

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

Институт физики высоких технологий
Направление подготовки Энего- и ресурсосберегающие процессы в химической
технологии, нефтехимии и биотехнологии
Кафедра общей химии и химической технологии

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

**Разработка основного оборудования производства этилена с
использованием Wolfram Mathematica**

УДК 661.716.2.04

Студент

4KM51	Мокшин Павел Владимирович			
Группа	ФИО	Подпись	Дата	

Руководитель

доцент	Балмашнов М.А.	К.Т.Н.		
Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

доцент	Креницына З.В.	К.Т.Н.		
Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата

По разделу «Социальная ответственность»

доцент	Раденков Т.А.			
Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	Ан В.В.	К.Т.Н.		
Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата

Томск – 2017 г.

Планируемые результаты освоения образовательной программы

Код результата	Результат освоения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС ВПО, критериев и/или заинтересованных сторон
<i>Профессиональные компетенции</i>		
Р1	Применять глубокие, математические, естественнонаучные, социально-экономические и профессиональные знания в области энерго-и ресурсосберегающих процессов химической технологии, нефтехимии и биотехнологии в профессиональной деятельности	Требования ФГОС (ПК-1,3,14,17,18,26,27 ОК-1,3), Критерий 5 АИОР (п.1.1)
Р2	Ставить и решать инновационные задачи производственного анализа, связанные с созданием и переработкой материалов с использованием моделирования объектов и процессов химической технологии, нефтехимии и биотехнологии с учетом минимизации антропогенного воздействия на окружающую среду.	Требования ФГОС (ПК-6,12,13 ОК-2), Критерий 5 АИОР (пп.1.2)
Р3	Разрабатывать новые технологические процессы на основе математического моделирования, проектировать и использовать энерго-и ресурсосберегающее оборудование химической технологии, нефтехимии и биотехнологии	Требования ФГОС (ПК-8,11,19-25 ОК-4), Критерий 5 АИОР (п.1.3)
Р4	Проводить теоретические и экспериментальные исследования в области разработки и оптимизации технологических процессов и систем с позиций энерго и	Требования ФГОС (4,5,7,8,9 ОК-4), Критерий 5 АИОР (п.1.4)

Р5	Внедрять и эксплуатировать современное высокотехнологичное оборудование, обеспечивать его высокую эффективность, соблюдать правила охраны здоровья и безопасности труда на производстве, выполнять требования по защите окружающей среды.	Требования ФГОС (ПК-2,9,10,15,16, ОК-4,5), Критерий 5 АИОР (п.1.5)
Р6	Демонстрировать глубокие знания социальных, этических и культурных аспектов инновационной профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-1,2,3), Критерий 5 АИОР (пп.2.4,2.5)
Р7	Самостоятельно учиться и непрерывно повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-2,4), Критерий 5 АИОР (2.6)
Р8	Активно владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в иноязычной среде, разрабатывать документацию, презентовать результаты профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-3) , Критерий 5 АИОР (п.2.2)
Р9	Эффективно работать индивидуально и в коллективе, демонстрировать ответственность за результаты работы и готовность следовать корпоративной культуре организации.	Требования ФГОС (ПК-26,27, ОК-4,5) , Критерий 5 АИОР (пп.1.6, 2.3)

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

Институт физики высоких технологий

Направление подготовки (специальность) Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии

Кафедра общей химии и химической технологии

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой

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

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Дипломного проекта

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

Студенту:

Группа	ФИО
4KM51	Мокшину Павлу Владимировичу

Тема работы:

Разработка основного оборудования производства этилена с использованием
Wolfram Mathematica

Утверждена приказом директора (дата, номер)	№10497/с дата 08.12.16
---	------------------------

Срок сдачи студентом выполненной работы:	14.06.17
--	----------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	
<i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i>	Цех компримирования и разделения пирогаза, ООО «Томскнефтехим» Установка осушки и выделения ЭЭФ. Проектная мощность 300 тыс./год нефти. Режим работы – непрерывный. . Технологические параметры: - температура газа 420°C; - рабочее давление 2,8 МПа.

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<p>Реферат Введение 1. Исследование палладиевых катализаторов 2. Расчет реактора гидрирования 2.1 Описание технологической схемы 2.1. Технологический расчет реактора гидрирования 2.2. Конструктивно-механический расчет реактора гидрирования 2.3. Механический расчет трехфазного сепаратора 3. Расчет теплообменного аппарата с плавающей головкой 3.1. Технологический расчет Т/А 3.2 Конструктивно – механический расчет Т/А 4. Социальная ответственность 5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение Заключение Список литературы</p>
<p>Перечень графического материала</p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>Лист 1. Технологическая схема. (А1) Лист 2. Реактор гидрирования. Чертеж общего вида. (А0) Лист 3-4. Реактор гидрирования. Выносные элементы. (А1х2) Лист 5. Теплообменный аппарат. Чертеж общего вида. (А0) Лист 6. Теплообменный аппарат. Выносные элементы. (А1)</p>

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

(с указанием разделов)

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	к.т.н., доцент Криницына З.В.
Социальная ответственность	Ассистент кафедры ЭБЖ Раденков Т.А.
Конструктивно–механический раздел	к.т.н., доцент Беляев В.М.
Механо–технологический раздел	к.т.н., доцент Семакина О.К.

Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:

2. Расчет реактора гидрирования
2.2 Определение расчетных параметров

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

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Балмашнов М.А.	к.т.н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4KM51	Мокшин Павел Владимирович		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА

«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
4КМ51	Мокшин Павел Владимирович

Институт	Физики высоких технологий	Кафедра	Общей химии и химической технологии
Уровень образования	Магистр	Направление/специальность	Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<p>1. Описание рабочего места (рабочей зоны, технологического процесса, механического оборудования) на предмет возникновения:</p> <ul style="list-style-type: none"> - вредных проявлений факторов производственной среды (метеоусловия, вредные вещества, освещение, шумы, вибрации, электромагнитные поля, ионизирующие излучения) - опасных проявлений факторов производственной среды (механической природы, термического характера, электрической, пожарной и взрывной природы) - негативного воздействия на окружающую природную среду (атмосферу, гидросферу, литосферу) - чрезвычайных ситуаций (техногенного, стихийного, экологического и социального характера) 	<p>Рабочее место расположено на открытом воздухе. Аппараты находятся на улице. Местность не заболоченная, равнинная. Климат умеренный.</p> <p>При ремонте аппаратов могут иметь место вредные и опасные проявления факторов производственной среды для человека.</p> <p>Оказывается негативное воздействие на природу (атмосферу, гидросферу.)</p> <p>Возможно возникновение чрезвычайных ситуаций техногенного, экологического и социального характера</p>
<p>2. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме</p>	<p>ГОСТ Р 12.1.019-2009 «Электробезопасность» ГОСТ 12.0.003-74 «Опасные и вредные факторы». ГОСТ 12.1.012-90 «Вибрационная безопасность». ГОСТ 12.1.004-91 «Пожарная безопасность».</p>

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p>1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> - физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой; - действие фактора на организм человека; - приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); - предлагаемые средства защиты (сначала коллективной защиты, затем — индивидуальные защитные средства) 	<p>1. Метеорологические условия производства – СИЗ (утепленный комплект одежды)</p> <p>2. Повышенный уровень шума – СИЗ (противошумные наушники, беруши)</p>
--	--

<p>2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности</p> <ul style="list-style-type: none"> - механические опасности (источники, средства защиты); - термические опасности (источники, средства защиты); - электробезопасность (вт.ч. статическое электричество, молниезащита - источники, средства защиты); - пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения) 	<p>1. Движущиеся машины и механизмы производственного оборудования (насосы) – сигнальная разметка, плакаты.</p> <p>3. Взрывоопасность и пожароопасность – первичные средства пожаротушения, ПСиБ.</p> <p>4. Электрический ток - заземляющие устройства, использование СИЗ.</p>
<p>3. Охрана окружающей среды:</p> <ul style="list-style-type: none"> - анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы); - анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы); - анализ воздействия объекта на литосферу (отходы); - разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды. 	<p>При ремонте аппаратов воздействия оказывают как производственные процессы, так и объекты постоянного и временного назначения.</p> <p>Ремонт реактора и теплообменника сопровождается:</p> <ul style="list-style-type: none"> - загрязнением атмосферного воздуха; - нарушением гидрогеологического режима;
<p>4. Защита в чрезвычайных ситуациях:</p> <ul style="list-style-type: none"> - перечень возможных ЧС на объекте; - выбор наиболее типичной ЧС; - разработка превентивных мер по предупреждению ЧС; - разработка мер по повышению устойчивости объекта к данной ЧС; - разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий. 	<p>Разрушение реактора вследствие превышения давления – наличие предохранительных клапанов.</p> <p>Разгерметизация оборудования, выброс взрывопожароопасной среды – наличие датчиков загазованности, системы ПСиБ, установки паровой завесы.</p>
<p>5. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</p> <ul style="list-style-type: none"> - специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; - организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны 	<p>Согласно трудового законодательства, для работников опасного производственного объекта предусмотрен ежегодный медицинский осмотр с целью выявления и профилактики проф.заболевания. Так же с целью соблюдения техники безопасности проводится ежегодная аттестация по ОТуПБ.</p>
<p>Перечень графического материала:</p>	

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

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

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4КМ51	Мокшин Павел Владимирович		

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

Студенту:

Группа	ФИО
4KM51	Мокшин Павел Владимирович

Институт	ИПР	Кафедра	ОХХТ
Уровень образования	магистр	Направление/специальность	Энего- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии

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

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	<i>Стоимость ПО 28 637 руб.; Размер оклада руководителя проекта 27400 руб.; Размер стипендии дипломника 5000 руб.;</i>
2. <i>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>
3. <i>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:

1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	<i>Построение оценочной карты для сравнения конкурентных разработок</i>
2. <i>Разработка устава научно-технического проекта</i>	<i>Планирование комплекса работ на создание проекта, построение графика выполнения работ</i>
3. <i>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>
4. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	<i>Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности</i>

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Карта сегментирования рынка услуг
2. Оценка конкурентоспособности технических решений
3. Диаграмма Исикава
4. Оценка степени готовности научного проекта к коммерциализации
5. Перечень заинтересованных сторон проекта
6. Цели и результаты проекта
7. Рабочая группа проекта
8. Ограничения проекта
9. Сырье, материалы, комплектующие изделия и покупные полуфабрикаты
10. Затраты на спецоборудование для научных работ
11. Расчет основной заработной платы
12. Баланс рабочего времени
13. Схема проектной структуры проекта

- | |
|--|
| 14. Матрица ответственности |
| 15. 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 Васильевна	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4КМ51	Мокшин Павел Владимирович		

Реферат

Выпускная квалификационная работа содержит 171 страницу, 26 рисунков, 44 таблицы, 4 приложения, 6 листов графического материала.

Ключевые слова: пиролиз, гидрирование ацетилена, реактор гидрирования, механический расчет, прочность, устойчивость, палладиевый катализатор.

Объектом исследования является установка осушки и выделения ЭЭФ производства мономеров ООО «Томскнефтехим».

Цель работы – изучение физико-химических свойств палладиевых катализаторов, процесса гидрирования ацетилена в ЭЭФ. Технологический и конструктивно-механические расчеты основного оборудования установки.

Оглавление

Введение.....	3
Глава 1. Исследование эффективности очистки этан-этиленовой фракции процесса пиролиза от ацетиленистых соединений на различных катализаторах.....	4
1.1 Методы исследования.....	4
1.2 Исследование физико-химических свойств палладийсодержащих катализаторов гидрирования.....	7
1.3 Влияние СО на процесс селективного гидрирования ацетилена в ЭЭФ.....	9
1.4 Исследование процесса селективного гидрирования ацетилена.....	10
в ЭЭФ на палладийсодержащих катализаторах.....	10
Глава 2. Расчет реактора гидрирования ацетилена.....	17
2.1 Описание технологической схемы.....	17
2.2 Технологический расчет реактора гидрирования ацетилена.....	23
2.2.1 Материальный баланс реактора.....	23
2.2.2 Высота слоя катализатора.....	26
2.2.3 Тепловой расчет.....	33
2.2.4 Гидравлический расчет.....	37
2.3 Конструктивно - механический расчет реактора гидрирования ацетилена.....	38
2.3.1 Определение расчетных параметров.....	38
2.3.2 Определение толщины стенки обечайки.....	40
2.3.3 Расчет эллиптических днищ.....	42
2.3.4 Сопряжение обечайки и днища.....	43
2.3.5 Укрепление отверстий в обечайке и днищах.....	45
2.3.6 Расчет фланцевых соединений.....	52
2.3.7 Определение расчетных усилий от ветровых нагрузок.....	63
2.3.8 Расчет на прочность и устойчивость.....	73
2.3.9 Расчет элементов опорного узла.....	80
2.3.10 Расчет средств защиты реактора гидрирования.....	83
Глава 3 Расчет теплообменного аппарата с плавающей головкой.....	93
3.1 Технологический расчет теплообменного аппарата.....	93
3.1.1 Определение поверхности теплообмена и основных размеров аппарата.....	94
3.1.2 Проверочный расчет выбранного аппарата.....	95
3.1.3 Расчет изоляции и тепловых потерь в окружающую среду.....	97
3.1.4 Гидравлический расчет аппарата.....	98
3.2 Конструктивно – механический расчет теплообменного аппарата.....	99
3.2.1 Определение расчетных параметров.....	99
3.2.2 Определение толщины стенки обечайки.....	101
3.2.3 Расчет эллиптических днищ.....	102

3.2.4 Укрепление отверстий в обечайке и днищах	103
3.2.5 Расчет фланцевого соединения.....	107
3.2.6 Расчет толщины трубной решетки	118
3.2.7 Расчет седловых опор	120
4.1 Основные опасности производства	132
4.2 Меры безопасности при ведении технологического процесса	137
4.3 Способы обезвреживания и нейтрализации продуктов.....	140
производства при разливах и авариях.....	140
4.4 Возможные накапливания зарядов статического электричества, их опасность и способы нейтрализации	141
4.5 Меры, обеспечивающие надежность охраны водных ресурсов и воздушного бассейна	143
4.6 Безопасный метод удаления продуктов производства из технологических систем и отдельных видов оборудования.....	144
4.7 Основные потенциальные опасности применяемого оборудования и трубопроводов	145
4.8 Требования безопасности при складировании и хранении	148
сырья, полуфабрикатов и готовой продукции.....	148
4.9 Средства индивидуальной защиты работающих	148
Глава 5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	151
5.1 Потенциальные потребители результатов исследования	151
5.2 Анализ конкурентных технических решений	152
5.3 Диаграмма Исикавы.....	153
5.4 Оценка готовности проекта к коммерциализации	154
5.5 Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования.....	156
5.6 Инициация проекта	156
5.7 Планирование управления научно-техническим проектом	159
5.8 Организационная структура проекта	163
5.9 Матрица ответственности	164
5.10 Оценка сравнительной эффективности исследования.....	165
Заключение	168
ПРИЛОЖЕНИЕ А	169
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	171

Введение

Этан-этиленовая фракция (ЭЭФ) пирогаза содержит около 1 % масс. ацетилена. Содержание ацетилена в товарном этилене для нефтехимического синтеза не должно превышать 0,0001 % масс., так как в противном случае резко снижается качество получаемых из этилена полимеров и ухудшаются условия процесса полимеризации [1].

Широкое применение для очистки газа от примесей углеводородов ряда ацетилена нашли главным образом различные методы сорбции и селективного каталитического гидрирования [2]. При современной тенденции к созданию крупных пиролизных установок последний метод наиболее выгоден и удобен. Преимущества этого метода заключаются в низкой энергоемкости, отсутствии сточных вод и сложного оборудования.

Самыми качественными катализаторами для гидрирования углеводородов ряда ацетилена в ЭЭФ являются катализаторы на основе палладия. При их создании необходимо учитывать два основных свойства – селективность по целевому продукту и активность. Для увеличения активности повышают содержание палладия, но в то же это негативно влияет на селективность. Для увеличения селективности в катализаторы добавляют другие металлы, либо частично дезактивируют при помощи каталитического яда – монооксида углерода. Недостатками подобных катализаторов являются высокая цена, недостаточная селективность, которая в свою очередь сказывается на образовании побочных продуктов. Исходя из этого, делаем вывод, что подбор катализаторов для ведения процесса гидрирования является актуальной задачей.

Глава 1. Исследование эффективности очистки этан-этиленовой фракции процесса пиролиза от ацетиленистых соединений на различных катализаторах.

В нашем исследовании был изучен процесс гидрирования ацетилена в этанэтиленовой фракции пирогаза на импортных катализаторах, наименованных №111 и №222, а также на российском опытном образце №277. Сырье содержало монооксид углерода в количестве 0; 0,002; 0,02 % масс.. Также было изучено влияние СО на процесс гидрирования ацетилена в ЭЭФ.

1.1 Методы исследования

В экспериментах использовали сырье – модельную смесь водорода, углеводородов и монооксида углерода. Состав углеводородов и соотношение водород/ацетилен соответствует потоку, поступающему в промышленный реактор.

Характеристика сырья приведена в табл. 1.

Таблица 1. Состав сырья

№ п/п	Единица измерения	Компонентный состав					
		H ₂	C ₂ H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	CO
1	% об.	1,39	1,09	0,8	11,96	84,75	0
	%масс.	0,095	0,97	0,44	11,46	87,035	0
2	% об.	1,59	1,22	1	16,66	79,528	0,002
	%масс.	0,11	1,09	0,53	16,06	82,268	0,002
3	% об.	1,32	1,13	1,3	16,3	79,9	0,02
	%масс.	0,09	1,03	0,69	15,55	82,62	0,02

Процесс селективного гидрирования исследовали на лабораторном реакторе проточного типа, схема которого приведена на рис. 1. Условия проведения испытаний катализаторов представлены в табл. 2. В реактор (5) загружали 5 см³ катализатора (фракция 2,5 мм). Температуру в реакторе поддерживали автоматически.

Методика эксперимента. Предварительно катализатор высушивали, для чего температуру поднимали со скоростью 1,5 °С/мин до достижения температуры 150 °С. Затем из баллонов (1), (2) через ротаметр (3) и узел смешения (4) начинали подачу газов и устанавливали необходимое объемное соотношение водород : сырье. Расход газов контролировали по ротаметру (3) и газовым часам (7). Отбор проб на анализ проводили после стабилизации рабочего режима каждые 20 мин.

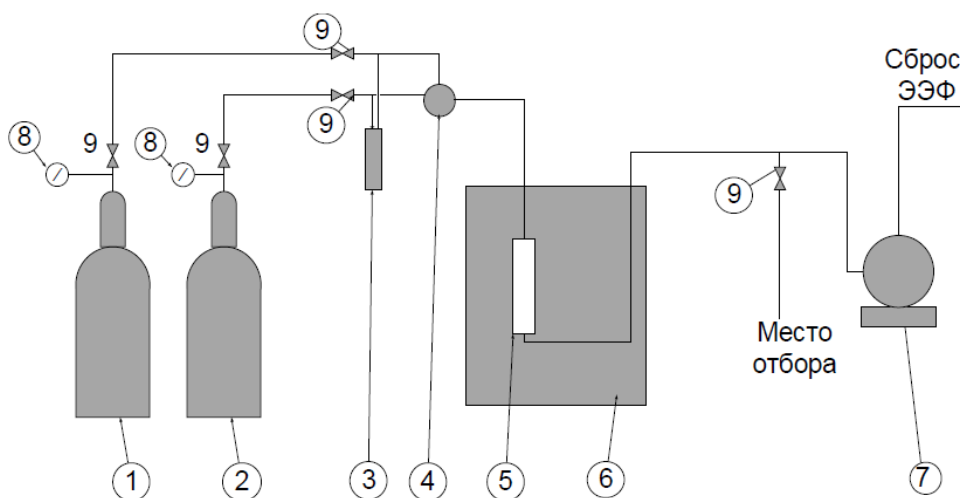


Рис. 1.1 - Схема лабораторной установки гидрирования:

1 – баллон с водородом; 2 – баллон с ЭЭФ; 3 – ротаметр; 4 – узел смешения; 5 – реактор гидрирования; 6 – термостат; 7 – газовые часы; 8 – манометр; 9 – вентиль

Таблица 1.2 - Условия гидрирования ацетилена в ЭЭФ

Параметры	Значение
Температура, С	60-140
Давление, атм	1
Объемная скорость по сырью, ч-1	3000

Состав сырья и продуктов реакции определяли хроматографическим методом по ГОСТ 24975.1-89 и МВИ 2102.529-2006, МВИ 2102.576-2007. Содержание метана, ацетилена, оксидов углерода (II, IV), водорода определяли методом «абсолютной калибровки», а этана и этилена методом «внутренней нормализации». Идентификацию компонентов осуществляли по времени удерживания. В табл. 3 приведены свойства изученных катализаторов. Кроме того были изучены физико-химические свойства отечественных промышленных палладиевых катализаторов гидрирования ПК-50, ПКА-25-1, МА-15, АГК, ФПК-1.

Текстульные характеристики катализаторов были исследованы на ртутном поромере «Porosimeter-2000» по измерению кривых вдавливания ртути. Определение удельной поверхности образцов проводили по методу БЭТ, основанному на измерении равновесной адсорбции азота при $T = 77 \text{ K}$.

Наименование	Показатели	Значение	
1. Импортный промышленный катализатор № 111	1. Внешний вид	Сферы	
	2. Массовая доля драг. металла, % масс.:	- палладий	0,039
		- серебро	0,25
	3. Номинальный размер, мм	2 - 4/3 - 7	
	4. Насыпная плотность, кг/дм ³	0,65 ± 0,05	
5. Прочность на раздавливание, Н	50/80		
2. Импортный промышленный катализатор № 222	1. Внешний вид	Экструдаты	
	2. Массовая доля палладия, % масс.	0,03 - 0,04	
	3. Диаметр гранул, мм	4	
	4. Насыпная плотность, кг/дм ³	0,8 ± 0,1	
	5. Прочность на раздавливание, Н, не менее	220	
3. Опытный катализатор № 277 (НПО «Оксит», Россия)	1. Внешний вид	Кольца	
	2. Массовая доля палладия, % масс.	0,04	
	3. Наружный диаметр, мм	5 - 6	
	4. Толщина стенки, мм	2 ± 0,5	
	5. Высота, мм	5 - 6	

1.2 Исследование физико-химических свойств палладийсодержащих катализаторов гидрирования

Активность и селективность катализаторов гидрирования зависят от их химического состава, а также характеристик пористой структуры. В табл. 4 приведены данные о содержании каталитически активного металла и фазовом составе носителей исследованных Pd-содержащих катализаторов.

Таблица 1.4 - Химический состав катализаторов

Катализатор	Содержание, % масс.		
	Активный компонент	Промотор	Носитель
ПК-50	0,5 Pd	-	γ - Al ₂ O ₃
ПКА-25-1	0,25 Pd	-	γ - Al ₂ O ₃
МА-15	0,5 Pd	-	γ - Al ₂ O ₃
АКГ	0,5 Pd	-	γ - Al ₂ O ₃
ФПК-1	0,5 Pd	-	γ - Al ₂ O ₃
№ 111	0,039 Pd	0,25 Ag	γ - Al ₂ O ₃
№ 222	0,040 Pd	-	α - Al ₂ O ₃
№ 277	0,035 Pd	0,25 Ag; 0,3 \sum Fe, Ti, Ca	α - Al ₂ O ₃

Содержание палладия в исследованных катализаторах составляет 0,035 - 0,5 % масс. В большинстве катализаторов носителем является γ -Al₂O₃, а в катализаторах №№ 222 и 277 – α -Al₂O₃ (корунд). Использование корунда в качестве носителя обеспечивает более высокую прочность и насыпную плотность катализаторов (табл. 4).

Наличие промоторов в современных катализаторах № 111 и № 277 должно придать им высокую селективность в реакции гидрирования ацетиленистых соединений в ЭЭФ. Присутствие в катализаторе № 277 соединений Fe, Ti, Ca свидетельствует о природном происхождении носителя. Скорее всего, при производстве катализатора использовался природный оксид алюминия – кордиерит.

Результаты исследований текстуры катализаторов приведены в табл. 5 и 6. Можно увидеть, что общий объем пор по ртути у Pd-содержащих катализаторов изменяется от 0,53 до 0,84 см³/г (табл. 5). Для катализаторов, содержащих 0,25 -0,5 % масс. Pd, характерна мезопористая структура. Основной объем пор приходится на поры радиусом от 40 до 100А. Удельная поверхность по азоту изменяется от 162 до 236 м²/г. Напротив, современные катализаторы №№ 111; 222; 277 обладают макропористой структурой. Основной объем пор приходится на поры радиусом 500 -10 000 и более А (рис. 2).

Таблица 1.5 - Характеристика текстуры Pd-содержащих катализаторов

Катализатор	Показатели			
	Удельная поверхность, м ² /г		Объем пор по ртути, см ³ /г	Средний радиус пор по ртути, А
	по азоту	по ртути		
ПК-50	183	163,0	0,68	62
ПКА-25-1	236	182,0	0,67	50
МА-15	176	170,0	0,65	50
АКГ	162	141,0	0,50	49
ФПК-1	231	178,0	0,84	39
№ 111	218	19,0	0,67	993
№ 222	13	23,0	0,78	1244
№ 277	2	1,8	0,53	4914

Удельная поверхность по азоту для этих катализаторов составляет 2 - 218 м²/г. Низкая удельная поверхность катализаторов №№ 222; 277 связана с тем, что носителем в этих катализаторах является корунд. Предварительными экспериментами по гидрированию ацетилена в ЭЭФ при использовании указанных выше катализаторов установлено, что, в близких условиях, наибольшая степень гидрирования ацетилена при высокой селективности по этилену достигается на катализаторах №№ 111, 222 и 277. Поэтому, и с учетом низкого содержания в катализаторах Pd, а значит более низкой их цены, дальнейшие исследования процесса гидрирования ацетилена в ЭЭФ проводили на этих катализаторах.

Таблица 1.6 - Распределение объема пор по радиусу

Катализатор	Интервал радиусов пор, Å											
	0 - 40		40 - 100		100 - 500		500 - 1000		1000 - 10000		> 10000	
	$V_{\text{пор}}, \text{см}^3/\text{г}$	%	$V_{\text{пор}}, \text{см}^3/\text{г}$	%	$V_{\text{пор}}, \text{см}^3/\text{г}$	%	$V_{\text{пор}}, \text{см}^3/\text{г}$	%	$V_{\text{пор}}, \text{см}^3/\text{г}$	%	$V_{\text{пор}}, \text{см}^3/\text{г}$	%
Значение												
ПК-50	0,07	9,7	0,43	59,7	0,19	26,4	0,03	4,2	0	0	0	0
ПКА-25-1	0,02	3,0	0,5	74,6	0,08	11,9	0,02	3,0	0,05	7,5	0	0
МА-15	0,08	11,6	0,36	52,2	0,23	33,3	0,02	2,9	0	0	0	0
АКТ	0,09	18,0	0,33	66,0	0,06	12,0	0,02	4,0	0	0	0	0
ФПК-1	0,11	10,4	0,52	52,8	0,04	3,9	0,01	1,0	0,15	15,7	0,16	16,2
№ 111	0	0	0,01	1,6	0,08	11,4	0,34	51,2	0,24	35,8	0	0
№ 222	0	0	0	0	0,12	15,4	0,21	26,9	0,45	57,7	0	0
№ 277	0	0	0	0	0	0	0,01	1,9	0,29	54,7	0,23	43,4

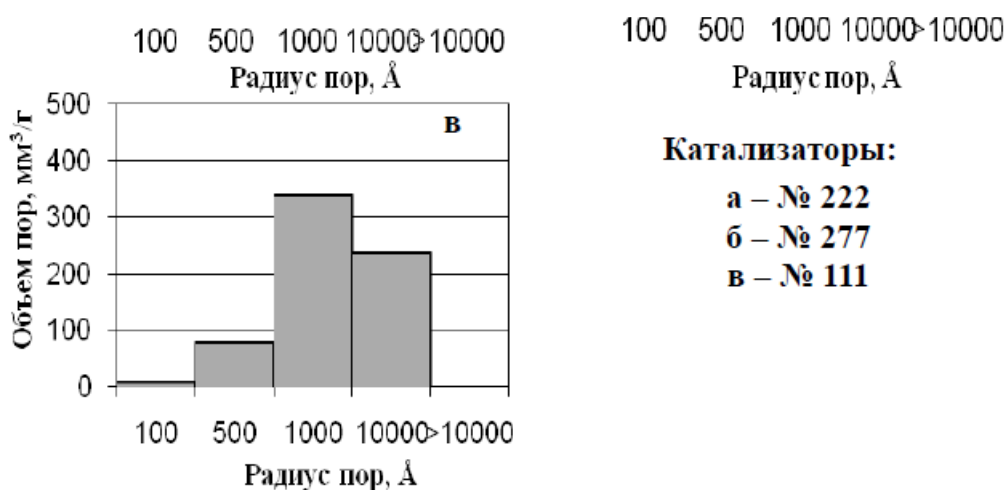


Рис. 1.2 - Распределение объема пор по радиусу пористой структуры катализаторов по данным ртутной порометрии

1.3 Влияние СО на процесс селективного гидрирования ацетилена в ЭЭФ

Адсорбция играет важную роль в гетерогенном катализе. Для того, чтобы химическая реакция произошла реагенты должны быть адсорбированы на поверхности катализатора. Для селективной адсорбции компонентов сырья на катализаторе и с целью увеличения селективности процесса по целевому продукту в сырье часто вводят каталитические яды. Для предотвращения реакции гидрирования этилена в этан на Pd-содержащих катализаторах используют монооксид углерода.

Роль СО заключается в блокировке части активных центров катализатора. Так как относительная скорость адсорбции ацетилена

значительно выше, чем этилена, то введение СО в ЭЭФ повышает селективность по этилену, исключая его гидрирование до этана [3 -7].

В дальнейшем было изучено влияние сырья с содержанием монооксида углерода 0; 0,002; 0,02 % масс. на каталитические свойства трех выбранных катализаторов.

Концентрация СО, равная 0,002 % масс., примерно соответствует содержанию монооксида углерода в смеси ЭЭФ и водорода, поступающей на очистку от ацетилена в ООО «Томскнефтехим».

1.4 Исследование процесса селективного гидрирования ацетилена в ЭЭФ на палладийсодержащих катализаторах

На рис. 3 приведена зависимость конверсии ацетилена в ЭЭФ от температуры реакции. Видно, что с увеличением температуры конверсия ацетилена, в основном возрастает. На катализаторе № 222 конверсия близка к 100 % во всем исследованном интервале температур при использовании сырья, не содержащего СО (рис. 3а). Однако, на сырье с содержанием 0,002 и

На катализаторе № 111 конверсия значительно ниже и достигает 90 % только при 110 °С в отсутствии СО в сырье и не превышает 33 % при содержании СО, равном 0,02 % масс.. При использовании катализатора № 277 и содержании СО в сырье, равном 0 и 0,002 % масс. (рис. 3а; 3б) конверсия ацетилена проходит через максимум в интервале температур 80 - 110 °С, а это ограничивает область его рабочих температур (80 -120 °С). При содержании СО, равном 0,02 % масс. (рис. 3в) до температуры 100 °С конверсия возрастает с 29 до 88 %, а затем рост становится более плавным и стремится к 100 % при 140 °С.

Необходимо отметить, что при очистке ЭЭФ важное значение имеет абсолютная величина остаточного содержания ацетилена (табл. 7).

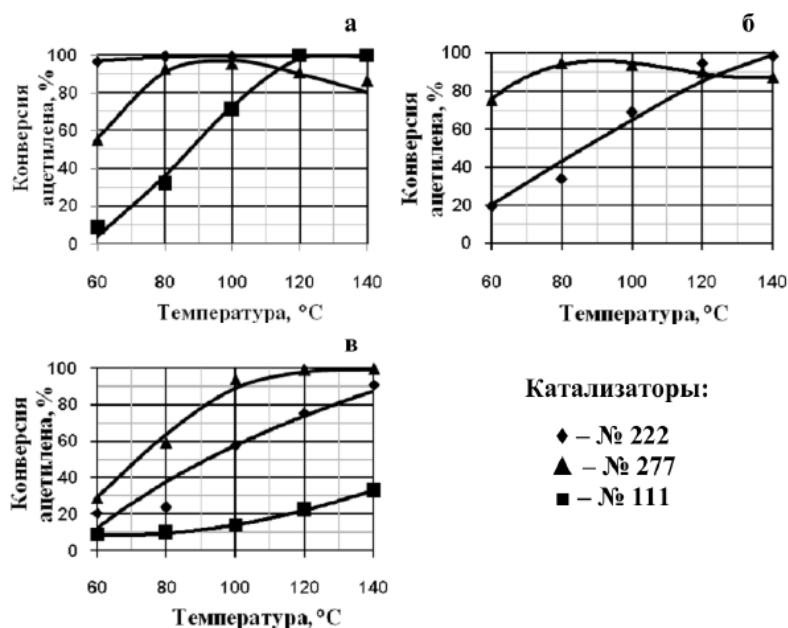


Рис. 1.3 - Влияние температуры на конверсию ацетилена в ЭЭФ.

Содержание СО в сырье: (а) – 0, (б) – 0,002, (в) – 0,02 % масс. Видно, что в отсутствии СО в сырье глубокая очистка достигается на катализаторах № 222 и № 111 уже при температурах выше 60 и 100 °С, соответственно.

Остаточное содержание ацетилена на катализаторе № 277 при всех рассмотренных температурах в десятки раз выше.

При содержании СО в сырье, равном 0,002 % масс., минимальная величина остаточного содержания ацетилена в ЭЭФ достигается при температуре 140 °С на катализаторе № 222 и при 80 °С на катализаторе № 277. Значение этой величины намного ниже нормы содержания ацетилена (0,5 % масс.) для первой ступени промышленного двухстадийного гидрирования ЭЭФ. При содержании СО в сырье, равном 0,02 % масс., с увеличением температуры остаточное содержание ацетилена уменьшается при использовании всех катализаторов. Минимальное значение этой величины достигается при 140 °С. Однако, требуемая для первой ступени промышленной двухступенчатой очистки норма содержания ацетилена достигнута только при использовании катализаторов № 277 и № 222.

Таблица 1.7 - Влияние температуры на величину остаточного содержания ацетилена в очищенной ЭЭФ

Содержание СО в сырье, % масс.	Температура, °С	Катализатор		
		№ 277	№ 111	№ 222
		Содержание ацетилена в очищенной ЭЭФ, % масс.		
0	60	0,430	0,893	0,030
	80	0,070	0,650	0,003
	100	0,040	0,290	0,0028
	120	0,090	0,0026	0,0028
	140	0,130	0,0026	0,0026
0,002	60	0,268	Не определялось	0,876
	80	0,063	Не определялось	0,724
	100	0,072	0,444	0,348
	120	0,116	Не определялось	0,063
	140	0,143	Не определялось	0,018
0,02	60	0,729	0,936	0,817
	80	0,419	0,928	0,783
	100	0,064	0,885	0,434
	120	0,008	0,800	0,255
	140	0,003	0,689	0,094

Ниже нами рассмотрено влияние температуры на изменение количества этилена (прирост этилена) в очищенной ЭЭФ (рис. 4). При отсутствии СО в сырье (рис. 4а) и проведении реакции на катализаторе № 277 прирост этилена с увеличением температуры проходит через максимум, на катализаторе № 222 снижается, а на катализаторе № 111 растет. Это происходит потому, что на катализаторе № 111 при низких температурах конверсия ацетилена мала. Напротив, на катализаторах № 277 и № 222 конверсия ацетилена при низких температурах выше в 5 -10 раз. При содержании СО в сырье, равном 0,002 % масс. (рис. 4б), на катализаторе № 277 с увеличением температуры до 90 °С прирост этилена возрастает, а затем снижается. Напротив, на катализаторе № 222 с увеличением температуры прирост этилена возрастает от 0,18 до 0,76 % масс.

При содержании СО в сырье, равном 0,02 % масс. (рис. 4в), на катализаторе

№ 277 с увеличением температуры до 100 °С прирост этилена возрастает, а затем снижается. При использовании катализаторов № 222 и № 111 с увеличением температуры содержание этилена возрастает. На катализаторе № 111 прирост этилена минимален, что объясняется низкой конверсией ацетилена.

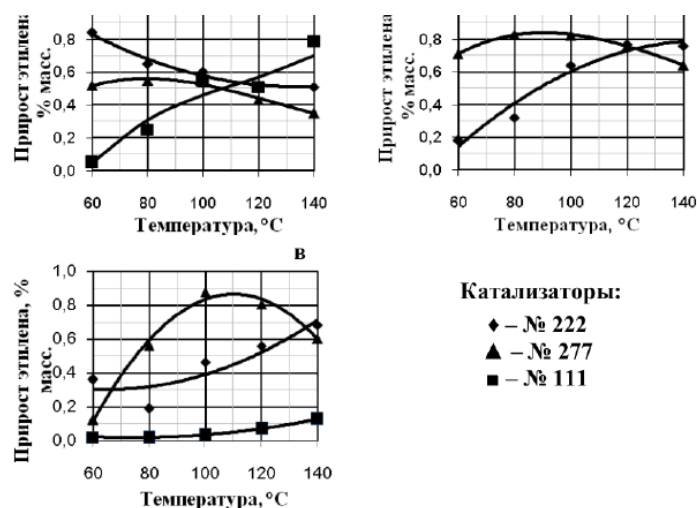


Рис. 1.4 - Влияние температуры на изменение количества этилена в очищенной ЭЭФ.

Содержание СО в сырье: (а) – 0 % масс.; (б) – 0,002 % масс.; (в) – 0,02 % масс. Прирост этана характеризует процесс глубокого или неселективного гидрирования ацетилена, при котором ацетилен гидрируется в этан и параллельно целевой этилен также гидрируется в этан.

На рис. 5 приведена зависимость изменения количества этана от температуры в очищенной ЭЭФ. Видно (рис. 5а), что при использовании катализаторов № 277 и № 111 с увеличением температуры прирост этана возрастает незначительно и не превышает 0,24 % масс.. На катализаторе № 222 прирост этана также растет, но его абсолютные значения в 2 -3 раза выше, что связано с высокой активностью этого катализатора.

При содержании СО в сырье, равном 0,002 % масс. (рис. 5б), на катализаторах № 277 и № 222 с увеличением температуры до 140 °С прирост этана возрастает всего до 0,3 % масс.. При содержании СО в сырье, равном 0,02 % масс., на всех катализаторах с увеличением температуры свыше 90 °С (рис. 5в) прирост этана возрастает.

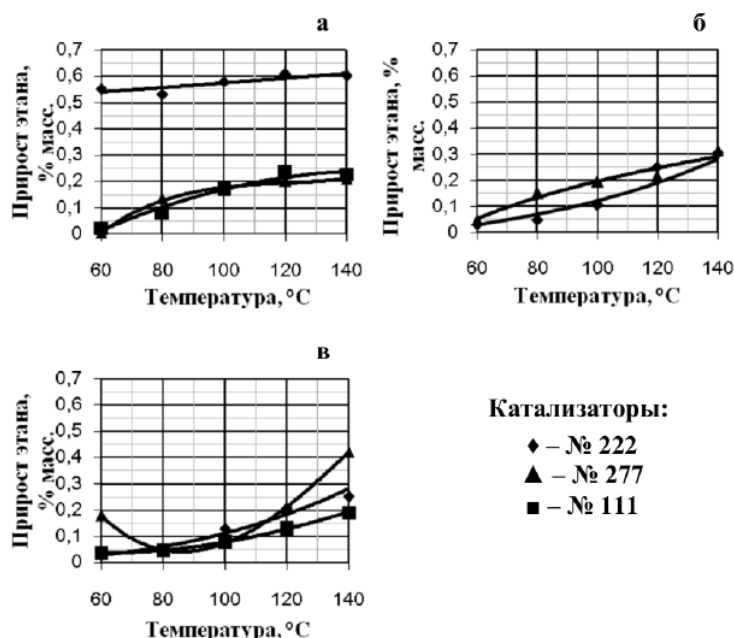


Рис. 1.5 - Влияние температуры на изменение количества этана в очищенной ЭЭФ. Содержание CO в сырье: (а) – 0 % масс.; (б) – 0,002 % масс.; (в) – 0,02 % масс.

Важной характеристикой работы катализатора является его селективность действия по этилену. Скорость целевой реакции гидрирования превращения в этан. На рис. 6 приведена зависимость селективности процесса по этилену от температуры.

Видно (рис. 6а), что селективность реакции гидрирования ацетилена в ЭЭФ на всех трех катализаторах с увеличением температуры изменяется по-разному.

При использовании катализатора № 111 в интервале температур 60 - 140 °C селективность по этилену примерно одинакова. На катализаторе № 222 селективность также стабильна, но ее величина ниже в 1,5 -2 раза, что связано с высокой активностью этого катализатора. Тогда как на катализаторе № 277 селективность самая высокая, но в интервале температур 60 -140 °C снижается от 99 до 74 %. Вероятно это связано с тем, что при увеличении температуры на этом катализаторе начинают образовываться побочные продукты – олигомеры ацетилена и этилена, так называемое «зеленое масло». При содержании CO в сырье, равном 0,002 % масс. (рис. 6б), с увеличением температуры селективность снижается с 86 до 71 % на

катализаторе № 222 и до 67 % на катализаторе № 277. При содержании СО в сырье, равном 0,02 % масс., (рис. 6в) на катализаторе № 222 селективность снижается от 83 до 73 %. На катализаторе № 111 селективность возрастает, но всего до 35 %. Тогда как на катализаторе № 277 селективность самая высокая (96 %) и достигает этого значения уже при температуре 90 °С.

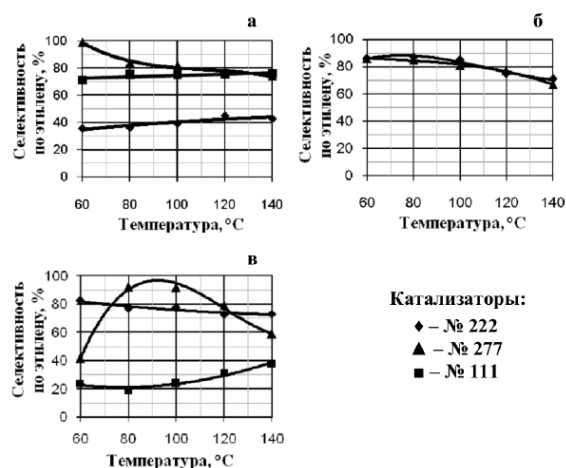


Рис. 1.6 - Влияние температуры на селективность реакции по этилену.

Содержание СО в сырье: (а) – 0 % масс.; (б) – 0,002 % масс.; (в) – 0,02 % масс.

Нами проведено сравнение влияния содержания СО в сырье на процесс селективного гидрирования ацетилена в ЭЭФ при использовании катализаторов № 111, № 222; № 277 и средней температуре процесса 100 °С (табл. 8). Сравнение проводили по пяти основным показателям процесса: конверсии ацетилена (%), приросту этилена и этана (% масс.), селективности по этилену (%), остаточному содержанию ацетилена (% масс.). Катализаторы оценивали по шкале баллов. За лучший по какому-либо из показателей катализатор получал 3 балла, за средний результат 2 балла и за худший – 1 балл. Затем баллы суммировались. Сравнение полученных экспериментальных данных показывает, что при использовании сырья, не содержащего монооксид углерода, наилучшие результаты по активности (конверсия ацетилена), остаточному содержанию ацетилена и приросту этилена достигаются на катализаторах № 222 и № 277, а по селективности и приросту этана – № 277 и № 111. При гидрировании ЭЭФ, содержащей 0,002

Таблица 1.8 - Выбор перспективного катализатора (T = 100 °C)

Катализатор	Показатели						Сумма баллов
	Концентрация CO в ЭЭФ, % масс	Конверсия ацетилена, %	Прирост этилена, % масс.	Прирост этана, % масс.	Селективность по этилену, %	Остаточное содержание ацетилена, % масс.	
№ 111	0	72	0.45	0.17	74	0.2900	8
№ 222		100	0.60	0.58	40	0.0028	11
№ 277		96	0.55	0.18	80	0.0400	11
№ 111	0,0020	62	0.48	0.20	72	0.4440	6
№ 222		68	0.60	0.10	85	0.3480	12
№ 277		94	0.82	0.82	80	0.0720	12
№ 111	0,0200	15	0.03	0.05	25	0.8850	7
№ 222		58	0.40	0.11	75	0.4340	9
№ 277		90	0.85	0.06	95	0.0640	14

Выводы

1. Изучен процесс гидрирования ацетилена в ЭЭФ, физико-химические свойства палладиевых катализаторов. Установлено, что современные катализаторы содержат 0,035-0,040 % масс. активного Pd, а также промотеры – Ag, Fe, Ti, Ca. Носителем является Al₂O₃. Катализаторы обладают макропористой структурой.

2. Установлено, что при использовании сырья, содержащего 0,002 % масс. монооксида углерода, при 100 °C селективность по этилену на катализаторах № 222 и № 277 составляет 85 и 80 % соответственно, а прирост этилена в ЭЭФ 0,6 -0,8 % масс.

3. Таким образом, по своим свойствам катализаторы № 222 и № 277 могут быть рекомендованы для модернизации реакторов на ООО «Томскнефтехим» в процессе селективного гидрирования ацетиленистых соединений в ЭЭФ пиролиза при содержании монооксида углерода в сырье от 0 до 0,002 % масс.

Глава 2. Расчет реактора гидрирования ацетилена

2.1 Описание технологической схемы

Кубовый продукт колонны К-10 поступает в качестве питания на 27-ю тарелку колонны выделения этан-этиленовой фракции (ЭЭФ) К-11.

Режим работы колонны К-11:

Температура верха, поз. TR-5-013-6, °С	(-20)–(-4)
Температура куба, поз. TR-5-013-7, °С	65–85
Температура контрольной тарелки № 11, поз. TRC-5-03, °С	50–70
Давление в кубе колонны, поз. PR-5-0106, МПа (кгс/см ²)	2.5–3.1 (25–31)
Перепад давления по колонне поз. PDR-5-0107, МПа (кгс/см ²),	не более 0.04 (не более 0.4)
Флегмовое число (расчетное)	0.91

Куб колонны К-11 оборудован выносным отключаемым кипятильником Т-47/1-2.

Тепло в куб колонны К-11 подводится за счет подогрева кубового продукта колонны К-11 циркулирующего через трубное пространство кипятильника Т-47/1-2, в межтрубное пространство которого подается пар П4.

Температура контрольной тарелки № 11 колонны К-11 (50–70) °С регулируется регулирующим клапаном поз. TRC-5-03, установленным на линии подачи пара П4 в кипятильник Т-47/1-2.

Образовавшийся конденсат пара П4 из межтрубного пространства кипятильника Т-47/1-2 стекает в сборник конденсата Е-145, откуда через регулирующий клапан поз. LRCA-5-0323 отводится в емкость Е

76.

Для уменьшения образования полимеров в колонне К-11 предусмотрена постоянная подача в линию питания колонны или в кипятильники Т-47/1,2 ингибитора полимеризации АСТRENE ЕС3214А от насоса Н-51а/1 из емкости Е-97.

Кубовый продукт колонны К-11 с температурой (65–85) °С поз. TR-5-013-7, расходом до 70 м³/ч поз. FR-5-0208 через регулирующий клапан регулятора поз. LRCA-5-0319 отводится в качестве питания в колонну К-14 для дальнейшего разделения.

Газообразная ЭЭФ с верха колонны К-11 поступает в трубное пространство дефлегматора Т-46, где охлаждается и частично конденсируется за счет испарения пропилена холодильного цикла, кипящего при температуре (-18) °С в межтрубном пространстве дефлегматора Т-46. Уровень пропилена-хладоагента в дефлегматоре Т-46 поддерживается регулирующим клапаном поз. LRCA-5-0320, установленным на линии подачи пропилена-хладоагента из Е-67 в дефлегматор Т-46 с коррекцией по уровню жидкой ЭЭФ в флегмовой емкости Е-30.

Пары пропилена из межтрубного пространства дефлегматора Т-46 направляются в сепаратор Е-66.

Схемой предусмотрена возможность изменения температуры кипения пропилена-хладоагента до (-37) °С путем вывода паров из дефлегматора Т-46 через емкость Е-65б на всас I-ой ступени компрессора М-6.

Газожидкостная смесь из трубного пространства дефлегматора Т-46 поступает во флегмовую емкость Е-30, откуда жидкая ЭЭФ насосом Н-27/1,2 через клапан регулятора расхода поз. FRC-5-0207 подается на орошение колонны К-11. Для обеспечения постоянной нагрузки насоса Н-27/1,2 в пределах рабочего диапазона (100-300) м³/ч схемой предусмотрен возврат жидкой ЭЭФ от насоса Н-27/1,2 во флегмовую емкость Е-30 через клапан с дистанционным управлением поз. HIC-5-0292.

- минимальном уровне 20 % в емкости Е-30 поз. LRCSA-5-0321;

- падении перепада давления между всасывающим и нагнетательным трубопроводами до значения 0.15 МПа (1.5 кгс/см²) поз.PDIS-5-0108, PDIS-5-0109.

Газообразная ЭЭФ с верха емкости E-30 через электродвигатель поз.ЭВ-05-2 с температурой [(-20)–(-4)] °С поз.TR-5-013-5 и давлением (2.6–3.0) МПа [(26–30) кгс/см²], через регулирующий клапан поз.PRC-5-0151, направляется в межтрубное пространство теплообменников Т-12/2 и Т-12/1, где подогревается до температуры (20–50) °С поз.TR-5-057-2 за счет тепла прогидрированной ЭЭФ, поступающей в трубное пространство теплообменников Т-12/1,2 из холодильника Т-48. Далее ЭЭФ нагревается в трубном пространстве подогревателя Т-50 за счет тепла пара П4, подаваемого в межтрубное пространство подогревателя, и направляется в реактор гидрирования ацетилена Р-2/1,2.

Конденсат пара П4 из подогревателя Т-50 отводится в емкость E-76 через термодинамические конденсатоотводчики.

Гидрирование ацетилена, содержащегося в ЭЭФ, осуществляется водородной фракцией в адиабатическом реакторе Р-2/1,2 на катализаторе марок АПКГС, Olemak -204 (G-58E).

Реактор Р-2/1,2 представляет собой вертикальный цилиндрический аппарат разделенный на три самостоятельные секции. Каждая секция заполняется слоем катализатора высотой в два метра. В работе находится один из реакторов, второй в резерве или на регенерации.

Реакция гидрирования ацетилена протекает при избытке водорода с повышением температуры процесса (процесс гидрирования экзотермический), что ведет к значительному полимерообразованию (образование "зеленого масла"). Массовая доля "зеленого масла" в ЭЭФ после гидрирования составляет (0.01–0.02) % в зависимости от активности катализатора.

Процесс гидрирования ацетилена протекает при температуре (60–150) °С (в зависимости от снижения активности катализатора).

Для регулирования концентрации СО в ЭЭФ, с целью увеличения селективности гидрирования ацетилена в реакторе Р-2/1,2, предусмотрена подача водородной фракции расходом до 125 м³/ч от теплообменника Т-40 через регулирующий клапан поз.FRC-5-0205 в трубопровод подачи ЭЭФ из Е-30 в теплообменник Т-12/2.

Режим работы реактора Р-2/1,2:

Давление, МПа (кгс/см ²), поз.PR-5-0152-1,2	2.4–3.0 (24-30)
Температура на входе, °С, поз.TRC-5-054-1,2	40–120
Температура на выходе, °С, поз.TRA-5-051, TRA-5-052, TRA-5-053	45-150

Водородная фракция из осушителей С-2/1,2 подается в ЭЭФ через отсекаТЕЛЬ поз.ОК-7:

- в поток ЭЭФ перед подогревателем Т-50 через регулирующий клапан поз.FRC-5-0251;

- в поток ЭЭФ, выходящий из I-ой секции реактора Р-2/1,2 перед водяными холодильниками Т-48а/1,2, через регулирующий клапан поз.FRC-5-0252;

- в поток ЭЭФ, выходящий из II-ой секции реактора Р-2/1,2 перед водяными холодильниками Т-48б/1,2, через регулирующий клапан поз.FRC-5-0253.

- в поток ЭЭФ, выходящий из II-ой секции реактора Р-2/1,2 перед водяными холодильниками Т-48б/1,2, через регулирующий клапан поз.FRC-5-0253.

датчика поз. TRC-5-054, установленными на линии подачи пара П4 в подогреватель Т-50 и линии подачи холодной ЭЭФ в реактор гидрирования Р-2/1,2.

Так как процесс гидрирования экзотермический, то после каждой ступени гидрирования ЭЭФ перед входом во II-ю и III-ю секции охлаждается обратной водой 3-ей системы в межтрубном пространстве холодильников Т-48а/1,2 и Т-48б/1,2 соответственно.

Регулирование температуры ЭЭФ на входе во II-ую реакционную секцию осуществляется двумя регулирующими клапанами регуляторов температуры, работающих от одного датчика поз. TRC-5-055, установленными на линии подачи ЭЭФ помимо холодильников Т-48а/1,2 (байпас Т-48а/1,2) и на выходе ЭЭФ из теплообменников Т-48а/1,2.

Регулирование температуры ЭЭФ на входе в III-ю реакционную секцию осуществляется двумя регулирующими клапанами регуляторов температуры, работающих от одного датчика поз. TRC-5-056, установленными на линии подачи ЭЭФ помимо холодильников Т-48б/1,2 (байпас Т-48б/1,2) и на выходе ЭЭФ из теплообменников Т-48б/1,2.

Для предотвращения вывода из строя катализатора и реактора Р-2/1,2 в целом при высоких температурах в его реакционных секциях и снижения расхода ЭЭФ в реактор Р-2/1,2 предусмотрен ряд сигнализаций и блокировок:

- поз. TISA-5-051 I-я реакционная секция сигнализация повышения температуры 180 °С и блокировка повышения температуры 200 °С;
- поз. TISA-5-052 II-я реакционная секция сигнализация повышения температуры 180 °С и блокировка повышения температуры 200 °С;

Гидрированная ЭЭФ из III-ей реакционной секции реактора Р-2/1,2 направляется в межтрубное пространство холодильника Т-48, где охлаждается обратной водой, подаваемой в трубное пространство холодильника. ЭЭФ из межтрубного пространства холодильника Т-48 направляется в трубное пространство теплообменников обратных потоков Т-12/1,2, где охлаждается потоком ЭЭФ, поступающей из емкости Е-30 в межтрубное пространство теплообменников Т-12/1,2.

ЭЭФ, охлажденная до температуры $[(-16)-(0)]$ °С поз. TR-5-058-1 из теплообменника Т-12/2 направляется в колонну К-11А для отмывки от "зеленого масла".

Схемой предусмотрена пусковая линия вывода ЭЭФ из трубного пространства теплообменника Т-12/2 в сепаратор Е-11 на всас I-ой ступени компрессора М-1.

Схемой предусмотрена линия вывода «зеленого масла» в Е-11 на всас I-ой ступени компрессора М-1 с низа I, II, III зоны реактора Р-2/1-2.

Схемой предусмотрены поточные хроматографы для анализа ЭЭФ после Т-50 до Р-2/1,2, после I-ой, II-ой, III-ей зон Р-2/1-2.

Режим работы колонны К-11А:

Температура верха, °С, поз. TR-5-066-2	$(-22)-(-6)$
Температура куба, °С, поз. TR-5-013-8	$(-20)-(-4)$
Давление в колонне, МПа (кгс/см ²)	2.4–2.9 (24–29)

Отмывка ЭЭФ от "зеленого масла" в колонне К-11А осуществляется жидкой ЭЭФ, подаваемой из куба колонны К-13 насосом Н-28а/1-2, через регулирующий клапан поз. FRC-5-0211 на верхнюю тарелку колонны К-11А.

Жидкая ЭЭФ с растворенным в ней "зеленым маслом" из куба колонны К-11А с температурой $[(-20)-(-4)]$ °С поз. TR-5-013-8 и расходом не более 6.0 м³/ч поз. FR-5-0212 отводится через теплообменник Т-40 в сепаратор Е-15 IV-ой ступени нагнетания компрессора М-1 или сепаратор Е-16 на всасе V-ой

ступени компрессора М-1. Уровень в кубе колонны К-11А регулируется регулирующим клапаном поз.LRCA-5-0324.

Отмытая от "зеленого масла" ЭЭФ с верха колонны К-11А направляется на осушку от остаточной влаги в осушителях С-3/1-2. Осушка производится до точки росы не выше $(-60)^\circ\text{C}$ на цеолите марки КА-СО.

Осушенная ЭЭФ из осушителей С-3/1-2 направляется в конденсатор Т-51а.

Схемой предусмотрена возможность подачи газообразной ЭЭФ с верха колонны К-11 и жидкой ЭЭФ из флегмовой емкости Е-30 на подпитку в этиленовый холодильный цикл (в сепаратор ЭХЦ Е-60).

2.2 Технологический расчет реактора гидрирования ацетилена

2.2.1 Материальный баланс реактора

Материальный баланс установки рассчитывается исходя из мощности установки по производству этилена в тыс.тонн\год, которая составляет 300 тыс.тонн\год.

На основании годовой производительности определяется часовая производительность установки по этилену.

$$G'ф = Gф * 1000 * 1000 / Tэф, \text{ кг/ч};$$

Где $G'ф$ – часовая производительность, кг/ч;

$Gф$ – мощность установки, тыс.тонн/год;

$Tэф$ – эффективный фонд рабочего времени, ч

$$G'ф = 330 * 1000 * 1000 / 8000 = 41250 \text{ кг/ч.}$$

В реакторе протекают следующие реакции:



По этилену:

$$G_{44} \cdot 0 + G_{47} \cdot X_{47} \cdot M_{\text{эт/Мац-Ср}} = G_{49} \cdot X_{49}$$

По этану:

$$G_{44} \cdot 0 + G_{47} \cdot X_{47} \cdot M_{\text{этан/Мэтил-Ср}} = G_{49} \cdot X_{49}$$

$$G_{44} + G_{47} = G_{49}$$

$$G_{47} \cdot 0.7926 + G_{47} \cdot 0.0112 \cdot 28/26 \cdot \text{Ср} = 45933,13$$

$$G_{47} \cdot 0.195 + 1.0714 \cdot \text{Ср} = 12237,55$$

$$G_{47} (0,195 + 1,0714 \cdot 0,8047) = 12237,55 + 45933,13 \cdot 1,0714$$

$$G_{47} \cdot 1,0572 = 61451,36$$

$$G_{47} = 58128,97 \text{ кг/ч}$$

$$\text{Ср} = 58128,97 \cdot 0.8047 - 45933.13 = 843.25 \text{ кг/ч}$$

$$G_{44} = G_{49} - G_{47} = 58357.43 - 58128.97 = 228.46 \text{ кг/ч}$$

Таблица 2.1 Материальный баланс реактора

компоненты	Приход				Расход	
	G44		G47		G49	
	кг/ч	%	кг/ч	%	кг/ч	%
Водород	111,12	48,64				
Метан	117,34	51,36	40,69	0,07	157,57	0,27
Ацетилен			651,94	1,12		
Этилен			46073,02	79,26	45933,13	78,71
Этан			11335,15	19,50	12237,55	20,97
Пропилен			29,06	0,05	29,18	0,05
ИТОГО	228,46	100,00	58129,86	100,00	58357,43	100,00

Целью расчетов контактного аппарата является определение:

- Основных геометрических размеров аппарата;
- Высоты слоя катализатора
- Необходимой поверхности теплообменника.

Все расчеты будем проводить при следующих исходных данных:

Температура на входе в аппарат T1, 80 С

Температура на выходе из аппарата T2, 140 С

Рабочее давление, P = 2.8 МПа

Таблица 2.2 – Состав потока на входе в реактор

Элемент	кг/ч	масс.доли	кмоль/ч	мол.дол
Водород	111,12	0,001904	55,01	0,02602
Метан	117,34	0,002709	9,88	0,00467
Ацетилен	651,94	0,011156	25,04	0,01185
Этилен	46073,02	0,789497	1645,465	0,7784
Этан	11335,15	0,1942366	377,838	0,1787
Пропилен	29,06	0,000498	0,6919	0,00033
ИТОГО	58317,63	1,00	2113,92	1,00

Диаметр аппарата определим по формуле:

$$D = \sqrt{\frac{4 * V_{ex}}{w_{ex} * \pi * 3600}};$$

V_{ex} - объемный расход парогазовой смеси, м³/ч

w_{ex} - линейная скорость потока на входе в реактор (0.3 м/с)

$$V_{ex} = \frac{g_{ex} * R * T}{P} = \frac{2113.92 * 8314 * 353}{280000} = 22157,2 \text{ м}^3/\text{ч}$$

$$D = \sqrt{\frac{4 * 22157,2}{0.3 * 3.14 * 3600}} = 1.97 \text{ м}$$

Принимаем стандартный диаметр D = 2м.

Скорость химического превращения ацетилена в этилен зависит от внешней диффузии реагентов к зернам катализатора.

Нагрузка на 1м² реакционного сечения в этом случае составит по этилену :

$$G_{C_2H_4}^f = \frac{G_{C_2H_4}^f}{\frac{\pi * D^2}{4}} = \frac{46073.02}{3.14 / 4 * 4} = 14672.94 \text{ кг/м}^2 * \text{ч}$$

Аналогично находим нагрузку для каждого компонента из смеси.

Таблица 2.3 - Нагрузка на 1м² реакционного сечения

Элемент	кг/(м ² *ч)	мас.доли	кмоль/(м ² *ч)	МОЛ. ДОЛИ.
---------	------------------------	----------	---------------------------	------------

Водород	35,389	0,001904	17,69	0,02602
Метан	50,36	0,002709	3,147	0,004673
Ацетилен	207,34	0,011156	7,97	0,011845
Этилен	14672,94	0,789497	524,03	0,778395
Этан	3606,9	0,19423662	120,33	0,1787
Пропилен	9,25	0,00049797	0,22	0,000327
ИТОГО	18582,18	1,00	673,387	1,00

2.2.2 Высота слоя катализатора

Высота слоя катализатора определяется из условия

$$H = \text{ВЕП} * Z$$

Где ВЕП – высота единиц переноса, м

Z – число единиц переноса.

$$\text{ВЕП} = \frac{Sc^{2/3}}{\kappa_G * a_v}$$

Где Sc – критерий Шмидта

$$Sc = \frac{\mu}{\rho * D_A^I}$$

μ, ρ – вязкость и плотность газового потока (Па*с, кг/м³)

D_A^I - эффективный коэф. Диффузии, м²/с

a_v - удельная поверхность катализатора

κ_G - коэф. Массопередачи, кмоль/(м²*Па*с)

При $Re < 350$

$$\kappa_G = 1,8215 * Re^{-0.51}$$

При $Re > 350$

$$\kappa_G = 0.9891 * Re^{-0.49}$$

Где Re – критерий Рейнольдса

$$Re = \frac{G_{ex} * d_{экв}}{3600 * \mu}$$

Где $d_{экв} = \frac{4 * \varepsilon}{a_v}$

ε - порозность слоя (0.38)

Число единиц переноса определяется выражением:

$$z = \eta_{сл} * \ln\left(\frac{\eta_{ex} * (1 + \delta * \eta_{вых})}{\eta_{вых} * (1 + \delta * \eta_{ex})}\right)$$

Где $\eta_{сл}$ - среднее логарифмическое сумм $(1 + \delta * \eta_{C_2H_2})$ и $(1 + \delta * \eta_i)$

η_i - концентрация ацетилена на поверхности контакта катализатора;

$\eta_{вых}, \eta_{вх}$ - мольные доли ацетилена в потоке на входе и выходе;

δ - изменение числа молей на 1 моль реагирующего ацетилена.

По данным мат.баланса установки найдем:

$$\eta_{ex} = 0,01184. \quad \eta_{вых} = 0$$

$$\delta = \frac{\sum v_i^{вых} - v_i^{вх}}{v_{C_2H_2}} = \frac{1-2}{1} = -1$$

Концентрация ацетилена на поверхности катализатора определяется соотношением

$$\eta_i = \frac{P_i}{P}$$

Где P_i - парциальное давление ацетилена на поверхности катализатора, Па;

P – общее давление на входе в реактор, Па

В свою очередь P_i можно найти из соотношения:

$$P_i = \frac{G_{ex}}{M * k_G * a_v * \text{ВЕП}}$$

Средняя молекулярная масса потока на входе в реактор:

$$\bar{M} = \sum_{i=1}^n \eta_i * M_i$$

Где M_i - молекулярная масса i -го компонента в потоке.

η_i - мольная доля i -го компонента.

$$\bar{M} = 0,02602*2,02 + 0,004673*16,05 + 0,011845*26,04 + 0,778395*28,6 + 0,1787*30,08 + 0,000327*42,09 = 27,667 \text{ кг/кмоль}$$

Средняя плотность потока:

$$\rho_{см} = \sum_{i=1}^n \eta_i * \rho_i$$

Где $\rho_i = \rho_0 * \frac{T_0 * P}{T * P_0} = \frac{M_i * T_0 * P}{22.4 * T * P_0}$ плотность i -го компонента в потоке.

При температуре на входе в реактор $T = 353 \text{ К}$ и рабочем давлении на входе в реактор $P = 2,8 \text{ МПа}$ найдем:

$$\begin{aligned} \rho_{H_2} &= \frac{2,02}{22,4} * \frac{273 * 2,8}{353 * 0,1} = 1,95 \text{ кг / м}^3 & \rho_{C_3H_6} &= 40,69 \text{ кг / м}^3 \\ \rho_{CH_4} &= 15,16 \text{ кг / м}^3 & \rho_{C_2H_6} &= 29,08 \text{ кг / м}^3 \\ \rho_{C_2H_2} &= 25,17 \text{ кг / м}^3 & \rho_{C_2H_4} &= 27,13 \text{ кг / м}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho_{см} &= 0,02602*1,95 + 0,004673*15,16 + 0,011845*25,17 + 0,778395*27,13 + 0,1787*28,08 \\ &+ 0,000327*40,69 = 26,747 \text{ кг/м}^3 \end{aligned}$$

Таблица 2.4 – состав потока на выходе из реактора

Элемент	кг/ч	масс.доли	кмоль/ч	мол.доли
Водород	0	0	0	0
Метан	157,57	0,0027	9,81	0,004775
Ацетилен	0	0	0	0
Этилен	45933,13	0,78771	1636,96	0,769685
Этан	12237,55	0,02097	406,83	0,19804
Пропилен	29,18	0,0005	0,69	0,00034
ИТОГО	58357,43	1,0	2054,29	1,0

Средняя молекулярная масса потока на выходе из реактора:

$$\bar{M}_{\text{вых}} = 0 \cdot 2,02 + 0,004775 \cdot 16,05 + 0,79685 \cdot 28,06 + 0,19804 \cdot 30,08 + 0,00034 \cdot 42,09 = 28,41 \text{ кг/моль}$$

При температуре на выходе из реактора $T = 414\text{K}$ и рабочем давлении $P = 2.8$ МПа:

$$\rho_{\text{H}_2} = 1,67 \text{ кг/м}^3$$

$$\rho_{\text{CH}_4} = 13,23 \text{ кг/м}^3$$

$$\rho_{\text{C}_2\text{H}_4} = 23,13 \text{ кг/м}^3$$

$$\rho_{\text{C}_2\text{H}_6} = 24,79 \text{ кг/м}^3$$

$$\rho_{\text{C}_3\text{H}_6} = 34,69 \text{ кг/м}^3$$

$$\rho_{\text{см}}^{\text{вых}} = 13,23 \cdot 0,004775 + 23,13 \cdot 0,79685 + 24,79 \cdot 0,19804 + 34,69 \cdot 0,00034 = 23,41 \text{ кг/м}^3$$

Коэф. диффузии D_i^A для ацетилен, диффундирующего через смесь газов:

$$D_{\text{C}_2\text{H}_2}^I = \frac{1 - \eta_{\text{C}_2\text{H}_2}}{\frac{\eta_{\text{H}_2}}{D_{\text{H}_2}^{\text{H}_2}} + \frac{\eta_{\text{CH}_4}}{D_{\text{C}_2\text{H}_2}^{\text{CH}_4}} + \frac{\eta_{\text{C}_2\text{H}_4}}{D_{\text{C}_2\text{H}_2}^{\text{C}_2\text{H}_4}} + \frac{\eta_{\text{C}_2\text{H}_6}}{D_{\text{C}_2\text{H}_2}^{\text{C}_2\text{H}_6}} + \frac{\eta_{\text{C}_3\text{H}_6}}{D_{\text{C}_2\text{H}_2}^{\text{C}_3\text{H}_6}}}$$

Где η_i - мольные доли компонентов в потоке

D_i^j - коэф. Диффузии для бинарных смесей. Для диффузии газа i в газ j по уравнению Максвелла – Джиллиленда имеем:

$$D_i^j = 4.3 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{3600 \cdot T^{3/2}}{P \cdot (v_i^{1/3} + v_j^{1/3})^2} \cdot \sqrt{\frac{1}{M_i} + \frac{1}{M_j}}$$

Где v_i, v_j - мольные объемы газов

P – общее давление, атм

Таблица 2.5 – мольные объемы газов, м³/кмоль

вещество	мольные объемы	Вещество	мольные объемы
H ₂	14,3	C ₂ H ₄	49
CH ₄	35	C ₂ H ₆	56
C ₂ H ₂	42	C ₃ H ₆	70

Таблица 2.6 - Результаты расчета коэффициентов диффузии представлены в табл.

Компонент	На входе, м2/с	На выходе, м2/с
H2	2,48*10-8	2,7*10-8
CH4	7,74*10-9	8,64*10-9
C2H2	6,24*10-9	6,97*10-9
C2H4	5,81*10-9	6,49*10-9
C2H6	5,45*10-9	6,09*10-9
C3H6	4,63*10-9	5,19*10-9

Для входного потока получаем $D_{C_2H_4}^I = 5.81 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2 / \text{с}$

Для выходящего потока $D_{C_2H_4}^I = 6,49 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2 / \text{с}$

Средняя вязкость газовой смеси:

$$\mu_{см} = \frac{\mu_{H_2}}{1 + \frac{1,385 * \mu_{H_2}}{\mu_{H_2} * \rho_{H_2}} * \left(\frac{\eta_{CH_4}}{D_{H_2}^{CH_4}} + \frac{\eta_{C_2H_4}}{D_{H_2}^{C_2H_4}} + \frac{\eta_{C_2H_6}}{D_{H_2}^{C_2H_6}} + \frac{\eta_{C_3H_6}}{D_{H_2}^{C_3H_6}} \right)}$$

Значения вязкостей компонентов газовой смеси можно вычислить по соотношению, основанному на использовании принципа соответственных состояний:

$$\mu_i = \frac{10^{-7} * 3600 * \mu_c * T_r}{(1 + 0.36 * T_r * (T_r - 1) * (1 + \frac{4}{T_c}))^{1/6}}$$

Где T_r - приведенная температура, выражаемая в виде доли от критической

$$T_r = \frac{T}{T_c}$$

μ_c - вязкость при критических параметрах:

Для органических соединений:

$$\mu_c = \frac{M^{1/2} * T_c}{\sum_{i=1}^m n_i * C_i}$$

T_c - критическая температура, К

n_i - число атомных групп i -го типа

C_i – групповые составляющие для определения μ_c

Для простых газов можно использовать выражение

Для потока на входе в реактор $\mu_{cm} = 10,03 \cdot 10^{-6}$ Па*с, а для потока на выходе из реактора $\mu_{cm} = 9,21 \cdot 10^{-6}$ Па*с

Удельная поверхность катализатора по производственным данным $av = 18$ м²/м³, тогда

$$d_{эkv} = \frac{4 \cdot 0,38}{18} = 0,084 \text{ м}$$

Для входного потока

$$Re_{ex} = \frac{29039,372 \cdot 0,084}{3600 \cdot 10,03 \cdot 10^{-6}} = 67556$$

$$Sc_{ex} = \frac{10,03 \cdot 10^{-6}}{26,747 \cdot 4,78 \cdot 10^{-9}} = 78,45$$

$$k_G^{ax} = 0,9891 \cdot 67556^{-0,41} = 0,0118 \text{ кмоль} / (\text{м}^2 \cdot \text{Па} \cdot \text{с})$$

Для выходного потока:

$$Re_{ex} = \frac{29039,372 \cdot 0,084}{3600 \cdot 9,21 \cdot 10^{-6}} = 73570$$

$$Sc_{ex} = \frac{9,21 \cdot 10^{-6}}{23,415 \cdot 5,19 \cdot 10^{-9}} = 75,79$$

$$k_G^{ax} = 0,9891 \cdot 73570^{-0,41} = 0,0114 \text{ кмоль} / (\text{м}^2 \cdot \text{Па} \cdot \text{с})$$

Высота единиц переноса:

$$\text{ВЕП} = \frac{\left(\frac{78,45^{2/3}}{0,0118 \cdot 18} + \frac{75,79^{2/3}}{0,0114 \cdot 18} \right)}{2} = 3,61$$

При:

$$P_i^{ax} = \frac{58357,43}{26,667 \cdot 0,0118 \cdot 18 \cdot 99,36 \cdot 3600} = 0,0277 \text{ атм}$$

$$P_i^{ablx} = \frac{58357,43}{28,41 \cdot 0,0114 \cdot 18 \cdot 99,36 \cdot 3600} = 0,02798 \text{ атм}$$

$$\eta_i^{ex} = \frac{0.0277}{28} = 9.89 * 10^{-4}$$

$$\eta_i^{ex} = \frac{0.02798}{28} = 9.99 * 10^{-4}$$

$$\eta_{cl}^{ex} = \frac{(1 - 1 * 0,01184) - (1 - 1 * 6,49 * 10^{-4})}{\ln\left(\frac{1 - 1 * 0,01184}{1 - 1 * 6,49 * 10^{-4}}\right)} = 0.9937$$

$$\eta_{cl}^{ex} = \frac{(1 - 1 * 0) - (1 - 1 * 5,81 * 10^{-4})}{\ln\left(\frac{1 - 1 * 0}{1 - 1 * 5,81 * 10^{-4}}\right)} = 0.9997$$

Тогда, коэффициент, учитывающий изменение состава продуктов на границах газовой пленки будет равен:

$$\eta_{cl} = \frac{\eta_{cl}^{ex} - \eta_{cl}^{ex}}{\ln\left(\frac{\eta_{cl}^{ex}}{\eta_{cl}^{ex}}\right)} = \frac{0.9937 - 0.9997}{\ln\left(\frac{0.9937}{0.9997}\right)} = 0.9967$$

Количество единиц переноса:

$$z = 0.9967 * \ln\left(\frac{0.011845 * (1 - 1 * 0.001)}{(0.001 * (1 * 0.011845))}\right) = 0.55$$

Высота слоя катализатора: $h_k = 3.61 * 0.55 = 2m$

Необходимый объем катализатора: $V_k = S * h_k$, где $S = \frac{\pi * D^2}{4}$ - площадь поперечного сечения реактора.

$$V_k = 1.98 * \frac{3.14 * 2 * 2}{4} = 6.5 м^3$$

Объемный расход контактного газа на выходе из реактора составит:

$$V_{вых} = \frac{g_{вых} * R * T}{P} = \frac{2054.29 * 8.314 * 414 * 1000}{2.8 * 10^6} = 2525.3 м^3 / ч$$

Линейная скорость на выходе из реактора

$$\omega_{вых} = \frac{V_{вых}}{S} = \frac{2525.3 * 4}{3.14 * 2 * 2 * 3600} = 0.22 м / с$$

Среднее значение линейной скорости газового потока в сечении аппарата:

$$\omega = \frac{\omega_{\text{вх}} + \omega_{\text{вых}}}{2} = \frac{0,3 + 0,22}{2} = 0,26 \text{ м / с ,}$$

Что соответствует оптимальному технологическому режиму.

Среднее время контакта составит

$$\tau_{\text{ср}} = \frac{V_k}{V} = 6.5 * 3600 * \frac{2}{2525.3 + 2215.72} = 22.8 \text{ с}$$

2.2.3 Тепловой расчет

Целью теплового расчета секции контактирования является уточнение температуры контактных газов на выходе из реактора.

Уравнение теплового баланса в общем виде:

$$Q_1 + Q_2 = Q_3 + Q_{\text{пот}}$$

Где Q1-тепловой поток исходной смеси, кВт; Q2-теплота, выделяющаяся за счет хим.реакции,кВт; Q3-тепловой поток контактного газа, кВт; Qпот – теплопотери в окр.среде, кВт.

Для определения значений Q1, Q3 необходимо рассчитать средние молярные теплоемкости газовой смеси при средней температуре T_{вх}=353К и контактного газа при средней температуре T_{вых} = 414 К.

Теплоемкости индивидуальных соединений можно вычислить по формуле:

$$c_i^0 = A + BT + CT^2 + DT^3$$

Таблица 2.7 - Константы уравнения

Вещество	A	B	C	D
Водород	6,483	2,22E-03	-3,30E-06	1,83E-09
Метан	4,598	1,25E-02	2,86E-	-2,70E-09

			06	
Ацетилен	5,6886	0,020344	-1,38E-05	3,73E-09
Этилен	1,0532	0,036714	-1,91E-05	3,90E-09
Этан	1,2174	0,042866	-1,70E-05	2,27E-09
Пропилен	0,886	0,056013	-2,77E-05	5,27E-09

Таблица 2.8 - Расчет средней молярной теплоемкости газовой смеси

Вещество	Молярная доля компонента (1)	Средняя молярная теплоемкость компонента, (2) Дж/моль*К	1*2
Водород	0,026020	29,00	0,750
Метан	0,004673	37,55	0,175
Ацетилен	0,011845	46,39	0,550
Этилен	0,778395	47,38	36,880
Этан	0,178700	57,34	10,250
Пропилен	0,000327	69,81	0,021
Итого	1,00		48,63

Таблица 2.9 - Расчет средней молярно теплоемкости контактного газа

Вещество	Молярная доля компонента (1)	Средняя молярная теплоемкость компонента, (2) Дж/моль*К	1*2
Водород	0	29,14	0,0000
Метан	0,00477	40,93	0,1952
Ацетилен	0	49,35	0,0000
Этилен	0,79685	53,51	42,6394
Этан	0,19804	65,24	12,9201
Пропилен	0,00034	79,36	0,0270
Итого	1		55,726

Находим тепловой поток газовой смеси :

$$Q_1 = \frac{g_1 * \bar{c}_1 * t_1}{3600}$$

\bar{c}_1 - средняя молярная теплоемкость газовой смеси, Дж/моль*К.

$$Q_1 = \frac{2113.92 * 48.63 * 80}{3600} = 2284.44 \text{ кВт}$$

Для определения Q_2 необходимо знать теплоты основных протекающих реакций. Примем их согласно уравнениям, представленным в материальном балансе.



$$Q_p = G_{C_2H_2}^P (-VH_p^1) + G_{C_2H_4}^P (-VH_p^2)$$

$$VH_p = \sum VH_{кон.в.в}^0 - \sum VH_{исх.в.в}^0$$

$$VH_p^1 = VH_{C_2H_4}^0 - (VH_{C_2H_2}^0 + 0)$$

$$VH_p^2 = VH_{C_2H_6}^0 - (VH_{C_2H_4}^0 + 0)$$

$$VH_p^1 = 50,66 - 226,6 = -175,94$$

$$VH_p^2 = -87,34 - 50,66 = -138$$

$$g_{C_2H_2} = 25,04 \text{ кмоль / ч}$$

$$g_{C_2H_4} = 1645,465 - 1636,96 = 8,5 \text{ кмоль / ч}$$

Находим Q_2 по формуле:

$$Q_2 = \frac{1000 * \sum (g_j^i * (-\Delta H_i))}{3600}$$

Где g_j^i - расход j-го компонента в i-той реакции, кмоль/ч

ΔH_i - тепловой эффект i-той реакции, кДж/моль

Получаем

$$Q_2 = \frac{1000}{3600} * (25,04 * 175,4 + 8,5 * 138) = 1545,84 \text{ кВт}$$

Потери тепла изолированным оборудованием:

$$Q_{пот} = \alpha_u * F_u * (t_{нар} - t_{о.с.})$$

α_u - суммарный коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием и конвекцией.

Исходя из требований техники безопасности, температура наружной поверхности не должна превышать 45С.

Для реакторов, при температуре наружной поверхности до 350 С

$$\alpha_u = 9,3 + 0,058 * t_{нар} = 9,3 + 0,058 * 45 = 11,92 \text{ Вт}/(\text{м}^2 * \text{К})$$

Толщина изоляции из условия

$$t_{вн} = t_{нар} + \frac{\alpha_u (t_{нар} - t_{в}) \delta_u}{\lambda_u}$$

δ_u, λ_u - толщина изоляции и теплопроводность.

$$\delta_u \frac{\lambda_u (t_{вн} - t_{нар})}{\alpha_u * (t_{нар} - t_{о.с.})} = \frac{0,28 * (140 - 45)}{11,91 * (45 - 20)} \approx 0,12 \text{ м}$$

Тогда

$$F_u = \pi * D_u * H_u + F_{кр} = 3,14 * 2 * 13,6 + 4,71 = 90,12 \text{ м}^2$$

$$Q_{ном} = 11,91 * 90,12 * (45 - 20) * 10^{-3} = 26,83 \text{ кВт}$$

Определяем тепловой поток контактного газа:

$$Q_3 = Q_1 + Q_2 - Q_{ном} = 1545,8 + 2284,44 - 26,83 = 3803,41 \text{ кВт}$$

Для теплового потока контактного газа имеем формулу:

$$Q_3 = \frac{g_{вых} * \bar{C}_{вых} * t_{вых}^u}{3600}$$

Где $\bar{C}_{вых}$ - средняя молярная теплоемкость контактного газа, Дж/моль*К

$t_{вых}^u$ - истинная температура контактного газа.

$$t_{вых}^u = \frac{3600 * Q_3}{g_{вых} * \bar{C}_{вых}} = \frac{3600 * 3803,88}{2054,29 * 55,726} = 120,06^\circ \text{С}$$

Таблица 2.9 - Тепловой баланс секции контактирования

Приход			Расход		
Тепловой поток	Значение, кВт	Доля, %	Тепловой поток	Значение, кВт	Доля, %
Теловой поток газовой смеси	2284,44	59,6	Тепловой поток контактного газа	3803,41	99,67
Теплота, выделяющаяся за счет реакций	1545,8	40,4	Теплопотери в окр.среду	26,83	0,33
Всего	3830,24	100		3830,24	100

2.2.4 Гидравлический расчет

Основное гидравлическое сопротивление реактора гидрирования сосредоточено в слое катализатора.

Гидравлическое сопротивление слоя насадки:

$$\Delta P = \frac{\lambda N a_v \rho w_0^2}{8 \varepsilon^3}$$

Где λ - коэффициент трения;

N - высота слоя катализатора;

a_v - удельная поверхность = 18 м²/м;

ρ - средняя плотность газового потока в реакторе = 25,08 кг/м³;

w_0^2 - фиктивная скорость = 0,3 м/с;

ε - порозность = 0,38.

Найдем критерий Рейнольдса

$$Re = \frac{4 * w_0 * \rho}{a_v * \mu} = \frac{4 * 0.3 * 25.08}{18 * 9.62 * 10^{-6}} = 173805$$

Коэффициент трения:

$$\lambda = \frac{133}{\text{Re}} + 2.34 = \frac{133}{173805} + 2.34 = 2.341$$

Находим гидравлическое сопротивление :

$$\Delta P = \frac{2.341 * 4.8 * 2 * 18 * 25.08 * 0.3^2}{8 * 0.38^3} = 395.2 \text{ Па}$$

$$P_{\text{ex}} = 2,8 \text{ МПа}$$

$$P_{\text{вых}} + \Delta P \leq P_{\text{ex}}$$

$$P_{\text{вых}} \leq 2,8 - 0,395 \leq 2,405 \text{ МПа}$$

2.3 Конструктивно - механический расчет реактора гидрирования ацетилен

2.3.1 Определение расчетных параметров

Исходные данные:

$P_{\text{расч}} = 2,8$ - рабочее давление, МПа

$D_{\text{вн}} = 2000$ - внутренний диаметр, мм

$H = 14500$ - высота аппарата, мм

$T_{\text{расч}} = 420$ - расчетная температура, С

$\varphi = 1$ - коэффициент прочности сварного шва

$c = 3$ - суммарная прибавка, мм

$\rho_{\text{воды}} = 1000$ - плотность воды, кг/м³

Для определения допускаемых напряжений и модуля упругости воспользуемся ГОСТ Р 52857.1 – 2007, [7].

Материал стали 09Г2С

$$t := (20 \ 100 \ 150 \ 200 \ 250 \ 300 \ 350 \ 375 \ 400 \ 420)^T$$

$$\sigma := (183 \ 160 \ 154 \ 148 \ 145 \ 134 \ 123 \ 116 \ 105 \ 92)^T$$

$$E := (1.99 \ 1.91 \ 1.86 \ 1.81 \ 1.76 \ 1.71 \ 1.64 \ 1.55 \ 1.44 \ 1.35)^T$$

Допускаемое напряжение $\sigma_{tR} := \text{Floor}(\text{linterp}(t, \sigma, T_{\text{расч}}), 0.5) = 92 \text{ МПа}$

Модуль упругости $E := \text{linterp}(t, E, T_{\text{расч}}) \cdot 10^5 = 1.35 \times 10^5$

Допускаемое напряжение при гидравлических испытаниях определяется по пределу текучести для выбранной стали при $t=20 \text{ С}$ взятому из ГОСТ Р 52857.1 – 2007, [1]:

$$\sigma_H := \text{Floor}\left(\frac{R_{m20}}{1.1}, 0.5\right) = 254.5 \text{ МПа}$$

Расчетная температура T_R – это температура для определения физико-механических характеристик конструкционного материала и допускаемых напряжений. Она определяется на основании теплового расчета или результатов испытаний. Если при эксплуатации температура элемента аппарата может повыситься до температуры, соприкасающейся с ним среды, расчетная температура принимается равной рабочей, но не менее $20 \text{ }^\circ\text{С}$. Проектируемый аппарат снабжен изоляцией препятствующей охлаждению или нагреванию элементов аппаратов внешней средой.

Расчетная температура $T_p = 420 \text{ }^\circ\text{С}$.

Рабочее давление P – максимальное избыточное давление среды в аппарате при нормальном протекании технологического процесса без учета допускаемого кратковременного повышения давления во время действия предохранительного устройства.

Расчетное давление P_R – максимальное допускаемое рабочее давление, на которое производится расчет на прочность и устойчивость элементов аппарата при максимальной их температуре. Как правило, расчетное давление может равняться рабочему давлению.

Расчетное давление может быть выше рабочего в следующих случаях: если во время действия предохранительных устройств давление в аппарате может повыситься более чем на 10% от рабочего, то расчетное давление должно быть равно 90% давления в аппарате при полном открытии предохранительного устройства; если на элемент действует гидростатическое давление от столба жидкости в аппарате, значение которого свыше 5% расчетного, то расчетное давление для этого элемента соответственно повышается на значение гидростатического давления.

Определяем расчетное давление по формуле:

$$P_{\text{расч}} = P_{\text{раб}} \cdot \frac{\sigma_{20}}{\sigma_{tR}} = 4.502 \text{ МПа}$$

Пробное давление при гидравлическом испытании:

$$P_{\text{пр}} := 1.25 \cdot P_{\text{расч}} \cdot \frac{\sigma_{20}}{\sigma_{tR}} = 7.372 \text{ МПа}$$

где $\sigma_{20} = 183$ - допускаемое напряжение для стали при 20 С

Условное давление для выбора фланцевых соединений определим по формуле:

$$P_{\text{усл}} := \text{Ceil} \left(P_{\text{расч}} \cdot \frac{\sigma_{20}}{\sigma_{tR}}, 1.5 \right) = 6 \text{ МПа}$$

2.3.2 Определение толщины стенки обечайки

Ведем расчет согласно ГОСТ Р 52857.2 – 2007, [8].

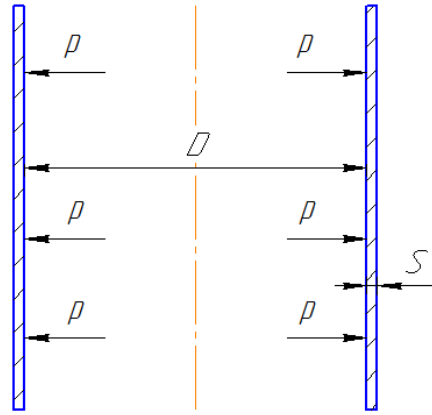


Рисунок 3.1 – Расчетная схема цилиндрической обечайки

Расчетная толщина стенки обечайки определяется по формуле:

$$s_R := \max \left(\frac{P_{\text{расч}} \cdot D_{\text{вн}}}{2 \cdot \sigma_{\text{tR}} \cdot \varphi - P_{\text{расч}}}, \frac{P_{\text{пр}} \cdot D_{\text{вн}}}{2 \cdot \sigma_{\text{H}} \cdot \varphi - P_{\text{пр}}} \right) = 32.756 \text{ мм}$$

Для выполнения условия прочности принимаем толщину стенки равной $s = 55$ мм.

Допускаемое внутреннее избыточное давление вычисляют по формуле:

$$P_{\text{доп}} := \left[\frac{2 \cdot \sigma_{\text{tR}} \cdot \varphi \cdot (s - c)}{D_{\text{вн}} + (s - c)} \right] = 7.575 \text{ МПа}$$

Проверка условия

$$Us11 := \begin{cases} \text{"Выполняется"} & \text{if } \frac{s - c}{D_{\text{вн}}} \leq 0.1 \\ \text{"Не выполнется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Us11 = "Выполняется"

2.3.3 Расчет эллиптических днищ

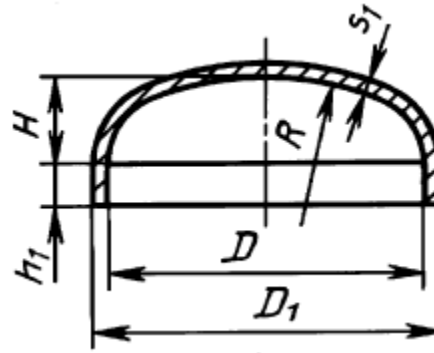


Рисунок 3.2 – Расчетная схема эллиптического днища

Расчетная толщина днища определяется по формуле:

$$s_{R.} := \max \left(\frac{P_{расч} \cdot R}{2 \cdot \sigma_{tR} \cdot \varphi - 0.5 \cdot P_{расч}}, \frac{P_{пр} \cdot R}{2 \cdot \sigma_{tR} \cdot \varphi - 0.5 \cdot P_{пр}} \right) = 52.328 \text{ мм}$$

где $R = D_{вн}$ - радиус кривизны в вершине днища.

Принимаем толщину днища стандартного значения $s_{дн} = 55 \text{ мм}$

Проверка применимости формул для эллиптических днищ:

$$Us12 := \begin{cases} \text{"Выполняется"} & \text{if } 0.002 \leq \frac{s_{дн} - c}{D_{вн}} \leq 0.1 \\ \text{"Не выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Us12 = \text{"Выполняется"}$$

Допускаемое давление при гидроиспытании

$$P_{доп.} := \frac{2 \cdot \sigma_{tR} \cdot \varphi \cdot (s_{дн} - c)}{D_{вн} + 0.5 \cdot (s_{дн} - c)} = 7.647 \text{ МПа}$$

Определим длину отбортованной цилиндрической части днища по формуле:

$$h_{1.} := 0.8 \cdot \sqrt{D_{вн} \cdot (s_{дн} - c)} = 172.187 \text{ мм}$$

Принимаем $h = 175$ мм.

Таким образом в результате расчета определили толщину стенки, обеспечивающие условие прочности, цилиндрической обечайки – 55 мм и толщину цилиндрического днища – 55мм.

2.3.4 Сопряжение обечайки и днища

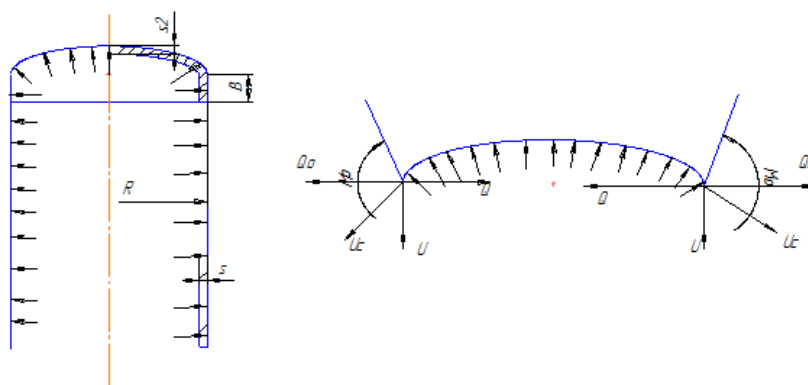


Рисунок 3.3 – Схема к определению краевых сил и моментов

Определяем краевые силы и моменты из уравнения совместности деформаций для места стыка обечайки с эллиптическим днищем, [14]:

$$\Delta_{ц.p.} + \Delta_{ц.Q0} + \Delta_{ц.M0} = \Delta_{э.p} + \Delta_{э.Q0} + \Delta_{э.M0}$$

$$\Theta_{ц.p.} + \Theta_{ц.Q0} + \Theta_{ц.M0} = -\Theta_{э.p} - \Theta_{э.Q0} - \Theta_{э.M0}$$

где $\Delta_{п}^ц, \Delta_{Q_0}^ц, \Delta_{M_0}^ц, Q_{п}^ц, Q_{Q_0}^ц, Q_{M_0}^ц$ - соответственно радиальные и угловые перемещение края цилиндрической оболочки под действием нагрузок P, Q_0, M_0 ;

$\Delta_{п}^э, \Delta_{Q_0}^э, \Delta_{M_0}^э, \Theta_{п}^э, \Theta_{Q_0}^э, \Theta_{M_0}^э$ - соответственно радиальные и угловые перемещение края эллиптической оболочки под действием нагрузок P, Q_0, M_0 ;

Подставляем соответствующие значения деформаций и решаем полученные уравнения с помощью программы Mathcad 15:

$$f1(Q_0, M_0) := \frac{(2 - \mu) \cdot R^2}{2 \cdot E \cdot (s - c)} \cdot P_{расч} - \frac{2 \cdot \beta \cdot R^2}{(s - c) \cdot E} \cdot Q_0 + \frac{2 \cdot \beta^2 \cdot R^2}{(s - c) \cdot E} \cdot M_0 - \frac{P_{расч} \cdot a^2}{2 \cdot E \cdot (s - c)} \left(2 - \mu - \frac{a^2}{b^2} \right) - \frac{2 \cdot \beta \cdot a^2}{(s - c) \cdot E} \cdot Q_0 - \frac{2 \cdot \beta^2 \cdot a^2}{(s - c) \cdot E} \cdot M_0$$

$$f2(Q_0, M_0) := -\frac{2 \cdot \beta^2 \cdot R^2}{(s - c) \cdot E} \cdot Q_0 + \frac{4 \cdot \beta^3 \cdot R^2}{(s - c) \cdot E} \cdot M_0 + \frac{2 \cdot \beta^2 \cdot a^2}{(s - c) \cdot E} + \frac{4 \cdot \beta^2 \cdot a^2}{(s - c) \cdot E} \cdot M_0$$

$$Q_0 = 284$$

$$M_0 = 286.5$$

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

$$\sigma_{mЭ} = \sigma_{PmЭ} + \sigma_{QmЭ} + \sigma_{MmЭ}$$

$$\sigma_{tЭ} = \sigma_{PtЭ} + \sigma_{QtЭ} + \sigma_{MtЭ}$$

где $\sigma_{mЭ}^P, \sigma_{mЭ}^{Q_0}, \sigma_{mЭ}^{M_0}$ - соответственно меридиальные напряжения действующие от нагрузок P, Q₀, M₀;

$\sigma_{tЭ}^P, \sigma_{tЭ}^{Q_0}, \sigma_{tЭ}^{M_0}$ - соответственно кольцевые напряжения действующие от нагрузок P, Q₀, M₀.

Подставим соответствующие значения нагрузок в формулы (17,18):

$$\sigma_{mЭ} := \frac{P_{расч} \cdot a}{2 \cdot (s - c)} + \frac{6 \cdot M_0}{(s - c)^2} = 30.689 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{tЭ} := \frac{(P_{расч} \cdot a) - \left(2 - \frac{a^2}{b^2}\right)}{2 \cdot (s - c)} + \frac{2 \cdot Q_0 \cdot \beta \cdot a}{s - c} + \frac{2 \cdot \mu \cdot \beta^2 \cdot a}{s - c} + \frac{6 \cdot \mu \cdot M_0}{(s - c)^2} = 67.164 \text{ МПа}$$

Определим максимальное напряжение на краю эллиптического днища и цилиндрической обечайке по формуле:

$$\sigma_{max} := \max(\sigma_{mЭ}, \sigma_{tЭ}, \sigma_{m0}, \sigma_{t0}) = 81.142 \text{ МПа}$$

Проверка выполнения условия прочности в месте сопряжения обечайки и днища:

$$Us13 := \begin{cases} \text{"Выполняется"} & \text{if } \sigma_{max} < \sigma_{tR} \\ \text{"Не выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Us13 = \text{"Выполняется"}$$

2.3.5 Укрепление отверстий в обечайке и днищах

Ведем расчет согласно ГОСТ Р 52857.3 – 2007, [9].

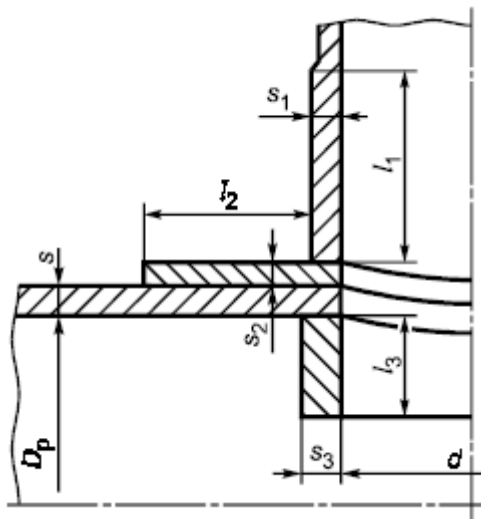


Рисунок 3.4 – Основная расчетная схема соединения штуцера со стенкой сосуда

Расчет толщины стенок патрубков

Расчетная толщина патрубка люка-лаза Ду=500

$$s_{p1} := \frac{P_{расч} \cdot (d + 2 \cdot c)}{2 \cdot \sigma_{tR} \cdot \varphi - P_{расч}} = 8.615 \text{ мм}$$

Принимаем $S_{p1}=12$ мм

Расчетная толщина патрубка ввода ЭЭФ $Dy=250$

$$s_{p1} := \frac{P_{расч} \cdot (d + 2 \cdot c)}{2 \cdot \sigma_{tR} \cdot \varphi - P_{расч}} = 4.52 \text{ мм}$$

Принимаем $S_{p1}=8$ мм

Расчетная толщина патрубка воздушника, дренажа $Dy=50$

$$s_{p1} := \frac{P_{расч} \cdot (d + 2 \cdot c)}{2 \cdot \sigma_{tR} \cdot \varphi - P_{расч}} = 0.95 \text{ мм}$$

Принимаем $S_{p1}=2$ мм

Проведем расчет для отверстия под люк-лаз $Dy=500$

$d := 524$ мм	диаметр отверстия
$l1 := 220$ мм	длина внешней части штуцера
$l3 := 50$ мм	длина внутренней части штуцера
$s_1 := 12$	толщина стенки штуцера
$l2 := 380$ мм	испольнительная ширина накладного кольца
$s_2 := 26$ мм	испольнительная толщина накладного кольца

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

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

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

Согласно выбранной оболочки, находим диаметры укрепляемых элементов по формулам:

$$D_p := \begin{cases} D_p \leftarrow D_{BH} & \text{if } n = 1 \\ D_p \leftarrow \frac{D_{BH}^2}{2 \cdot h} \cdot \sqrt{1 - 4 \cdot \left(\frac{D_{BH}^2 - 4 \cdot h^2}{D_{BH}^4} \right)} \cdot r^2 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$D_p = 2 \times 10^3 \text{ мм}$$

Определяем расчетный диаметр отверстия в стенке оболочки:

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

$$d_p = 520 \quad \text{мм}$$

Проверка условий применения формул для расчета укрепления отверстий:

$$\text{Прим} := \begin{cases} \text{"Отношение диаметров НЕ выполняется"} & \text{if } \left(\frac{d_p - 2 \cdot c}{D_{BH}} > 1 \right) \text{ if } n = 1 \\ & \left(\left(\frac{d_p - 2 \cdot c}{D_{BH}} > 0.6 \right) \right) \text{ otherwise} \\ \text{"Отношение толщины к диаметру НЕ выполняется"} & \text{if } \left(\frac{s - c}{D_{BH}} > 0.1 \right) \text{ if } n = 1 \\ & \left(\left(\frac{s - c}{D_{BH}} > 0.1 \right) \right) \text{ otherwise} \\ \text{"Условия применения формул выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Тип = "цилиндрическая оболочка"

Прим = "Условия применения формул выполняются"

Расчетные толщины стенок укрепляемых элементов определяем в соответствии с ГОСТ 52857.2 – 2007, [8]:

$$s_p := \begin{cases} \frac{P_{np} \cdot D_p}{2 \cdot \varphi \cdot \sigma_{tR} - P_{расч}} & \text{if } n = 1 \\ \frac{P_{np} \cdot D_p}{4 \cdot \varphi \cdot \sigma_{tR} - P_{расч}} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$s_p = 38.458 \quad \text{мм}$$

Расчетная толщина стенки штуцера определяется по формуле:

$$s_{p1} := \frac{P_{расч} \cdot (d + 2 \cdot c)}{2 \cdot \sigma_{tR} \cdot \varphi - P_{расч}} = 8.615 \text{ мм}$$

Находим расчетные длины внешней и внутренней частей штуцера соответственно:

$$l_{1p} := \min[11, \sqrt{(d + 2 \cdot c) \cdot (s_1 - c)}] = 60.679 \text{ мм}$$

$$l_{3p} := \min[13, 0.5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c) \cdot (s_1 - 2c)}] = 50 \text{ мм}$$

Расчетная ширина накладного кольца:

$$l_{2p} := \min[12, \sqrt{D_p \cdot (s_1 + s_2 - c)}] = 379.473 \text{ мм}$$

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

$$l_p := \sqrt{D_p \cdot (s_1 - c)} = 322.49 \text{ мм}$$

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:

$$d_{op} := 0.4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s_1 - c)} = 128.996 \text{ мм}$$

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

$$d_o := 2 \cdot \left[\left(\frac{s_1 - c}{s_p} \right) - 0.8 \right] \cdot \sqrt{D_p \cdot (s_1 - c)} = 507.916 \text{ мм}$$

Проверка условия необходимости укрепления отверстия:

$$Us14 := \begin{cases} \text{"Укрепление отверстия НЕОБХОДИМО"} & \text{if } d_0 < d_p \\ \text{"Укрепление отверстия НЕ требуется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Тип = "цилиндрическая оболочка"

Us14 = "Укрепление отверстия НЕОБХОДИМО"

В случае укрепления отверстия утолщением стенки сосуда или штуцера либо накладным кольцом, либо торообразной вставкой или отбортовкой должно выполняться условие:

$$l_{1p} \cdot (s_1 - s_{1p} - c_s) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3 + l_p \cdot (s - s_p - c) \geq 0.5 \cdot (d_p - d_{op})$$

$$Us144 := \begin{cases} \text{"Условие выполняется"} & \text{if } l_{1p} \cdot (s_1 - s_{1p} - c_s) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3 + l_p \cdot (s - s_p - c) \geq 0.5 \cdot (d_p - d_{op}) \\ \text{"Условие НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Us144 = "Условие выполняется"

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

$$V := \frac{1 + \frac{l_{1p} \cdot (s_1 - c) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_2 - c - c) \cdot \chi_3}{l_p \cdot (s - c)}}{1 + 0.5 \cdot \frac{d_p - d_{op}}{l_p} + K \cdot \frac{d + 2 \cdot c}{D_p} \cdot \frac{l_{1p}}{l_p}} = 0.913$$

Допускаемое давление:

$$P_{дв} := \frac{2 \cdot K \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot \sigma_{tR} \cdot V}{D_p + (s - c) \cdot V} = 7.967 \text{ МПа}$$

Так как $d_0 > D_{y50}, D_{y250}$, то укреплять отверстия в обечайке не требуется.

Расчет укрепления отверстий в выпуклой крышке, $D_y=500$.

Согласно, выбранной оболочки находим диаметры укрепляемых элементов по формулам:

$$D_p := \begin{cases} D_p \leftarrow D_{BH} & \text{if } n = 1 \\ D_p \leftarrow \frac{D_{BH}^2}{2 \cdot h} \cdot \sqrt{1 - 4 \cdot \left(\frac{D_{BH}^2 - 4 \cdot h^2}{D_{BH}^4} \right)} \cdot r^2 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$D_p = 4 \times 10^3 \quad \text{мм}$$

Определяем расчетный диаметр отверстия в стенке оболочки:

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

$$d_p = 520 \quad \text{мм}$$

Проверка условий применения формул для расчета укрепления отверстий:

$$\text{Прим} := \begin{cases} \text{"Отношение диаметров НЕ выполняется"} & \text{if } \left(\frac{d_p - 2 \cdot c}{D_{BH}} > 1 \right) \text{ if } n = 1 \\ & \left(\left(\frac{d_p - 2 \cdot c}{D_{BH}} > 0.6 \right) \right) \text{ otherwise} \\ \text{"Отношение толщины к диаметру НЕ выполняется"} & \text{if } \left(\frac{s - c}{D_{BH}} > 0.1 \right) \text{ if } n = 1 \\ & \left(\left(\frac{s - c}{D_{BH}} > 0.1 \right) \right) \text{ otherwise} \\ \text{"Условия применения формул выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Тип = "цилиндрическая оболочка"

Прим = "Условия применения формул выполняются"

Расчетные толщины стенок укрепляемых элементов определяем в соответствии с ГОСТ 52857.2 – 2007, [8]:

$$s_p := \begin{cases} \frac{P_{\text{расч}} \cdot D_p}{2 \cdot \varphi \cdot \sigma_{tR} - P_{\text{расч}}} & \text{if } n = 1 \\ \frac{P_{\text{расч}} \cdot D_p}{4 \cdot \varphi \cdot \sigma_{tR} - P_{\text{расч}}} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$s_p = 32.49 \quad \text{мм}$$

Расчетная толщина стенки штуцера определяется по формуле:

$$s_{p1} := \frac{P_{\text{расч}} \cdot (d + 2 \cdot c)}{2 \cdot \sigma_{tR} \cdot \varphi - P_{\text{расч}}} = 8.615 \quad \text{мм}$$

Находим расчетные длины внешней и внутренней частей штуцера соответственно:

$$l_{1p} := \min[11, \sqrt{(d + 2 \cdot c) \cdot (s_1 - c)}] = 68.804 \quad \text{мм}$$

$$l_{3p} := \min[13, 0.5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c) \cdot (s_1 - 2c)}] = 50 \quad \text{мм}$$

Расчетная ширина накладного кольца:

$$l_{2p} := \min[12, \sqrt{D_p \cdot (s_1 + s_2 - c)}] = 340 \quad \text{мм}$$

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

$$l_p := \sqrt{D_p \cdot (s_1 - c)} = 456.07 \quad \text{мм}$$

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:

$$d_{op} := 0.4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s_1 - c)} = 182.428 \quad \text{мм}$$

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

$$d_o := 2 \cdot \left[\left(\frac{s - c}{s_p} \right) - 0.8 \right] \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 730.16 \text{ мм}$$

$$d_o > d_p$$

Следовательно, отверстие под люк укрепления не требует. Так же не требуют укрепления отверстия $D_u=50$, смещенные относительно оси крышки, согласно ГОСТ 52857.3 -2007 п.4.4

В результате проведенного расчета установили, что требуется укрепление отверстия под штуцер люка-лаза. Укрепили отверстия с помощью увеличения толщины стенок штуцера и накладных колец.

2.3.6 Расчет фланцевых соединений

Для расчета воспользуемся ГОСТ Р 52857.4 – 2007, [10]

Исходя из рабочих условий и в соответствии с рекомендациями [13, с 213], выбираем приварные встык фланцы с уплотнительной поверхностью типа выступ – впадина, прокладка металлоасбест.

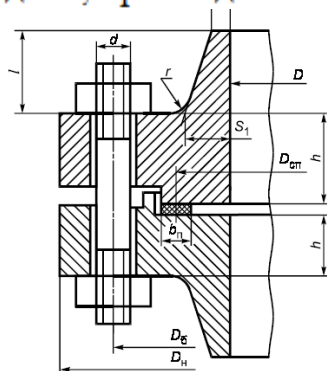


Рисунок 3.5 – Фланцевое соединение с уплотнительной поверхностью типа выступ - впадина

Расчет проведем фланцевого соединения ввода ЭЭФ Ду=250

Данные:

$D := 250$	внутренний диаметр фланца, мм
$D_H := 470$	наружный диаметр фланца, мм
$D_6 := 400$	диаметр болтовой окружности, мм
$D_{сп} := 157$	расчетный диаметр прокладки, мм
$b_{п} := 20$	ширина прокладки, мм
$h := 45$	ширина тарелки фланца, мм
$h_{п} := 3$	толщина прокладки, мм
$S_0 := 8$	толщина стенки штуцера, мм
$d := 40$	диаметр болта, мм
$n := 12$	количество болтов
$S1 := 20$	расчетная температура, С
$P := 4$	расчетное давление, МПа

Материал прокладки металлоасбест.

Выбор крепежных элементов:



Расчетная температура неизолированных плоских фланцев определяется по формуле:

$$t_{\phi} := 0.96 \cdot t = 384$$

Расчетная температура болтов:

$$t_6 := 0.85 \cdot t = 340$$

Допускаемые напряжения для шпилек из стали 35Х:

$$\sigma_{д,6} := \text{Floor}(\text{linterp}(t, \sigma_6, t_6), 0.5) = 222 \text{ МПа}$$

Модуль упругости для болтов при рабочей температуре:

$$E_{\sigma} := 2.05 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

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

$$\sigma_{206} := 183.3 \text{ МПа}$$

Коэффициент линейного расширения стали 35Х при $t = 250\text{-}300 \text{ }^{\circ}\text{C}$

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

Допускаемые напряжения для фланцев из стали 09Г2С

$$t := \begin{pmatrix} 250 \\ 300 \end{pmatrix} \quad \sigma_{\phi} := \begin{pmatrix} 145 \\ 134 \end{pmatrix}$$

$$\sigma := \text{Floor}(\text{linterp}(t, \sigma_{\phi}, t_{\phi}), 0.5) = 140.5 \text{ МПа}$$

Коэффициент линейного расширения стали 09Г2С при $t = 250\text{-}300 \text{ }^{\circ}\text{C}$

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

Находим эффективную ширину плоской прокладки по формуле:

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

где $b_{\pi} = 20 \text{ мм}$ – ширина прокладки.

Характеристики про $b_0 = 17 \text{ мм}$

$m = 2.5$ – прокладочный коэффициент

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

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

$E_n = 200 \text{ МПа}$ – условный модуль сжатия прокладк

Усилия, необходимые для смятия прокладки и обеспечения герметичности фланцевого соединения

Усилие, необходимое для смятия прокладки находим по формуле:

$$P_{обж} := 0.5 \cdot \pi \cdot D_{сп} \cdot b_0 \cdot m \cdot |P| = 4.192 \times 10^4 \text{ Н}$$

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

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

$$R_{\Pi} = 8.385 \times 10^4 \text{ Н}$$

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

Площадь поперечного сечения болтов (шпилек):

$$f_{\sigma} = 324 \text{ мм}^2$$

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

$$A_{\sigma} := n \cdot f_{\sigma} = 3.888 \times 10^3 \text{ мм}^2$$

Равнодействующая нагрузка от давления:

$$Q_{д} := \frac{\pi}{4} \cdot (D_{сп})^2 \cdot P = 7.744 \times 10^4 \text{ Н}$$

Приведенная нагрузка, вызванная воздействием внешней силы и изгибающего момента:

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

Найдем податливость прокладки:

$$y_{\Pi} := \frac{h_{\Pi} \cdot K_{обж}}{E_{\Pi} \cdot \pi \cdot D_{сп} \cdot b_{\Pi}} = 1.369 \times 10^{-6} \text{ мм/Н}$$

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

$$L_{60} := 100 \quad \text{мм}$$

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

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

$$L_6 = 122.4 \quad \text{мм}$$

Податливость болтов рассчитывается по формуле:

$$\nu_{60} := \frac{L_6}{E_{206} \cdot A_6} = 1.444 \times 10^{-7}$$

Расчетные параметры фланцев

- параметр длины обечайки

$$l_0 := \sqrt{D \cdot S_0} = 44.721$$

- отношение наружного диаметра фланца к внутреннему:

$$K := \frac{D_H}{D} \quad K = 1.88$$

- коэффициенты, зависящие от соотношения размеров тарелки фланца

$$\beta_T := \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \log(K)) - 1}{(1.05 + 1.945 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} = 1.521$$

$$\beta_U := \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \log(K)) - 1}{1.36 \cdot (K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = 3.353$$

$$\beta_Y := \frac{1}{(K - 1)} \cdot \left[0.69 + 5.72 \cdot \frac{K^2 \cdot \log(K)}{(K^2 - 1)} \right] = 3.073$$

$$\beta_Z := \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = 1.704$$

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

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

- коэффициент λ

$$\lambda := \frac{\beta_F \cdot h + l_0}{\beta_T \cdot l_0} + \frac{\beta_V \cdot h^3}{\beta_U \cdot l_0 \cdot (S_0)^2} = 6.144$$

Угловая податливость фланцев

Угловая податливость фланцев при затяжке

$$y_\Phi := \frac{0.91 \cdot \beta_V}{E_{20} \cdot \lambda \cdot l_0 \cdot (S_1)^2} = 2.128 \times 10^{-11}$$

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

$$y_{\Phi H} := \left(\frac{\pi}{4}\right)^3 \cdot \frac{D_6}{E_{20} \cdot h^3 \cdot D_H} \quad y_{\Phi H} = 2.114 \times 10^{-11}$$

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

$$C_F := \max \left[1, \sqrt{\frac{\pi \cdot D_6}{n \cdot \left(2 \cdot d + \frac{6 \cdot h}{m + 0.5} \right)}} \right] = 1.015$$

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

$$b := 0.5(D_6 - D_{\text{сп}}) \quad b = 121.5$$

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

$$\gamma := \frac{1}{y_{\Pi} + y_{\phi} \cdot \frac{E_{206}}{E_6} + 2 \cdot b^2 \cdot y_{\phi} \cdot \frac{E_{20}}{E}} \quad \gamma = 4.349 \times 10^5$$

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

$$\alpha := 1 - \frac{y_{\Pi} - 2 \cdot e \cdot y_{\phi} \cdot b}{y_{\Pi} + y_{\phi} + 2 \cdot b^2 \cdot y_{\phi}} \quad \alpha = 0.239$$

Коэффициент жесткости фланцевого соединения, нагруженного внешним изгибающим моментом:

$$\alpha_M := \frac{y_{\phi} + 2 \cdot y_{\phi n} \cdot b \cdot \left(b + e - \frac{e^2}{D_{\text{сп}}} \right)}{y_{\phi} + y_{\Pi} \cdot \left(\frac{D_{\phi}}{D_{\text{сп}}} \right)^2 + 2 \cdot y_{\phi n} \cdot b^2} \quad \alpha_M = 0.044$$

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

$$Q_t := \gamma \cdot [2\alpha_{\phi} \cdot h \cdot (t_{\phi} - 20) - 2\alpha_{\phi} \cdot h \cdot (t_{\phi} - 20)] = 2.958 \times 10^4 \text{ Н}$$

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

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

$$P_{\phi 1} = 2.649 \times 10^5 \text{ Н}$$

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

$$P_{62} := \max(P_{обж}, 0.4 \cdot A_6 \cdot \sigma_{206}) \quad P_{62} = 2.851 \times 10^5 \text{ Н}$$

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

$$P_{6M} := \max(P_{61}, P_{62}) \quad P_{6M} = 2.851 \times 10^5 \text{ Н}$$

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

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

$$P_{6P} = 1.814 \times 10^5 \text{ Н}$$

Проверка прочности болтов (шпилек) и прокладки

Расчетные напряжения в болтах (шпильках)

- при затяжке:

$$\sigma_{61} := \frac{P_{6M}}{A_6} = 73.32 \text{ МПа}$$

- в рабочих условиях:

$$\sigma_{62} := \frac{P_{6P}}{A_6} \quad \sigma_{62} = 46.662 \text{ МПа}$$

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

$$Us1_1 := \begin{cases} \text{"Условия прочности в при затяжке НЕ выполняются"} & \text{if } \sigma_{61} > \sigma_{206} \\ \text{"Условия прочности в рабочих условиях НЕ выполняются"} & \text{if } \sigma_{62} > \sigma_{д.6} \\ \text{"Условия прочности выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

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

Удельное давление на прокладку находим по формуле:

$$q := \frac{\max(P_{6M}, P_{6P})}{\pi \cdot D_{сп} \cdot b_{п}} \quad q = 28.898 \text{ МПа}$$

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:

$$M_M := C_F \cdot P_{6M} \cdot b \quad M_M = 3.464 \times 10^7 \quad \text{Н*мм}$$

Расчетный изгибающий момент, действующий на фланец в рабочих условиях:

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

$$M_P = 1.813 \times 10^7 \quad \text{Н*мм}$$

Расчетные напряжения во фланце при затяжке:

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

$$\sigma_{0M} := \frac{M_M}{\lambda \cdot (S1 - c_0)^2 \cdot D_{пр}} \quad \sigma_{0M} = 78.027 \quad \text{МПа}$$

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

- радиальное напряжение:

$$\sigma_{RM} := \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + l_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot l_0 \cdot D} \cdot M_M \quad \sigma_{RM} = 24.697 \quad \text{МПа}$$

- окружное напряжение:

$$\sigma_{TM} := \frac{\beta_Y \cdot M_M}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_{RM} \quad \sigma_{TM} = 179.484 \quad \text{МПа}$$

Расчетные напряжения во фланце в рабочих условиях:

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

$$\sigma_{0p} := \frac{M_p}{\lambda \cdot (S1 - c_0)^2 \cdot D_{пр}} \quad \sigma_{0p} = 40.848 \quad \text{МПа}$$

- максимальные меридиональные мембранные напряжения в обечайке плоского фланца:

$$\sigma_{0mp} := \max \left[\frac{Q_d + F + \frac{4 |M|}{D_{сп}}}{\pi \cdot (D + S1) \cdot (S1 - c_0)}, \frac{Q_d + F - \frac{4 |M|}{D_{сп}}}{\pi \cdot (D + S1) \cdot (S1 - c_0)} \right]$$

$$\sigma_{0mp} = 5.37 \quad \text{МПа}$$

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

- радиальное напряжение:

$$\sigma_{Rp} := \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + l_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot l_0 \cdot D} \cdot M_p \quad \sigma_{Rp} = 12.929 \quad \text{МПа}$$

- окружное напряжение:

$$\sigma_{Tp} := \frac{\beta_Y \cdot M_p}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_{Rp} \quad \sigma_{Tp} = 93.961 \quad \text{МПа}$$

Проверка условий статической прочности фланцев

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

KT = 1.3 при расчете с учетом стесненности температурных деформаций. При расчете без учета стесненности температурных деформаций KT = 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 условиях выполняются"

Проверка углов поворота фланцев

Угол поворота приварного встык фланца, плоского фланца

$$\Theta := M_p \cdot y_{\Phi} \cdot \frac{E_{20}}{E} = 1.503 \times 10^{-3}$$

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 = "Условие поворота плоского фланца выполняется"

Таким образом, проверили выполнение условия на герметичность.

Аналогично проводим расчет для остальных фланцевых соединений.

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

2.3.7 Определение расчетных усилий от ветровых нагрузок

Расчет ведем по ГОСТ Р 51273 – 99, [11].

Данные:

$H_k = 16,5$	Высота колонны, м
$q_0 = 450$	Район установки - III:
$D_1 = 2$	Диаметр верхней части колонны, м
$D_2 = 2$	Диаметр нижней части колонны, м
$D_H = 2.11$	Диаметр опоры, м
$D_3 = 2$	Высота изоляции, м
$H_u = 14.5$	Удельный вес, Н/м ³
$\gamma_u = 4000$	

Толщина:

$S_1 := 0.01$	Стенки в верхней части колонны, м
$S_2 := 0.01$	Стенки в нижней части колонны, м
$S_o := 0.01$	Стенки опоры, м
$S_{и} := 0.1$	Изоляции, м
$F_d := 2.3$	Площадь внутренней поверхности эллиптического днища, м ²
$V_d := 0.4191$	Объем эллиптического днища, м ³
$G_{л} := 40$	Вес люка, кг
$C_f := 6 \cdot 10^7$	Коэффициент неравномерности сжатия грунта, Н/м ³

Разбиваем аппарат на участки высотой $h \sim 10$ м, как показано на рисунке 3.6.

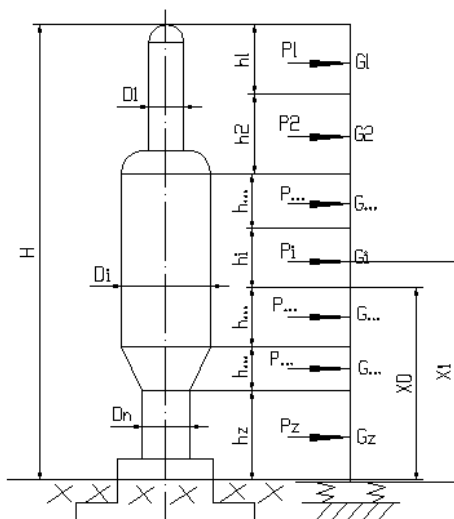


Рисунок 3.6 – Расчетная схема аппарата

- Высота участка №1, м $H_1 := 4.6$
- Высота участка №2, м $H_2 := 5.1$
- Высота участка №3, м $H_3 := 5.1$
- Высота участка №4, м $H_4 := 1.7$

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

- Участок №1, м $x_1 := 2.3$
- Участок №2, м $x_2 := 2.55$
- Участок №3, м $x_3 := 2.55$
- Участок №4, м $x_4 := 0.85$

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

$$x_0 := \begin{pmatrix} 13.1 \\ 8.1 \\ 3.1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

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

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

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.

$$G_{o1} := 10 \cdot \gamma_{ст} \cdot H_1 \cdot \frac{\pi \cdot (D_n^2 - D_1^2)}{4} \quad G_{o1} = 1.2838 \times 10^5 \quad \text{Н}$$

Вес крышки, Н:

$$G_{к1} := 2 \cdot 10 \cdot F_d \cdot S_1 \cdot \gamma_{ст} \quad G_{к1} = 19885.8 \quad \text{Н}$$

Вес обслуживающей площадки, Н:

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

Вес воды, Н:

$$G_{в1} := 10 \cdot V_1 \cdot \gamma_{в} \quad G_{в1} = 135000 \quad \text{Н}$$

$V_1 := 13.5 \quad \text{м}^3$ - объем секции реактора

Тогда вес первого участка составит, Н:

$$G_{r1} := G_{o1} + G_{к1} + G_{в1} + G_{ис} + G_{пл} \quad G_{r1} = 308152.6013 \quad \text{Н}$$

(2.109)

Аналогично считаем массу остальных участков. В итоге получаем:

Вес второго участка, Н:

$$G_{r2} = 324758.558 \quad \text{Н}$$

Вес третьего участка, Н:

$$G_{r3} = 324758.558 \quad \text{Н}$$

Вес четвертого участка, Н:

$$G_{r4} = 47445.5905 \text{ Н}$$

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

$$G_{r.max} := G_{r1} + G_{r2} + G_{r3} + G_{r4} = 1005115.3077 \quad G_{r.max} = 1005115.3077 \text{ Н}$$

Определение периода собственных колебаний

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

$$T_0 := 1.8 \cdot H_k \cdot \sqrt{\frac{G_{r.max}}{g} \cdot \frac{H_k}{E \cdot I_1}}$$

где I – момент инерции верхнего металлического сечения аппарата относительно оси, m^4

E – модуль упругости стали 09Г2С – $1,73 \cdot 10^{11}$ Па

Найдем момент инерции по формуле:

$$I_1 := \pi \cdot \frac{(D_1 + S_1 - c)^3 \cdot (S_1 - c)}{8} = 0.1801$$

Подставив полученное значение в формулу (2.2.111) получим:

$$T_0 := 1.8 \cdot H_k \cdot \sqrt{\frac{G_{r.max}}{g} \cdot \frac{H_k}{E \cdot I_1}} = 0.9178 \text{ с}$$

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 статической составляющей, Н/м²:

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

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

Θ - коэффициент, учитывающий изменение ветрового давления по высоте аппарата

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

$$\Theta_j = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

В итоге получаем:

$$q_i = \begin{array}{|c|} \hline 315 \\ \hline 315 \\ \hline 315 \\ \hline 315 \\ \hline \end{array}$$

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

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

где D_H – наружный диаметр по участкам, м.

$$D_{\#1} := D_1 + 2 \cdot S_1 + 2 \cdot S_{\#} \quad D_{\#1} = 2.51$$

$$D_{\#2} := D_1 + 2 \cdot S_1 + 2 \cdot S_{\#} \quad D_{\#2} = 2.51$$

$$D_{\#3} := D_2 + 2 \cdot S_2 + 2 \cdot S_{\#} \quad D_{\#3} = 2.51$$

$$D_{\#4} := D_2 + 2 \cdot S_2 + 2 \cdot S_{\#} \quad D_{\#4} = 2.51$$

Подставив значения в формулу (116) получим:

$$P_{st_i} =$$

3636.99
4032.315
4032.315
1344.105

Определение коэффициентов для расчета динамической составляющей:

$$\varepsilon_{ww} := \frac{T_r \cdot \sqrt{q_0}}{840} \quad \varepsilon = 0.0055$$

С помощью программы MathCAD определяем коэффициент динамичности при ветровой нагрузке:

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

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

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

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

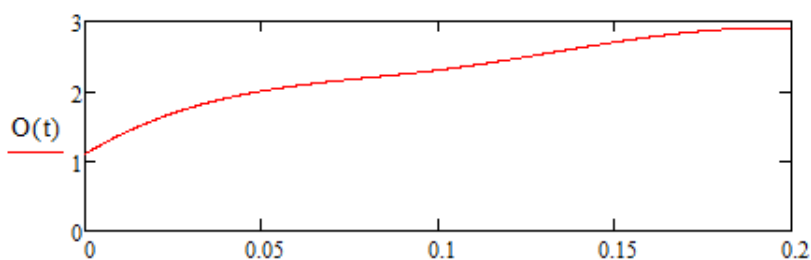


Рисунок 3.7 – коэффициент ξ

$$O(\varepsilon) = 1.2583$$

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

$$\xi = 1.2583$$

Коэффициент пульсации скоростного напора для середины участка :

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

Получим:

$$m_i =$$

0.6
0.6
0.6
0.6

Приведенное относительное ускорение центра тяжести i-го участка:

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

$$\eta_{r_i} =$$

0
0
0
0

где α_i - относительно перемещение центров тяжести участков,

1/N*M:

$$\alpha := \gamma \cdot \frac{H_k}{2 \cdot E \cdot I_1} \cdot \beta$$

$$\alpha =$$

0
0
0
0

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

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

$$P_{r.dyn_i} =$$

0
0
0
0

Ветровая нагрузка в условиях гидроиспытаний

Ветровая нагрузка на i -м участке, H :

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

$P_{r_i} =$

3636.99
4032.315
4032.315
1344.105

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

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

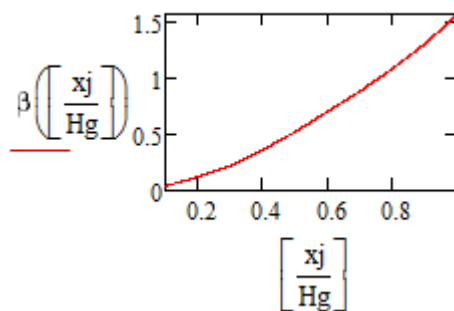


Рисунок 3.8 – коэффициент x_j

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

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

где A_j – площадь обслуживающих площадок, м²: 7,536

Получаем:

$$M_{vj} := \begin{pmatrix} 2033.7216 \\ 2033.7216 \\ 2033.7216 \\ 2033.7216 \end{pmatrix}$$

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

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

$$M_{v1_i} =$$

-31144.6055
-53523.9537
-55741.727
-55943.3427

Аналогично находятся изгибающие моменты для рабочих условий и условий монтажа.

$$MFS = \begin{pmatrix} 13.1 & -31144.6055 & -31144.6055 & -31144.6055 & 0 \\ 8.1 & -53523.9537 & -53523.9537 & -53523.9537 & 1005115.3077 \\ 3.1 & -55741.727 & -55741.727 & -55741.727 & 604860.5652 \\ 1 & -55943.3427 & -55943.3427 & -55943.3427 & 535155.1652 \end{pmatrix}$$

Видим, что моменты для всех условий равны. Так как колонна постоянного сечения динамическая составляющая ветровых нагрузок равна нулю. Статическая же составляющая не зависит от массы аппарата, а зависит только от высоты расчетного сечения. Максимальный момент приходится на сечение, где располагаются отверстия в опорной обечайке.

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 3 балла, следовательно, расчету на сейсмическое воздействие наш аппарат не подлежит.

2.3.8 Расчет на прочность и устойчивость

Расчет ведем по ГОСТ Р 51274 – 99, [12].

Данные:

Внутреннее избыточное давление на высоте X_0 , Па:	$p := 0.72 \cdot 10^6$
Допускаемое напряжение для корпуса колонны, Па:	$\sigma_{дК} := 154 \cdot 10^6$
Допускаемое напряжение для опорной обечайки, Па:	$\sigma_{д0} := 184 \cdot 10^6$
Допускаемое напряжение в анкерных болтах, Па:	$\sigma_{дВ} := 120 \cdot 10^6$
Допускаемое напряжение бетона на сжатие, Па:	$\sigma_{дбет} := 30 \cdot 10^6$
Начальный внутренний диаметр анкерных болтов, м.:	$d_{2H} := 0.0292$
Диаметр колонны в сечении соединения с опорной обечайкой, м.:	$D_K := 1.4$
Диаметр опорной обечайки, м.:	$D_{op} := 1.4$
Ширина верхнего опорного элемента, м.:	$b_5 := 0.15$
Минимальное расстояние между двумя смежными ребрами, м.:	$b_6 := 0.15$
Диаметр окружности вписанной в шестигранник анкерного болта, м.:	$e_1 := 0.014$
Расстояние между анкерным болтом и опорной обечайкой, м.:	$e_2 := 0.4$
Число анкерных болтов, м.:	$n := 8$
Высота опорного узла, м.:	$h_1 := 0.25$
Площадь поперечного сечения анкерного болта, м ² .:	$A_{\sigma} := 0.005$
Внутренний диаметр опорной обечайки, м.:	$D_3 := 1.4$
Диаметр окружности анкерных болтов, м.:	$D_4 := 1.5$
Ширин нижнего опорного кольца, м.:	$b_1 := 0.25$

Расчет корпуса аппарата

При расчете аппарата проверяют следующие сечения:

- поперечное сечение корпуса в месте присоединения опорной обечайки (сечение В-В, рисунок 10)
- поперечное сечение опорной обечайки в месте присоединения к корпусу (сечение Г-Г, рисунок 11)
- поперечное сечение опорной обечайки в местах расположения отверстий (сечение Д-Д, рисунок 11)
- сечение опорной обечайки в месте присоединения нижнего опорного кольца (сечение Е-Е, рисунок 11)

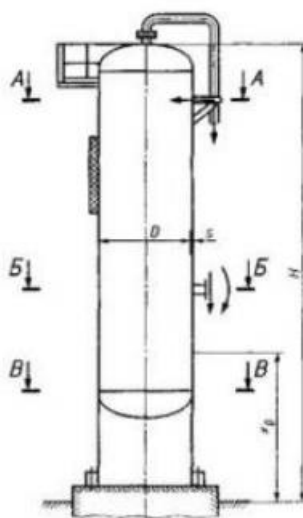


Рисунок 3.9 – Расчетные сечения корпуса аппарата

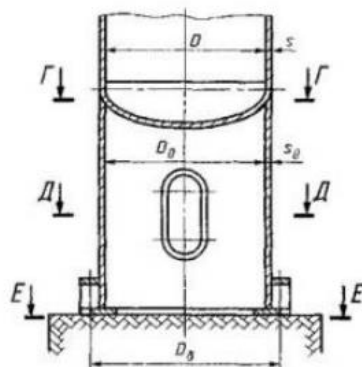


Рисунок 3.10 – Расчетные сечения опорной обечайки

По таблице 3.1 определяем действующие на аппарат нагрузки, необходимые для расчета.

Таблица 3.1 – Сочетание нагрузок

Условия	Расчетное давление p , МПа (кгс/см ²)	Осевое сжимающее усилие F , Н (кгс)	Расчетный изгибающий момент M , Н × мм (кгс × см)
Рабочее условие	p_1	$F_1 = G_1$	$M_1 = M_{G1} + M_{v1}$ Для сейсмических районов принимают большее из двух значений: $M_1 = M_{G1} + M_{v1}$ $M_1 = M_{G1} + M_{R1}$
Условие испытания	p_2	$F_2 = G_2$	$M_2 = M_{G2} + 0,6M_{v2}$
Условие монтажа	0	$F_3 = G_3$	$M_3 = M_{G3} + M_{v3}$
		Для анкерных болтов $F_3 = G_4$	Для сейсмических районов принимают большее из двух значений: $M_3 = M_{G3} + M_{v3}$ $M_3 = M_{G3} + M_{R3}$

Расчет напряжений для условий гидроиспытаний.

Корпус колонного аппарата

Продольные напряжения рассчитывают по формуле:

$$\sigma_{x1_i} := \frac{p_1 \cdot (D_{1_i} + s_{1_i})}{4 \cdot (s_{1_i} - c)} - \frac{F_1}{\pi \cdot D_{1_i} \cdot (s_{1_i} - c)} + \frac{4 \cdot M_{1_i}}{\pi \cdot (D_{1_i})^2 \cdot (s_{1_i} - c)}$$

Получим:

$\sigma_{x1_i} =$, Па

3.999·10 ⁷
4.04·10 ⁷
4.091·10 ⁷
4.135·10 ⁷
4.135·10 ⁷

Кольцевые напряжения находим по формуле:

$\sigma_{y_i} =$, Па $\sigma_{y_i} := \frac{p_1 \cdot (D_{1_i} - s_{1_i})}{2 \cdot (s_{1_i} - c)}$

6.255·10 ⁷
6.255·10 ⁷
6.255·10 ⁷
6.255·10 ⁷
6.255·10 ⁷

Эквивалентные напряжения для расчетных сечений, Па:

$$\sigma_{E1_i} := \sqrt{\left(\sigma_{x1_i}\right)^2 - \sigma_{x1_i} \cdot \sigma_{y_i} \cdot \frac{\phi_{T_i}}{\phi_{P_i}} + \left(\sigma_{y_i} \cdot \frac{\phi_{T_i}}{\phi_{P_i}}\right)^2}$$

где $\phi_T = 1$ – коэффициент прочности кольцевого сварного шва;

$\phi_P = 1$ – коэффициент прочности продольного сварного шва.

$\sigma_{E1_i} =$	$x_{0_i} =$
5.487·10 ⁷	20.5
5.493·10 ⁷	16.7
5.502·10 ⁷	12.5
5.51·10 ⁷	7.1
5.51·10 ⁷	1.25

Проверим выполнение условия прочности по формуле:

$$\max\left(\left(\left|\sigma_{x1_i}\right| \quad \sigma_{E1_i}\right)\right) \leq \sigma_{дК} \cdot \phi_{T_i}$$

$$\sigma_{дК} \cdot \phi_{T_i} =$$

1.54·10 ⁸
1.54·10 ⁸
1.54·10 ⁸
1.54·10 ⁸
1.54·10 ⁸

$$I := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } \max(\sigma_{x1}, \sigma_{E1}) \leq \min(\sigma_{дК} \cdot \phi_T) \\ \text{"Условие прочности не выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

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

Проверка устойчивости:

```

spr1 := "Проверка устойчивости необходима"
spr2 := "Проверка устойчивости не требуется"
I := | spr1
     | spr2 if s3 ≤ sНО
I = "Проверка устойчивости не требуется"

```

Расчет опорной обечайки

Проверку прочности сварного шва, соединяющего корпус колонны с опорной обечайкой (сечение Г-Г по рис.11) для рабочих условиях следует проводить по формуле:

$$\frac{1}{\pi \cdot D_3 \cdot a_1} \cdot \left(\frac{4 \cdot M_{13}}{D_3} + F_1 \right) \leq \phi_s \cdot \min((\sigma_{д0} \ \sigma_{дК}))$$

$$\frac{1}{\pi \cdot D_3 \cdot a_1} \cdot \left(\frac{4 \cdot M_{13}}{D_3} + F_1 \right) = 1.466 \times 10^7$$

```

spr1 := "Условие прочности не выполняется"
spr2 := "Условие прочности выполняется"
I := | spr1
     | spr2 if \frac{1}{\pi \cdot D_3 \cdot a_1} \cdot \left( \frac{4 \cdot M_{13}}{D_3} + F_1 \right) \leq \phi_s \cdot \min((\sigma_{д0} \ \sigma_{дК}))
I = "Условие прочности выполняется"

```

Проверку устойчивости опорной обечайки в зоне отверстия (сечение Д-Д по рис 11.) следует проводить по формуле:

$$\frac{F_1}{\Psi_1 \cdot F_{д1}} + \frac{M_{15} + F_1 \cdot \Psi_3 \cdot D_3}{\Psi_2 \cdot M_{д1}} \leq 1$$

где F_d, M_d - определяют по ГОСТ 14249-80;

ψ_1, ψ_2, ψ_3 - коэффициенты, определяемые соответственно по: 12, 13.

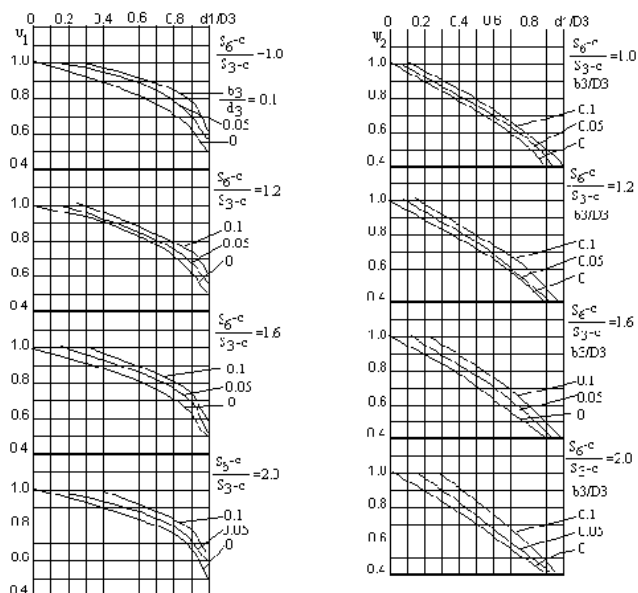


Рисунок 3.11 – Коэффициент ψ_1, ψ_2

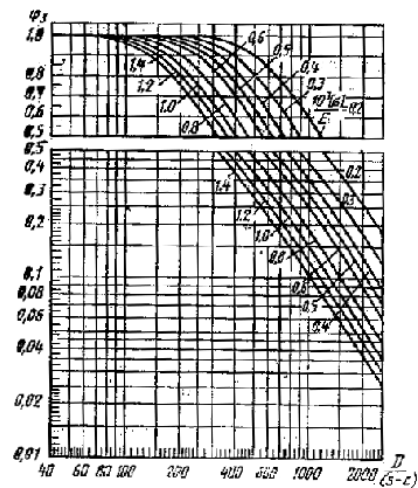


Рисунок 3.12 – Коэффициент ψ_3

Допускаемое осевое сжимающее усилие для рабочих условий следует рассчитывать по формуле:

$$F_d := \frac{F_{d\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{F_{d\Pi}}{F_{dE}}\right)^2}}$$

где $F_{дП}$ - допускаемое осевое сжимающее усилие из условия прочности:

$$F_{дП} := \pi \cdot (D_3 + s_3 - c) \cdot (s_3 - c) \cdot \sigma_{д0} = 6.511 \times 10^6 \text{ Па}$$

$F_{дЕ1}$ допускаемое осевое сжимающее усилие $F_{дЕ1}$ определяют из условия местной устойчивости в пределах упругости по формуле:

$$F_{дЕ1} := \frac{310 \cdot 10^{-6} \cdot E}{n_y} \cdot D_3^2 \cdot \left[\frac{100 \cdot (s_3 - c)}{D_3} \right]^{2.5} = 1.344 \times 10^7$$

$n_y=2,4$ - для рабочих условий

Допускаемое осевое сжимающее усилие $F_{дЕ2}$ - из условия общей устойчивости в пределах упругости по формуле:

$$F_{дЕ2} := \frac{\pi \cdot (D_1 + s_3 - c) \cdot (s_3 - c) \cdot E}{n_y} \cdot \left(\frac{\pi}{\lambda} \right)^2 = 3.818 \times 10^{10} \text{ Па}$$

$$F_{дЕ} := \begin{cases} \min((F_{дЕ1} \ F_{дЕ2})) \\ F_{дЕ1} \text{ if } \frac{1}{D_{ор}} < 10 \end{cases}$$

$$F_{дЕ} = 1.344 \times 10^7 \text{ Па}$$

$$F_{д1} := \frac{F_{дП}}{\sqrt{1 + \left(\frac{F_{дП}}{F_{дЕ}} \right)^2}} = 5.859 \times 10^6$$

Условие устойчивости опорной обечайки в зоне отверстия для рабочих условий (сечение Д-Д по рис.11):

$$\frac{F_1}{\Psi_1 \cdot F_{д1}} + \frac{M_{15} + F_1 \cdot \Psi_3 \cdot D_3}{\Psi_2 \cdot M_{д1}} = 0.097$$

где $M_{д1}$ – допускаемый изгибающий момент:

$$M_{д1} := \frac{\pi}{4} \cdot D_3 \cdot (D_3 + s_3 - c) \cdot (s_3 - c) \cdot \sigma_{д0} \cdot \phi_3 = 2.005 \times 10^6$$

$0,097 < 1$ следовательно условие устойчивости опорной обечайки в зоне отверстий выполняется.

2.3.9 Расчет элементов опорного узла

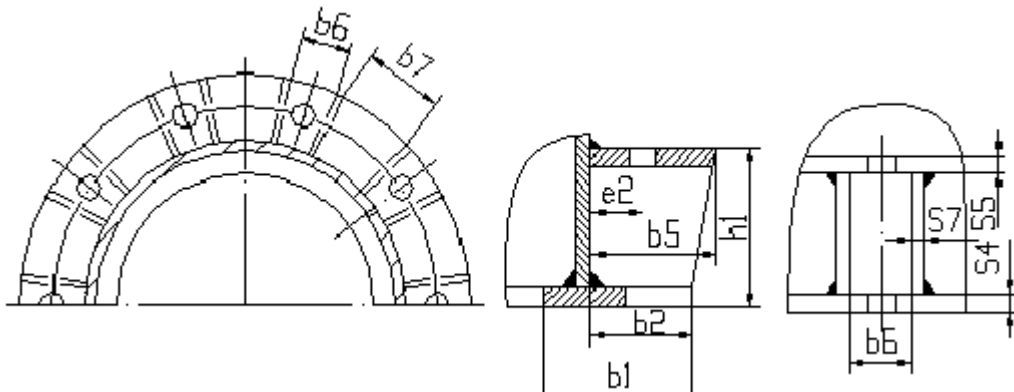


Рисунок 3.13 – Опорный узел

Ширину опорного кольца b_1 рассчитывают по формуле:

$$b_{1R} := \frac{1}{\pi \cdot D_4 \cdot \sigma_{дбет}} \cdot \left(\frac{4 \cdot M_{15}}{D_4} + F_1 \right) = 2.267 \times 10^{-3} \text{ м}$$

$$b_{1R} := \begin{cases} \text{"Ширина } b_1 \text{ не достаточна, измените ее в исходных данных"} \\ b_1 \text{ if } b_{1R} \leq b_1 \end{cases}$$

$$b_1 = 0.25$$

Выступающая ширина нижнего опорного кольца b_2 :

$$b_2 := \text{round} \left[\left[\frac{(2 \cdot d_{2H} + 0.03) + \frac{2}{3} \cdot b_1}{2} \right], 3 \right]$$

$$b_2 = 0.128$$

Напряжение сжатия в бетоне следует рассчитывать по формуле:

$$\sigma_{\text{бет}} := \sigma_{\text{дбет}} \cdot \frac{b_{1R}}{b_1} = 2.721 \times 10^5 \quad \text{Па}$$

spr1 := "Условие прочности сварного шва не выполняется"

spr2 := "Условие прочности сварного шва выполняется"

spr3 := "Проверку на прочность сварного шва для этого исполнения проводить не следует"

$$I := \begin{cases} \text{spr1} \\ \text{spr2} & \text{if } \max \left[\frac{1}{\pi \cdot D_3 \cdot 2 \cdot a_2} \cdot \left(\frac{4 \cdot M_1}{D_3} - F_1 \right) \right] \leq 0.6 \cdot \sigma_{\text{д0}} \wedge \text{tisp} = 1 \\ \text{spr3} & \text{if } \text{tisp} = 2 \vee \text{tisp} = 3 \vee \text{tisp} = 4 \end{cases}$$

I = "Условие прочности сварного шва выполняется"

Толщина нижнего опорного кольца:

$$\chi_1 := \begin{cases} 1 & \text{if } \text{tisp} = 1 \\ \left[\frac{1 + 1.81 \cdot \left(\frac{b_2}{b_7} \right)^3}{1 + 2.97 \cdot \left(\frac{b_2}{b_7} \right)^3} \right]^2 & \text{if } \text{tisp} = 2 \vee \text{tisp} = 3 \vee \text{tisp} = 4 \end{cases}$$

$$\chi_1 = 0.991$$

$$s_4 := \max \left(\left(\chi_1 \cdot b_2 \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot \sigma_{\text{бет}}}{\sigma_{\text{д0}}}} + c \cdot 1.5 \cdot s_3 \right) \right) = 0.015 \quad \text{м}$$

Примем толщину нижнего опорного кольца $s_4 = 0.02$ м.

Толщина верхнего опорного элемента - кольца: где χ_2 – коэффициент

$$\chi_2 := \sqrt{\frac{3 \cdot \left(\frac{b_5}{b_6}\right)}{\left(\frac{b_5}{b_6}\right)^2 \cdot \frac{e_1}{1 - \frac{e_1}{b_6}}}} \quad \chi_2 = 2.953$$

$$s_5 := \max\left(\left(\chi_2 \cdot \sqrt{\frac{A_\sigma \cdot \sigma_{дВ}}{\sigma_{д0}}} + c \cdot 1.5 \cdot s_3\right)\right) = 0.017 \text{ м}$$

Принимаем $s_5 = 0,02$ м.

Толщину ребра s_7 найдем по формуле:

$$s_7 = 0.008 \text{ м.} \quad \max\left(\left(\frac{A_\sigma \cdot \sigma_{дВ}}{\chi_3 \cdot b_2 \cdot \sigma_{д0}} + c \cdot 0.4 \cdot s_4\right)\right)$$

Расчет анкерных болтов

Число анкерных болтов n устанавливают конструктивно, при этом $n=4,6,8,10,12,16$...далее кратно 4.

Внутренний диаметр резьбы анкерных болтов найдем по формуле:

$$d_2 = 100 \cdot \left(\chi_8 \cdot \sqrt{\frac{|M_{13} - 0.44 \cdot F_1 \cdot D_4|}{n \cdot \sigma_{дВ} \cdot D_4}} + c \right)$$

$$d_2 = 27 \text{ мм.}$$

Принимаем болты М30.

2.3.10 Расчет средств защиты реактора гидрирования

Предохранительный клапан — трубопроводная арматура, предназначенная для защиты от механического разрушения оборудования и трубопроводов избыточным давлением путём автоматического выпуска избытка жидкой, паро- и газообразной среды из систем и сосудов с давлением сверх установленного.

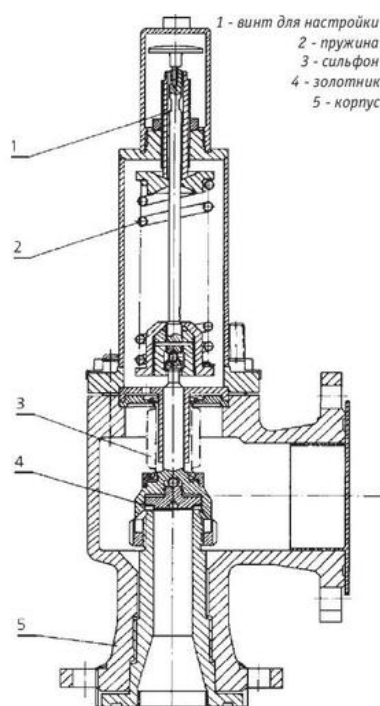


Рисунок 3.14 – Устройство предохранительного клапана

Предохранительные клапаны устанавливаются непосредственно на сосуде и аппарате в наиболее высокой их части с таким расчетом, чтобы в случае открытия клапана и аппарата, в первую очередь, удалялись скапливающиеся пары и газы.

Если клапаны по конструктивным соображениям нельзя разместить на верхнем днище сосуда и аппарата, в виде исключения, их можно ставить на отводящем трубопроводе или специальном отводе.

Проходное сечение подводящего патрубка, на котором устанавливается предохранительный клапан, должно быть не менее проходного сечения фланца со стороны входа продукта в предохранительный клапан. При необходимости установки двух клапанов и более (по расчету) на одном патрубке, площадь поперечного сечения патрубка должна быть не менее 1,25 суммарной площади проходного сечения клапанов.

Внутренний диаметр выхлопной трубы предохранительного клапана должен быть не менее внутреннего диаметра выходного штуцера клапана. В случае объединения выхлопных труб от нескольких предохранительных клапанов, установленных на одном сосуде или аппарате, сечение коллектора должно быть не менее суммы сечений выхлопных труб от этих клапанов.

Количество рабочих клапанов, их пропускная способность должны быть выбраны так, чтобы в сосуде или в аппарате при полном открытии клапана не могло образоваться давление, превышающее расчетное более, чем на 0,5 кгс/см² для сосудов и аппаратов с давлением до 3 кгс/см² включительно и на 10% для сосудов и аппаратов с давлением свыше 3 кгс/см².

Исходные данные:

Рабочая среда – ЭЭФ

Диаметр автоматического клапана-регулятора, мм.

In[2]= **d = 25**

Out[2]= 25

Рабочее давление среды, МПа.

In[3]= **P_p = 2.8**

Out[3]= 2.8

Наибольшее избыточное давление перед клапаном, МПа.

In[4]= **(P₁)_a = 21**

Out[4]= 21

Наибольшее избыточное давление за клапаном, МПа.

In[5]= **P₂ = 1.6**

Out[5]= 1.6

Молярная масса ЭЭФ, г/моль

$$\text{In[6]}:= \mathbf{M = 28.05}$$

$$\text{Out[6]}= 28.05$$

Температура в системе, К.

$$\text{In[7]}:= \mathbf{T_1 = -30 + 273}$$

$$\text{Out[7]}= 243$$

Плотность ЭЭФ, кг/м³

$$\text{In[8]}:= \rho = \frac{\mathbf{M}}{\mathbf{22.4}}$$

$$\text{Out[8]}= 1.25223$$

Решение:

Определяем максимальный аварийный расход этилена при полностью открытом регулирующем клапане $D_y = 25$ мм. Истечение газа происходит от давления $(P_1)_a = 21$ МПа до максимально допустимого давления в аппарате:

Расчет давления для полного открытия клапана:

$$\text{In[9]}:= \mathbf{(P_2)_a = 1.1 * P_p}$$

$$\text{Out[9]}= 2.31$$

Критическое давление этилена, МПа.

$$\text{In[11]}:= \mathbf{P_{кр} = 5.03}$$

$$\text{Out[11]}= 5.03$$

Критическая температура воздуха, К.

$$\text{In[12]}:= \mathbf{T_{кр} = 282.9}$$

$$\text{Out[12]}= 282.9$$

При параметрах перед клапаном-регулятором.

Давление перед клапаном-регулятором, МПа.

$$\text{In[13]}:= \mathbf{(P_1)_a + 0.1}$$

$$\text{Out[13]}= 21.1$$

Температура перед клапаном-регулятором, К.

$$\text{In[14]}:= \mathbf{T_1 = 243}$$

$$\text{Out[14]}= 243$$

Исходя из параметров (P) и (T₁) определяем коэффициент сжимаемости газов (z_a) по формуле адиабаты:

$$\ln[15]= z_a = 1 - \left((10.2 \times ((P_1)_a + 0.1) - 6) \times \left(0.00345 \times \frac{\rho}{1.2044} - 0.000446 \right) + 0.015 \right) \times (1.3 - 0.0144 \times (T_1 - 283.2))$$

Out[15]= 0.414627

Определяем показатель адиабаты для этилена ((k₁)_a) по формуле адиабаты:

$$\ln[16]= (k_1)_a = 1.556 - 3.9 \times 10^{-4} \times T_1 - 0.208 \times \rho + \left(\frac{(P_1)_a + 0.1}{T_1} \right)^{1.43} \times \left(384 \times \left(\frac{(P_1)_a + 0.1}{T_1} \right)^{0.8} \right)$$

Out[16]= 2.11193

ln[17]=

При параметрах после клапана-регулятора:

Давление после клапана-регулятора, МПа.

$$\ln[18]= (P_2)_a + 0.1$$

Out[18]= 2.41

Температура после клапана-регулятора, К.

$$\ln[19]= T_1 = 243$$

Out[19]= 243

Определяем показатель адиабаты для воздуха ((k₂)_a) по формуле:

$$\ln[20]= (k_2)_a = 1.556 - 3.9 \times 10^{-4} \times T_1 - 0.208 \times \rho + \left(\frac{(P_2)_a + 0.1}{T_1} \right)^{1.43} \times \left(384 \times \left(\frac{(P_2)_a + 0.1}{T_1} \right)^{0.8} \right)$$

Out[20]= 1.1809

Более правильно определять значение (k_a) как среднее между значениями перед

$$\text{In[21]}:= k_a = 0.5 ((k_1)_a + (k_2)_a)$$

$$\text{Out[21]}= 1.64641$$

Определяем критическое отношение давлений на клапане-регуляторе по формуле:

$$\text{In[22]}:= (\beta^*)_a = \left(\frac{2}{(k_a + 1)} \right)^{\frac{k_a}{k_a - 1}}$$

$$\text{Out[22]}= 0.490021$$

При истечении среды из отверстия с острыми кромками, каковыми являются ПУ, максимальный расход устанавливается при меньшем отношении давлений. Для предохранительных клапанов установлено, что:

$$\text{In[23]}:= (\beta^*)_{кл} = 0.57 (\beta^*)_a$$

$$\text{Out[23]}= 0.279312$$

Критическое истечение с постоянным максимальным расходом происходит при отношении давлений за и перед ПУ:

$$\text{In[24]}:= \beta^* = \frac{(P_2)_a + 0.1}{(P_1)_a + 0.1}$$

$$\text{Out[24]}= 0.114218$$

Определяем коэффициент докритического расхода $(B_2)_a$, учитывающий соотношение давлений за и перед ПУ. При максимальном критическом расходе среды $\beta \leq (\beta^*)_{кл}$, коэффициент $(B_2)=1$ [1, стр.50] .

Определяем коэффициент, учитывающий физико-химические свойства газов и паров при рабочих параметрах при $\beta_a \leq (\beta^*)_a$:

$$\text{In[26]}:= (B_3)_a = 1.59 \sqrt{\frac{k_a}{k_a + 1}} \left(\frac{2}{k_a + 1} \right)^{\frac{1}{k_a - 1}}$$

$$\text{Out[26]}= 0.813167$$

Определяем коэффициент $(B_1)_{(z=1)}$, учитывающий физико-химические свойства газов и паров при температуре и коэффициенте сжимаемости $(z_1)_a=0,94$.

$$\text{In[27]}:= (B_1)_{z=1} = 5.46 (B_3)_a \sqrt{\frac{M}{T_1}}$$

$$\text{Out[27]}= 1.98687$$

Определим коэффициент $(B_1)_a$, учитывающий физико—химические свойства газов и паров при параметрах среды перед клапаном.

$$\text{In[28]}:= (B_1)_a = \frac{(B_1)_{z=1}}{\sqrt{z_a}}$$

$$\text{Out[28]}= 3.0856$$

Пропускную способность предохранительного клапана следует рассчитывать по формуле

$$\ln[29]= m_a = 3.16 (B_3)_a \alpha_{кл} F_{кл} \sqrt{(P_1)_a + 0.1 \rho} ;$$

Определим площадь поперечного сечения клапана, мм².

$$\ln[30]= F_{кл} = \frac{N[\pi] * d^2}{4}$$

$$\text{Out}[30]= 490.874$$

$$\ln[31]= \alpha_{кл} = 0.55$$

$$\text{Out}[31]= 0.55$$

Максимальный аварийный расход газа через регулирующий клапан с D=25мм, при $\alpha_{кл}=0,55$, кг/ч:

$$\ln[32]= m_a = 3.16 (B_3)_a \alpha_{кл} F_{кл} \sqrt{(P_1)_a + 0.1 \rho}$$

$$\text{Out}[32]= 3188.6$$

$$\ln[33]=$$

Определяем необходимые размеры предохранительного устройства.

Максимально допустимое давление в аппарате, МПа.

$$\ln[34]= P_1 = (P_2)_a$$

$$\text{Out}[34]= 2.31$$

Определяем коэффициент сжимаемости газов z_1 :

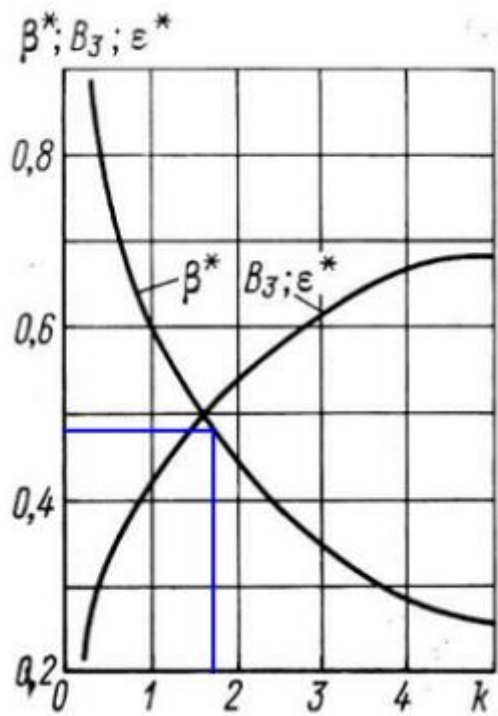
$$\ln[35]= z_1 = 1 - \left((10.2 \times (P_1) - 6) \times \left(0.00345 \times \frac{\rho}{1.2044} - 0.000446 \right) + 0.015 \right) \times (1.3 - 0.0144 \times (T_1 - 283.2))$$

$$\text{Out}[35]= 0.938897$$

При показателе адиабаты $k_a=1.80143$ определим критическое отношение давлений (β_1^*) на клапане-регуляторе по рисунку 3.3 [1,стр.50]

$$\ln[36]= k_a$$

$$\text{Out}[36]= 1.64641$$



B_3, β^*, ϵ^* .

Рисунок 3.15 – определение коэффициентов

In[37]:= $\beta^*_1 = 0.48$

Out[37]= 0.48

При истечении среды из отверстия с острыми кромками, каковыми являются ПУ, максимальный расход устанавливается при меньшем отношении давлений. Для предохранительных клапанов установлено, что:

In[38]:= $(\beta)_{кл} = 0.57 \beta^*_1$

Out[38]= 0.2736

In[39]:=

In[40]:=

Находим отношение давлений за и перед ПУ:

$$\text{In[41]}: \beta_1 = \frac{p_2 + 0.1}{p_1 + 0.1}$$

Out[41]= 0.705394

$$\text{In[42]}: \beta_1 \geq (\beta)_{\text{кл}}$$

Out[42]= True

При $\beta_1=0,594$ и $(\beta_1^*)_{\text{кл}}=0,324$ определяем B_2 .

$$\text{In[43]}: B_2 = \left(1 - \left(\frac{\beta_1 - (\beta)_{\text{кл}}}{1 - (\beta)_{\text{кл}}} \right)^2 \right)^{0.5}$$

Out[43]= 0.804147

При температуре $t=40^\circ\text{C}$ для этилена определяем $(B_1)^*_{(z=1)}$

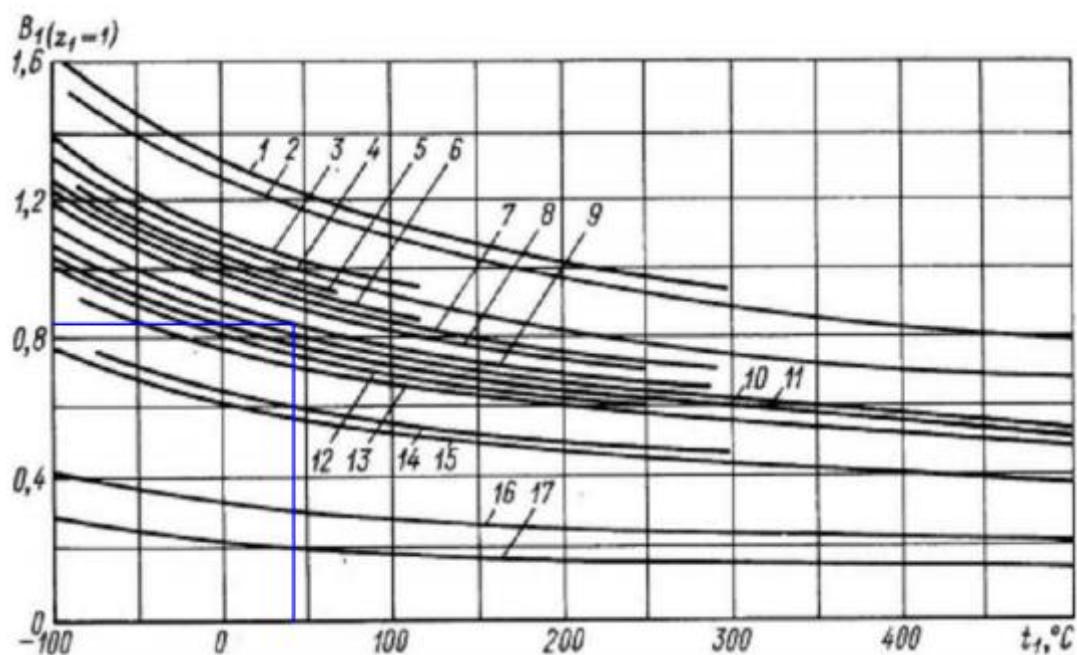


Рисунок: 3 Коэффициенты $(B_1)^*_{(z=1)}$ для идеальных газов.

Тогда по формуле определяем коэффициент B_1 , учитывающий физико—химические свойства газов и паров при параметрах среды перед клапаном.

$$\text{In[45]}: B_1 = \frac{(B_1^*)_{(z=1)}}{\sqrt{z_1}}$$

Out[45]= 0.846262

В качестве ПУ выбираем пружинный полноподъемный предохранительный клапан $\alpha_1 = 0,6$

In[47]: $\alpha_1 = 0.6$

Out[47]: 0.6

При $m = m_a = 3513.9$ кг/ч находим произведение $(\alpha_1 F)_R$, мм³.

$$\text{In[48]: } (\alpha_1 F)_R = \frac{m_a}{10 B_1 B_2 (p_1 + 0.1)}$$

Out[48]: 194.421

Тогда определяем расчетную площадь седла, мм².

$$\text{In[49]: } (F_c)_R = \frac{(\alpha_1 F)_R}{\alpha_1}$$

Out[49]: 324.035

Определим расчетный диаметр седла, мм.

$$\text{In[50]: } (d_c)_R = \sqrt{\frac{(F_c)_R}{0.785}}$$

Out[50]: 20.3171

Исходя из полученных данных $(d_c)_R = 20,32$ мм и $P_p = 2, 1$ МПа, выбираем предохранительный пружинный полноподъемный клапан типа СППК4-40 на условное давление 4,0 МПа с диаметром седла $d_c = 30$ мм из приложения по таблице П5 [1, стр. 165].

Выполним проверку выбранного клапана с $d_c = 30$ мм, $\alpha_1 = 0.6$ по формуле Росгортехнадзора.

При $k_a = 1.80143$ и $\beta_1 = 0.853035$ определяем коэффициент В по таблице П11 [1, стр.170].

In[53]: $d_c = 30$

Out[53]: 30

In[54]: k_a

Out[54]: 1.64641

In[55]: β_1

Out[55]: 0.705394

In[56]: $B = 0.953$

Out[56]: 0.953

Максимально допустимое давление в аппарате, МПа.

Определяем площадь седла, мм².

$$\text{In[57]: } F_{np} = \frac{m_a}{5.03 \alpha_1 B \sqrt{(p_1 + p_2) \rho}}$$

Out[57]: 501.023

Определяем расчетный диаметр ПК,мм.

$$\text{In[58]= } d_{nr} = \sqrt{\frac{F_{nr}}{0.785}}$$

Out[58]= 25.2635

$$\text{In[59]= } d_c \geq d_{nr}$$

Out[59]= True

Что свидетельствует о том, что ПК подходит по формуле Росгортехнадзора.

В результате проведенного механического расчета:

- Определили толщину стенки цилиндрической обечайки, эллиптических днищ. Она составила 55 мм;
- Выяснили, что необходимо укрепить отверстия в цилиндрической обечайке для штуцера ввода исходного сырья и люка-лаза. Сделали это путем увеличения толщины стенки штуцера и накладного кольца;
- 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, диаметры анкерных болтов, обеспечивающих устойчивость аппарата
- Рассчитали и подобрали предохранительный клапан.

Глава 3 Расчет теплообменного аппарата с плавающей головкой

3.1 Технологический расчет теплообменного аппарата

Исходные данные

$V := 22250 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}}$	расход ЭЭФ
$P_2 := 2.8 \text{ МПа}$	давление ЭЭФ
$P_1 := 0.6 \text{ МПа}$	давление оборотной воды
$t_{21} := 140 \text{ } ^\circ\text{C}$	температура ЭЭФ на входе в теплообменник
$t_{22} := 100 \text{ } ^\circ\text{C}$	температура ЭЭФ на выходе из теплообменника
$t_{11} := 20 \text{ } ^\circ\text{C}$	температура воды на входе в теплообменник
$t_{12} := 45 \text{ } ^\circ\text{C}$	температура воды на выходе из теплообменника

Тепловой баланс аппарата

Средняя температура газа:

$$t_{2\text{cp}} := \frac{t_{21} + t_{22}}{2} = 120 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Молярная масса ЭЭФ:

$$\mu_{\text{см}} := 28.41 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$$

Плотность ЭЭФ:

$$\rho_2 := \frac{P_2 \cdot 10^5}{R \cdot (t_{2\text{cp}} + 273)} = 2.435 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Теплоемкость ЭЭФ:

$$C_{p2} := 55.726 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

Удельная теплоемкость ЭЭФ:

$$C_{p2} := \frac{C_{p2}}{\mu_{\text{см}}} = 1.961$$

Тепловая нагрузка аппарата с учетом потерь 5%:

$$Q := 1.05 \cdot \frac{V \cdot \rho_2 \cdot C_{p2} \cdot (t_{21} - t_{22})}{3600} = 1.277 \times 10^3 \text{ кВт}$$

Средняя температура воды:

$$t_{1cp} := \frac{t_{11} + t_{12}}{2} = 32.5 \text{ C}$$

Теплоемкость воды:

$$C_1 := 4.190 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}$$

Из уравнения теплового баланса найдем расход воды:

$$G_1 := \frac{Q}{C_1 \cdot (t_{12} - t_{11})} = 12.191 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

3.1.1 Определение поверхности теплообмена и основных размеров аппарата

$$\Delta t_G := t_{21} - t_{12} = 95 \text{ C}$$

$$\Delta t_M := t_{22} - t_{11} = 80 \text{ C}$$

$$\Delta t := \frac{\Delta t_G - \Delta t_M}{\ln\left(\frac{\Delta t_G}{\Delta t_M}\right)} = 87.285 \text{ C}$$

Предварительно зададим коэффициент теплопередачи:

$$K := 50 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{K}}$$

Требуемая площадь теплообмена:

$$F_1 := \frac{Q \cdot 1000}{K \cdot \Delta t} = 292.604 \text{ м}^2$$

Выбираем теплообменник со следующими параметрами:

Площадь теплообмена – 351 м²

Диаметр кожуха, D_к – 1000 мм

Длина труб, L – 6 м

Число труб, n – 792

Число труб по вертикали – 26

Наружный диаметр труб d_н – 20 мм

3.1.2 Проверочный расчет выбранного аппарата

Определение коэффициента теплоотдачи от стенки к жидкости

Коэффициент кинематической вязкости: $\nu_1 := 7.256 \cdot 10^{-7}$

Число Прандтля: $Pr_1 := 4.845$

Коэффициент теплопроводности: $\lambda_1 := 0.6221 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$

Объемный расход воды: $V_1 := \frac{G_1}{\rho_1} = 0.012 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$

Где $\rho_1 := 994.3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ плотность воды при средней температуре

Скорость движения воды по трубам:

$$w_1 := \frac{4 \cdot V_1}{\frac{\pi}{4} \cdot (d_B \cdot 10^{-3})^2} = 0.462 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Число Рейнольдса:

$$Re_1 := \frac{w_1 \cdot (d_B \cdot 10^{-3})}{\nu_1} = 1.019 \times 10^4$$

Так как $Re > 4000$, значит режим течения турбулентный.

Число Нусельта:

$$Nu_1 := 0.021 \cdot Re_1^{0.8} \cdot Pr_1^{0.43} = 66.577$$

Определяем коэффициент теплоотдачи от воды к трубе:

$$\alpha_1 := \frac{Nu_1 \cdot \lambda_1}{d_B \cdot 10^{-3}} = 2.589 \times 10^3 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Определение коэффициента теплоотдачи от стенки к газу

Коэффициент динамической вязкости при средней температуре:

$$\mu_2 := 9.21 \cdot 10^{-6} \quad \text{Па}\cdot\text{с}$$

Коэффициент динамической вязкости:

$$\nu_2 := \frac{\mu_2}{\rho_2} = 3.672 \times 10^{-7} \quad \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$$

Находим коэффициент теплопроводности при средней температуре:

$$\lambda_2 := 0.0267 \quad \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$$

Число Прандтля многоатомного газа:

$$\text{Pr}_2 := 1$$

Площадь поперечного сечения межтрубного пространства:

$$f := \frac{\pi \cdot D_K \cdot 10^{-3}}{4} - \frac{(d_H \cdot 10^{-3})^2 \cdot (n \cdot \pi)}{4} = 0.537 \quad \text{м}^2$$

Смоченный периметр:

$$u := \pi \cdot D_K \cdot 10^{-3} + n \cdot \pi \cdot d_H \cdot 10^{-3} = 52.904 \quad \text{м}$$

Эквивалентный диаметр:

$$d_{э2} := 4 \cdot \frac{f}{u} = 0.041 \quad \text{м}$$

Скорость движения газа в межтрубном пространстве:

$$w_2 := \frac{V}{f \cdot 3600} = 1.152 \quad \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Число Рейнольдса:

$$\text{Re}_2 := \frac{w_2 \cdot d_{э2}}{\nu_2} = 1.273 \times 10^5$$

Так как $\text{Re} > 4000$, значит режим движения турбулентный.

Число Нусельта:

$$Nu_2 := 0.021 \cdot Re_2^{0.8} \cdot Pr_2^{0.43} = 254.654$$

Определяем коэффициент теплоотдачи от газа к трубе:

$$\alpha_2 := \frac{Nu_2 \cdot \lambda_2}{d_{32}} = 167.593 \quad \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$$

Коэффициент теплопроводности стенок труб: $\lambda_{ст} := 46.5 \quad \frac{Вт}{м \cdot К}$

Термическое сопротивление стенок труб: $\Sigma_r := 0.0002 \quad \frac{м^2 \cdot К}{Вт}$

Коэффициент теплопередачи:

$$K := \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta \cdot 10^{-3}}{\lambda_{ст}} + \Sigma_r + \frac{1}{\alpha_2}} = 90.83 \quad \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$$

Требуемая площадь теплообмена:

$$F := \frac{Q \cdot 10^3}{K \cdot \Delta t} = 209.003 \quad м^2$$

Необходимая длина трубок:

$$L_p := \frac{F}{n \cdot \pi \cdot d_b \cdot 10^{-3}} = 5.25 \quad м$$

Запас поверхности теплообмена:

$$\Delta := \frac{L - L_p}{L} \cdot 100 = 12.5$$

3.1.3 Расчет изоляции и тепловых потерь в окружающую среду

Примем допустимую температуру поверхности изоляции: $t_{из} := 55 \quad С$

Температура окружающего воздуха: $t_B := 20 \text{ C}$

Коэффициент теплоотдачи от изоляции к воздуху:

$$\alpha_n := 9.3 + 0.06 \cdot t_{\text{из}} = 12.6 \quad \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Коэффициент теплопередачи в окр. среду:

$$K_n := \alpha_n \cdot \frac{t_{\text{из}} - t_B}{t_{21} - t_B} = 3.675 \quad \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

В качестве материала изоляции примем совелит.

Коэффициент теплопроводности материала: $\lambda_{\text{из}} := 0.098 \quad \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$

Толщина изоляционного слоя:

$$\delta_{\text{из}} := \lambda_{\text{из}} \cdot \left(\frac{1}{K_n} + \frac{1}{\alpha_n} \right) = 0.034 \text{ м}$$

Наружная поверхность теплообмена:

$$F_n := \pi \cdot D_K \cdot 10^{-3} \cdot L + \pi \cdot \frac{(D_K \cdot 10^{-3})^2}{2} = 20.42 \text{ м}^2$$

Потери тепла в окружающую среду:

$$Q_{\text{пот}} := K_n \cdot F_n \cdot (t_{21} - t_B) = 9.005 \times 10^3 \text{ Вт}$$

3.1.4 Гидравлический расчет аппарата

Эквивалентная шероховатость труб: $\Delta := 0.2 \text{ мм}$

Коэффициент потерь на трение:

$$\lambda := 0.11 \left(\frac{\Delta}{d_B} + \frac{68}{\text{Re}_1} \right)^{0.25} = 0.041$$

Коэффициент сопротивления входной камеры: $\xi_{\text{ВХ}} := 1.5$

Коэффициент сопротивления поворота между входами: $\xi_{\text{ПОВ}} := 2.5$

Коэффициент сопротивления выходной камеры: $\xi_{\text{ВЫХ}} := 1.5$

Коэффициент сопротивления входа и выхода труб: $\xi_{\text{ТР}} := 1$

Потеря давления на трение и преодоления местных сопротивлений:

$$\Delta P := \left(\lambda \cdot \frac{L \cdot z_{\text{ТР}}}{d_{\text{в}} \cdot 10^{-3}} + \xi_{\text{ВХ}} + 12 \cdot z_{\text{ТР}} \cdot \xi_{\text{ТР}} + 5 \cdot \xi_{\text{ПОВ}} + \xi_{\text{ВЫХ}} \right) \cdot \frac{\rho_1 \cdot w_1^2}{2} = 7.448 \times 10^3 \text{ Па}$$

Мощность, потребляемая двигателем насоса:

$$N := \frac{V_1 \cdot 2 \cdot \Delta P}{0.75} = 243.526 \text{ Вт}$$

В результате технологического расчета теплообменного аппарата определили необходимую поверхность теплообмена – 292 м². Исходя из данных условий подобрали стандартный теплообменник с площадью – 351 м². Запас площади составил 12.5%.

3.2 Конструктивно – механический расчет теплообменного аппарата

3.2.1 Определение расчетных параметров

Исходные данные

$P_{\text{расч}} = 2,8$ - рабочее давление, МПа

$D_{\text{вн}} = 1000$ - внутренний диаметр, мм

$T_{\text{расч}} = 180$ - расчетная температура, С

$\varphi = 1$ - коэффициент прочности сварного шва

$c = 3$ - суммарная прибавка, мм

$\rho_{\text{воды}} = 1000$ - плотность воды, кг/м³

Для определения допускаемых напряжений и модуля упругости воспользуемся ГОСТ Р 52857.1 – 2007, [7].

Материал стали 09Г2С

$$t := (20 \ 100 \ 150 \ 200 \ 250 \ 300 \ 350 \ 375 \ 400 \ 420)^T$$

$$\sigma := (183 \ 160 \ 154 \ 148 \ 145 \ 134 \ 123 \ 116 \ 105 \ 92)^T$$

$$E := (1.99 \ 1.91 \ 1.86 \ 1.81 \ 1.76 \ 1.71 \ 1.64 \ 1.55 \ 1.44 \ 1.35)^T$$

Допускаемое напряжение $\sigma_{tR} := \text{Floor}(\text{linterp}(t, \sigma, T_{\text{расч}}), 0.5) = 150 \text{ МПа}$

Модуль упругости $E := \text{linterp}(t, E, T_{\text{расч}}) \cdot 10^5 = 1.83 \times 10^5$

Допускаемое напряжение при гидравлических испытаниях определяется по пределу текучести для выбранной стали при $t=20 \text{ С}$ взятому из ГОСТ Р 52857.1 – 2007, [1]:

$$\sigma_H := \text{Floor}\left(\frac{R_{m20}}{1.1}, 0.5\right) = 254.5 \text{ МПа}$$

Определяем расчетное давление по формуле:

$$P_{\text{расч}} := P_{\text{раб}} = 2.8 \text{ МПа}$$

Пробное давление при гидравлическом испытании:

$$P_{\text{пр}} := 1.25 \cdot P_{\text{расч}} \cdot \frac{\sigma_{20}}{\sigma_{tR}} = 4.27 \text{ МПа}$$

где $\sigma_{20} = 183$ - допускаемое напряжение для стали при 20 С

Условное давление для выбора фланцевых соединений определим по формуле:

$$P_{\text{усл}} := \text{Ceil}\left(P_{\text{расч}} \cdot \frac{\sigma_{20}}{\sigma_{tR}}, 1.5\right) = 6 \text{ МПа}$$

3.2.2 Определение толщины стенки обечайки

Ведем расчет согласно ГОСТ Р 52857.2 – 2007, [8].

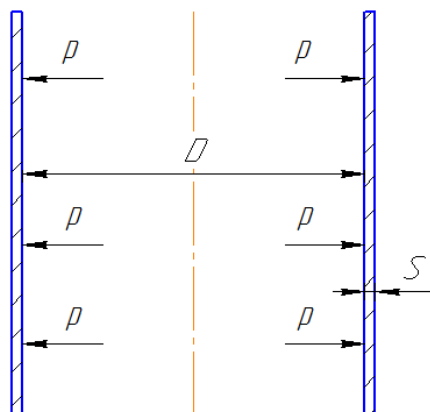


Рисунок 3.17 – Расчетная схема цилиндрической обечайки

Расчетная толщина стенки обечайки определяется по формуле:

$$s_R := \max \left(\frac{P_{расч} \cdot D_{вн}}{2 \cdot \sigma_{tR} \cdot \varphi - P_{расч}}, \frac{P_{пр} \cdot D_{вн}}{2 \cdot \sigma_{н} \cdot \varphi - P_{пр}} \right) = 9.421 \text{ мм} \quad (2.5)$$

Для выполнения условия прочности принимаем толщину стенки равной $s = 18$ мм.

Допускаемое внутреннее избыточное давление вычисляют по формуле:

$$P_{доп} := \left[\frac{2 \cdot \sigma_{tR} \cdot \varphi \cdot (s - c)}{D_{вн} + (s - c)} \right] = 4.433 \text{ МПа}$$

Проверка условия применимости формул:

$$Us11 := \begin{cases} \text{"Выполняется"} & \text{if } \frac{s - c}{D_{вн}} \leq 0.1 \\ \text{"Не выполнется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Us11 = \text{"Выполняется"}$$

3.2.3 Расчет эллиптических днищ

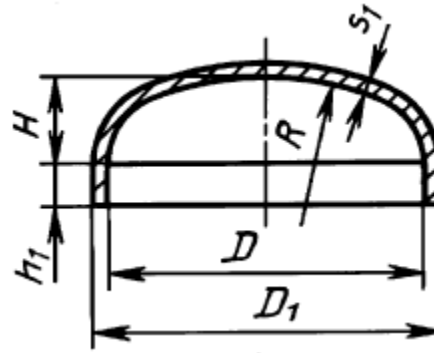


Рисунок 3.18 – Расчетная схема эллиптического днища

Расчетная толщина днища определяется по формуле:

$$s_R := \max \left(\frac{P_{\text{расч}} \cdot R}{2 \cdot \sigma_{tR} \cdot \varphi - 0.5 \cdot P_{\text{расч}}}, \frac{P_{\text{пр}} \cdot R}{2 \cdot \sigma_{tR} \cdot \varphi - 0.5 \cdot P_{\text{пр}}} \right) = 14.335 \text{ мм}$$

где $R = D_{\text{вн}}$ - радиус кривизны в вершине днища.

Принимаем толщину днища стандартного значения $s_{\text{дн}} = 18 \text{ мм}$

Проверка применимости формул для эллиптических днищ:

$$Us12 := \begin{cases} \text{"Выполняется"} & \text{if } 0.002 \leq \frac{s_{\text{дн}} - c}{D_{\text{вн}}} \leq 0.1 \\ \text{"Не выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Us12 = \text{"Выполняется"}$$

Допускаемое давление при гидроиспытании

$$P_{\text{доп.}} := \frac{2 \cdot \sigma_{tR} \cdot \varphi \cdot (s_{\text{дн}} - c)}{D_{\text{вн}} + 0.5 \cdot (s_{\text{дн}} - c)} = 4.467 \text{ МПа}$$

Определим длину отбортованной цилиндрической части днища по формуле:

$$h_1 := 0.8 \cdot \sqrt{D_{\text{вн}} \cdot (s_{\text{дн}} - c)} = 97.98 \text{ мм}$$

Принимаем $h_1 = 100$ мм.

Таким образом в результате расчета определили толщину стенки, обеспечивающие условие прочности, цилиндрической обечайки – 18 мм и толщину цилиндрического днища – 18 мм.

3.2.4 Укрепление отверстий в обечайке и днищах

Ведем расчет согласно ГОСТ Р 52857.3 – 2007, [9].

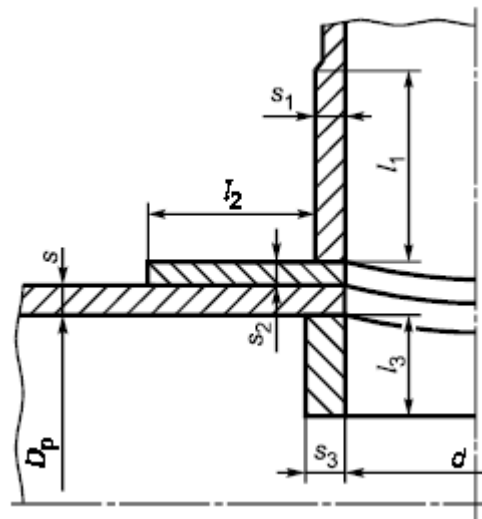


Рисунок 3.18 – Основная расчетная схема соединения штуцера со стенкой сосуда

Расчет толщины стенок патрубков

Расчетная толщина патрубка входа ЭЭФ $D_y=250$

$$s_{p1} := \frac{P_{\text{расч}} \cdot (d + 2 \cdot c)}{2 \cdot \sigma_{tR} \cdot \varphi - P_{\text{расч}}} = 2.883 \text{ мм}$$

Принимаем $s_{p1}=6$ мм

Расчетная толщина патрубка ввода воды $D_y=200$

$$s_{p1} := \frac{P_{расч} \cdot (d + 2 \cdot c)}{2 \cdot \sigma_{tR} \cdot \varphi - P_{расч}} = 4.52 \text{ мм}$$

Принимаем $s_{p1} = 6 \text{ мм}$

Проведем расчет для отверстия под ввод ЭЭФ $D_y = 250$

$d := 300$ мм	диаметр отверстия
$l_1 := 200$ мм	длина внешней части штуцера
$l_3 := 50$ мм	длина внутренней части штуцера
$s_1 := 6$	толщина стенки штуцера
$l_2 := 150$ мм	исполнительная ширина накладного кольца
$s_2 := 4$ мм	исполнительная толщина накладного кольца

$n :=$

цилиндрическая
 эллиптическая

$n = 1$

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

Тип = "цилиндрическая оболочка"

Согласно выбранной оболочки находим диаметры укрепляемых элементов по формулам:

$$D_p := \begin{cases} D_p \leftarrow D_{BH} & \text{if } n = 1 \\ D_p \leftarrow \frac{D_{BH}^2}{2 \cdot h} \cdot \sqrt{1 - 4 \cdot \left(\frac{D_{BH}^2 - 4 \cdot h^2}{D_{BH}^4} \right)} \cdot r^2 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$D_p = 1 \times 10^3$ мм

Определяем расчетный диаметр отверстия в стенке оболочки:

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

$d_p = 306$ мм

Проверка условий применения формул для расчета укрепления отверстий:

$$\text{Прим} := \begin{cases} \text{"Отношение диаметров НЕ выполняется"} & \text{if } \left(\frac{d_p - 2 \cdot c}{D_{\text{BH}}} > 1 \right) \text{ if } n = 1 \\ & \left(\left(\frac{d_p - 2 \cdot c}{D_{\text{BH}}} > 0.6 \right) \right) \text{ otherwise} \\ \text{"Отношение толщины к диаметру НЕ выполняется"} & \text{if } \left(\frac{s - c}{D_{\text{BH}}} > 0.1 \right) \text{ if } n = 1 \\ & \left(\left(\frac{s - c}{D_{\text{BH}}} > 0.1 \right) \right) \text{ otherwise} \\ \text{"Условия применения формул выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases} \quad 1 \text{ B}$$

С) Тип = "цилиндрическая оболочка"

$$\text{Прим} = \text{"Условия применения формул выполняются"} \\ s_p := \begin{cases} \frac{P_{\text{расч}} \cdot D_p}{2 \cdot \varphi \cdot \sigma_{tR} - P_{\text{расч}}} & \text{if } n = 1 \\ \frac{P_{\text{расч}} \cdot D_p}{4 \cdot \varphi \cdot \sigma_{tR} - P_{\text{расч}}} & \text{otherwise} \end{cases} \\ s_p = 9.421 \quad \text{мм}$$

Расчетная толщина стенки штуцера определяется по формуле:

$$s_{p1} := \frac{P_{\text{расч}} \cdot (d + 2 \cdot c)}{2 \cdot \sigma_{tR} \cdot \varphi - P_{\text{расч}}} = 2.883 \quad \text{мм}$$

Находим расчетные длины внешней и внутренней частей штуцера соответственно

$$l_{1p} := \min \left[11, \sqrt{(d + 2 \cdot c) \cdot (s_1 - c)} \right] = 30.299 \quad \text{мм} \\ l_{3p} := \min \left[13, 0.5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c) \cdot (s - 2c)} \right] = 30.299 \quad \text{мм}$$

Расчетная ширина накладного кольца:

$$l_{2p} := \min \left[12, \sqrt{D_p \cdot (s + s_2 - c)} \right] = 151.658 \quad \text{мм}$$

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

$$l_p := \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 122.474 \quad \text{мм}$$

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:

$$d_{op} := 0.4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 48.99 \quad \text{мм}$$

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

$$d_o := 2 \cdot \left[\left(\frac{s - c}{s_p} \right) - 0.8 \right] \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 194.035 \quad \text{мм}$$

Проверка условия необходимости укрепления отверстия:

$$Us14 := \begin{cases} \text{"Укрепление отверстия НЕОБХОДИМО"} & \text{if } d_o < d_p \\ \text{"Укрепление отверстия НЕ требуется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Тип = "цилиндрическая оболочка"

Us14 = "Укрепление отверстия НЕОБХОДИМО"

В случае укрепления отверстия утолщением стенки сосуда или штуцера либо накладным кольцом, либо торообразной вставкой или отбортовкой должно выполняться условие:

$$l_{1p} \cdot (s_1 - s_{1p} - c_s) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3 + l_p \cdot (s - s_p - c) \geq 0.5 \cdot (d_p - d_{op})$$

$$Us144 := \begin{cases} \text{"Условие выполняется"} & \text{if } l_{1p} \cdot (s_1 - s_{1p} - c_s) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_1 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3 + l_p \cdot (s - s_p - c) \geq 0.5 \cdot (d_p - d_{op}) \\ \text{"Условие НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Us144 = "Условие выполняется"

Так как условие выполнилось, находим внутреннее избыточное:

$$V := \frac{1 + \frac{l_{1p} \cdot (s_1 - c) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_2 - c - c) \cdot \chi_3}{l_p \cdot (s - c)}}{1 + 0.5 \cdot \frac{d_p - d_{op}}{l_p} + K \cdot \frac{d + 2 \cdot c}{D_p} \cdot \frac{l_{1p}}{l_p}} = 0.62$$

Допускаемое давление:

$$P_{дв} := \frac{2 \cdot K \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot \sigma_{tR} \cdot V}{D_p + (s - c) \cdot V} = 4.346 \text{ МПа}$$

В результате проведенного расчета установили, что требуется укрепление отверстия под штуцер ввода ЭЭФ и ввода воды. Укрепили отверстия с помощью увеличения толщины стенок штуцера и накладных колец.

3.2.5 Расчет фланцевого соединения

Для расчета воспользуемся ГОСТ Р 52857.4 – 2007, [10]

Исходя из рабочих условий и в соответствии с рекомендациями [13, с 213], выбираем приварные встык фланцы с уплотнительной поверхностью типа выступ – впадина, прокладка металлоасбест.

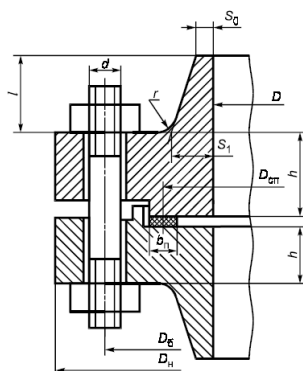


Рисунок 3.19 – Фланцевое соединение с уплотнительной поверхностью типа выступ - впадина

Расчет проведем фланцевого соединения крышки распределительной камеры $D_y = 1000$

$D := 1000$	мм	внутренний диаметр фланца
$D_H := 1300$	мм	наружный диаметр фланца
$D_6 := 1220$	мм	диаметр болтовой окружности
$D_{сп} := 1100$	мм	средний диаметр прокладки
$b_{пр} := 15$	мм	ширина прокладки
$h := 115$	мм	толщина фланца
$h_{пр} := 3.5$	мм	толщина прокладки
$S_0 := 28$	мм	толщина стенки фланца
$d := 46$	мм	диаметр отверстия
$n := 40$		количество отверстий
$S1 := 63$	мм	толщина стенки фланца
$P := 4$	МПа	расчетное давление

Материал прокладки металлоасбест

Выбор крепежных элементов:



Расчетная температура неизолированных плоских фланцев определяется по формуле:

$$t_{\phi} := 0.96 \cdot t = 384$$

Расчетная температура болтов:

$$t_6 := 0.85 \cdot t = 340$$

Допускаемые напряжения для шпилек из стали 35Х:

$$\sigma_{д,6} := \text{Floor}(\text{interp}(t, \sigma_6, t_6), 0.5) = 222 \text{ МПа}$$

Модуль упругости для болтов при рабочей температуре:

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

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

$$\sigma_{206} := 183.3 \text{ МПа}$$

Коэффициент линейного расширения стали 35Х при $t = 250\text{-}300 \text{ }^\circ\text{C}$

$$\alpha_b := 14.8 \cdot 10^{-6} \quad 1/\text{K}$$

Допускаемые напряжения для фланцев из стали 09Г2С

$$t := \begin{pmatrix} 250 \\ 300 \end{pmatrix} \quad \sigma_\phi := \begin{pmatrix} 145 \\ 134 \end{pmatrix}$$

$$\sigma := \text{Floor}(\text{linterp}(t, \sigma_\phi, t_\phi), 0.5) = 140.5 \text{ МПа}$$

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

$$\sigma_{д.ф} := \eta \cdot \sigma = 140.5 \text{ МПа}$$

Коэффициент линейного расширения стали 09Г2С при $t = 250\text{-}300 \text{ }^\circ\text{C}$

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

Находим эффективную ширину плоской прокладки по формуле:

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

где $b_n = 15 \text{ мм}$ – ширина прокладки.

$$b_0 = 17 \quad \text{мм}$$

Характеристики прокладки:

$m = 2.5$ – прокладочный коэффициент

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

$K_{обж} = 0.9$ – коэффициент обжатия прокладки

$E_n = 200 \text{ МПа}$ – условный модуль сжатия прокладки

Усилия, необходимые для смятия прокладки и обеспечения герметичности фланцевого соединения

$$P_{\text{обж}} := 0.5 \pi \cdot D_{\text{сп}} \cdot b_0 \cdot m \cdot |P| = 2.937 \times 10^5 \text{ Н}$$

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

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

$$R_{\text{п}} = 5.875 \times 10^5 \quad \text{Н}$$

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

Площадь поперечного сечения болтов (шпилек):

$$f_6 = 1045 \text{ мм}^2$$

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

$$A_6 := n \cdot f_6 = 4.18 \times 10^4 \text{ мм}^2$$

Равнодействующая нагрузка от давления

$$Q_{\text{д}} := \frac{\pi}{4} \cdot (D_{\text{сп}})^2 \cdot P = 3.801 \times 10^6 \text{ Н}$$

Приведенная нагрузка, вызванная воздействием внешней силы и изгибающего момента:

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

Найдем податливость прокладки:

$$y_{\text{п}} := \frac{h_{\text{п}} \cdot K_{\text{обж}}}{E_{\text{п}} \cdot \pi \cdot D_{\text{сп}} \cdot b_{\text{п}}} = 2.279 \times 10^{-7} \text{ мм/Н}$$

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

$$L_{60} := 230 \quad \text{мм}$$

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

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

$$L_6 = 255.76 \quad \text{мм}$$

Податливость болтов рассчитывается по формуле:

$$y_6 := \frac{L_6}{E_{206} \cdot A_6} \quad y_6 = 2.807 \times 10^{-8} \quad \text{мм/Н}$$

Расчетные параметры фланцев

- параметр длины обечайки

$$l_0 := \sqrt{D \cdot S_0} \quad l_0 = 167.332 \quad \text{мм}$$

- отношение наружного диаметра фланца к внутреннему:

$$K := \frac{D_H}{D} \quad K = 1.3$$

- коэффициенты, зависящие от соотношения размеров тарелки фланца

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

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

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

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

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

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

- коэффициент λ

$$\lambda := \frac{\beta_F \cdot h + l_0}{\beta_T \cdot l_0} + \frac{\beta_V \cdot h^3}{\beta_U \cdot l_0 \cdot (S_0)^2} \quad \lambda = 1.673$$

Угловая податливость фланцев

Угловая податливость фланцев при затяжке

$$y_\Phi := \frac{0.91 \cdot \beta_V}{E_{20} \cdot \lambda \cdot l_0 \cdot (S_1)^2} \quad y_\Phi = 2.104 \times 10^{-12}$$

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

$$y_{\Phi H} := \left(\frac{\pi}{4}\right)^3 \cdot \frac{D_6}{E_{20} \cdot h^3 \cdot D_H} \quad y_{\Phi H} = 1.397 \times 10^{-12}$$

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

$$C_F := \max \left[1, \sqrt{\frac{\pi \cdot D_6}{n \cdot \left(2 \cdot d + \frac{6 \cdot h}{m + 0.5} \right)}} \right] = 1.015$$

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

$$b := 0.5(D_6 - D_{сп}) \quad b = 60$$

$$\gamma := \frac{1}{y_{\Pi} + y_{\text{б}} \cdot \frac{E_{206}}{E_{\text{б}}} + 2 \cdot b^2 \cdot y_{\text{ф}} \cdot \frac{E_{20}}{E}} \quad \gamma = 3.617 \times 10^6$$

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

$$\alpha := 1 - \frac{y_{\Pi} - 2 \cdot e \cdot y_{\text{ф}} \cdot b}{y_{\Pi} + y_{\text{б}} + 2 \cdot b^2 \cdot y_{\text{ф}}} \quad \alpha = 0.193$$

Коэффициент жесткости фланцевого соединения, нагруженного внешним изгибающим моментом:

$$\alpha_{\text{М}} := \frac{y_{\text{б}} + 2 \cdot y_{\text{фН}} \cdot b \cdot \left(b + e - \frac{e^2}{D_{\text{сп}}} \right)}{y_{\text{б}} + y_{\Pi} \cdot \left(\frac{D_{\text{б}}}{D_{\text{сп}}} \right)^2 + 2 \cdot y_{\text{фН}} \cdot b^2} \quad \alpha_{\text{М}} = 0.138$$

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

$$Q_{\text{т}} := \gamma \cdot [2\alpha_{\text{ф}} \cdot h \cdot (t_{\text{ф}} - 20) - 2\alpha_{\text{б}} \cdot h \cdot (t_{\text{б}} - 20)] \quad Q_{\text{т}} = -3.639 \times 10^6 \quad \text{Н}$$

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

$$P_{\text{б1}} := \max \left[\left[\alpha \cdot (Q_{\text{д}} + F) + R_{\Pi} + \frac{4 \cdot \alpha_{\text{М}} \cdot |M|}{D_{\text{сп}}} \right], \left[\alpha \cdot (Q_{\text{д}} + F) + R_{\Pi} + \frac{4 \cdot \alpha_{\text{М}} \cdot |M|}{D_{\text{сп}}} - Q_{\text{т}} \right] \right]$$

$$P_{\text{б1}} = 4.96 \times 10^6 \quad \text{Н}$$

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

$$P_{62} = 3.065 \times 10^6 \quad \text{Н}$$

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

$$P_{6M} := \max(P_{61}, P_{62}) \qquad P_{6M} = 4.96 \times 10^6 \quad \text{Н}$$

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

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

$$P_{6p} = 4.389 \times 10^6 \quad \text{Н}$$

Проверка прочности болтов (шпилек) и прокладки

Расчетные напряжения в болтах (шпильках)

- при затяжке:

$$\sigma_{61} := \frac{P_{6M}}{A_6} \qquad \sigma_{61} = 118.664 \quad \text{МПа}$$

- в рабочих условиях:

$$\sigma_{62} := \frac{P_{6p}}{A_6} \qquad \sigma_{62} = 104.995 \quad \text{МПа}$$

$$Us1_1 := \begin{cases} \text{"Условия прочности в при затяжке НЕ выполняются"} & \text{if } \sigma_{61} > \sigma_{206} \\ \text{"Условия прочности в рабочих условиях НЕ выполняются"} & \text{if } \sigma_{62} > \sigma_{д.6} \\ \text{"Условия прочности выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

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

Удельное давление на прокладку находим по формуле:

$$q := \frac{\max(P_{6M}, P_{6P})}{\pi \cdot D_{СП} \cdot b_{П}} \quad q = 71.767 \text{ МПа}$$

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:

$$M_M := C_F \cdot P_{6M} \cdot b \quad M_M = 2.976 \times 10^8 \quad \text{Н*мм}$$

Расчетный изгибающий момент, действующий на фланец в рабочих условиях:

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

$$M_P = 4.002 \times 10^8 \quad \text{Н*мм}$$

$$\sigma_{0M} := \frac{M_M}{\lambda \cdot (S1 - c_o)^2 \cdot D_{гр}} \quad \sigma_{0M} = 49.401 \quad \text{МПа}$$

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

- радиальное напряжение:

$$\sigma_{RM} := \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + l_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot l_0 \cdot D} \cdot M_M \quad \sigma_{RM} = 24.633 \quad \text{МПа}$$

- окружное напряжение:

$$\sigma_{TM} := \frac{\beta_Y \cdot M_M}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_{RM} \quad \sigma_{TM} = 75.469 \quad \text{МПа}$$

Расчетные напряжения во фланце в рабочих условиях:

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

$$\sigma_{0p} := \frac{M_p}{\lambda \cdot (S1 - c_o)^2 \cdot D_{гр}} \quad \sigma_{0p} = 66.426 \quad \text{МПа}$$

- максимальные меридиональные мембранные напряжения в обечайке плоского фланца:

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

$$\sigma_{0mp} = 18.971 \quad \text{МПа}$$

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

- радиальное напряжение:

$$\sigma_{Rp} := \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + l_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot l_0 \cdot D} \cdot M_p \quad \sigma_{Rp} = 33.122 \quad \text{МПа}$$

- окружное напряжение:

$$\sigma_{Tp} := \frac{\beta_Y \cdot M_p}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_{Rp} \quad \sigma_{Tp} = 101.478 \quad \text{МПа}$$

Проверка условий статической прочности фланцев

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

$$\sigma_{3max} := \max(|\sigma_{0m} + \sigma_{Rm}|, |\sigma_{0m} + \sigma_{Tm}|)$$

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

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

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

Проверка углов поворота фланцев

Угол поворота приварного встык фланца, плоского фланца

$$\Theta := M_p \cdot y_{\phi} \cdot \frac{E_{20}}{E} \quad \Theta = 1.042 \times 10^{-3}$$

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.

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

3.2.6 Расчет толщины трубной решетки

Расчет толщины неподвижной трубной решетки

Наружный диаметр прокладки $D_{п.н} := 1075 \text{ мм}$

Внутренний диаметр прокладки $D_{п.в} := 1049 \text{ мм}$

Средний диаметр прокладки $D_{с.п.} := \frac{D_{п.н} + D_{п.в}}{2} = 1.062 \times 10^3 \text{ мм}$

Шаг расположения отверстий в решетке $t_p := 26$

Диаметр отверстий в решетке $d_o := 20.5 \text{ мм}$

Коэффициент прочности решетки $\varphi := \frac{t_p - d_o}{t_p} = 0.212$

Расчетная толщина неподвижной решетки $S := \frac{D_{с.п.}}{4.2} \cdot \sqrt{\frac{P_{np}}{\varphi \cdot \sigma_{tR}}} + 2 \cdot c = 96.757 \text{ мм}$

Исполнительная толщина неподвижной решетки $S_{исп} := 98 \text{ мм} \quad +$

Расчетная толщина неподвижной решетки $S := \frac{D_{с.п.}}{4.2} \cdot \sqrt{\frac{P_{пр}}{\varphi \cdot \sigma_{tR}}} + 2 \cdot c = 96.757 \text{ мм}$

Исполнительная толщина неподвижной решетки $S_{исп} := 98 \text{ мм}$

Расчет толщины подвижной трубной решетки

Наружный диаметр прокладки $D_{п.н.} := 990 \text{ мм}$

$D_{п.в.} := 961 \text{ мм}$ +

Внутренний диаметр прокладки

Средний диаметр прокладки $D_{с.п.} := \frac{D_{п.н.} + D_{п.в.}}{2} = 975.5 \text{ мм}$

Расчетная толщина неподвижной решетки $S := \frac{D_{с.п.}}{4.2} \cdot \sqrt{\frac{P_{пр}}{\varphi \cdot \sigma_{tR}}} + 2 \cdot c = 89.202 \text{ мм}$

Исполнительная толщина подвижной решетки $S_{исп} := 90 \text{ мм}$

Расчет плоской крышки распределительной камеры

Наружный диаметр прокладки $D_H := 1075 \text{ мм}$

Внутренний диаметр прокладки $D_B := 1038 \text{ мм}$

Средний диаметр прокладки $D_{с.п.} := 1057$ асбометаллическая прокладка

Полная ширина прокладки $b := \frac{D_H - D_B}{2} = 18.5 \text{ мм}$

Расчетная ширина уплотнения $b_0 := 65 \text{ мм}$

Прокладочный коэффициент $m := 3.25$

Удельное давление смятия прокладки $q := 380$

Диаметр болтовой окружности $D_6 := 1170 \text{ мм}$

Равнодействующая внутреннего давления $Q_d := 0.785 \cdot D_{с.п.}^2 \cdot P_{пр} = 3.745 \times 10^6$

Реакция прокладки в рабочих условиях $R_{п} := 2 \cdot \pi \cdot m \cdot P_{пр} \cdot D_{с.п.} = 9.217 \times 10^4$

Площадь поперечного сечения шпильки

$$\varphi_6 := 520$$

Допускаемое напряжение для шпилек

$$\sigma := 230$$

Принятое количество шпилек

$$\Pi := 40$$

Условие прочности шпилек

$$\frac{P_6}{\Pi \cdot \varphi_6} = 184.477$$

Коэффициент

$$\psi := \frac{P_6}{Q_d} = 1.025$$

Коэффициент

$$K_1 := 0.5$$

Коэффициент

$$K_2 := 0.8 \cdot \sqrt{\frac{D_6}{D_{C.П.}}} - 1 = 0.262$$

Коэффициент ослабления

$$K_o := 1$$

Расчетная толщина крышки

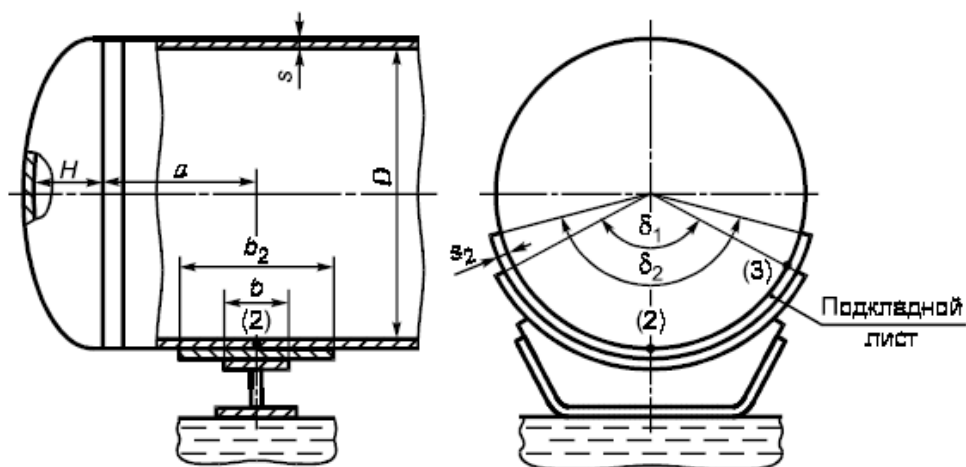
$$S_1 := \frac{K_1}{K_o} \cdot D_{C.П.} \cdot \sqrt{\frac{P_{np}}{(\sigma_{tR})}} + c = 91.169 \text{ мм}$$

Принимаем

$$S_1 := 95 \text{ мм}$$

3.2.7 Расчет седловых опор

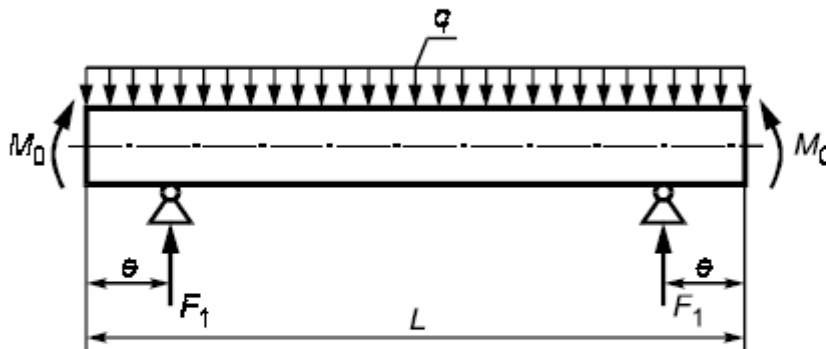
Сосуды, работающие под внутренним избыточным давлением



Исходные данные

$\rho := 7850$	плотность материала, кг/м ³
$H := 250$	высота выпуклой части днища по внутренней поверхности без учета цилиндрической отбортовки, мм;
$L := 6200$	длина цилиндрической части сосуда, включая длину цилиндрической отбортовки днища, мм;
$D := 1000$	внутренний диаметр цилиндрической обечайки или выпуклого днища, мм;
$P_{rab} := 2.8$	внутреннее избыточное или наружное давление, МПа
$\phi := 1$	коэффициент прочности сварных швов обечайки, расположенных в области опорного узла;
$E := 1.91 \cdot 10^5$	модуль продольной упругости при расчетной температуре, МПа
$b := 50$	ширина седловой опоры, мм;
$s_2 := 12$	исполнительная толщина подкладного листа, мм;
$b_2 := 200$	ширина подкладного листа, мм;
$\sigma_t := 160$	допускаемое напряжение при расчетной температуре, МПа;
$\sigma_{20} := 180$	допускаемое напряжение при температуре 20 °С, МПа;
$a := 2000$	длина выступающей цилиндрической части сосуда, включая отбортовку днища, мм;
$e := a + H$	длина свободновыступающей части эквивалентного сосуда, мм;
$t_{rab} := 140$	рабочая температура в аппарате, °С;
$c := 1.5$	сумма прибавок к расчетной толщине стенки, мм;
$\delta_1 := 120\text{-deg}$	угол охвата седловой опоры, °;
$\delta_2 := 140\text{-deg}$	угол охвата сосуда подкладным листом, °.

В качестве основной расчётной схемы принимаем цилиндрический сосуд постоянного сечения симметрично опёртый на две опоры.



Выберите условие нагружения:

z :=

Внутреннее давление
Наружнее давление

Допускаемое наружное давление

$$n_y := \begin{cases} 2.4 & \text{if } o = 1 \\ 1.8 & \text{if } o = 2 \end{cases} \quad n_y = 2.4$$

$$p_d := \begin{cases} p_{dp} \leftarrow \frac{2 \cdot \sigma_d \cdot (s - c)}{D + (s - c)} \\ B_1 \leftarrow \min \left[1.0, 9.45 \cdot \frac{D}{L} \cdot \sqrt{\frac{D}{100 \cdot (s - c)}} \right] \\ p_{dE} \leftarrow \frac{2.08 \cdot 10^{-5} \cdot E \cdot D}{n_y \cdot B_1 \cdot L} \cdot \left[\frac{100 \cdot (s - c)}{D} \right]^{2.5} \\ p_d \leftarrow \frac{p_{dp}}{\sqrt{1 + \left(\frac{p_{dp}}{p_{dE}} \right)^2}} \end{cases}$$

$$p_d = 0.234 \text{ МПа}$$

Вес аппарата: $G = 192000 \text{ Н}$

Масса 19,2 тонн

Проверка применимости формул:

$$\text{Prov} := \begin{cases} \text{"Формулы применимы"} & \text{if} \\ \text{"Формулы НЕ применимы"} & \text{otherwise} \end{cases} \begin{cases} A_k \geq (s - c) \cdot \sqrt{D \cdot (s - c)} \\ 60 \cdot \text{deg} \leq \delta_1 \leq 180 \cdot \text{deg} \\ \frac{s - c}{D} \leq 0.5 \\ s_2 \geq s \end{cases}$$

Prov = "Формулы применимы"

Нагрузки на корпус аппарата:

$$q := \frac{G}{L + \frac{4 \cdot H}{3}} \quad q = 29.388 \frac{\text{H}}{\text{мм}}$$

$$M_0 := q \cdot \frac{D^2}{16} \quad M_0 = 1.837 \times 10^6 \text{ Н} \cdot \text{мм}$$

Опорное усилие:

$$F_1 := \frac{G}{2}$$

$$F_1 = 9.6 \times 10^4 \text{ Н}$$

Горизонтальная сила (перпендикулярная оси аппарата):

$$P_1 = k_{18} * F_1 = 0.1 * 9.6 = 0.96 \text{ т}$$

Площадь опорной плиты (бетон В20):

$$F_n \geq F_{nR} = \frac{F_1}{[\sigma]} = \frac{9.6}{1500} = 64 \text{ см}^2$$

Проверка: $0,8 * 2 * 100 = 160 > 64$

Действительное напряжение в бетоне:

$$\sigma_{\text{бет}} = [\sigma_{\text{бет}}] \frac{F_{nR}}{F_n} = 1500 \frac{64}{160} = 600 \text{ т/м}^2$$

Расчет толщины опорной пластины:

$$S_{nR} = 2.45 * b \sqrt{\frac{K_{19} * \sigma_{\text{bem}}}{1.1 * [\sigma]}} = 2.45 * 0.1 * \sqrt{\frac{0.5 * 600}{1.1 * 15400}} = 0.032 \text{ м} = 32 \text{ мм}$$

K_{19} - табличный коэффициент

$[\sigma]$ - доп.напряжение для Ст3

Толщина полки швеллера 46 мм > 32 мм

Расчет ребра на изгиб:

$$S_1 \geq S_{pR} = \frac{42 * P_1}{1.1 * [\sigma] * D} = \frac{42 * 0.96}{1.1 * 15400 * 1} = 0.024 = 3 \text{ мм}$$

Толщина опорных ребер 4 мм > 3 мм

Проверка несущей способности обечайки в сечении между опорами

Допускаемый изгибающий момент:

$$M_d := \begin{cases} M_p \leftarrow \frac{\pi}{4} \cdot D \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot \sigma_d \\ M_E \leftarrow \frac{8.9 \cdot 10^{-5} \cdot E}{n_y} \cdot D^3 \cdot \left[\frac{100 \cdot (s - c)}{D} \right]^{2.5} \\ M_d \leftarrow \frac{M_p}{\sqrt{1 + \left(\frac{M_p}{M_E} \right)^2}} \end{cases}$$

$$M_d = 1.183 \times 10^9 \quad \text{Н·мм}$$

$$K_9 = 1.173$$

Проверка условия прочности:

$$\text{Проверка1} := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется."} & \text{if } \frac{\pi \cdot D}{4 \cdot (s - c)} + \frac{4 \cdot M_{12} \cdot K_9}{\pi \cdot D^2 \cdot (s - c)} \leq \sigma_d \cdot \phi \\ \text{"Условие прочности НЕ выполняется. Увеличить толщину стенки"} & \text{otherwise} \\ \text{"Проверка не выполняется"} & \text{if } z = 2 \end{cases}$$

Проверка1 = "Условие прочности выполняется."

Примем: $\underset{\text{мм}}{s} := 12$ мм

Максимальный момент между опорами:

$$M_{12} := M_0 + F_1 \cdot \left(\frac{L}{2} - a \right) - \frac{q}{2} \cdot \left(\frac{L}{2} + \frac{2}{3} \cdot H \right)^2$$

$$M_{12} = -4.936 \times 10^7 \quad \text{Н}\cdot\text{мм}$$

Поперечное усилие в сечении оболочки над опорой:

$$Q_1 := \frac{L - 2 \cdot a}{L + \frac{4}{3} \cdot H} \cdot F_1 \qquad Q_1 = 3.233 \times 10^4 \quad \text{Н}$$

Дополнительные вычисления:

K9 - коэффициент, учитывающий частичное заполнение жидкостью

$$x := \frac{L}{D} \quad y := \frac{D}{(s-c)}$$

$$W1 := -0.20924 \cdot (x-1) + 0.028702 \cdot x \cdot (x-1) + 0.4795 \cdot 10^{-3} \cdot y \cdot (x-1)$$

$$W2 := -\left[0.2391 \cdot 10^{-6} \cdot x \cdot y \cdot (x-1) + 0.29936 \cdot 10^{-2} \cdot (x-1) \cdot x^2 + 0.85692 \cdot 10^{-6} \cdot (x-1) \cdot y^2\right]$$

$$W3 := 0.88174 \cdot 10^{-6} \cdot x^2 \cdot (x-1) \cdot v - 0.75955 \cdot 10^{-8} \cdot v^2 \cdot (x-1) \cdot x$$

$$W4 := 0.82748 \cdot 10^{-4} \cdot (x-1) \cdot x^3 + 0.48168 \cdot 10^{-9} \cdot (x-1) \cdot y^3$$

$$K9 := \max(1.6 + W1 + W2 + W3 + W4, 1)$$

$$\text{Проверка}_1 := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется."} & \text{if } \frac{\pi \cdot D}{4 \cdot (s-c)} + \frac{4 \cdot M_{12} \cdot K9}{\pi \cdot D^2 \cdot (s-c)} \leq \sigma_d \cdot \phi \\ \text{"Условие прочности НЕ выполняется. Увеличить толщину стенки"} & \text{otherwise} \\ \text{"Проверка не выполняется"} & \text{if } z = 2 \end{cases}$$

$$\text{Проверка}_1 = \text{"Условие прочности выполняется."}$$

Проверка условия устойчивости:

$$p_v := \begin{cases} 0 & \text{if } z = 1 \\ p & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Проверка}_2 := \begin{cases} \text{"Условие устойчивости выполняется."} & \text{if } \frac{p_v}{p_d} + \frac{M_{12}}{M_d} \leq 1 \\ \text{"Условие устойчивости НЕ выполняется."} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Проверка}_2 = \text{"Условие устойчивости выполняется."}$$

Проверка несущей способности обечайки, неукреплённой кольцами жесткости в области опорного узла

Параметр, определяемый расстоянием до днища:

$$\gamma := 2.83 \cdot \frac{a}{D} \cdot \sqrt{\frac{(s-c)}{D}} \quad \gamma = 0.58$$

Параметр, определяемый шириной пояса опоры:

$$\beta_1 := 0.91 \cdot \frac{b}{\sqrt{D \cdot (s-c)}} \quad \beta_1 = 0.444$$

Общее меридиональное мембранное напряжение изгиба, действующее в области опорного узла.

$$\sigma_{\text{mx}} := \frac{4 \cdot M_1}{\pi \cdot D^2 \cdot (s-c)} \quad \sigma_{\text{mx}} = 8.798 \quad \text{МПа}$$

Выберите вид обечайки:

u :=

Цилиндрическая обечайка без подкладных листов
Цилиндрическая обечайка с подкладными листами

$$w := \begin{cases} s-c & \text{if } u = 1 \\ (s-c) \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{s_2}{s-c}\right)^2} & \text{if } u = 2 \end{cases}$$

$$\underline{\underline{b}} := \begin{cases} b & \text{if } u = 1 \\ b_2 & \text{if } u = 2 \end{cases}$$

$$\underline{\underline{\delta}} := \begin{cases} \delta_1 & \text{if } u = 1 \\ \delta_2 & \text{if } u = 2 \end{cases}$$

$$F_1 \leq \min(F_{d2}, F_{d3})$$

F_{d2} - допустимое опорное усилие от нагружения в меридиональном направлении.

F_{d3} - допустимое опорное усилие от нагружения в окружном направлении

Предельные напряжения изгиба σ_{i2} , σ_{i3} :

Коэффициенты для определения $\sigma_{ij} = K_1 \cdot K_2 \cdot \sigma_d$

$$K_2 := \begin{cases} 1.25 & \text{if } o = 1 \\ 1.05 & \text{if } o = 2 \end{cases}$$

$$K_2 = 1.25$$

K_{10} - коэффициент, учитывающий влияние ширины пояса опоры

$$K_{10} := \max\left(\frac{e^{-\beta_1 \cdot \sin(\beta_1)}}{\beta_1}, 0.25\right) \quad K_{10} = 0.25$$

K_{12} - коэффициент, учитывающий влияние угла охвата

$$K_{12} := \frac{1.15 - 0.1432 \cdot \delta}{\sin(0.5 \cdot \delta)} \quad K_{12} = 0.851$$

K_{14} - коэффициент, учитывающий влияние угла охвата

$$K_{14} := \frac{1.45 - 0.43 \cdot \delta}{\sin(0.5 \cdot \delta)} \quad K_{14} = 0.425$$

K_{16} - коэффициент, учитывающий влияние расстояния до днища

$$K_{16} := 1 - \frac{0.65}{1 + (6 \cdot \gamma)^2} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{3 \cdot \delta}} \quad K_{16} = 0.968$$

K_{17} - коэффициент, учитывающий влияние ширины пояса опоры

$$K_{17} := \frac{1}{1 + 0.6 \cdot \sqrt{\frac{D}{w}} \cdot \frac{b}{D} \cdot \delta}$$

K_{13} - коэффициент, учитывающий влияние угла охвата

$$K_{13} := \frac{\max\left(1.7 - \frac{2.1 \cdot \delta}{\pi}, 0\right)}{\sin(0.5 \cdot \delta)} \quad K_{13} = 0.071$$

K_{15} - коэффициент, учитывающий влияние расстояние до днища

$$K_{15} := \min\left(1, \frac{0.8 \cdot \sqrt{\gamma} + 6 \cdot \gamma}{\delta}\right) \quad K_{15} = 1$$

K_{11} - коэффициент, учитывающий влияние ширины пояса опоры

$$K_{11} := \frac{1 - e^{-\beta_1} \cdot \cos(\beta_1)}{\beta_1} \quad K_{11} = 2.186$$

$$v_{12} := \frac{-0.23 \cdot K_{13} \cdot K_{15}}{K_{12} \cdot K_{10}}$$

$$v_{13} := \frac{-0.53 \cdot K_{11}}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17} \cdot \sin(0.5 \cdot \delta)}$$

$$v_{212} := -\sigma_{\text{mx}} \cdot \frac{1}{K_2 \cdot \sigma_d}$$

$$v_{213} := 0$$

$$v_{222} := \left(\frac{p \cdot D}{4 \cdot w} - \sigma_{\text{mx}} \right) \cdot \frac{1}{K_2 \cdot \sigma_d}$$

$$v_{223} := \frac{p \cdot D}{2 \cdot w} \cdot \frac{1}{K_2 \cdot \sigma_d}$$

$$K_{112} := \frac{1 - v_{212}^2}{\left(\frac{1}{3} + v_{12} \cdot v_{212} \right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + v_{12} \cdot v_{212} \right)^2 + \left(1 - v_{212}^2 \right) \cdot v_{12}^2}}$$

$$K_{112} = 1.463$$

$$K_{122} := \frac{1 - v_{213}^2}{\left(\frac{1}{3} + v_{13} \cdot v_{213} \right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + v_{13} \cdot v_{213} \right)^2 + \left(1 - v_{213}^2 \right) \cdot v_{13}^2}}$$

$$K_{122} = 0.146$$

$$K_{113} := \frac{1 - v_{222}^2}{\left(\frac{1}{3} + v_{12} \cdot v_{222} \right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + v_{12} \cdot v_{222} \right)^2 + \left(1 - v_{222}^2 \right) \cdot v_{12}^2}}$$

$$K_{113} = 1.494$$

$$K_{123} := \frac{1 - v_{223}^2}{\left(\frac{1}{3} + v_{13} \cdot v_{223} \right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + v_{13} \cdot v_{223} \right)^2 + \left(1 - v_{223}^2 \right) \cdot v_{13}^2}}$$

$$K_{123} = 0.21$$

Проверка условия прочности:

$$\text{Проверка3} := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется."} & \text{if } F_1 \leq \min(F_{d2}, F_{d3}) \\ \text{"Условие прочности НЕ выполняется."} & \text{otherwise} \\ \text{"Проверка не выполняется"} & \text{if } z = 2 \end{cases}$$

Проверка3 = "Условие прочности выполняется."

Проверка условия устойчивости:

$$\frac{p_v}{p_d} + \frac{M_1}{M_d} + \frac{F_e}{F_d} + \left(\frac{Q}{Q_d} \right)^2 \leq 1$$

где F_e - эффективное осевое усилие от местных мембранных напряжений, действующих в области опоры.

$$F_e := F_1 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \sqrt{\frac{D}{(w)}} \cdot K_{13} \cdot K_{15} \quad F_e = 4.236 \times 10^4 \quad \text{Н}$$

$$K_{1,2} := \min(K_{112}, K_{122}) \quad K_{1,2} = 0.146$$

$$K_{1,3} := \min(K_{113}, K_{123}) \quad K_{1,3} = 0.21$$

$$\sigma_{i2} := K_{1,2} \cdot K_2 \cdot \sigma_d \quad \sigma_{i2} = 29.264 \quad \text{МПа}$$

$$\sigma_{i3} := K_{1,3} \cdot K_2 \cdot \sigma_d \quad \sigma_{i3} = 42.087 \quad \text{МПа}$$

$$F_{d2} := \frac{0.7 \cdot \sigma_{i2} \cdot \sqrt{D \cdot (w)} \cdot (w)}{K_{10} \cdot K_{12}} \quad F_{d2} = 1.938 \times 10^5 \quad \text{Н}$$

$$F_{d3} := \frac{0.9 \cdot \sigma_{i3} \cdot \sqrt{D \cdot (w)} \cdot (w)}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17}} \quad F_{d3} = 4.016 \times 10^5 \quad \text{Н}$$

$$F_1 \leq \min(F_{d2}, F_{d3})$$

Допускаемое поперечное усилие:

$$Q_d := \begin{cases} Q_{dp} \leftarrow 0.25 \cdot \sigma_d \cdot \pi \cdot D \cdot (w) \\ Q_{de} \leftarrow \frac{2.4 \cdot E \cdot (w)^2}{n_y} \cdot \left[0.18 + 3.3 \cdot \frac{D \cdot (w)}{L^2} \right] \\ Q_d \leftarrow \frac{Q_{dp}}{\sqrt{1 + \left(\frac{Q_{dp}}{Q_{de}} \right)^2}} \end{cases}$$

$$Q_d = 1.954 \times 10^6 \quad \text{Н}$$

Допускаемое усилие из условия устойчивости:

$$F_d := \pi \cdot (D + w) \cdot (w) \cdot \sigma_d \quad F_d = 8.143 \times 10^6 \quad \text{Н}$$

$$\text{Пров}_4 := \begin{cases} \text{"Условие устойчивости выполняется."} & \text{if } \frac{p_v}{p_d} + \frac{M_1}{M_d} + \frac{F_e}{F_d} + \left(\frac{Q_1}{Q_d} \right)^2 \leq 1 \\ \text{"Условие устойчивости НЕ выполняется."} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Пров}_4 = \text{"Условие устойчивости выполняется."}$$

Глава 4. Социальная ответственность

4.1 Основные опасности производства

Технологический процесс во всех отделениях производства ЭП-300 связан с переработкой больших количеств легковоспламеняющихся жидкостей и газов в сжиженном и газообразном состоянии, которые способны при взаимодействии с кислородом воздуха взрываться и гореть, поэтому производство ЭП-300 относится к взрывопожароопасным.

Ситуации взрывов и пожаров могут возникнуть:

- при разгерметизации трубопроводов топливного газа, водорода, метана, этана, пропана, пропилена и др. фракций;
- при розжиге горелок на печах пиролиза бензина и этана, а также печи подогрева регенерационного газа (часто сопровождается взрывами и хлопками);
- при неисправной работе электрооборудования;
- при повышенном трении и вибрации движущихся частей и механизмов.

По воздействию на организм человека опасность производства ЭП-300 связана:

- с применением и получением вредных (токсичных) веществ, например, метанол, щелочи, сероводород, фенольная фракция, бензол, а также вещества, перечисленные в предыдущем абзаце и т.п.;
- с применением огневого нагрева;
- с ведением технологического процесса при высоких давлениях (до 4.0 МПа) и низких температурах (до минус 160 °С);

- с применением тока высокого напряжения для питания электродвигателей;

- с возможностью возникновения статического электричества при транспортировке жидкостей.

Наиболее опасные места на производстве ЭП-300.

1. Печи пиролиза бензина, этана и ББФ.
2. Узел масляной и водной промывки пирогаза.
3. Узел перегрева пара высокого давления.
4. Разводка топливного газа, бензина, ПБФ, ШФЛУ, этановой фракции к печам пиролиза.
5. Паропроводы высокого и среднего давления, узлы редуцирования пара.
6. Машинный зал турбокомпрессоров.
7. Газоразделение.
8. Печь нагрева регенерационного газа.
9. Метанольное хозяйство.
10. Дренажно-факельное хозяйство.
11. Узлы щелочной очистки пирогаза и упарки щелочных стоков.
12. Колодцы, люки, низкие места, приямки, где возможно скопление взрывоопасных смесей углеводородов с воздухом, т.к. пары углеводородов в основном тяжелее воздуха.

Таблица 4.1 - Пожароопасные и токсичные свойства сырья, полупродуктов, готовой продукции и отходов производства

Наименование сырья, полупродуктов, готовой продукции (вещества, массовая доля, %), отходов производства	Класс опасности (ГОСТ 12.1.007-76)	Агрегатное состояние при нормальных условиях	ПЛОТность паров (газа) по воздуху, кг/м ³	Удельный вес для твердых и жидких веществ, г/см ³	Растворимость в воде, массовая доля, %	Возможно ли воспламенение или взрыв при воздействии		Температура, °С						Пределы воспламенения					ПДК или ОБУВ в воздухе рабочей зоны производственных помещений мг/м ³ мг/дм ³	Характеристика токсичности (воздействие на организм человека)	Литература
						Воды (да, нет)	Кислая среда	Кипения	Плавления	Самовоспламенения	Воспламенения	Вспышки	Начала экзотермического разложения	концентрационные (объемная доля), %		температурные °С		аэрозвеси, (г/см ³) дисперсность			
														нижний	верхний	нижний	верхний				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Этановая фракция (по этану)	4	газ	1.048	-	плохо	нет	нет	-88.63	-	515	-	-	-	2.9	15.0				300	Наркотическое действие	*
11.1.1.5 Этилен (С3Н6)	4	Горючий газ	0.974	-	плохо	нет	нет	-	-	435	-	-	-	2.7	34	-	-	-	100	Наркотическое действие Длительное вдыхание вызывает невротический синдром с сосудисто-вегетативным нарушением	ГОСТ 25070-87 изм. 1

11.1.1.6 Пропилен (С3Н6)	4	газ	1.45	-	незначи- тельно	нет	нет	-47.7	-	455	-	-	-	2.4	11. 0	-	-	-	100	Наркотическое действие Длительное вдыхание вызы- вает невросте- нический синдром с сосу-дисто- вегетатив-ным нарушением	ГОСТ 25043- 87 изм.1
11.1.1.15 Ингибитор коррозии AQUMAX EC1376 A	-	Жидкост ь	-	1.023	Полность ю	нет	нет	100	-2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Не представляет опасности при обычных условиях. При воздействии высоких концентраций раздражение глаз и верхних дыхательных путей.. При контакте с глазами – может иметь место поражение тканей глаза. Мало токсичен При проглатывании- раздражение слизистых рта, пищевода и желудка. Может иметь место расстройство функций желудка и кишечника.	Паспорт безопасн ости. Санитар но- эпидеми ологичес кое заключе ние

11.1.1.25. Катализатор Oetamax- 204 (G-58E)	4	Твердое вещество	-	2.3- 2.7	нераствори м	-	-	-	>750	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6 (пыль оксида алюминия)	В связи с рассеянием пыли, возможно легкое раздражение глаз и слизистых оболочек	Паспорт безопас ности.
11.1.1.26. Катализатор АПКГС	4	Твердое вещество	-	-	-	нет	нет	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6 (пыль оксида алюмини ния)	Палладий обладает аллергизирующим действием, при контакте с ним у рабо-тающих могут возникать аллер-гические забо-левания органов дыхания (брон-хиальная астма), кожи, глаз. Пыль оксида алюминия вызывает алюминоз легких, утомляемость, одышку, кашель, раздражает слизистые глаз, носа, рта. Могут развиваться угри, экзема, дерматиты.	ТУ 2172- 010- 4988453 6-2002

4.2 Меры безопасности при ведении технологического процесса

К технологическому процессу производства этилена-пропилена (ЭП-300) применимы общие требования безопасности согласно ГОСТ 12.3.002-75.

ЭП-300 является крупнотоннажным производством с применением больших количеств сжиженных газов и легковоспламеняющихся жидкостей, для переработки которых используется крупногабаритное оборудование. Аварийный останов одной единицы оборудования влечет за собой остановку всего производства. Исходя из этого, к надежности работы всего оборудования предъявляются жесткие требования.

Для обеспечения безопасной работы производства предусмотрено:

- технологический процесс осуществляется по непрерывной схеме;
- технологическое оборудование максимально расположено на наружных установках;
- расположение оборудования обеспечивает свободный доступ к нему и удобное обслуживание;
- аппараты, трубопроводы, арматура выполнены герметичными;
- обеспечено отсутствие постоянных выбросов в атмосферу;
- освобождение аппаратов от газообразных продуктов производится в факельную систему;
- освобождение аппаратов от жидких продуктов производится в подземные дренажные емкости с отводом от них газов на факел;
- управление технологическим процессом автоматизировано и осуществляется централизованно из помещений операторных, расположенных в изолированных от производства зданиях;

- выбор материала оборудования, и средств контроля и автоматики выполнен с учетом взрыво- и пожароопасности производства;
- компрессорно-насосное оборудование, согласно правилам, обеспечено системами сигнализаций и блокировок, которые при отклонении от допустимых норм технологического процесса приводят к их автоматической остановке;
- исполнение электрооборудования по взрывозащите соответствует категории и группе взрывоопасной смеси;
- для загрузки и выгрузки катализатора имеются средства механизации (передвижные бункеры, тачки, краны, укосины);
- для установки оборудования имеются монорельсы с ручными и электрическими грузоподъемными средствами;
- для продувки оборудования и трубопроводов (перед пуском и т.п.) предусмотрен подвод продувочного азота, расположение мест подачи азота обеспечивает надежность продувки подключаемых участков;
- для предотвращения ожогов выполнена изоляция оборудования и трубопроводов:
 - 1) в помещении при температуре стенки выше 45 °С;
 - 2) на наружных установках при температуре стенки выше 60 °С;
- в соответствии с нормами и в зависимости от характеристики помещений и наружных установок выполнено рабочее и аварийное освещение;
- для обеспечения нормальных санитарных условий труда в помещениях выполнена вентиляция, а также местные отсосы от звукоизолирующих кожухов компрессоров;
- для защиты от статического электричества оборудование и трубопроводы заземлены;
- метанольный узел выполнен согласно "Инструкции о мерах безопасности при работе с метанолом на предприятиях и в организациях Минхимпрома ВН-28-86" ;

- приготовление растворов реагентов выполняется на складах реагентов, на установку они поступают по трубопроводам в готовом виде;

- при появлении загазованности в помещении компрессорной (тит.404) включается аварийная вытяжная вентиляция.

Для обеспечения безопасной работы узла подачи диметилдисульфида (ингибитора коксообразования) на печи пиролиза предусмотрено:

- хранение диметилдисульфида в емкости под азотной подушкой давлением 0.5 МПа;

- установлены предохранительные клапаны на емкости и трубопроводах нагнетания для защиты от превышения давления;

- автоматическое отключение насосов Н-2/1,2 Н-3/1,2 по минимальному уровню в емкости Е-148 для предотвращения работы насосов «всухую»;

- класс герметичности затворов применяемой арматуры – А;

- заземление вновь монтируемых трубопроводов и оборудования.

На линиях нагнетания каждого насоса установлен манометр, запорный и обратный клапаны, а также перепускной предохранительный клапан, срабатывающий при превышении рабочего давления.

Для обеспечения безопасной эксплуатации производства необходимо соблюдать следующее:

- эксплуатация оборудования с неисправными средствами автоматизации, контроля и системы блокировок запрещается. Ручное деблокирование в системах автоматического управления запрещается (за исключением пускового периода);

- допускается в исключительных случаях по письменному разрешению руководителя предприятия, кратковременное отключение блокировок по отдельному параметру на 30 мин. Перед снятием блокировки должны быть разработаны мероприятия по обеспечению безопасности ведения

технологического процесса и производства работ. Время снятия блокировки должно быть минимальным. В операторной должно быть четко показано, что произведена деблокировка данной системы.

- к самостоятельной работе на производстве допускать лиц, не моложе 21-го года, прошедших медицинскую комиссию, инструктаж по охране труда и промышленной безопасности, прошедшего аттестацию на рабочее место;

- при ведении технологического процесса строго выдерживать нормы технологического режима, указанные в данном регламенте;

- обеспечить все рабочие места инструкциями по охране труда, технологическими и эксплуатационными документами;

- не допускать проведения ремонтных работ на работающем оборудовании, в том числе категорически запрещается подтягивать фланцевые соединения, регулировать предохранительные клапаны на аппаратах и трубопроводах находящихся под давлением;

- при отсутствии освещения на установке пользоваться только светильниками во взрывобезопасном исполнении;

- работать всему обслуживающему персоналу в спецодежде, каске, спецобуви, каждому иметь при себе фильтрующий противогаз или самоспасатель;

- все неработающее оборудование и коммуникации должны быть освобождены от продукта, продукты азотом, надежно отключены и отглушены заглушками от системы.

4.3 Способы обезвреживания и нейтрализации продуктов производства при разливах и авариях

При нарушении герметичности аппаратов или разрыве трубопровода отключить поврежденный аппарат или участок трубопровода и принять меры к обезвреживанию, а при невозможности немедленного

обезвреживания - к исключению возможности возникновения пожара, отравления технологического и ремонтного персонала.

При разливе жидких углеводородов засыпать их песком, собрать и вывезти с установки. Место разлива промыть водой в ХЗК.

Пролитый метанол смыть большим количеством воды в ХЗК.

При разливе щелочи отключить поврежденный участок и смыть щелочь обильной струей в ХЗК.

При пропуске пирогаза и других углеводородных продуктов через неплотности принимаются меры к оперативному отключению поврежденных участков. Из района загазованности выводятся посторонние лица, все работы в этой зоне прекращаются, район оцепляется, выставляется охрана. Работать в зоне разрешается только в индивидуальных средствах защиты.

4.4 Возможные накапливания зарядов статического электричества, их опасность и способы нейтрализации

Продукты, применяемые на ЭП-300, имеют объемное сопротивление выше 100 кОм/м, что способствует возникновению статического электричества при их транспортировке.

При нормальной работе, в трубопроводах и технологическом оборудовании исключена возможность образования взрывоопасных концентраций, т.к. вся система герметизирована и находится под избыточным давлением, поэтому скорости перекачки жидкостей по трубопроводам и истечения их в аппараты не ограничиваются. По технологии процесса разбрызгивание, дробление и распыление веществ не производится.

Все трубопроводы и аппараты, по которым транспортируются продукты, изготовлены из углеродистой и легированной стали.

Предусмотрена защита зданий, сооружений, оборудования, трубопроводов:

- от прямых ударов молнии осуществляется путем присоединения корпусов установок, отдельных емкостей и аппаратов к заземляющему устройству и установкой молниеприемников;

- от статической индукции и статического электричества, осуществляется путем его присоединения к контуру заземления;

- от электромагнитной индукции, осуществляется путем устройства через (25-30) м металлических перемычек между трубопроводами, расположенными на расстоянии 10 см один от другого.

Система заземляющего устройства состоит из внутреннего и внешнего контуров.

Внешний контур выполнен из электродов, изготовленных из стальных вертикально вбитых стержней длиной 2.5 м, соединенных между собой полосовой сталью 4 x 40 мм.

Внутренний контур заземления выполнен из полосовой стали 4 x 25 мм, 4 x 40 мм и присоединяется к внешнему. Все соединения заземляющего устройства выполнены сваркой.

Все электрооборудование, пусковая аппаратура, а также все металлические части, нормально не находящиеся под напряжением, но могущие оказаться под током вследствие нарушения изоляции, заземлены путем присоединения к контуру. Металлические вентиляционные коробки и кожухи термоизоляции трубопроводов в пределах установок присоединены в начале и в конце, а также через каждые (40-50) м к внутреннему контуру защитного заземления.

Заземление кабельных конструкций осуществляется с помощью строительных металлоконструкций, на которых они установлены.

4.5 Меры, обеспечивающие надежность охраны водных ресурсов и воздушного бассейна

С целью охраны воздушного бассейна выполнены следующие технологические мероприятия:

- сброс углеводородных газов от предохранительных клапанов, освобождение оборудования для ремонта и в аварийных случаях производится в факельную систему с последующей продувкой азотом, сбрасываемым также в факельную систему;

- высота дымовых труб и факельного ствола выбраны с учетом рассеивания выбросов в приземном слое атмосферы до концентраций не превышающих предельно-допустимых.;

- уплотнительные поверхности фланцев, трубопроводов, подающих углеводороды, имеют исполнение "шип-паз", "выступ-впадина", оборудование низкотемпературного узла газоразделения имеет сварные соединения;

- компрессоры и основные насосы выполнены в герметичном исполнении и оборудованы системами блокировок, которые останавливают агрегаты при нарушении технологических параметров;

- факельная установка обеспечивает безопасное освобождение производства от всех легких горючих сред, для бездымного горения углеводородов на факел подается водяной пар.

Контроль наличия углеводородов в окружающем воздухе на наружной площадке и дозрывоопасных концентраций в помещениях компрессорной, газоанализаторной, осуществляется датчиками дозрывных концентраций, которые установлены в местах возможного возникновения утечек.

Для исключения попадания вредных веществ в сеть канализации предусмотрено:

- площадки, где возможен розлив продуктов, обвалованы;
- для сброса стоков с обвалованных территорий предусмотрены емкость для сброса стоков, загрязненных щелочью, и локально-очистные сооружения для очистки стоков от углеводородов;
- сернисто-щелочные стоки выводятся с установки в нефтеловушку узла сбора и откачки сточных вод;
- сброс атмосферных осадков с обвалованных территорий в канализацию производств после определения качества стоков через соответствующие задвижки, установленные в сухих колодцах, при отсутствии в них загрязненных веществ.

Пролитое во время проведения работ масло следует засыпать песком или стереть ветошью, затем песок (или ветошь) собрать в полиэтиленовые мешки и удалить в специально установленное место, согласно Порядку обращения с отходами производства и потребления.

Сбор, накопление и вывоз образующихся отходов производится в соответствии с требованиями инструкции Общества «О порядке обращения с отходами производства и потребления».

4.6 Безопасный метод удаления продуктов производства из технологических систем и отдельных видов оборудования

Для безопасного удаления продуктов производства из технологических систем и оборудования на производстве ЭП-300 предусмотрено дренажно-факельное хозяйство (ДФК). Описание дренажно-факельного хозяйства приводится в разделе 4.2.25.

Порядок обращения с отходами производства и потребления производится в соответствии с требованиями инструкции ООО «Томскнефтехим» «Инструкции о порядке обращения с отходами производства и потребления» (ОООС-1).

4.7 Основные потенциальные опасности применяемого оборудования и трубопроводов

Технологический процесс производства ЭП-300 связан с применением таких продуктов, как углеводороды, метанол, щелочь, керосин, а также с ведением процесса при высоких давлениях, высоких и низких температурах, с применением тока высокого напряжения для питания электродвигателей, наличием пара высокого давления для турбин компрессоров, поэтому от обслуживающего персонала требуется особо ответственное отношение к соблюдению правил по охране труда и промышленной безопасности.

Для исключения возможности возникновения аварий, взрывов, пожаров, загазованности рабочих помещений и территории, несчастных случаев необходимо на производстве обеспечить:

- бесперебойную работу приточно-вытяжной вентиляции;
- бесперебойную работу СИА и СУ;
- бесперебойное снабжение производства электроэнергией и воздухом КИП;
- бесперебойную работу системы обогрева аппаратов и трубопроводов, что особо важно в холодное время года;
- исправное состояние запорной арматуры, которая должна обеспечивать при закрытии надежное прекращение поступления продуктов в систему;
- исправное состояние предохранительных клапанов и устройств;

- исправное состояние крепления фланцевых соединений трубопроводов и оборудования, в том числе полный комплект деталей предусмотренных конструкцией;

- исправное состояние заземления оборудования и трубопроводов от статического электричества;

- категорический запрет открытого дренирования продуктов из аппаратов и трубопроводов;

- контроль содержания углеводородов в воздухе рабочей зоны помещений;

- герметичность фланцевых соединений, аппаратов, трубопроводов и всей системы, для чего:

1) не допускать резких изменений давления и температуры в аппаратах, нарушения технологического режима, поддерживать постоянство расхода и перепада на линиях всаса и нагнетания ступеней турбокомпрессоров, не допускать завышения уровней сепараторов на всасе турбокомпрессоров;

2) запрещается работа установок с неисправными и отключенными приборами контроля;

3) перед включением в работу оборудование и трубопроводы продуть азотом до содержания объемной доли кислорода - не более 0,5 %;

4) при остановах на ремонт оборудование и трубопроводы должны отсекается запорной арматурой с обязательными опорожнением и установкой заглушек, затем выполняются мероприятия по пропариванию, продувке азотом и воздухом;

5) при останове узла, отключении отдельных аппаратов или участков трубопровода на ремонт, сброс давления производить только после дренирования жидкой фазы, по окончании стравливания давления произвести продувку азотом до отсутствия горючих веществ. Перед ремонтом после продувки азотом, выполнить продувку воздухом или осуществить проветривание;

б) перед выгрузкой отработанного катализатора производится стравливание газа с реакторов гидрирования с последующей их пропаркой (проводится пассивация для исключения возможности самовозгорания);

7) снятие и установку заглушек, замену прокладок во фланцевых и других соединениях, а также прочие работы, связанные с разгерметизацией, производить только после выполнения соответствующих подготовительных мероприятий (отключение, освобождение, продувка, отглушение и т.д.);

8) огневые и газоопасные работы проводить в соответствии с "Типовой инструкцией по организации и безопасному проведению огневых работ на взрывоопасных и взрывопожароопасных объектах" и "Типовой инструкции по организации безопасного проведения газоопасных работ", не допускать проведения ремонтных работ, связанных с применением открытого огня без специального разрешения, не применять открытого огня в местах, не предусмотренных для этих целей.

Запрещается курить в неустановленных местах;

9) соблюдать осторожность при вскрытии кипятильников колонн (в процессе работы в трубках кипятильников скапливаются полимеры, которые при соприкосновении с воздухом могут воспламеняться), перед вскрытием кипятильник отключить запорной арматурой по линии пара и продукта, отглушить, пропарить трубное пространство, продуть азотом. Вскрывать крышки кипятильника попеременно, не допускать потока воздуха через трубное пространство, при чистке трубок необходимо поддерживать их во влажном состоянии.

- оформление нарядов-допусков соответствующей формы на выполнение всех ремонтных работ;

- категорически запрещается применение открытого огня для выявления утечек газа;

- немедленное устранение обнаруженных негерметичностей.

4.8 Требования безопасности при складировании и хранении сырья, полуфабрикатов и готовой продукции

Производство ЭП-300 "жестко" связано с потребителями. Непосредственного хранения продуктов на производстве ЭП-300 нет.

Прием из железнодорожных цистерн и хранение бензина осуществляется на установке 405.

Бензин по трубопроводу с установки 405 поступает непосредственно на печи пиролиза бензина производства ЭП-300.

Продуктами производства ЭП-300 являются: этилен, пропилен, тяжелая смола пиролиза, бутилен-бутадиеновая фракция (ББФ), пироконденсат, фракция ЖПП.

Газообразный этилен по трубопроводу передается на производство ПЭВД-150, жидкий этилен - на изотермическое хранилище этилена (установка 406И), ББФ на установку 406, тяжелая смола пиролиза, пироконденсат и фракция ЖПП - на установку 405.

4.9 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

бесплатной выдачи спецодежды, спецобуви и средств индивидуальной
защиты работникам ООО «Томскнефтехим»».

Таблица 4.2 – Средства индивидуальной защиты работников

11.4.11.2. Цех компримирования и разделения пирогаза (цех 402)						
1. Отделение компримирования	Машинист компрессорных установок	- куртка на у/п	ГОСТ 29335-92	24 месяца	-	том 4 п.94, стр.18 п.4036, стр.749
		- брюки на у/п	ГОСТ 29335-92	24 месяца	-	
		- костюм х/б	ГОСТ 27575-87	12 месяцев	-	
		- ботинки кожаные	ГОСТ 12.4.137-84	12 месяцев	-	
		- валенки	ТУ 17 РСФСР 35-5773-01-89	30 месяцев	-	
		- галоши на валенки		24 месяца 1	-	
		- рукавицы комбин.	ГОСТ 12.4.010-75	месяц 1	-	
		- перчатки резиновые	ТУ 38.106508-89	месяц	-	
		- фартук прорезин.	ГОСТ 12.4.029-76	деж.	-	
		- каска	ГОСТ 12.4.128-83	до износа	-	
- наушники	ГОСТ 12.4.051-87	до износа	-			
- респиратор РПГ-67	ГОСТ 12.4.004-74	до износа	-			
2. Отделение низко-температурного разделения пирогаза	Аппаратчик газоразделения	- куртка на у/п	ГОСТ 29335-92	24 месяца	-	том 4 п.90, стр.17 п.4129, стр.768
		- брюки на у/п	ГОСТ 29335-92	24 месяца	-	
		- костюм х/б	ГОСТ 27575-87	12 месяцев	-	
		- ботинки кожаные	ГОСТ 12.4.137-84	12 месяцев	-	
		- валенки	ТУ 17 РСФСР 35-5773-01-89	30 месяцев	-	
		- галоши на валенки		24 месяца 1	-	
		- рукавицы комб.	ГОСТ 12.4.010-75	месяц 6	-	
		- перчатки кожаные (при отборе проб)	ГОСТ 28846-90	месяцев	-	
- перчатки резиновые	ТУ 38.106508-86	6 месяц до	-			
- каска	ГОСТ 12.4.128-83	износа	-			

Глава 5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Целью раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является проектирование и создание конкурентоспособных разработок, технологий, отвечающих современным требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

Для анализа потребителей результатов исследования необходимо рассмотреть целевой рынок и провести его сегментирование [1]. На рисунке 1 представлена карта сегментирования рынка по разработке палладиевых катализаторов ПК-25.



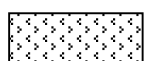
Размер компании	Вид продукции	
	ПК-25 для гидрирования	ПК-25 для нефтехимии
Крупные		
Средние		

Рисунок 5.1 — Карта сегментирования рынка услуг по разработке ПК-25:



-



- ООО "НИАП-КАТАЛИЗАТОР", г.Новомосковск



- ОАО «Ангарский завод катализаторов и органического синтеза», г.Ангарск

5.2 Анализ конкурентных технических решений

Чтобы оценить эффективность научной разработки и определить направление ее дальнейшего развития, необходимо определить её положение на рынке конкурентных технических решений.

В таблице 1 представлен сравнительный анализ разного типа катализаторов (н) в рамках выполнения ВКР и двух конкурентных работ (к1) и (к2) [2].

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б _ф	Б _{к1}	Б _{к2}	К _ф	К _{к1}	К _{к2}
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Повышение выпуска продукции	0,1	4	3	3	0,4	0,3	0,3
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,05	5	5	5	0,25	0,25	0,25
3. Качество продукта (состав, тех. характеристики)	0,15	5	3	4	0,75	0,55	0,6
4. Энергоэкономичность	0,05	4	4	3	0,2	0,2	0,15
5. Надежность	0,02	5	5	4	0,1	0,1	0,08
6. Безопасность	0,02	5	5	4	0,1	0,1	0,08
7. Потребность в ресурсах памяти	0,02	3	3	3	0,06	0,06	0,06
8. Простота эксплуатации	0,1	5	5	5	0,5	0,5	0,5
9. Возможность подключения в сеть ЭВМ	0,01	3	3	3	0,03	0,03	0,03
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Конкурентоспособность продукта	0,1	4	4	3	0,4	0,4	0,3
2. Уровень проникновения на рынок	0,1	2	3	3	0,2	0,3	0,3
3. Цена	0,15	4	3	3	0,6	0,55	0,55
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0,02	4	2	3	0,08	0,04	0,06
5. Послепродажное обслуживание	0,05	2	2	3	0,1	0,1	0,15
6. Финансирование научной разработки	0,05	1	2	2	0,05	0,1	0,1
7. Срок выхода на рынок	0,01	3	3	3	0,03	0,03	0,03
8. Наличие сертификации разработки	0,01	3	3	4	0,03	0,03	0,04
Итого	1	62	58	55	3,88	3,54	3,58

Особенностью конкурентного решения [1] является замена катализатора в реакторе гидрирования ацетилена на улучшенный. Среди заявленных выгод: увеличение селективности процесса и увеличение выхода продукции за счёт увеличения в итоге расхода питания в реактор.

Анализ альтернативных работ показал, что разработанная в рамках ВКР схема замены катализатора обладает приемлемым конкурентным уровнем.

5.3 Диаграмма Исикавы

С целью установления причинно-следственных связей, возникающих в ходе выполнения модернизации основного технологического оборудования путём замены тарелки на насадки в колонне, сформирована диаграмма Исикава. Основными факторами, влияющими на объект исследования, являются методы, оборудование и исполнитель.



Рисунок 5.2 — 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.

5.4 Оценка готовности проекта к коммерциализации

Логическим завершением разработки объекта модернизации и создания необходимых математических и аппаратных расчётов является практическое применение на действующем промышленном объекте. Для осуществления реализации разработки необходимо представить её в виде коммерческого проекта.

Таблица 5.2 — 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 разработки	1	1
15	Прорабатывается механизм реализации научного проекта	4	3
	ИТОГО БАЛЛОВ	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 (45-59 баллов). 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.

5.5 Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования

Для обеспечения коммерческой отдачи от реализации проекта возможно применение таких методов коммерциализации научных разработок, как торговля патентными лицензиями, передача ноу-хау, инжиниринг, франчайзинг, организация собственного предприятия и т.д. Для коммерциализации данного типа модернизации оборудования актуален метод инжиниринга по следующим причинам. Во-первых, разработанный метод модернизации имеет значимое практическое применение, учитывает множество параметров протекания процесса в аппарате и способствует оптимизации, энерго- и ресурсосбережению и, в конечном счете, снижению затрат на производство. Во-вторых, для разработки метода модернизации необходим большой объем актуальных промышленных данных, для установления закономерностей, анализа взаимосвязей, тестирования и т.п. В-третьих, существует практика сотрудничества производственных 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).

5.6 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 3-6).

Таблица 5.3 — Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидание заинтересованных сторон
Научное объединение кафедры (студенты, преподаватели)	<ol style="list-style-type: none"> 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)	<ol style="list-style-type: none"> 1) Получение проекта, способствующего оптимизации, энерго-и ресурсосбережению действующего производства. 2) Развитие и укрепление связей с научным объединением (университет, кафедра) в области совместных научных разработок.
Университет, к которому относится научное объединение	Продвижение статуса учебного заведения, повышение научного престижа
Научные объединения сторонние (конкурирующие)	Опасения в связи с появлением конкурентоспособного проекта

Таблица 5.4 — Цели и результаты проекта

Цели проекта:	Исследование палладиевых катализаторов с целью повышения ресурсоэффективности и производительности установки.
Ожидаемые результаты проекта:	Получение модернизированного оборудования с высоким уровнем энергоэффективности
Критерии приемки результата проекта:	<ol style="list-style-type: none"> 1) Новизна идеи 2) Адекватность относительно действующего промышленного процесса 3) Расчеты обеспечивают получение полного набора необходимых производственных показателей 4) Универсальность 5) Простота и точность расчёта
Требование к результату проекта:	Максимальное соответствие критериям приемки результата проекта

Таблица 5.5 — Рабочая группа проекта

№ п/п	ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функция	Трудозатраты, час.(за 2 года)
1	Балмашнов М.А., доцент каф. ОХХТ	Руководитель проекта	Координирование проекта, консультирование	360
2	Мокшин П.В. магистрант каф. ОХХТ	Исполнитель проекта	Сбор и анализ литературных данных, выполнение необходимых расчётов.	2700

Таблица 5.6 — Ограничения проекта

Фактор	Ограничения /допущения
Расчетные возможности	Выполнение расчетов ограничено компьютерными мощностями кафедры
Сроки завершения проекта	апрель 2017 года
Бюджет проекта	Материальная база научной группы (кафедры)

5.7 Планирование управления научно-техническим проектом Бюджет научного исследования

Выполнение научных исследований влечет за собой ряд материальных затрат для обеспечения эффективной и комфортной работы.

Таблица 5.7 — Сырье, материалы, комплектующие изделия и покупные полуфабрикаты

Наименование	Кол-во	Цена за единицу, 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

Таблица 5.8 — Расчет затрат по статье «Спецоборудование для научных работ»

№ п/п	Наименование оборудования	Кол-во единиц оборудования	Цена единицы оборудования, тыс. руб	Общая стоимость оборудования, тыс. руб
1	ПО Microsoft Office 2015	1	1,557	1,557
2	КОМПАС 3D V16	1	1,490	1,490
3	Wolfram Mathematica 11	1	25,580	25,580

Таблица 5.9 — Расчет основной заработной платы

№ п/п	Исполнитель по категориям	Трудоемкость, чел.-дн.	Заработная плата, приходящаяся на один чел.-дн., тыс.руб.	Всего заработная плата по тарифу (окладам), тыс.руб.
1	Руководитель	20	1,19	23,8
3	Магистрант	140	0,36	50,4

Статья расчета заработной платы включает в себя основную заработную плату работников и дополнительную.

$$C_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп}, \quad (1)$$

где $Z_{осн}$ – основная заработная плата;

$Z_{доп}$ – дополнительная заработная плата.

В свою очередь основная заработная плата определяется как:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_{раб}, \quad (2)$$

где $Z_{осн}$ – основная заработная плата одного работника;

$T_{раб}$ – продолжительность работ, выполняемых научно
– техническим работником, раб. дн. ;

$Z_{дн}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Средняя заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{дн} = \frac{Z_{м} \cdot M}{F_{д}}, \quad (3)$$

где $Z_{м}$ – месячный должностной оклад работника, руб;

M – количество месяцев работы без отпуска в течении года;

при отпуске в 24 раб. дня $M = 11,2$ месяца, 5 – дн. неделя;

при отпуске в 48 раб. дней $M = 10,4$ месяца, 6 – дн. неделя;

$F_{д}$ – действительный годовой фонд рабочего времени научно
– технического персонала, раб. дн. (таблица 10).

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_{м} = Z_{б} \cdot (k_{пр} + k_{д}) \cdot k_{р}, \quad (4)$$

где $Z_{б}$ – базовый оклад, руб;

$k_{пр}$ – приемлимый коэффициент;

$k_{д}$ – коэффициент доплат и надбавок;

Таблица 5.10 — Баланс рабочего времени за два года

Показатели рабочего времени	Руководитель	Магистрант
Календарное число дней	730	730
Количество нерабочих дней		
-выходные дни		
- праздничные дни	193	193
	51	51
Потери рабочего времени		
-отпуск	48	48
-невыходы по болезни	14	14
Действительный годовой фонд рабочего времени	424	424

Таблица 5.11 — Расчет основной заработной платы

Исполнитель	Z_b , руб.	k_p	Z_m , руб.	$Z_{дн}$, руб.	$T_{раб}$, раб.дн.	$Z_{осн}$, руб.
Руководитель	27400	1,3	35620	874	212	185288
Магистрант	5000	1,3	6500	160	212	33920

Дополнительная заработная плата рассчитывается исходя из 10-15% от основной заработной платы:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн}, (5)$$

где $Z_{\text{доп}}$ – дополнительная заработная плата, руб;
 $k_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной зарплаты;
 $Z_{\text{осн}}$ – основная заработная плата, руб.

Таблица 5.12 — Заработная плата исполнителей НТИ

Заработная плата	Руководитель	Магистрант
Основная зарплата	185288	33920
Дополнительная зарплата	27793	5088
Итого по статье $C_{\text{зп}}$	213081	39008

Отчисления на социальные нужды во внебюджетные фонды:

$$C_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}), (6)$$

где $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчисления на уплату во внебюджетные фонды.

На 2014 г. в соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%. На основании пункта 1 ст.50 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 ($C_{\text{ком}}$) составляют 10% $C_{\text{зп}}$ исполнителей проекта и равны 25209 руб.

Общие затраты за два года реализации проекта с учетом всех вышеупомянутых пунктов составили 335043 руб.

5.8 Организационная структура проекта

Исходя из рекомендаций [1] выбран проектный вариант организационной структуры проекта.



Рисунок 5.3 — Проектная структура проекта

5.9 Матрица ответственности

С целью распределения ответственности между участниками проекта сформирована матрица ответственности (таблица 13).

Таблица 5.13 — 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

С целью иллюстрации графика выполнения работы строится календарный план для максимального по длительности исполнения работ в рамках научно-исследовательского проекта на основе временных показателей проведения научного исследования с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени дипломирования. Календарный план-график приведен в Приложении А.

5.10 Оценка сравнительной эффективности исследования

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{\text{р}i}}{\Phi_{\text{max}}} , \quad (7)$$

где $I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i}$ – интегральный финансовый показатель разработки;

Φ_{ri} – стоимость i -го варианта исполнения;

$\Phi_{\text{мах}}$ – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение бюджета затрат разработки в размах (значение больше единицы), либо соответствующее численное удешевление стоимости разработки в размах (значение меньше единицы, но больше нуля).

Таблица 5.14 — Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии	Объект исследования	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Аналог 1	Аналог 2
1. Способствует росту производительности труда пользователя		0,25	5	5	3
2. Удобство в эксплуатации		0,20	4	5	3
3. Энергосбережение		0,20	5	5	4
4. Надежность		0,20	5	5	3
6. Материалоемкость		0,15	5	5	5
ИТОГО		1			

$$I_{\text{р.-тек.пр.}} = 0,25 * 5 + 0,20 * 4 + 0,20 * 5 + 0,20 * 5 + 0,15 * 5 = 4,8$$

$$I_{\text{р.-аналог 1}} = 0,25 * 5 + 0,20 * 5 + 0,20 * 5 + 0,20 * 5 + 0,15 * 5 = 5,0$$

$$I_{\text{р.-аналог 2}} = 0,25 * 3 + 0,20 * 3 + 0,20 * 4 + 0,20 * 3 + 0,15 * 5 = 3,5$$

В результате проведенной работы была спроектирована и создана конкурентоспособная разработка, отвечающая современным требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения. Сравнение значений интегральных показателей ресурсоэффективности позволило понять, что более эффективным вариантом решения поставленной в магистерской диссертации технической задачи с позиции финансовой и ресурсной эффективности является исполнение 1 или 2.

Заключение

В результате данной дипломной работы были достигнуты следующие цели:

- Изучен процесс гидрирования ацетиленистых соединений;
- Исследованы физико-химические свойства палладиевых катализаторов, в результате чего были рекомендованы марки катализаторов для модернизации установки осушки и выделения ЭЭФ производства мономеров ООО «Томскнефтехим»;
- Были произведены поверочные технологические и конструктивно-механические расчеты основного оборудования установки выделения ЭЭФ при повышении производительности по этилену на 10%;
- В разделе «Социальная ответственность» были рассмотрены вредные и опасные производственные факторы, а так же средства коллективной и индивидуальной защиты;
- В разделе «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» была спроектирована и создана конкурентноспособная разработка.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

СПИСОК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

Мокшина Павла Владимировича

№	Наименование научного труда	Руко- писн. или печ.	Издательство, журнал (номер, год)	Номер стр.	Кол- во стр.	Фамилии соавторов
1	Расчёт средств защиты ректификационной колонны с использованием программы Wolfram Mathematica 10.4	Печ.	Междисциплинарная научно- практическая конференция «Современная наука. Теория, методология и практические результаты исследований» Кемерово, 2017.			
2	Расчёт средств защиты ректификационной колонны с использованием программы Wolfram Mathematica 10.4	печ.	Материалы XVIII Международной научно- практической конференции студентов и молодых ученых «Химия и химическая технология в XXI веке». – Томск, 2017.	75	1	