} = 3.067 \times 10^4 \quad (5.3.140.)$$

$$G_{\text{ап1}} := (A + A_1) \cdot 2 = 1.472 \times 10^5 \text{ Н} \quad (5.3.141.)$$

Вес жидкости в аппарате:

Вес жидкости внутри аппарата при гидроиспытаниях:

$$G_{\text{жид1}} := \left( \pi \cdot \frac{D_{\text{вк}}^2}{4} \cdot 11.25 \right) \cdot \rho_{\text{вод}} \cdot g = 5.525 \times 10^4 \text{ Н} \quad (5.3.142.)$$

Вес аппарата при гидроиспытаниях:

$$G_{\text{ап2}} := G_{\text{ап1}} + G_{\text{жид1}} = 2.024 \times 10^5 \text{ Н} \quad (5.3.143.)$$

Нагрузка от собственной массы:

$$F_{\text{www}} := G_{\text{ап2}} = 2.024 \times 10^5 \text{ Н}$$

Переводим нагрузку в МН:

$$F1 := \frac{F}{1000000} = 0.202 \text{ МН.}$$

### 5.3.10 Расчет седловых опор.

В этом разделе определяются изгибающие моменты и поперечные усилия, а также максимальный момент между опорами. Исходя из этих данных подбирается седловая опора.

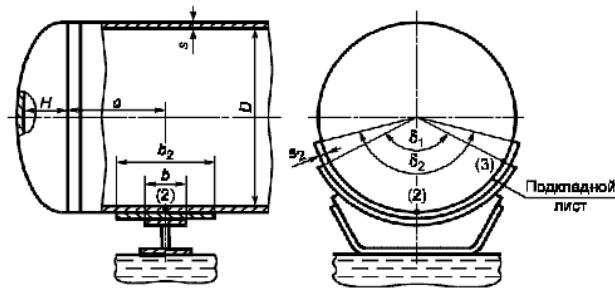


Рис.25 Расчетная схема обечайки, не подкрепленной кольцами жесткости.

### Определение расчетных усилий.

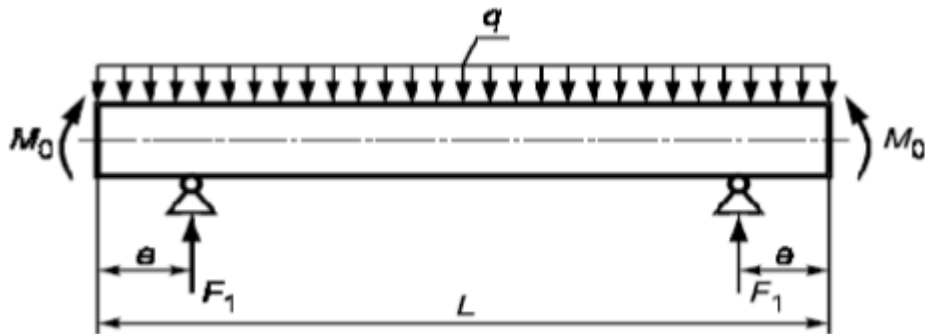


Рис. 26. Расчетная схема определения усилий

Длина цилиндрической обечайки:

$$L_{об} := 3000 \quad \text{мм}$$

$$q := \frac{G_{ап2}}{L_{об} + H_{Э.к.м.п} \cdot \frac{4}{3}} = 67. \quad (5.3.144.)$$

Н

$$M_0 := q \cdot \frac{D_{ВК}^2}{16} = 2.699 \quad (5.3.145.)$$

Нагрузка на одну опору:

$$F_1 := \frac{G_{ап2}}{2} = 1.012 \times 10^5 \quad \text{Н}$$

Переводим в кН:

$$\frac{F_1}{1000} = 101.215 \quad \text{кН}$$

Определение изгибающих моментов и поперечных усилий.

Расстояние от края цилиндрической обечайки до центра опоры:

$$e := 0.8\text{ м}$$

$$a := 1$$

Момент над опорой:

$$M_1 := \left| \left( \frac{q \cdot e^2}{2} - M_0 \right) \right| \text{ Н}\cdot\text{м} \quad (5.3.146.)$$

$$M_2 := M_1 = 28.336 \text{ Н}$$

Максимальный момент между опорами:

$$M_{12} := M_0 + F_1 \cdot \left( \frac{L_{об}}{2} - a \right) - \frac{q}{2} \cdot \left[ \frac{L_{об}}{2} + \frac{2}{3} \cdot (H_{Э.к.м.п}) \right]^2 = 5.05 \times 10^7 \text{ Н}\cdot\text{м} \quad (5.3.147.)$$

$$Q_1 := \frac{L_{об} - 2 \cdot a}{L_{об} + \frac{4}{3} \cdot (H_{Э.к.м.п})} \cdot F_1 = 1.011 \times 10^5 \text{ Н}\cdot\text{м} \quad (5.3.148.)$$

Проверка несущей способности обечайки в сечении между опорами.

$$\text{Пров}_{\text{нес.сп.}} := \begin{cases} \text{"Выполняется"} & \text{if } M_{12} > M_1 \\ \text{"Не выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Пров}_{\text{нес.сп.}} = \text{"Выполняется"}$$

**Вывод:** Таким образом, подбираем седловую опору типа 2 для сосудов и аппаратов диаметром 800 мм, второго исполнения (нагрузка от 80 до 160 кН) согласно ОСТ 26-2091-93, с геометрическими параметрами, приведенными в таблице 14.

Таблица 15 - Основные параметры седлообразной опоры

Диаметр аппарата, $D_{вн}$	Допускаемая нагрузка на одну опору, кН	$S_1$	$S_2$	R	L	$L_1$	l	B	$B_1$	$B_2$	h	A	$A_1$	Масса, кг	Масса подкладного листа, кг
														Исполнение II	
800	160	14	14	422	740	760	670	250	400	140	345	500	600	65,5	23,6

Так же принимаем размеры опорного листа согласно таблице 15.

Таблица 16 - Основные размеры опорного листа

Диаметр аппарата, $D_{вн}$	S	R	H	Масса, кг
800	10	422	360	28,8

## **6. Социальная ответственность**

### **Введение**

Производственная безопасность представляет собой систему организационных мероприятий и технических средств, уменьшающих вероятность воздействия на персонал опасных производственных факторов, вредных воздействий технологических процессов, энергии, средств, предметов, условий и режимов труда до приемлемого уровня. Необходимо выявить вредные и опасные производственные факторы, которые могут возникать при разработке и эксплуатации данных аппаратов.

### **6.1 Производственная безопасность**

#### **6.1.1 Анализ вредных выявленных факторов при эксплуатации оборудования**

##### **Вредные вещества**

Наиболее опасными соединениями является двуокись азота, так как она вследствие своей медленной растворимости во влаге, покрывающей слизистые оболочки дыхательных путей, имеет значительный скрытый период между моментами поступления ядовитых газов в организм и началом развития болезненных явлений, преимущественно в глубоких отделах органов дыхания.

После вдыхания окислов азота, состоявших полностью или в большей части из двуокиси азота, пострадавший во многих случаях не чувствует никакого раздражения дыхательных путей и только через 20-30 минут у него возникает кашель, отдышка, загрудинные боли; эти первичные явления часто проходят при выходе пострадавшего из загазованного помещения на свежий воздух, а затем через час или несколько часов снова нарастает отдышка, появляются кашель, боли в груди, всё более усиливающееся затруднение дыхания, развиваются синюшность и тяжёлые, опасные для жизни явления отёка лёгких.



Тетроксид, ангидрид азотной кислоты, пары и аэрозоль азотной кислоты действуют тоже раздражающе-удушающим образом на органы дыхания человека. Низшие окислы азота: закись азота и ангидрид азотной кислоты обладают преимущественно сосудорасширяющим и метгемоглобинообразующим свойствами, а отчасти и наркотическим свойством.

Систематическое воздействие превышающих предельно допустимые концентрации, но ещё не способных острое отравление концентраций двуокиси азота и других высших окислов азота ведёт к развитию тяжёлых хронических заболеваний дыхательных путей – хронических бронхитов, бронхиолитов, токсических пневмосклерозов, часто осложнённых астмоидными приступами, бронхоэктазиями и явлениями вторичной слабости сердца.

### **Шум и вибрация**

Источники инфразвука, ультразвука на предприятии отсутствуют.

В технологическом процессе не используются механизмы, устройства, оборудование, являющиеся источниками повышенной вибрации.

Источниками постоянного производственного шума на предприятии являются:

- насосное оборудование;
- вентиляционное оборудование;
- аппараты воздушного охлаждения

Согласно таблице 1 СН 2.2.4/2.1.8.562-96, [24] предельно допустимый уровень звука для категории напряженности трудового процесса легкой степени с легкой физической нагрузкой – 80 дБА.

Для защиты обслуживающего персонала и окружающей среды от воздействия шума предусмотрены следующие мероприятия:

- вентиляционное оборудование вентсистем установлено на виброизоляторах в помещениях, не имеющих постоянных рабочих мест. Стены помещений являются звукоизолирующими конструкциями;

- Забор и выхлопные трубы вентиляции оснащены шумоглушителями;

- Насосное оборудование имеет конструктивную защиту – блокировки, отключающие насос при кавитации на приеме, что позволяет эксплуатировать оборудование в паспортном режиме.

Для защиты дежурного персонала в зоне обслуживания оборудования с высоким уровнем шума при периодических осмотрах, ремонтных работах предусматривается не только использование средств индивидуальной защиты (противошумов), но и защита по времени пребывания – введение регламентированных перерывов не менее 10 минут в течение 1 часа работы.

Постоянные рабочие места рабочего и дежурного персонала, обслуживающего производство (операторы, дежурные слесари), располагаются в помещениях, удаленных от источников производственного шума. Согласно таблице П.7.3 Р.2.2.200605, [25] пребывание дежурного персонала при периодическом осмотре, обслуживании оборудования в зоне воздействия повышенных уровней шума ограничивается временем 10 минут.

### **6.1.2 Анализ опасных выявленных факторов при эксплуатации оборудования**

#### **Электрический ток.**

При сборке, настройке, подключении и эксплуатации разрабатываемого устройства возможно поражение электрическим током, что является опасным фактором. Для минимизации опасности удара электрическим током разработан ряд требований безопасности к электротехническим приборам, установленный [26]. Данный ГОСТ устанавливает требования для изоляции, защитного заземления, органов управления, блокировки, оболочки, зажимов и выводных устройств, экранов и про-

чих средств защиты от опасного и вредного влияния электромагнитных полей, теплового, оптического и рентгеновского излучения, предупредительных знаков, надписей, сигнализаций. Также, для минимизации риска, следует соблюдать технику безопасности при работе с электроприборами.

Источниками электрической опасности являются:

- оголенные части проводов или отсутствие изоляции;
- отсутствие заземления;
- замыкания;
- статическое напряжение.

От токоведущих частей электроустановок человека защищают изолирующие защитные средства. Они подразделяются на основные и дополнительные. Основными изолирующими средствами защиты разрешается прикасаться к токоведущим частям электроустановок, имеющих рабочее напряжение до 1000 Вольт. В первую очередь, к таким защитным средствам относится слесарно-монтажный инструмент, снабженный изолирующими рукоятками – плоскогубцы, ножи, отвертки и т.п. Электробезопасность работающего персонала и посторонних лиц должна обеспечиваться выполнением следующих мероприятий :

1. Соблюдение соответствующих расстояний до токоведущих частей;
2. Изоляция токопроводимых частей;
3. Применение блокировки аппаратов и ограждающих устройств для предотвращения ошибочных операций и доступа к токоведущим частям;
4. Использование предупреждающей сигнализации, надписей и плакатов;
5. Применение устройств для снижения напряженности электрических и магнитных полей до допустимых значений;
6. Использование средств защиты и приспособлений.

Механическое повреждение может быть вызвано падением человека с высоты вследствие испуга при незначительном воздействии силы тока, практически безопасного, если не были выполнены меры безопасности при работе на высоте.

Наибольшую, опасность при всех видах поражения представляет электроудар, когда при прохождении тока через тело человека поражается весь организм в целом, возникают судороги, расстройство дыхания, аритмия работы сердца. Степень опасности силы тока зависит от силы тока, проходящего через организм. Если сила тока, проходящего через организм 1,5 мА (при постоянном 106 напряжении), то в месте контакта с токоведущими частями ощущается зуд и нагрев. Такую силу тока называют порогом ощущения.

Увеличение силы тока до 10 мА при переменном и до 50 мА при постоянном напряжении вызывает у человека сильные боли в пальцах и кистях рук. При такой силе тока человек еще может самостоятельно оторваться от токоведущих частей. Такую силу тока называют условно безопасной.

Дальнейшее увеличение от 10 мА до 100 мА при переменном и от 50 мА до 100 мА при постоянном напряжении вызывает очень сильные боли, руки парализуются, наступает паралич дыхания, самостоятельно оторваться от токоведущих частей невозможно. Сила тока при снижении сопротивления человеческого тела постоянно возрастает и при достижении 100 мА, как при переменном, так и при постоянном напряжении наступает клиническая смерть (отсутствие внешних признаков жизни).

Опасное и вредное воздействие на людей электрического тока, электрической дуги и электромагнитных полей проявляются в виде электротравм и профессиональных заболеваний. Для предотвращения этих и других несчастных случаев необходимо разработать электробезопасность конструкций.

Основные способы и средства электрозащиты:

- изоляция токоведущих 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 электробезопасности.

### **Подвижные части производственного оборудования.**

Движущиеся части производственного оборудования, являющиеся возможным источником травмоопасности, должны быть ограждены или расположены так, чтобы исключалась возможность прикосновения к ним работающего или использованы другие средства (например, двухручное управление), предотвращающие травмирование. [27]

Если функциональное назначение движущихся частей, представляющих опасность, не допускает использование ограждений или других средств, исключающих возможность прикосновения работающих к движущимся частям, то конструкция производственного оборудования должна предусматривать сигнализацию, предупреждающую о пуске оборудования, а также использование сигнальных цветов и знаков безопасности. [27]

В непосредственной близости от движущихся частей, находящихся вне поля видимости оператора, должны быть установлены органы управления аварийным остановом (торможением), если в опасной зоне, создаваемой движущимися частями, могут находиться работающие. [27]

Конструкция зажимных, захватывающих, подъемных и загрузочных устройств или их приводов должна исключать возможность возникновения опасности при полном или частичном самопроизвольном прекращении подачи

энергии, а также исключать самопроизвольное изменение состояния этих устройств при восстановлении подачи энергии.

Элементы конструкции производственного оборудования не должны иметь острых углов, кромок, заусенцев и поверхностей с неровностями, представляющих опасность травмирования работающих, если их наличие не 108 определяется функциональным назначением этих элементов. В последнем случае должны быть предусмотрены меры защиты работающих. [27]

Части производственного оборудования (в том числе трубопроводы гидро-, паро-, пневмосистем, предохранительные клапаны, кабели и др.), механическое повреждение которых может вызвать возникновение опасности, должны быть защищены ограждениями или расположены так, чтобы предотвратить их случайное повреждение работающими или средствами технического обслуживания. [27]

Конструкция производственного оборудования должна исключать самопроизвольное ослабление или разъединение креплений сборочных единиц и деталей, а также исключать перемещение подвижных частей за пределы, предусмотренные конструкцией, если это может повлечь за собой создание опасной ситуации.

Производственное оборудование должно быть пожаровзрывобезопасным в предусмотренных условиях эксплуатации. [27]

### **Повышенная температура поверхности оборудования.**

Аппараты, температура наружных поверхностей которых в процессе эксплуатации может превышать 45 °С, должны быть теплоизолированы. Теплоизоляция разрабатывается и изготавливается по документации эксплуатирующей организации (Заказчика) и в комплект поставки не входят. [28]

При необходимости нахождения людей вблизи горячих частей оборудования должны быть приняты меры по их защите ожогов и действия высокой температуры (ограждение действующего оборудования, вентиляция, спецодежда и т.п.). [29]

Работы, при которых возможно бурное протекание химического процесса, разбрызгивание горячих или вредных веществ, а также работы под вакуумом должны выполняться в вытяжных шкафах на противнях или поддонах. При работе следует пользоваться специальными защитными очками, спецодеждой, фартуками и перчатками из материалов, стойких к воздействию вышеназванных веществ. [29]

Все горячие части оборудования, трубопроводы, баки и другие элементы, прикосновение к которым может вызвать ожоги, должны иметь тепловую изоляцию. Температура на поверхности изоляции при температуре окружающего воздуха 25 град. С должна быть не выше 45 град. С. Окраска, условные обозначения, размеры букв и расположение надписей должны соответствовать Правилам устройства и безопасной эксплуатации трубопроводов пара и горячей воды и ГОСТ 14202-69. Трубопроводы промышленных предприятий. Оповестительная окраска, предупреждающие знаки и маркировочные щитки. [29]

Все горячие участки поверхностей оборудования и трубопроводов, находящиеся в зоне возможного попадания на них легко воспламеняющихся, горючих, взрывоопасных или вредных веществ, должны быть покрыты металлической обшивкой для предохранения тепловой изоляции от пропитывания этими веществами.

Трубопроводы агрессивных, легко воспламеняющихся, горючих, взрывоопасных или вредных веществ должны быть герметичными. В местах возможных утечек (краны, вентили, фланцевые соединения) должны быть установлены защитные кожухи, а при необходимости - специальные устройства со сливом из них продуктов утечек в безопасное место. [29]

### **Мероприятия по предотвращению воздействия опасных и вредных факторов**

С целью обеспечения безопасных условий работы обслуживающего персонала и предохранения оборудования от разрушения, а также для уменьшения последствий аварий, предусмотрен ряд мероприятий по технике безопасности:

1. Предусмотрен максимальный вынос оборудования на открытую площадку, что улучшает безопасность его эксплуатации. В зданиях расположено

компрессорное и насосное оборудование, узлы приготовления и регенерации катализатора и приготовления промотора.

2. Управление технологическими процессами отделения производства азотной кислоты осуществляется автоматически или дистанционно из ЦУП, что уменьшает необходимость пребывания обслуживающего персонала у аппаратов.

3. Для предотвращения загрязнения горючими, взрывоопасными и токсичными газами территории промышленной площадки предусмотрено сжигание некондиционных газов, образующихся при пуске и остановке. В коллекторы сброса газов на факелы также подключены сбросы токсичных и взрывоопасных газов от предохранительных клапанов.

4. Для предотвращения отравления токсичными газами и парами при остановках на ремонт должно производиться дренирование аппаратов и коммуникаций с последующей промывкой водой (конденсатом). Для дренирования рабочих смесей и промывных вод установлен ряд дренажных сборников, снабженных насосами.

5. Для обезвреживания кислых стоков производства и разбавления стоков, содержащих значительное количество примесей, не позволяющих подавать их непосредственно на очистительные сооружения предприятия, в составе производства предусмотрены нейтрализатор и усреднитель стоков.

6. При остановке на ремонт, а также после ремонта перед включением в работу должна производиться продувка оборудования азотом, воздухом, паром. Для этих целей предусмотрены расходы воздуха, азота и пара.

7. С целью обеспечения безотказности производства, для создания азотных подушек, для приборов КИПиА и других целей используется чистый азот с содержанием кислорода 0,02% объемных.

8. С целью уменьшения вероятности попадания азотной кислоты в систему сбора конденсата конденсат водяного пара через нейтрализатор сбрасывается в химзащищенную канализацию.



9. На коллекторе сброса газов на факел предусмотрена емкость (сепаратор) для улавливания всей жидкости, которая может быть выброшена из системы синтеза в случае аварийных ситуаций.

10. Для предотвращения коррозии аппаратов и трубопроводов они изготовлены из материалов, стойких в средах, содержащих азотную кислоту.

Для предотвращения разрушения оборудования необходимо выполнение требований «Правил устройства и безопасной эксплуатации трубопроводов пара и горячего водоснабжения» ПБ 10-573-03.

Для защиты персонала от воздействия опасных и вредных факторов предусмотрены средства индивидуальной защиты.

Для защиты от удара молнией рекомендуется устанавливать молниеотводы на высоком оборудовании.

Молниеотвод состоит из молниеприёмника, воспринимающего удар молнии, токоотвода, соединяющего молниеприёмник с землёй, и заземлителя, отводящего ток линии в землю.

### **Средства индивидуальной защиты работающих**

На основании Трудового кодекса РФ ст.221 работникам, занятым в производствах с вредными и (или) опасными условиями труда, а также на работах, выполняемых в особых температурных условиях или связанных с загрязнением, выдают сертифицированные средства индивидуальной защиты (СИЗ), а также смывающие и обезвреживающие средства в соответствии с Инструкцией ОТБ-7 «О порядке обеспечения, применения и хранения специальной одежды, специальной обуви и других средствах индивидуальной защиты» и ежегодно пересматриваемыми «Нормами 149 бесплатной выдачи спецодежды, спецобуви и средств индивидуальной защиты работникам ОАО "АЗОТ"»

## **6.2 Экологическая безопасность.**

### **Выбросы в атмосферу.**

Газообразными выбросами в атмосферу являются технологические отходы – выхлопной газ, вентиляционные выбросы.

Выхлопной газ образуется на стадии абсорбции нитрозного газа конденсатом водяного пара (или ЧОВ) в абсорбционной колонне поз. К-31, проходит каталитическую очистку от окислов азота и монооксида углерода в реакторах поз. Р-40 и поз. Р-80 и выбрасывается в выхлопную трубу поз. Х-102 высотой 150 метров в атмосферу.

Для предотвращения выбросов в атмосферу неочищенного выхлопного газа при возникновении аварийных ситуаций на стадии его очистки предусмотрены блокировки, приводящие к остановке стадии конверсии (блокировки класса Б, II и III группы).

Вентиляционные выбросы в атмосферу с содержанием оксидов азота н/б  $2\text{мг/м}^3$  образуются при естественном воздухообмене через аварийные фонари кор.727 и принудительном воздухообмене корпусов 727.

Возможны залповые выбросы оксидов азота и аммиака в атмосферу при аварийных остановках агрегата.

При пусках и остановках агрегата АК-72 повышение содержания оксидов азота в выхлопном газе, выбрасываемом в атмосферу, не наблюдается.

### **Сточные воды**

Сточные воды производства образуются при продувке водооборотных циклов и барабанов поз. Э-14 котлов-утилизаторов поз. Э-13, с охлаждения сальников насосов. Сточные воды представляют собой условно чистые стоки и сбрасываются в промливневую канализацию.

Продувочная вода водооборотного цикла перед сбросом в канализацию

используется на охлаждение продувочной воды от котлов утилизаторов и сальников насосов Н-20, Н-15, Н-46, Н-1.

Оборудование стадии охлаждения и промывки нитрозного газа, абсорбции окислов азота, хранилища кислоты, насосного отделения установлено в специальных поддонах, выполненных из кислотостойкого кирпича.

Поддоны оборудованы дренажными емкостями поз. Е-48, куда собираются кислые стоки соответствующих стадий. Проливы кислот, сброс после торцевых уплотнений кислотных насосов Н-35, Н-36, Н-101, а также кислота при опорожнении оборудования и трубопроводов при подготовке к ремонту поступают в дренажные ёмкости поз. Е-48, откуда насосами Н-49 перекачиваются в ёмкость поз. Е-103/2. Собранные в ёмкости поз. Е-103/2 кислые стоки анализируются и затем используются в производстве неконцентрированной азотной кислоты.

#### **Твёрдые и жидкие отходы.**

Твёрдые отходы образуются:

- при замене фильтрующих материалов в фильтрах воздуха, природного газа, аммиачно-воздушной смеси, газообразного аммиака, азота, азото-водородной смеси (технологические отходы);
- при проведении работ по изоляции трубопроводов и технологического оборудования (шлаковата);
- при проведении ремонтных работ на градирнях (отходы с градирен);
- при проведении работ по ремонту и уходу за технологическим оборудованием (прокладочные материалы, обтирочный материал);
- при проведении строительных и монтажных работ (строительно-бытовой мусор);
- при проведении работ по уборке производственных помещений (обтирочный материал);

- после загрузки катализатора АПК-2,  $Al_2O_3$  в реактора каталитической очистки поз. Р-40, Р-80 (невозвратная тара).

Твердые отходы складировются на специальных площадках для хранения твёрдых отходов согласно типу отходов.

Жидкими отходами в производстве неконцентрированной азотной кислоты является отработанное масло типа ТП-22.

Отработанное масло образуется при работе комплексного машинного агрегата КМА-5.

Отработанное масло ТП-22 накапливается в ёмкости отработанного масла поз. Е-72. По мере накопления – перекачивается насосом поз. Н-38 в автоцистерну отработанного масла стороннего потребителя. Транспортировка отработанного масла должна осуществляться при следующих условиях:

- автоцистерна должна быть специально оборудована и снабжена специальными знаками;

- наличие паспорта на отработанное масло;

- наличие документации для транспортирования и передачи с указанием количества транспортируемого отработанного масла, цели и места назначения транспортирования;

- соблюдения требований безопасности к транспортированию опасных отходов на транспортных средствах.

## **6.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

### **Пожарная и взрывная опасность**

Лаборатория относится к взрывоопасному помещению категории Д. К категории Д относятся помещения, связанные с обработкой негорючих веществ и материалов в холодном состоянии.

Пожарная безопасность в лаборатории обеспечивается системой предотвращения пожара путем организационных мероприятий и технических средств, обеспечивающих невозможность возникновения пожара, а также системой пожарной защиты, направленной на предотвращение воздействия на людей опасных факторов пожара и ограничения ущерба от него.

Опасными факторами пожара является открытый огонь и искры, повышенная температура воздуха и предметов, пониженная концентрация кислорода в воздухе, обрушение и повреждение зданий, установок, а также взрывы.

Система пожарной защиты предусматривает следующие меры:

- 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.

На блочном щите управления из средств пожаротушения находятся пенные, порошковые и водные огнетушители.

При работе на участке водоочистки необходимо следить за тем, чтобы вода не попадала на электропроводку и распределительные коробки, так как это может привести к короткому замыканию и пожару.

Все переходы должны быть свободными и иметь, по крайней мере, хотя бы два выхода, не должно быть длинных тупиковых проходов.

Все двери и все ворота для машин должны открываться наружу. Здание иметь оконные перелеты, которые располагаются, как правило, в одной плоскости с внутренней поверхностью стен. В зданиях должны быть предусмотрены вытяжные шахты для дымоудаления.

Для оказания первой помощи в лаборатории всегда должны быть:

1. бинты;
2. гигроскопическая вата;
3. 3%-ый раствор йода;
4. 2%-ый раствор борной кислоты;
5. 2%-ый раствор уксусной кислоты;

### **Безопасность при чрезвычайных ситуациях**

Чрезвычайные ситуации (ЧС) - совокупность таких обстоятельств, которые сопровождаются разрушениями, поражениями людей, изменением экологической обстановки.

К чрезвычайным ситуациям относятся: производственные аварии, стихийные бедствия.

В условиях ЧС необходимо знать правила поведения во избежание паники и несчастных случаев.

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.

Стихийные бедствия - ураганы, наводнения, землетрясения предотвратить нельзя, поэтому, отключив электричество в здании, его необходимо покинуть или спуститься в подвальное помещение (бомбоубежище).

Эвакуационные пути - это пути, ведущие к эвакуационным выходам. Наиболее распространенными путями эвакуации являются проходы, коридоры, фойе и лестницы.

Самое главное - при любой чрезвычайной ситуации сохранять спокойствие и не забывать отключить электроэнергию и электроприборы. Иначе, это приведет к ещё большим разрушениям.

При поступлении сигнала об угрозе нападения противника все работники лаборатории должны быть обеспечены средствами индивидуальной защиты, после чего должны удалиться в убежище согласно плану эвакуации из помещения.

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

Законодательство РФ об охране труда основывается на Конституции РФ и состоит из федерального закона, других федеральных законов и иных нормативных правовых актов субъектов РФ. Среди них можно выделить **федеральный закон “Об обязательном социальном страховании от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний”**. Для реализации этих законов приняты Постановления Правительства РФ “О государственном надзоре и контроле за соблюдением законодательства РФ о труде и охране труда”, “О службе охраны труда”, “О Федеральной инспекции труда” и др.[9]

Управление охраной труда осуществляет блок федеральных органов исполнительной власти, руководимый Министерством здравоохранения и социального развития Российской Федерации (Минздравсоцразвития). Оно осуществляет функции государственной политики и нормативно-правовому регулированию в сфере здравоохранения и социального развития, социального страхования, условий и охраны труда и т. д.

Функции по контролю и надзору, которые ранее осуществлялись Сан-эпиднадзором Минздрава России, **переданы Федеральной службе по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека (Роспотребнадзор).**

Федеральная служба по труду и занятости (Роструд) осуществляет функции по надзору и контролю в сфере труда, а также государственный надзор и контроль за соблюдением, в частности, трудового законодательства и нормативных правовых актов, содержащих нормы трудового права; установленного порядка расследования и учета несчастных случаев на производстве.

Федеральное агентство по здравоохранению и социальному развитию (Росздрав) организует деятельность по установлению связи заболевания с профессией, государственной службы медико-социальной экспертизы и др.

Федеральная служба по надзору в сфере здравоохранения и социального развития (Росздравнадзор) осуществляет контроль за порядком организации осуществления медико-социальной экспертизы; порядком установления степени утраты профессиональной трудоспособности в результате несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний и др.

Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека (Роспотребнадзор) — государственный санитарно-эпидемиологический надзор за соблюдением санитарного законодательства; организует деятельность системы санитарно-эпидемиологической службы РФ.

**В федеральном законе “О пожарной безопасности” (1994)** определяются общие правовые, экономические и социальные основы обеспечения пожарной безопасности в России, дается регулирование отношений между органами государственной власти, органами местного самоуправления, предприятиями, организациями, крестьянскими хозяйствами и иными юридическими лицами независимо от форм собственности.[10] **Федеральный закон “О промышленной безопасности опасных производственных объектов” (1997)** определяет правовые, экономические и социальные основы обеспечения безопасной эксплуатации опасных производственных



объектов и направлен на предупреждение аварий на опасных производственных объектах и обеспечение готовности организаций к локализации последствий аварий.

**Федеральный закон “О радиационной безопасности населения” (1995) характеризует правовые основы обеспечения радиационной безопасности населения в целях охраны его здоровья.**

## **7. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

### **Введение**

Целью раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является проектирование и создание конкурентоспособных разработок, технологий, отвечающих современным требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

### **7.1 Потенциальные потребители результатов исследования**


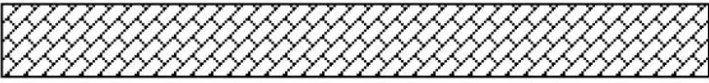
Для анализа потребителей результатов исследования необходимо рассмотреть целевой рынок и провести его сегментирование.

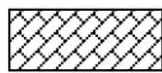
*Целевой рынок* – сегменты рынка, на котором будет продаваться в будущем разработка. В свою очередь, сегмент рынка – это особым образом выделенная часть рынка, группы потребителей, обладающих определенными общими признаками.

*Сегментирование* – это разделение покупателей на однородные группы, для каждой из которых может потребоваться определенный товар (услуга).

Можно применять географический, демографический, поведенческий и иные критерии сегментирования рынка потребителей, возможно применение их комбинаций с использованием таких характеристик, как возраст, пол, национальность, образование, любимые занятия, стиль жизни, социальная принадлежность, профессия, уровень дохода.

Для анализа потребителей результатов исследования необходимо рассмотреть целевой рынок и провести его сегментирование. На рисунке 27 представлена карта сегментирования рынка по производству азотной кислоты.

Размер компании	Вид продукции
	Оборудование для производства азотной кислоты
Крупные	
Средние	



—

**Кемеровское ОАО "Азот"**



—

**АО "Новомосковская акционерная компания "Азот"**

Рис. 27. Карта сегментирования рынка услуг по производству азотной кислоты:

## 7.2 Диаграмма Исикавы

С целью установления причинно-следственных связей, возникающих в ходе выполнения модернизации основного технологического оборудования путем замены тарелки на насадки в колонне, сформирована диаграмма Исикава. Основными факторами, влияющими на объект исследования, являются методы, оборудование и исполнитель.

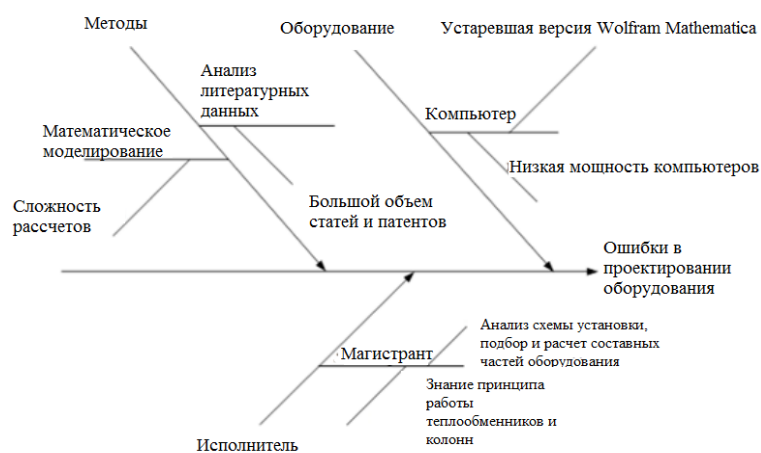


Рисунок 28 — Причинно-следственная диаграмма

Анализируя факторы, влияющие на реализацию поставленной задачи, можно принять следующие меры по оптимизации выполнения работы. Для фактора

«оборудование» можно рассмотреть вариант использования более мощного процессорного блока. Для фактора «методы» вариантом решения проблемы является накопление и анализ данных на основе проведения собственных расчетов. Для фактора «магистрант» предлагается выполнять поэтапный подбор разных катализаторов с их вариацией.

### 7.3 Оценка готовности проекта к коммерциализации

Логическим завершением разработки объекта модернизации и создания необходимых математических и аппаратных расчётов является практическое применение на действующем промышленном объекте. Для осуществления реализации разработки необходимо представить её в виде коммерческого проекта. Оценка степени готовности научного проекта к коммерциализации представлена в таблице 17

Таблица 17 — Оценка степени готовности научного проекта к коммерциализации

№ п/п	Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
1	Определен имеющийся научно-технический задел	3	3
2	Определены перспективные направления коммерциализации научно-технического задела	2	2
3	Определены отрасли и технологии для предложения на рынке	4	3

4	Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынке	5	3
5	Определены авторы и осуществлена охрана их прав	5	3
6	Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	4	3
7	Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	2	2
8	Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	2	3
9	Определены пути продвижения научной разработки на рынок	2	3
10	Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	4	3
11	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	1	1
12	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	2	2
13	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	4	3
14	Имеется команда для коммерциализации научной	1	1

	разработки		
15	Прорабатывается механизм реализации научного проекта	4	3
Итого		45	36

Согласно данным таблицы 2 суммарное количество баллов по категории степень проработанности научного проекта составляет 45, что указывает на готовность проекта к коммерциализации с перспективой выше среднего (45-59баллов). В свою очередь уровень имеющихся знаний у разработчика находится в диапазоне 30-44, что говорит о перспективе ниже среднего уровня. Таким образом, реализация данного проекта вероятна и требует партнерского участия и инвестирования со стороны научно-исследовательских объединений, промышленных организаций. Развить компетенцию разработчика в сфере коммерциализации проекта (в данном случае магистранта) возможно путем более полного и подробного ознакомления с предыдущими и действующими проектами.

#### **7.4 Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования**

Для обеспечения коммерческой отдачи от реализации проекта возможно применение таких методов коммерциализации научных разработок, как торговля патентными лицензиями, передача ноу-хау, инжиниринг, франчайзинг, организация собственного предприятия и т.д. Для коммерциализации данного типа модернизации оборудования актуален метод инжиниринга по следующим причинам. Во-первых, разработанный метод модернизации имеет значимое практическое применение, учитывает множество параметров протекания процесса в аппарате и способствует оптимизации, энерго- и ресурсосбережению и, в конечном счете, снижению затрат на производство. Во-вторых, для разработки метода модернизации необхо-

дим большой объем актуальных промышленных данных, для установления закономерностей, анализа взаимосвязей, тестирования и т.п. В-третьих, существует практика сотрудничества производственных организации с научными объединениями с целью решение промышленных задач путем глубоко научного изучения и поиска обоснованных вариантов решения.

Таким образом, инжиниринг, в данном случае, реализуется путем заключения договора на осуществление изучения и оптимизации промышленного процесса. Стороной консультантом выступает научно-исследовательская группа научной организации (университет, кафедра). Заказчик представлен в лице производственной организации (завод, фабрика).

### **7.5 Инициация проекта**

Для определения нового проекта необходимо составление Устава проекта. В рамках магистерской работы предполагается наличие таких критериев, как цели и результаты проекта, организационная структура проекта, ограничения и допущения проекта (таблица 9-12).

Под заинтересованными сторонами проекта понимаются лица или организации, которые активно участвуют в проекте или интересы кото-

рых могут быть затронуты как положительно, так и отрицательно в ходе исполнения или в результате завершения проекта. Это могут быть заказчики, спонсоры, общественность и т.п. Информация по заинтересованным сторонам проекта представлена в табл. 18.

Таблица 18 — Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидание заинтересованных сторон
Научное объединение кафедры (студенты, преподаватели)	1) Освоение принципиально новой (для научной группы) области исследования и методов модернизации оборудования 2) Коммерческое продвижение проекта 3) Развитие и укрепление связей с отраслью промышленности (производственные компании, заводы) в области совместных научных разработок.
Представители промышленности (компании, заводы)	1) Получение проекта, способствующего оптимизации, энерго-и ресурсосбережению действующего производства. 2) Развитие и укрепление связей с научным объединением (университет, кафедра) в области совместных научных разработок.
Университет, к которому относится научное объединение	Продвижение статуса учебного заведения, повышение научного престижа
Научные объединения сторонние (конкурирующие)	Опасения в связи с появлением конкурентоспособного проекта

В табл. 19 представлена информация о иерархии целей проекта и критериях достижения целей.

Таблица 19 — Цели и результаты проекта

Цели проекта:	Разработка аппаратов для очистки и охлаждения нитрозных газов
Ожидаемые результаты проекта:	Получение модернизированного оборудования с высоким уровнем энергоэффективности
Критерии приемки результата проекта:	1) Новизна идеи 2) Адекватность относительно действующего промышленного процесса 3) Расчеты обеспечивают получение полного набора необходимых производственных показателей 4) Универсальность 5) Простота и точность расчёта
Требование к результату проекта:	Максимальное соответствие критериям приемки результата проекта



## 7.6 Организационная структура проекта.

На данном этапе работы решены следующие вопросы: кто будет входить в рабочую группу данного проекта, определена роль каждого участника в данном проекте, а также прописаны функции, выполняемые каждым из участников и их трудозатраты в проекте. Эту информация представлена в табличной форме (табл. 20).

Таблица 20 — Рабочая группа проекта

№ п/п	ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функция	Трудозатраты, час.(за 2 года)
1	Тихонов В.В. доцент каф. ОХХТ	Руководитель проекта	Координирование проекта, консультирование	110
2	Чернов А.В. магистрант каф. ОХХТ	Исполнитель проект	Сбор и анализ литературных данных, выполнение необходимых расчётов	2700

## 7.7 Ограничения и допущения проекта.

Ограничения проекта – это все факторы, которые могут послужить ограничением степени свободы участников команды проекта, а так же «границы проекта» - параметры проекта или его продукта, которые не будут реализованных в рамках данного проекта.

Таблица 21 — Ограничения проекта

Фактор	Ограничения /допущения
Расчетные возможности	Выполнение расчетов ограничено компьютерными мощностями кафедры
Сроки завершения проекта	июнь 2018 года
Бюджет проекта	Материальная база научной группы (кафедры)

## 7.8 Контрольные события проекта

В рамках данного раздела необходимо определить ключевые события проекта, определить их даты и результаты, которые должны быть получены по состоянию на эти даты. Эту информацию необходимо свести в таблицу

Таблица 22

### *Контрольные события проекта*

№ п/п	Контрольное событие	Дата	Результат (подтверждающий документ)
1	Календарное планирование работ по теме	30.09.17	Календарный план работ
2	Анализ литературы, вычисление приближенных значений	18.01.18	Выбор модели абсорбционной колонны и теплообменника
3	Проектирование	15.04.18	Проект абсорбционной колонны и теплообменника
4	Составление пояснительной записки	5.06.18	Выпускная квалификационная работа

## 7.9 План проекта

В рамках планирования научного проекта необходимо построить календарный или сетевой графики проекта.

Диаграмма Ганта – это тип столбчатых диаграмм (гистограмм), который используется для иллюстрации календарного плана проекта, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

График строится в виде таблице в 15 с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени выполнения научного проекта. При этом работы на графике следует выделить различной штриховкой в зависимости от исполнителей, ответственных за ту или иную работу.

Таблица 23






Календарный план-график проведения НИОКР

Обозначения: Руководитель-



; Магистрант -



№ работ	Вид работ	Исполнители	Т. КИ	Продолжительность выполнения работ																													
				Сентябрь			Октябрь			Ноябрь			Дек. акбрь			Январь			Февраль			Март			Апрель			Май			Июнь		
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	
Кал. Дн.	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	
1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель	3																														
2	Выбор направления исследований	Руководитель Магистрант	5																														
3	Календарное планирование работ по теме	Магистрант	4																														
4	Изучение литературы, вычисление приближенных значений	Магистрант	110																														
5	Корректировка полученных результатов	Руководитель, Магистрант	40																														



## 7.10 Бюджет научного исследования

При планировании бюджета научного исследования должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов планируемых расходов, необходимых для его выполнения. В процессе формирования бюджета, планируемые затраты группируются по статьям.

Расчет стоимости материальных затрат производится по действующим прейскурантам или договорным ценам. В стоимость материальных затрат включают транспортно-заготовительные расходы (3 – 5 % от цены). В эту же статью включаются затраты на оформление документации (канцелярские принадлежности, тиражирование материалов). Результаты по данной статье заносятся в табл. 23.

Таблица 24

*Сырье, материалы, комплектующие изделия и покупные полуфабрикаты*

Наименование	Кол-во	Цена за ед., руб	Сумма, руб
Тетрадь	2 шт	25	50
Ручка	4 шт	15	60
Картридж для принтера	1 шт	550	550
Бумага	1 шт	300	300
Всего за материалы			960
Транспортно-заготовительные расходы (3-5%)			38
Итого по статье			998

### **Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ**

В данную статью включают все затраты, связанные с приобретением специального оборудования (приборов, контрольно-измерительной аппаратуры, стендов, устройств и механизмов), необходимого для проведения работ по конкретной теме. Определение стоимости спецоборудования производится по дей-

ствующим преискурантам, а в ряде случаев по договорной цене. Данные показатели представлены в табл. 25

Таблица 25

*Расчет затрат по статье «Спецоборудование для научных работ»*

№ п/п	Наименование оборудования	Кол-во единиц оборудования	Цена единицы оборудования, тыс. руб	Общая стоимость оборудования, тыс. руб
1	ПО MicrosoftOffice 2015	1	1,557	1,557
2	КОМПАС 3D V16	1	1,490	1,490
3	Mathcad Application	1	30	30
4	Итого			33,047

**Основная заработная плата**

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 оплаты труда. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы (размер определяется Положением об оплате труда). Расчет основной заработной платы сводится в табл. 26.

Таблица 26

*Расчет основной заработной платы*

№ п/п	Исполнитель по категориям	Трудоемкость, чел.-дн.	Заработная плата, приходящаяся на один чел.-дн., тыс.руб.	Всего заработная плата по тарифу, тыс.руб.
1	Руководитель	13	1,19	15,5
2	Магистрант	337		52,8

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением проекта, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату.

$$Сзп= Зосн+ Здоп , \quad (7.1)$$

где  $Зосн$ – основная заработная плата;

$Здоп$ – дополнительная заработная плата.

Основная заработная плата ( $Зосн$ ) руководителя (лаборанта, инженера) от **предприятия** (при наличии руководителя от предприятия) рассчитывается по следующей формуле:

$$Зосн= Здн \cdot Т раб, \quad (7.2)$$

где  $Зосн$ – основная заработная плата одного работника;

$Тр$ – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн. (табл. 19);

$Здн$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Основная заработная плата руководителя (от ТПУ) рассчитывается на основании отраслевой оплаты труда. Отраслевая система оплаты труда в ТПУ предполагает следующий состав заработной платы:

1) оклад – определяется предприятием. В ТПУ оклады распределены в соответствии с занимаемыми должностями, например, ассистент, ст. преподаватель, доцент, профессор. Базовый оклад  $Зб$  определяется исходя из размеров окладов, определенных штатным расписанием предприятия.

2) стимулирующие выплаты – устанавливаются руководителем подразделений за эффективный труд, выполнение дополнительных обязанностей и т.д.

3) иные выплаты; районный коэффициент.

Расчёт основной заработной платы приведён в табл. 27.

## Талица 27

*Расчёт основной заработной платы*

Заработная плата	Руководитель	Магистр
Основная зарплата	212000	14416
Дополнительная зарплата	25440	0
Итого по статье Сзп	237440	14416

**Отчисления на социальные нужды**

Отчисления во внебюджетные фонды:

$$\mathbf{Свнеб= квнеб \cdot (Зосн+ Здоп),} \quad (7.3)$$

где *квнеб*– коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

На 2014 г. в соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%. На основании пункта 1 ст.58 закона №212-ФЗ для учреждений, осуществляющих образовательную и научную деятельность в 2014 году водится пониженная ставка – 27,1%.

Стипендиальные выплаты студентам, магистрам и аспирантам не облагаются налогом.

Отчисления на социальные нужды составляют 57745 руб.

Научные и производственные командировки составляют 10% исполнителей проекта и равны 25209 руб.

Накладные расходы составляют 80-100 % от суммы основной и дополнительной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнении темы. Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле:

$$\mathbf{Снакл= кнакл \cdot (Зосн+ Здоп),} \quad (7.4)$$



Общие затраты за два года реализации проекта с учетом всех вышеупомянутых пунктов составили 571721 руб.

#### 3.4. Бюджет научного исследования

При планировании бюджета научного исследования должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов планируемых расходов, необходимых для его выполнения. В процессе формирования бюджета, планируемые затраты группируются по статьям, представленным в таблице (табл. 28).

Сырье, материалы, покупные изделия и полуфабрикаты (за вычетом отходов)

В эту статью включаются затраты на приобретение всех видов материалов, комплектующих изделий и полуфабрикатов, необходимых для выполнения работ по данной теме. Количество потребных материальных ценностей определяется по нормам расхода.

Таблица 28

#### *Группировка затрат по статьям*

Статьи	Затраты, руб
Сырье, материалы (за вычетом возвратных отходов), покупные изделия и полуфабрикаты	998
Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	33047
Основная заработная плата	226414
Дополнительная заработная плата	25440
Отчисления на социальные нужды	57745
Научные и производственные командировки	25209
Накладные расходы	202868
Итого плановая себестоимость	571721

## 7.11 Организационная структура проекта

В практике используется несколько базовых вариантов организационных структур: функциональная, проектная, матричная.

Исходя из рекомендаций выбран проектный вариант организационной структуры проекта.

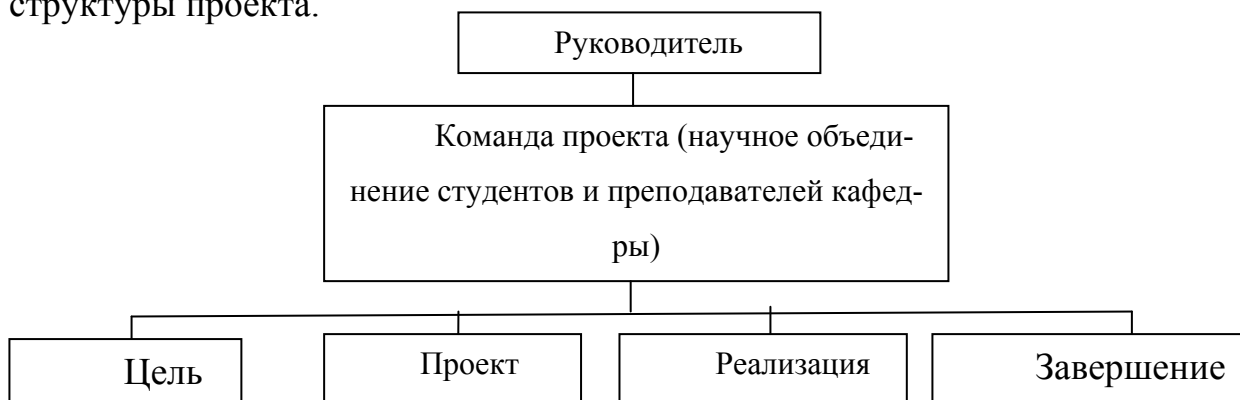


Рисунок 30 — Проектная структура проекта

## 7.12 Матрица ответственности

Для распределения ответственности между участниками проекта формируется матрица ответственности (табл. 29).

Таблица 29 Матрица ответственности

Этапы проекта	Руководитель проекта	Магистрант
Формирование актуальной проблемы	И	О
Выбор методики решения	С	И
Литературный обзор	С	И
Проведение расчетов	С	И
Анализ полученных данных	С	И
Структурирование и оформление результатов	С	И

### 7.13 План управления коммуникациями проекта

План управления коммуникациями отражает требования к коммуникациям со стороны участников проекта. Информация по данному разделу приведена в таблице (табл.30).

Таблица 30-План управления коммуникациями проекта

№ п/п	Какая информация передается	Кто передает информацию	Кому передается информация	Когда передается информация
1	Статус проекта	Магистр	Руководитель	Ежемесячно
2	Обмен информацией о текущем состоянии проекта	Магистр	Руководитель	Еженедельно
3	Документы и информация по проекту	Руководитель/ магистр	Руководитель/ магистр	Не позже сроков графиков и к. точек
4	О выполнении контрольной точки	Магистр	Руководитель	Не позже контрольного события по плану управления

### 7.14 Реестр рисков проекта

Идентифицированные риски проекта включают в себя возможные неопределенные события, которые могут возникнуть в проекте и вызвать последствия, которые повлекут за собой нежелательные эффекты. Информация по данному разделу приведена в таблице (табл.31).

Таблица 31-риски проекта

№	Риск	Потенциальное воздействие	Вероятность наступления (1-5)	Влияние риска (1-5)	Уровень Риска	Способы смягчения риска	Условия наступления
1	Неэффективность технологии	Изменение планов проекта	2	4	Низкий	Моделирование технологии	Неправильное планирование работы
2	Существование прототипа научной разработки	Изменение планов проекта	5	2	Низкий	Выявить сильные и слабые стороны конкурентов	Наличие альтернативных разработок
3	Отсутствие финансирования	Невозможность реализации технологии	2	4	Высокий	Заинтересовать инвесторов	Незаинтересованность в данной разработке

#### 4.4. Оценка сравнительной эффективности исследования

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\Phi}^p = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\max}}, \quad (7.4)$$

где - интегральный финансовый показатель разработки;

$\Phi_{pi}$ — стоимость  $i$ -го варианта исполнения;

$\Phi_{\max}$ — максимальная стоимость исполнения научноисследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение бюджета затрат разработки в раз-

ах (значение больше единицы), либо соответствующее численное удешевление стоимости разработки в разгах (значение меньше единицы, но больше нуля).

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности рекомендуется проводить в форме таблицы.

Таблица 32 Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Аналог 1	Аналог 2
1. Энергосбережение	0,40	5	4	4
2. Надежность	0,35	5	4	3
3. Материалоемкость	0,25	4	5	5
ИТОГО	1			

$$I_{\text{ТП}} = 0,40 * 5 + 0,35 * 4 + 0,25 * 4 = 4,75$$

$$\text{Аналог 1} = 0,40 * 4 + 0,35 * 4 + 0,25 * 5 = 4,25$$

$$\text{Аналог 2} = 0,40 * 4 + 0,35 * 3 + 0,25 * 5 = 3,9$$

Сравнение интегрального показателя эффективности текущего проекта и аналогов позволит определить сравнительную эффективность проекта. Сравнительная эффективность проекта:

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{финр}}^{\text{р}}}{I_{\text{финр}}^{\text{а}}} \quad (7.5)$$

где  $\mathcal{E}_{\text{ср}}$  – сравнительная эффективность проекта;

$$\mathcal{E}_{\text{ср1}} = \frac{4,75}{4,25} = 1,11$$

$$\mathcal{E}_{\text{ср2}} = \frac{4,75}{3,9} = 1,21$$

Сравнение значений интегральных показателей эффективности позволило понять и выбрать более эффективный вариант решения поставленной в магистерской диссертации технической задачи с позиции финансовой и ресурсной эффективности.

В результате проведенной работы была спроектирована и создана конкурентоспособная разработка, отвечающая современным требованиям производства.

## **Заключение**

В результате данной дипломной работы были достигнуты следующие цели:

1. Изучен промышленный процесс отмывки и охлаждения нитрозных газов, изучение схемы и оборудования ОАО "АЗОТ" по производству азотной кислоты.
2. Проведена исследовательская работа по модернизации абсорбционной колонны.
3. В разделе «Социальная ответственность» были рассмотрены вредные и опасные производственные факторы, а так же средства коллективной и индивидуальной защиты;
4. В разделе «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» была спроектирована и создана конкурентноспособная разработка.

## Список использованных источников

1. Кутепов А. М., Бондарева Т. И., Беренгартен Н. Г., Общая химическая технология, изд. 2-е, перераб. и доп., М.: «Высшая школа», 1990. – 522 с.
2. Постоянный технологический регламент № 3 производства неконцентрированной азотной кислоты. - Россошь: ОАО « Минудобрения», 1999. - 335 с.
3. Кинетика абсорбционных процессов; под ред. В.И. Атрощенко. – Харьков: Вища школа, 1976.
4. Производство азотной кислоты в агрегатах большой мощности; под ред. В.М. Олевского. – М.: Химия, 1985.
5. Пешкова Л.В., Проскурнин А.Л., Степовая Н.А. Температурный режим процесса кислотообразования в производстве азотной кислоты // Молодежная наука в развитии регионов: материалы Всерос. конф. студентов и молодых ученых с международным участием, Березники, 27 апреля 2011 г. – Пермь: Березниковский филиал Перм. гос. техн. ун-та, 2011. – С. 254–255.
6. Пешкова Л.В., Степовая Н.А., Шаломов О.Ю. Математическое моделирование режима орошения абсорбционной колонны в производстве неконцентрированной азотной кислоты // Информационные системы и модели в научных исследованиях, промышленности, образовании и экологии: статья. Всерос. конф. – Тула: Инновационные технологии, 2010. – С. 63–67.
7. Скобло А.И. и др. Процессы и аппараты нефтегазопереработки и нефтехимии. – М.: ООО «Недра-Бизнес-центр», 2000. – 677 с.
8. Павлов К.Ф., Романков А.А., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу «Процессы и аппараты химической технологии». – Л.: Химия, 1981. – 552 с.
9. Основные процессы и аппараты химической технологии. Пособие по проектированию. / Под ред. Ю.И. Дытнерского. – М.: Химия, 1983. – 272 с.
10. Тимонин А.С. основы конструирования и расчета химико-технологического и природоохранного оборудования. Справочник. – Калуга: Изд. Н. Бочкаревой, 2002. Т.1, 852 с., т.2, 1028 с., т.3, 968 с.

11. Лацинский А.А., Толчинский А.Р. Основы конструирования и расчета химической аппаратуры.– М.: Машиностроение, 1970. – 752 с.
12. Расчет и конструирование машин и аппаратов химических производств. Примеры и задачи / под ред. М.Ф. Михалева.– Л.: Машиностроение, 1984. – 301 с.
13. ГОСТ 52857.3 – 2007 «Укрепление отверстий в обечайках и днищах при внутреннем и внешних давлениях. Расчет на прочность обечаек и днищ при внешних статических нагрузках на штуцер»;
14. ГОСТ 52857.2 – 2007 « Расчет цилиндрических и конических обечаек, выпуклых и плоских днищ и крышек»;
15. ГОСТ 52857.4 – 2007 «Расчет на прочность и герметичность фланцевых соединений»;
16. Миниович М. А. Технический справочник по азотной кислоте: М.:Справ. изд.: ГИАП. 1961. <http://intek.info/zhidkosti-svoystva-primenenie/20-azotnaya-kislota-fizicheskie-svoystva/10-plotnost-vodnykh-rastvorov-azotnoj-kisloty>
17. Теплоемкость азотной кислоты, номограмма: <http://chem21.info/page/157169055205173006187177017118190167240075026251/>
18. Ю.А. Булыгин С.С. Баранов Теплообменное оборудование для нефтегазовой промышленности. Учебное издание, 2015-100стр.
19. ГОСТ Р 52857.1-2007 "Общие требования"
20. ГОСТ Р 52857.2-2007 "НОРМЫ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА НА ПРОЧНОСТЬ"
21. ОСТ 26 291 "СОСУДЫ И АППАРАТЫ СТАЛЬНЫЕ СВАРНЫЕ, ОБЩИЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ".
22. ГОСТ Р 52857.7-2007 Сосуды и аппараты НОРМЫ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА НА ПРОЧНОСТЬ. Теплообменные аппараты
23. ГОСТ Р 52857.4-2004 " Расчет фланцевых соединений".
24. СН 2.2.4/2.1.8.562-96 «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки»;
25. Р 2.2.2006-05 «Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда»;



26. ГОСТ 12.2.007.0-75 Система стандартов безопасности труда. Изделия электротехнические. Общие требования безопасности.

27. ГОСТ 12.2.003–91 ССБТ. Оборудование производственное. Общие требования безопасности.

28. Теплообменники кожухотрубчатые. Руководство по эксплуатации. ОАО «ВНИИНЕФТЕМАШ» -Москва, 2013

29. РД 34.03.201-97 Правила техники безопасности при эксплуатации тепло-механического оборудования электростанций и тепловых сетей.

30. Федеральный закон от 21.12.1994 N 69-ФЗ (ред. от 29.07.2017) «О пожарной безопасности». <http://legalacts.ru/doc/FZ-o-pozharnoj-bezopasnosti/>

### 1.1. Feedstock for the production of nitric acid

The raw material for the production of nitric acid is ammonia, air and water. Synthetic ammonia is more or less contaminated with impurities. Such impurities are catalyst dust, lubricating oil (when compressed by a piston compressor). For the production of pure gaseous ammonia, evaporative stations and distillation units of liquid ammonium are used.

Atmospheric air, used in the production of nitric acid, is taken in the territory of the plant or near it. This air is contaminated with gaseous impurities and dust. Therefore, it is thoroughly cleaned to avoid poisoning of the ammonia oxidation catalyst. Air purification is carried out, as a rule, in a scrubber, and then in a two-stage filter.

The water used for technological needs is subjected to special preparation: sludge from mechanical impurities, filtration and chemical purification from salts dissolved in it. To produce reactive nitric acid, pure steam condensate is required.

#### 1.1.2 Methods for the production of nitric acid

The first plant for the production of HNO<sub>3</sub> from ammonia by-product coke was built in Russia in 1916. In 1928 the production of nitric acid from synthetic ammonia was mastered [1].

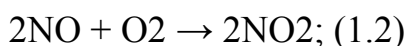
A distinction is made between the production of weak (dilute) nitric acid and the production of concentrated nitric acid.

The process of production of dilute nitric acid is composed of three stages:

1) conversion of ammonia to obtain nitric oxide



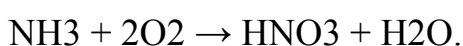
2) oxidation of nitric oxide to nitrogen dioxide



3) absorption of nitrogen oxides with water



The total reaction of formation of nitric acid is expressed



Production of nitric acid according to the scheme AK-72. The basis of the AK-72 scheme developed in the USSR is a closed energy technology cycle with a two-stage conversion of ammonia and cooling of nitrous gases at a pressure of 0.42-0.47 MPa and absorption of nitrogen oxides at a pressure of 1.1-1.26 MPa; products are issued in the form of 60% HNO<sub>3</sub>. The first aggregate AK-72 with the capacity of 380 thousand tons / year was launched in 1976 [1].

The process flow diagram is shown in Figure 1.1.

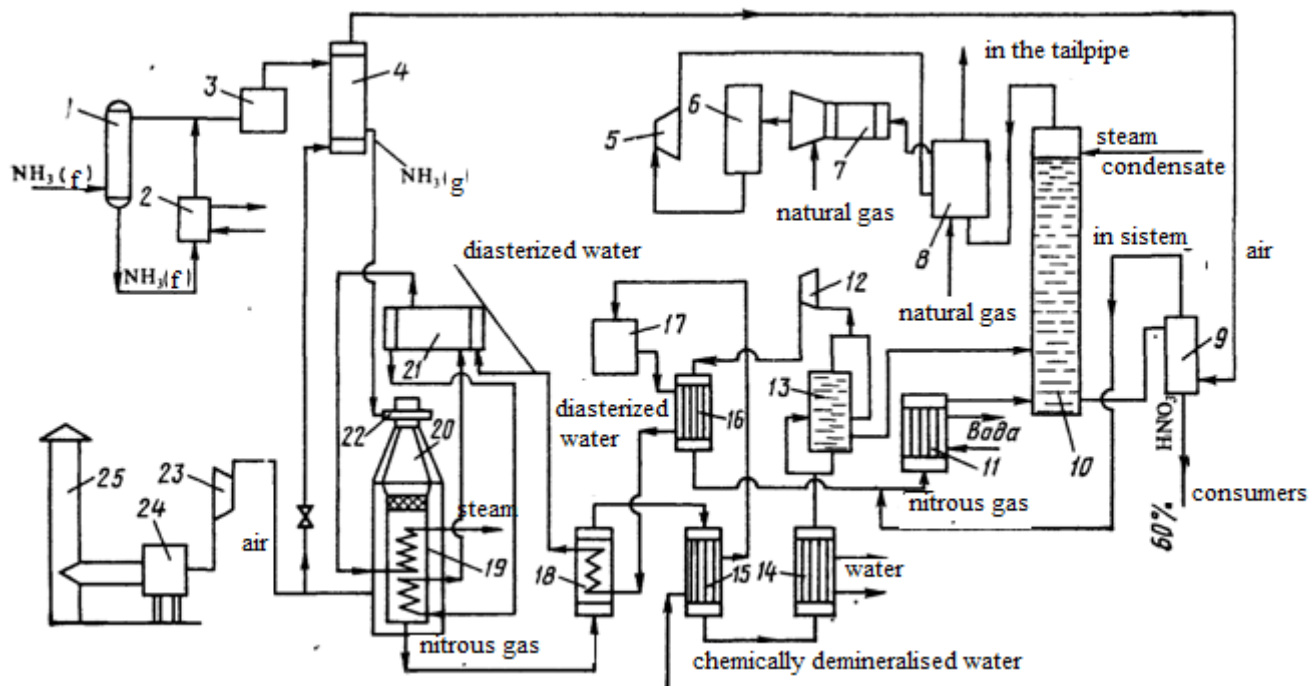


Figure 1.1 -Technological scheme for the production of nitric acid AK-72:

1 - receiver; 2 - evaporator; 3, 24 - filters; 4, 15 - heaters; 5 - recuperation turbine; 6 - catalytic cleaning reactor; 7 - the mixer; 8 - furnace device; 9 - purge column; 10 - absorption column, II, 14 - water coolers; 12, 23 - compressors; 13 - gas washer; 16, 18 - refrigerators of nitrous gases; 17 - deaeration column; 19 - waste heat boiler; 20 - contact apparatus; 21 - a drum with a separation device; 22 - mixing chamber; 25 - air intake pipe.

The air is taken from the atmosphere through the pipe 25, cleaned of dust in the filter 24, compressed by an air compressor 23 to 0.42 MPa and, divided into two streams, is fed to a contactor and an ammonia heater. Liquid ammonia (a vapor-liquid mixture) flows through the receiver 1 to the evaporator 2, where it evaporates at 10-16 ° C and a pressure of 0.6 MPa.

After the evaporator, ammonia gas is purified from oil and mechanical impurities in filter 3 and sent to an ammonia heater 4 where it is heated to 80-120 ° C by air.

The purified air and ammonia enter the mixing chamber 22 of the contact apparatus 20. The resulting ammonia-air mixture contains 9.6-10.0% NH<sub>3</sub>. After a fine cleaning in the filter integrated in the contact apparatus, the ammonia-air mixture is fed to a two-stage catalyst consisting of three platinum networks and a layer of a non-platinum catalyst. Nitrogen gases at a temperature of 840-860 ° C enter the recovery boiler 19 located under the contact device, where by their cooling, steam is produced at a pressure of 4 MPa with a temperature of 440 ° C. The boiler is fed with chemically purified water deaerated in column 17. Deaerated water passes heat exchanger 16 where it is heated by nitric gases to 150 ° C, economizer 18 and then enters the drum of the recovery boiler 21.

The nitrous gases after the heat recovery boiler are cooled in the economizer 18, give their heat in the preheater 15 and then enter the water cooler 14 for further cooling to 55 ° C. When cooling of nitrous gases, condensation of water vapor occurs to form 40-45% nitric acid, which is supplied to the gas washer 13. Nitric gases also enter here.

The acid from the bottom of the washer is supplied to the absorption column 10, and the nitrous gases are compressed in the compressor 12 to 1.1-1.26 MPa, where they are heated to 210-230 ° C. After compression, the nitrous gases are cooled in a refrigerator 16 to 155-165 ° C. in the refrigerator 11 of the second stage to 60-65 ° C and are fed to the absorption column 10. The coils of the column are provided with coils for cooling the acid. From above, steam condensate (H<sub>2</sub>O) enters the column with a temperature not exceeding 40 ° C. The bottom of the column displays 58-60% nitric acid; it enters the purge column 9 to remove the nitrogen oxides dissolved therein and is then sent to the storage.

The exhaust gas from the absorption column is heated in a preheater (furnace) 8, mixed in a mixer 7 with natural gas and heated to 480 ° C is sent for catalytic purification from nitrogen oxides to the reactor. The catalyst of purification is the alumopalladium catalyst APK-2. After catalytic decomposition, exhaust gases containing up to 0.008% nitrogen oxides at a temperature of 750 ° C enter the recovery turbine 5, which is part of the gas turbine unit. Here, the thermal energy of the exhaust gases is converted into a mechan-

ical one with simultaneous reduction of the gas pressure to 0.95-1.05 MPa. Energy generated in a gas turbine is used to drive compressors 12 and 23 (nitric and air).

Production of weak nitric acid under increased pressure. In the 1960s, an aggregate for the production of nitrogen acid with a capacity of 120,000 tons a year was developed at a pressure of 0.716 MPa using high-temperature catalytic exhaust gas purification, which produces products in the form of 53-58% HNO<sub>3</sub> [1]. When developing this scheme, issues of economic efficiency of production under the AK-72 scheme were revised, as a result of which the plant's capacity was reduced from 380,000 tons to 120,000 tons per year and the pressure in the whole scheme was reduced. In particular, the absorbers operate at a pressure of 0.5-0.7 MPa. Improved tail gas cleaning scheme [1].

Production of concentrated nitric acid by direct synthesis from nitrogen oxides. Direct synthesis of HNO<sub>3</sub> is based on the interaction of liquid nitrogen oxides with water and gaseous oxygen under a pressure of up to 5 MPa according to equation



100% nitrogen dioxide at atmospheric pressure and at a temperature of 21.5 ° C completely passes into the liquid state. In the oxidation of ammonia, the NO produced is oxidized to NO<sub>2</sub>, whose content in the gas mixture is about 11%. Transfer of nitrogen dioxide of this concentration to the liquid state at atmospheric pressure is not possible, therefore, for liquefying nitrogen oxides, an increased pressure is applied.

*Concentration of nitric acid with the help of water-removing substances.*

It is impossible to obtain concentrated nitric acid by distilling dilute acid. When boiling and distilling the dilute nitric acid, it can be evaporated only to a content of 68.4% HNO<sub>3</sub> (azeotropic mixture), after which the composition of the distillation mixture will not change [1].

In industry, the distillation of dilute aqueous solutions of nitric acid is carried out in the presence of dehydrating substances (concentrated sulfuric acid, phosphoric acid, concentrated solutions of nitrates, etc.). The use of water-removing substances makes it possible to reduce the water vapor content over the boiling mixture and to increase the content of nitric acid vapor, with the condensation of which 98% HNO<sub>3</sub> is obtained.

The technological scheme for concentrating nitric acid using sulfuric acid is shown in Figure 1.2. Diluted nitric acid from the pressure tank 1 is fed to the column 6 via two flow meters 2 connected in parallel. One acid stream passes to the evaporator 3 and is supplied as a mixture of liquid and steam to the 10th plate of the column 6, another stream without heating enters the overlying plate.

Sulfuric acid from the pressure tank 4 through the regulator 5 is fed to the top of the column 6 above the inlet of the cold nitric acid stream. Into the lower part of the column, a sharp steam is introduced, upon heating with which nitric acid begins to evaporate from the ternary mixture.

Vapors of nitric acid at a temperature of 70-85 ° C, rising upwards, leave through the nipple in the column cover and enter condenser-7 condenser. These impurities contain impurities of nitrogen and water oxides.

In a condenser condenser, nitric acid vapor is condensed at a temperature of about 30 ° C to form 98-99% HNO<sub>3</sub>, while the nitrogen oxides are partially absorbed by this acid.

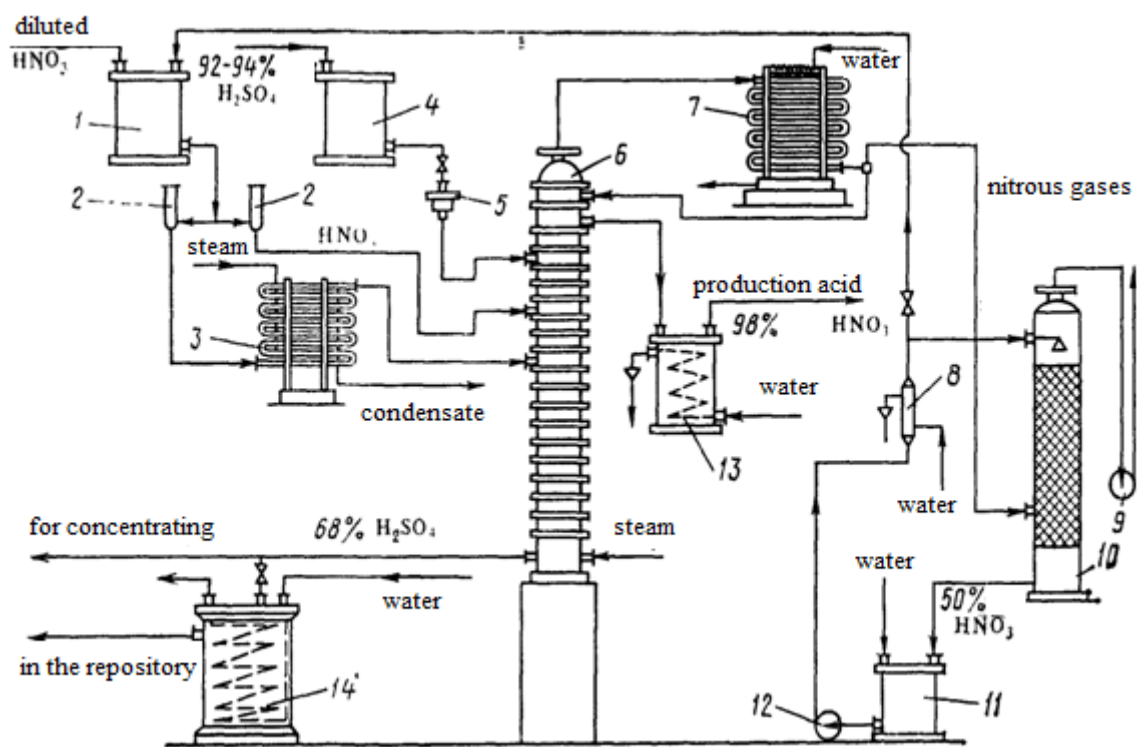


Figure 1.2 - Scheme of concentration of dilute nitric acid in the presence of sulfuric acid

1, 4 - pressure tanks for nitric and sulfuric acid; 2 - control lamps; 3 - evaporator of dilute nitric acid; 5 - box for acid supply regulation; 6 - concentration column; 7 - condenser condenser; 8 - refrigerator of acid circulating in the tower; 9-fan; 10 - absorber tower; 11 - collection; 12 - the pump; 13 - condenser of concentrated nitric acid, 14 - refrigerator of spent sulfuric acid.

Concentrated nitric acid containing nitrogen oxides is sent to the two upper trays and passes them in series, the oxides being blown out of the solution by the nitric acid vapor entering the condenser 7. Uncondensed nitric acid vapor and released nitrogen oxides are sent for absorption to the tower 10, watered by water. The resulting 50% acid enters collection 11 and is again sent to concentrate. Concentrated nitric acid after cooling is sent to the warehouse of finished products.

The spent sulfuric acid containing 65-85% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> is fed to the concentration. When nitric acid is concentrated with 92-93% sulfuric acid, the consumption of the latter is significantly reduced when applying to the concentration of 59-60% HNO<sub>3</sub> instead of 48-50%. Therefore, in some cases it is advantageous to pre-concentrate 50% HNO<sub>3</sub> to 60% by simple evaporation.

A major disadvantage of concentrating nitric acid with sulfuric acid is the high content of fumes and fog H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> in the exhaust gases after electrostatic precipitators (0.3-0.8 g / m<sup>3</sup> of gas). Therefore, sulfuric acid is replaced, for example, with magnesium nitrate or zinc.

#### *Concentration of nitric acid with magnesium nitrate.*

This method of concentration provides pure concentrated nitric acid without harmful emissions into the atmosphere. However, he has a number of significant drawbacks that do not allow the use of such a method everywhere. First of all, this is due to the increased cost of the product obtained in comparison with other methods and the problem of utilization of hard-to-process solid waste [1].