

Школа **Инженерная школа новых производственных технологий**
 Направление подготовки **18.03.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии, профиль Машины и аппараты химических производств**
 Отделение школы (НОЦ) **Научно-образовательный центр Н.М.Кижнера**

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Разработка проточного плазмон-каталитического реактора для конверсии углеводов

УДК 66.023.2-047.84:665.632

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4К51	Кузнецов Максим Тарасович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Швалев Ю.Б.	к.т.н., доцент		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Механический расчет оборудования»

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

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Креницына З.В.	к.т.н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Скачкова Л.А.			

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

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

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

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

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП
 _____ Беляев В.М.
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Бакалаврской работы

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

Студенту:

Группа	ФИО
4К51	Кузнецову Максиму Тарасовичу

Тема работы:

Разработка проточного плазмон-каталитического реактора для конверсии углеводородов	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№ 2847/с от 12.04.2019
Срок сдачи студентом выполненной работы:	25.05.2019

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>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></p>	<p>Разработка проточного плазмон-каталитического реактора для конверсии углеводородов Производительность реактора $G_b = 10$ кг/ч; Степень конверсии $\alpha = 0.9$; Рабочая температура $t = 25$ °С; Рабочее давление $P = 0.1$ МПа.</p>
---	--

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<p>Реферат Введение 1 Литературный обзор 2 Экспериментальная часть 3 Описание технологической схемы 4 Технологический расчет проточного плазмон-каталитического реактора 5 Выбор конструкционного материала 6 Механический расчет 7 Гидравлический расчет 8 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение 9 Социальная ответственность Заключение Список литературы Приложение</p>
<p>Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>Лист 1 – Результаты эксперимента А1 Лист 2 – Технологическая схема установки А1 Лист 3 – Общий вид реактора А1 Лист 4 – Общий вид реактора А1 Лист 5 – Экономические показатели А1</p>

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

(с указанием разделов)

Раздел	Консультант
Механический расчет оборудования	Беляев В.М.
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Креницына З.В.
Социальная ответственность	Скачкова Л.А.

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

--

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	25.01.2019
--	------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Швалев Юрий Борисович	к.т.н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4К51	Кузнецов Максим Тарасович		

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

Студенту:

Группа	ФИО
4К51	Кузнецову Максиму Тарасовичу

Школа	ИШНПТ	Отделение(НОЦ)	Н.М. Кижнера
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	18.03.02. Энерго - и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии

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

<p>1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i></p> <p>2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i></p> <p>3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i></p>	<p><i>Работа с информацией, представленной в российских и иностранных научных публикациях, аналитических материалах, статистических бюллетенях и изданиях, нормативно-правовых документах; анкетирование; опрос</i></p>
---	---

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p>1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала проекта</i></p>	<p><i>Проведение предпроектного анализа. Определение целевого рынка и проведение его сегментирования. Выполнение SWOT-анализа проекта</i></p>
<p>2. <i>Разработка устава научно-технического проекта</i></p>	<p><i>Определение целей и ожиданий, требований проекта. Определение заинтересованных сторон и их ожиданий.</i></p>
<p>3. <i>Планирование процесса управления проектом: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i></p>	<p><i>Составление календарного плана проекта. Определение бюджета НИИ. Проведение оценки экономической эффективности исследования низина в модельных растворах</i></p>

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

<p>1. <i>Затраты на научно-исследовательский проект.</i></p> <p>2. <i>Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта.</i></p> <p>3. <i>Сравнительная эффективность разработки.</i></p>	
---	--

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
4К51	Кузнецов Максим Тарасович		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
4К51	Кузнецову Максиму Тарасовичу

Школа	ИШНПТ	Отделение(НОЦ)	Н.М. Кижнера
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	18.03.02. Энерго - и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии

Тема ВКР:

Разработка проточного плазмон-каталитического реактора для конверсии углеводородов	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объект исследования – проточный плазмон-каталитический реактор Рабочая зона – Лаборатория Область применения – Химическая промышленность, нефтехимическая промышленность.
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: -специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; -организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.	- "Трудовой кодекс Российской Федерации" от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 01.04.2019); - организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны: технический перерыв, проветривание, полная изоляция от производственных источников шума и вибрации.
2. Производственная безопасность: - анализ выявленных вредных и опасных факторов; - обоснование мероприятий по снижению воздействия.	- повышенный уровень вибрации; - повышенный уровень шума; - электрический ток; - повышенная температура поверхности оборудования.
3. Экологическая безопасность: -анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы); - анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы); - анализ воздействия объекта на литосферу(отходы).	- вредные вещества, которые выделяются или используются во время работы аппарата; - вредные воздействия на гидросферу и литосферу.

4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	<ul style="list-style-type: none"> - Перечень возможных ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения-пожар, взрыв; - разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий: а) использование огнетушителя, песка, асбестового одеяла б) в случае стихийных бедствий отключение воды и электричества с) организационная эвакуация работающих.
--	---

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Скачкова Лариса Александровна			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4К51	Кузнецов Максим Тарасович		

Запланированные результаты обучения по ООП 18.03.02 выпуска 2019 г.

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС ВПО, критериев и/или заинтересованных сторон
<i>Профессиональные компетенции</i>		
Р1	Применять базовые математические, естественнонаучные, социально-экономические и специальные знания в профессиональной деятельности	Требования ФГОС (ОПК-1,2,3; ПК-8,10,11,12; ОК-1,2,3,4), Критерий 5 АИОР (п.1.1)
Р2	Применять знания в области энерго-и ресурсосберегающих процессов химической технологии, нефтехимии и биотехнологии для решения производственных задач	Требования ФГОС (ОПК-1,2; ПК-1,3,,9; ОК-7), Критерий 5 АИОР (пп.1.1,1.2)
Р3	Ставить и решать задачи производственного анализа, связанные с созданием и переработкой материалов с использованием моделирования объектов и процессов химической технологии, нефтехимии и биотехнологии.	Требования ФГОС (ОПК-2; ПК-2,4,5,16; ОК-5,7), Критерий 5 АИОР (пп.1.2)
Р4	Проектировать и использовать энерго-и ресурсосберегающее оборудование химической технологии, нефтехимии и биотехнологии	Требования ФГОС (ОПК – 1; ПК-2,4,5,8,17,18; ОК-3,4), Критерий 5 АИОР (п.1.3)
Р5	Проводить теоретические и экспериментальные исследования в области энерго-и ресурсосберегающих процессов химической технологии, нефтехимии и биотехнологии	Требования ФГОС (ОПК -2,3; ПК-13,14,15; ОК-7), Критерий 5 АИОР (п.1.4)
Р6	Осваивать 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 (ОПК – 3; ПК-1,4,6,7,9,10,11; ОК-9), Критерий 5 АИОР (п.1.5)
<i>Общекультурные компетенции</i>		
Р7	Демонстрировать знания социальных, этических и культурных аспектов профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-1,6), Критерий 5 АИОР (пп.2.4,2.5)
Р8	Самостоятельно учиться и непрерывно повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-7), Критерий 5 АИОР (2.6)

P9	Владеть иностранным языком на уровне, позволяющем разрабатывать документацию, презентовать результаты профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-5) , Критерий 5 АИОР (п.2.2)
P10	Эффективно работать индивидуально и в коллективе, демонстрировать ответственность за результаты работы и готовность следовать корпоративной культуре организации.	Требования ФГОС (ОК-4,6,8) , Критерий 5 АИОР (пп.1.6, 2.3)

Реферат

Дипломный проект состоит из пояснительной записки, содержащей 117 страниц машинописного текста, 28 рисунков, 31 таблиц, 62 источника литературы, 5 листа графического материала формата А1.

Выпускная квалификационная работа «Разработка проточного плазмон-каталитического реактора для конверсии углеводородов».

Ключевые слова: реактор, плазмонный катализ, фотокатализ, электромагнитное излучение, непрерывная технология синтеза.

Объектом работы является проточный плазмон-каталитический реактор.

Цель работы – расчет проточного плазмон-каталитического реактора для конверсии углеводородов.

В ходе выполнения работы были произведены все необходимые расчеты для конструирования аппарата, определены его размеры и основные механические характеристики.

Проточный плазмон-каталитический реактор: диаметр реакционной трубки 3х0.4 мм, длина реакционной трубки 450 мм соответственно, реакционный объем 0.003 м³, катализатор – оптоволокно с нанесенным слоем золота.

Степень внедрения: конверсия углеводородов с использованием плазмонного катализа на лабораторной стадии.

Область применения: химическая промышленность, нефтехимическая промышленность.

В ходе работы было подтверждено, что рассчитанный реактор соответствует всем предъявляемым технологическим требованиям.

В разделе «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» описаны ресурсоэффективность проекта, его анализ, план работы по проекту.

В разделе «Социальная ответственность» описаны мероприятия по безопасному ведению технологического процесса.

Abstract

The diploma project consists of an explanatory note containing 117 pages of typewritten text, 28 figures, 31 tables, 62 sources of literature, 4 sheets of graphic material.

Graduation qualification work " Development of the flow plasmon-catalytic reactor for the conversion of hydrocarbons ".

Key words: reactor, plasmon catalysis, photocatalysis, electromagnetic radiation, continuous synthesis technology.

The object of work is an introduction of plasmon catalysis technology to the application and the calculation of the flow plasmon-catalytic reactor.

Aim of work – calculation and design of the flow plasmon-catalytic reactor for the conversion of hydrocarbons.

Continuous flow-reactor with agitator: the diameter of the reaction tube is 3x0.4 mm, the length of the reaction tube is 450 mm, respectively, the reaction volume is 0.003 m³, the catalyst is an optical fiber coated by gold layer.

Scope: chemical industry, petrochemical industry.

In the course of the work it was confirmed that the calculated reactor meets all the technological requirements.

The section "Financial management, resource efficiency and resource saving" describes the resource efficiency of the project, its analysis, work plan for the project.

The section "Social responsibility" describes measures for the safe conduct of the technological process.

Содержание

Введение.....	15
1 Литературный обзор	16
1.1 Основные явления образования плазмон-поляритона	16
1.2 Плазмонные материалы для фотокатализа	17
1.3 Способы регулирования селективности плазмонного катализа	19
2 Экспериментальная часть	23
2.1 Исходные вещества и материалы.....	23
2.2 Схема экспериментальной установки	23
2.3 Методика приготовления раствора циклогексена	24
2.4 Методы исследования раствора циклогексадиена-1,3	24
2.5 Результаты и их обсуждения	25
3 Описание технологической схемы.....	28
4 Технологический расчет плазмон-каталитического реактора	30
4.1 Материальный баланс.....	30
4.2 Тепловой баланс реактора непрерывного действия	33
4.3 Расчет полезного объема реактора.....	35
4.4 Расчет штуцеров и подбор фланцев	38
4.5 Выводы по технологическому расчету	39
5 Выбор конструкционного материала	41
5.1 Определение расчетных параметров.....	41
5.2 Определение прибавок на различные виды разрушений	42
5.3 Выводы по выбору конструкционных материалов	43
6 Механический расчет плазмон-каталитического реактора	44
6.1 Расчет толщины стенки цилиндрической обечайки реактора	45
6.2 Расчет толщины стенки трубной решетки и перфорированной плоской крышки.....	49
6.3 Расчет фланцевого соединения корпуса с крышкой	54
6.4 Расчет укрепления отверстий.....	65
6.5 Определение массы реактора и расчет обечайки от воздействия опорных нагрузок ..	68
6.6 Общий вывод по механическому расчету.....	77
7 Гидравлический расчет и подбор насоса	79
8 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	81

8.1 Потенциальные потребители результатов исследования	81
8.2 SWOT – анализ.....	82
8.3 Планирование научно-исследовательских работ	83
8.4 Определение ресурсосберегающей, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности проекта	90
9 Социальная ответственность	93
9.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.....	93
9.2 Производственная безопасность	95
9.3 Экологическая безопасность	98
9.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	101
Заключение.....	104
Список публикаций.....	105
Список использованных источников	106
Приложение А.....	110
Приложение Б	114

Введение

В настоящее время процессы подготовки и переработки углеводородного сырья занимают ключевое место в определении цены конечного товара. Не самая высокая степень конверсии исходного сырья, множество побочных продуктов, а также сложные условия проведения химических процессов существенно удорожают конечную стоимость продукта. В связи с этим появляется огромная потребность в энерго- и ресурсосберегающих технологиях подготовки и переработки углеводородного сырья.

Одним из способов усовершенствования технологии переработки углеводородного сырья является создание принципиально новых реакторных систем, основанных на использовании принципиально новых подходов к трансформации органических веществ. Наиболее перспективными являются системы на основе плазмонного инициирования органических реакций, позволяющего реализовать многочисленные процессы с использованием энергии света. Одним из примеров таких систем может являться оптическое волокно, покрытое тонким слоем золота, и, очевидно, что конструирование и проектирование реакторных систем на основе данного материала представляет собой важнейшую задачу.

Основное отличие плазмон-каталитического реактора от других реакторов, используемых в подобном процессе, – это наличие плазмон-активного инициатора, который представляет собой оптическое волокно, покрытое плазмон-активными структурами на основе металлов, способных возбуждать поверхностный плазмон-поляритон [1]. Поверхностный плазмон-поляритон возбуждается под действием светового или лазерного излучения, что делает данную технологию одной из наиболее перспективных для химической промышленности [1].

Основными достоинствами плазмон-каталитического реактора являются мягкие условия синтеза (комнатная температура, атмосферное давление), а также малое количество побочных продуктов или их полное отсутствие.

1 Литературный обзор

Солнечная энергия, используемая для высокоселективных химических реакций, это огромный шаг к ресурсоэффективному производству. Развитие фотокаталитических наноматериалов в качестве антенн для поглощения светового излучения играет ключевую роль.

В данном разделе представлены теоретические основы плазмоники и способы её применения.

1.1 Основные явления образования плазмон-поляритона

В данном подразделе представлено краткое описание плазмон-опосредованных явлений таких как: локализованный поверхностный плазмонный резонанс (LSPR), электрическое усиление ближнего поля (ENFE) и контакт Шоттки между плазмоникой и полупроводниками. Эти три характерные особенности являются основой для создания катализаторов, основанных на плазмонном эффекте.

1.1.1 Локализованный поверхностный плазмонный резонанс

Поверхностные плазмоны - это коллективное колебание свободных электронов, которые ограничены поверхностью металла [2]. В сочетании с фотонами поверхностные плазмоны могут возбуждать электронную проводимость, которая распространяется волнообразно вдоль границы раздела между металлом и диэлектриком. Обычно электронная проводимость распространяется структурами из нановолокон, известными как поверхностные плазмон-поляритоны [3]. Так как они ограничены границей раздела металл - диэлектрик, то они могут распространяться только вдоль поверхности металла, пока энергия не рассеется, либо за счет тепловых потерь, либо за счет рассеивания излучения. Здесь мы выделяем эффект LSPR, который заключается в колебаниях электронной плотности, ограниченной поверхностью наночастиц плазмонного металла.

1.1.2 Электрическое усиление ближнего поля

Важной характеристикой эффекта LSPR является то, что он может усиливать напряженность электромагнитного поля падающего света и приводить к увеличению

					<i>ФЮРА.ППКР.000.000.ПЗ</i>		
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>			
<i>Выполнил</i>	<i>Кузнецов М.Т.</i>				<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>	<i>Швалева Ю.Б.</i>				<i>Д</i>	<i>16</i>	<i>7</i>
<i>Н. Контр.</i>					<i>Литературный обзор</i>		
<i>Утверд.</i>					<i>ТПУ ИШНПТ НОЦ Н.М. Кижнера Группа 4К51</i>		

электрического поля в нанометровом масштабе. Данный эффект, вызванный LSPR, называется электрическим усилением ближнего поля (ENFE). На эффект ENFE влияет пространственно-неоднородное распределение плазмонов по поверхности наноматериала. ENFE экспоненциально затухает при отдалении от поверхности наноматериала на расстояние 10–50 нанометров [4]. Данный эффект позволяет существенно увеличить каталитическую способность плазмона, а также повысить его селективность.

1.1.3 Барьер Шоттки

Так как при соединении металла и диэлектрика их энергия Ферми выравнивается, то при достижении равновесия между ними образовывается потенциальный барьер. Электроны полупроводника должны преодолеть этот барьер для того, чтоб течь из полупроводника в металл. Это приводит к истощению электронов на границе раздела полупроводников. Образовавшаяся зона истощения вызывает изгиб валентной зоны и зоны проводимости полупроводника, например, в полупроводнике n-типа полосы смещены вниз, а в полупроводниках p-типа полосы согнуты вверх относительно уровня Ферми [5]. Такой изгиб называется барьером Шоттки.

Барьер Шоттки существенно уменьшает катализирующую способность фотокатализаторов, однако при использовании благородных металлов в качестве покрытия для диэлектриков, можно существенно увеличить энергию электронов, для беспрепятственного преодоления барьера Шоттки.

1.2 Плазмонные материалы для фотокатализа

В данном подразделе рассмотрены основные материалы и способы их комбинирования для создания плазмон-поляритона.

1.2.1 Монокатализаторы на основе Au, Ag, Cu

Основывая на подпункте 1.1 можно сказать, что при изменении размера, формы и материалов окружающих металлические наночастицы можно влиять на плотность электрического поля на их поверхности, тем самым приводя к изменению частоты колебаний электронов и пика LSPR. Так при использовании наночастиц Au, полученного химическим восстановлением из его солей, с размерами меньшими половины длины волны падающего света, можно увидеть проявление эффект LSPR [6].

Наночастицы Au, Ag и Cu демонстрируют различные положения пиков LSPR, как показано на рисунке 1.1 (а). Свойства, связанные с размером и формой, обеспечивают множество регулируемых фотокаталитических характеристик плазмонных наноструктур

					<i>ФЮРА.ППКР.000.000.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						17
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

у Au/анатаз. Тогда как Au/анатаз проявляет более высокую активность при ультрафиолетовом излучении в отношении восстановления нитробензола.

Наноконструкция, состоящая из нановолокон TiO_2 с включениями Au/Pt, значительно усиливает фотокаталитическую активность в отношении образования H_2 и восстановления CO_2 [15].

Кроме того, в наноразмерные матрицы из TiO_2 можно помещать Au/Pt. Такие наноструктуры обладают фотокаталитической активностью в 21 и 13 раз выше, чем у чистого TiO_2 под воздействием ультрафиолетового и видимого излучения, соответственно [16].

Наноконструкция Pt/Au/ WO_3 непрерывно выделяет H_2 и CO_2 из глицерина при облучении видимым светом [17].

Помимо металлических и оксид металлических присадок существуют и другие наноматериалы, такие как полупроводники, цеолиты и т.д. Их также, как и металлические присадки можно объединять с плазмонными металлами для получения фотокатализаторов. В этих фотокатализаторах неметаллические вещества являются не только носителями, но и участниками реакций. Также их можно использовать в качестве инструмента для модификации структуры катализатора. Например, Au/NR, который используется в качестве фотосенсибилизатора в сочетании с TiO_2 , такая наноконструкция может собирать широкий спектр видимого света и увеличивать каталитическую способность окисления пропан-2-ол [18].

Частица анатаз/рутил с расположенным Au/NR на границе раздела анатаз-рутил, используется в качестве активного плазмонного фотокатализатора для аэробного окисления ароматических спиртов в альдегиды [19]. Этот фотокатализ стимулируется посредством плазмонной активации частиц Au видимым светом с последующим последовательным перенос электронов в месте контакта Au/рутил/анатаз.

1.3 Способы регулирования селективности плазмонного катализа

Из написанного выше видно, что на селективность той или иной реакции влияет множество факторов. В связи с этим выделяют внешние и внутренние факторы (способы), влияющие на селективность процесса [1].

1.3.1 Внутренние факторы, влияющие на селективность плазмонного катализа

К внутренним факторам относятся [1]:

- тип металла;
- состав катализатора;

									Лист
									19
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ФЮРА.ППКР.000.000.ПЗ				

- горячие электроны.

Вышеупомянутые металлы, которые могут проявлять плазмонный эффект, в основном представляют собой Au, Ag, Cu, Pt, Rh и Pd. Способ регулирования селективности целевого продукта заключается в использовании определенных активных центров металлов, т.к. по своей природе они обладают различными каталитическими свойствами, даже при одинаковом облучении при идентичных условиях реакции.

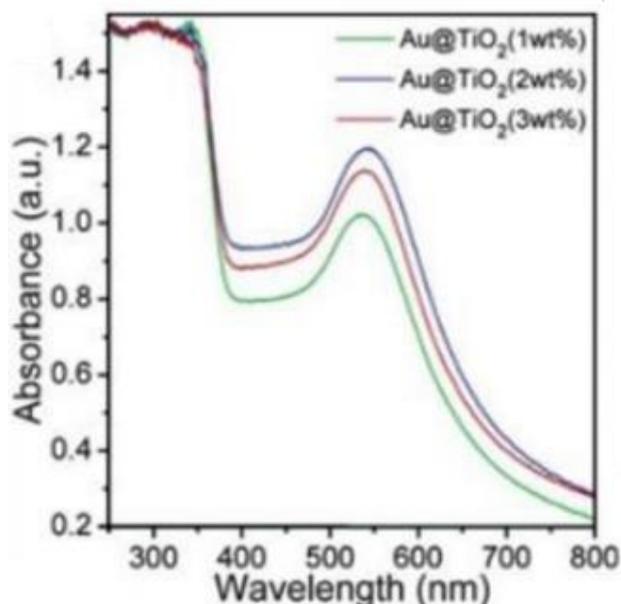


Рисунок 1.2 – Влияние концентрации Au на длину волны катализатора [20]

Степень окисления металла (рассматривается, как изменение состава) влияет на его электронные свойства и, таким образом, существенно изменяет взаимодействие между наноструктурами металла и падающим светом, тем самым увеличивая или уменьшая селективность процесса.

Таблица 1.1 – Селективность восстановления оксида стирола на различных плазмон-активных катализаторах [21]

Тип катализатора	Степень превращения, %	Селективность, %
Au/CeO ₂	19.7	88
Au/ZrO ₂	17.4	72
Au/TiO ₂	22.5	73
Au/Al ₂ O ₃	23.9	60

Различность состава наноструктур, также существенно влияет на селективность катализатора, так, например, наночастицы Au, нанесенные на разные подложки, показывают разную селективность в отношении восстановления оксида стирола до стирола как показано ниже в таблице 1.1.

Помимо подложек, сами наночастицы плазмонного металла могут эффективно преобразовывать энергию видимых фотонов в энергию горячих носителей заряда внутри наночастиц. Эти энергетические носители заряда могут переноситься в молекулы или подложки (включая полупроводники) [22, 23], где могут вызывать фотохимические превращения [24, 25]. Следовательно, управляя фотоиндуцированными горячими электронами можно настраивать каталитическую активность, а, следовательно, и селективность плазмонных фотокатализаторов.

1.3.2 Внешние факторы, влияющие на селективность плазмонного катализа

К внешним факторам относятся [1]:

- источник света;
- интенсивность света;
- функциональные группы;
- растворители;
- pH и т.д.

Источники света такие как: солнечное свет, лазерное излучение, светоизлучающий диод, а также лампа накаливания все они по-разному влияют на селективность в той или иной реакции.

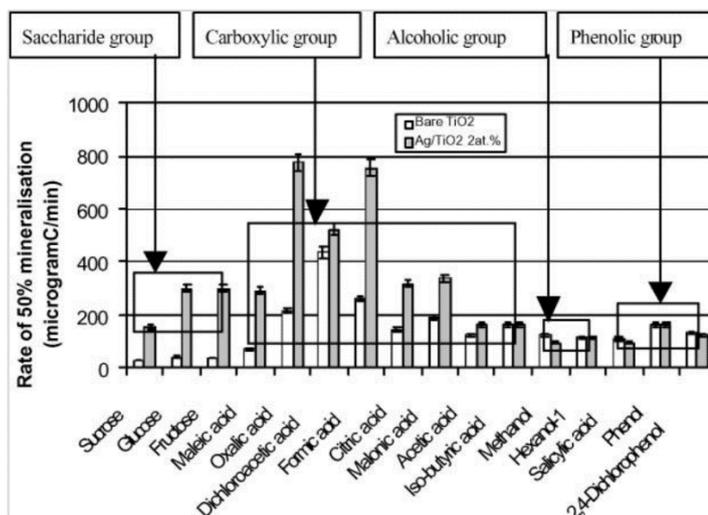


Рисунок 1.3 – Скорость минерализации органических соединений на TiO₂ и Ag/TiO₂ [26]

Известно, что физико-химические свойства молекулы, такие как полярность связи, молекулярная полярность, функциональные группы (например, C = C, -CHO, -COOH и -OH) и адсорбция, влияют на их реакционную способность и условия связывания. Влияние этих факторов значительно возрастает в присутствии плазмонных катализаторов в полярных условиях реакции (Рисунок 1.3).

Резюмируя вышесказанное можно выделить шесть основных механизмов повышения селективности [1]:

- состав катализатора (изменение элементного состава и степени окисления);
- перенос горячих электронов (более широкое или сильное фотопоглощение, фототермический эффект);
- усиление локальных электрических полей на катализаторе (усиление в ближнем поле);
- совместимость элементов, входящих в катализатор (бифункциональность, синергетический эффект);
- источник электромагнитного излучения (тип излучения, длина волны и интенсивность излучения);
- реакционная среда (растворитель, добавки, рН среды).

					<i>ФЮРА.ППКР.000.000.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		22

2 Экспериментальная часть

В данном разделе приведены результаты эксперимента по синтезу циклогексадиена-1,3 на плазмон-активном катализаторе и их обсуждения.

2.1 Исходные вещества и материалы

В качестве исходного вещества для синтеза циклогексадиена-1,3 использовался 99,9 % циклогексен

В качестве стандарта использовался 99,9 % раствор бензола.

В качестве катализатора использовалось оптоволокно длиной 450 мм, с нанесенным 50 нм слоем золота.

2.2 Схема экспериментальной установки

На рисунке 2.1 представлена схема экспериментальной установки по синтезу циклогексадиена-1,3 на плазмон-активном катализаторе. Конструкция установки позволяет проводить синтез циклодиена при различных температурах и скоростях потока, при разной форме, диаметре и длине трубки, а также при разном плазмон-активном веществе, нанесенным на оптоволокно.

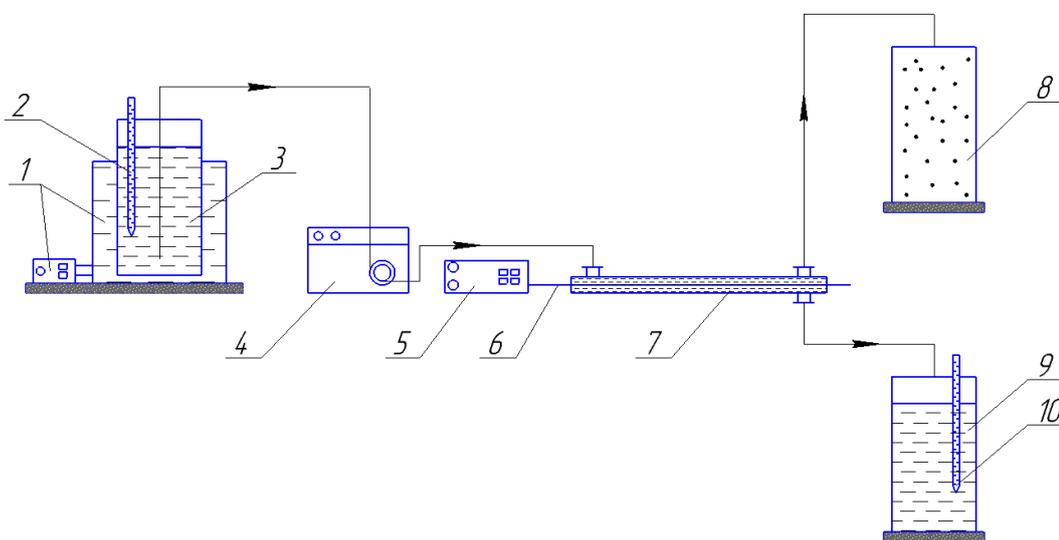


Рисунок 2.1 – Схема экспериментальной установки:

1 – термостат; 2, 9 – термометр; 3 – емкость с раствором циклогексена;
4 – перистальтический насос; 5 – лазерная установка; 6 – оптоволокно; 7 – реакционная трубка; 8 – емкость хранения водорода; 9 – накопитель раствора циклогексадиена-1,3.

					<i>ФЮРА.ППКР.000.000.ПЗ</i>		
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			
Выполнил	Кузнецов М.Т.				Лит.	Лист	Листов
Провер.	Швалева Ю.Б.				Д	23	5
Н. Контр.					Экспериментальная часть		
Утверд.					ТПУ ИШНПТ НОЦ Н.М. Кижнера Группа 4К51		

Раствор циклогексена из емкости 3 перистальтическим насосом 4 подается в реакционную трубку 7. Температура раствора в емкости 3 поддерживается термостатом 1. В реакционной трубке 7 при помощи катализатора, который представляет собой оптоволокно с нанесенным слоем золота, происходит превращение циклогексена в циклогексалиен-1,3 и водород. Образовавшийся раствор циклогексалиен-1,3 и водород подаются в емкости 9 и 8 соответственно. Определение теплового эффекта реакции производилось при помощи термометров 2 и 9.

Полученный циклогексадиен-1,3 подвергался хроматографическому анализу на. В качестве стандарта использовался 99.9% раствор бензола.

Синтез производился при скорости потока равной 0.737 мм/с и длине трубки 450 мм, данные параметры являются наиболее оптимальными [2], а также при температуре равной 25°C и давлении равном 0.1 МПа.

2.3 Методика приготовления раствора циклогексена

Для проведения синтеза циклогексадиена-1,3 из циклогексена был приготовлен раствор последнего.

Состав раствора циклогексена:

- циклогексен 95 % масс.;
- бензол 5 % масс.

Бензол в растворе служит стандартом, на основе которого в дальнейшем производился хроматографический анализ, а также определялась селективность процесса синтеза циклогексадиена-1,3 на плазмон-активном катализаторе.

Рассчитанный объем исходного 99.9 % раствора бензола, для получения 500 мл 95.0 % раствора циклогексена, равен 12 мл. Раствор бензола помещали в мерную колбу и разбавляли его раствором 99.9 % до 500 мл.

2.4 Методы исследования раствора циклогексадиена-1,3

Для определения степени конверсии циклогексена использовался хроматографический анализ, который проводился на газовом хроматографе Agilent 7820А совмещенном с масс-селективным детектором Agilent 5975.

В ходе проведения анализа на газовом хроматографе использовались следующие настройки:

- температура испарителя 160°C;
- колонка HP-5MS.

					<i>ФЮРА.ППКР.000.000.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		24



Рисунок 2.2 - Газовый хроматограф Agilent 7820A совмещенный с масс-селективным детектором Agilent 5975

2.5 Результаты и их обсуждения

При выполнении работы был осуществлён ряд экспериментов по синтезу циклогексадиена-1,3. В ходе экспериментов были получены следующие зависимости: степень конверсии от диаметра трубки, а также изменение температуры реакционного потока во времени.

Хроматографический анализ производился для определения остаточного циклогексена в образовавшемся растворе циклогексадиена-1,3. Такой способ определения степени конверсии является более точным, т.к. исключаются различные побочные эффекты, связанные с разбавлением анализируемого раствора, растворителями для промывки иглы хроматографа. Также из полученных данных можно определить селективность процесса, т.к. побочные вещества при синтезе циклогексадиена-1,3 из циклогексена обладают более низкой температурой кипения, чем циклогексадиена-1,3.

Данные хроматографического анализа представлены на рисунках А.1 - А.8 приложения А. Исходя из полученных результатов видно, что при увеличении диаметра трубки степень конверсии резко снижается, это происходит в результате того, что толщина плазмона, образующегося на поверхности оптоволокна, равна 50 нм, что на несколько порядков ниже, чем диаметр трубки. Проходя по трубке большего диаметра время контакта реагента с плазмой существенно снижается, что в свою очередь снижает степень конверсии, т.к. вне поля катализатора реакция проходит при высоких температурах.

Также из рисунков А.1 - А.8 приложения А можно сделать вывод, что селективность плазмон-каталитического превращения циклогексена в циклодиен приблизительно равна 1.

					<i>ФЮРА.ППКР.000.000.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		25

Данный вывод основывается на том, что на результатах хроматограмм присутствуют только бензол и непрореагировавший циклогексен, циклогексадиена-1,3 не присутствует, т.к. его температура кипения выше 160°C, продукты возможных побочных реакций обладают температурой кипения ниже, чем целевой продукт. Поэтому, если бы в процессе синтеза циклогексадиена-1,3 образовывались побочные вещества, то они были бы отражены на хроматограмме.

Зависимость степени конверсии циклогексена от диаметра трубки представлена на рисунке 2.3.

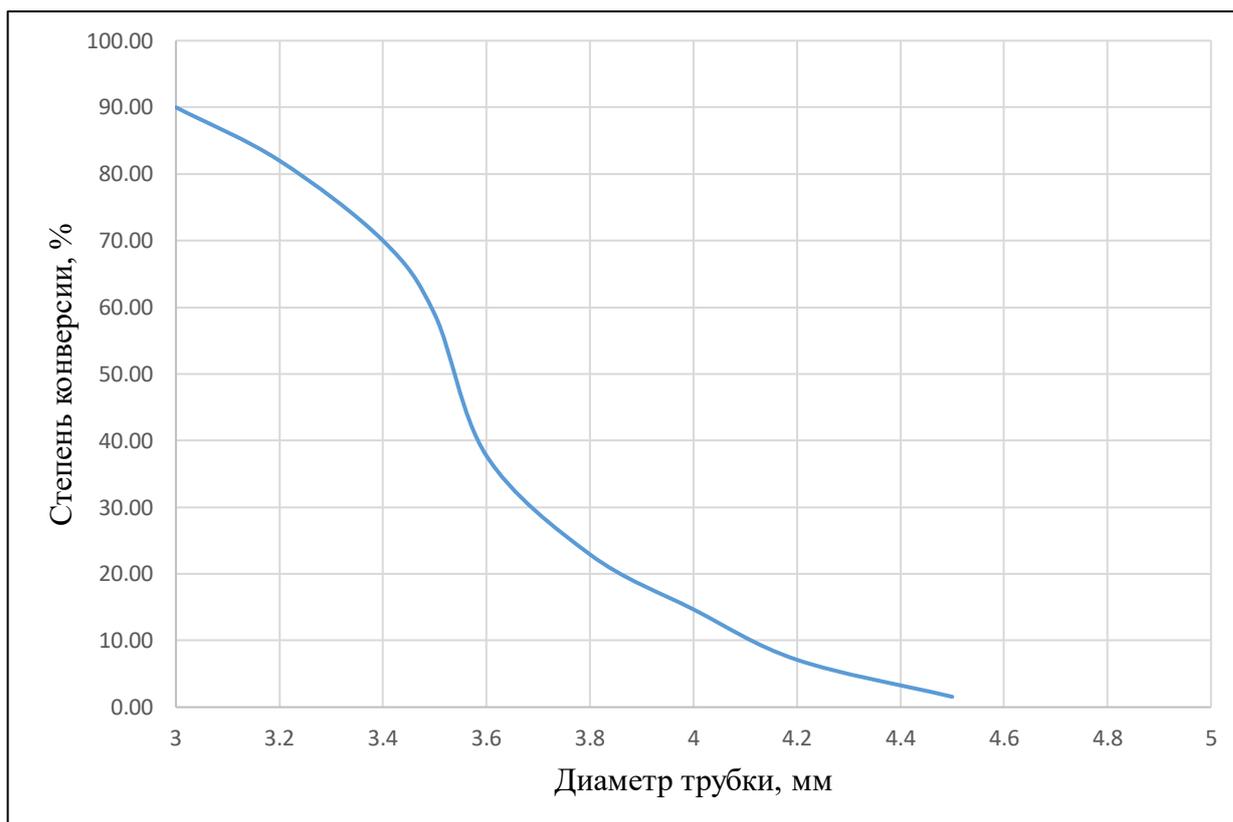


Рисунок 2.3 – Зависимость степени конверсии циклогексена от диаметра трубки

В ходе эксперимента также были получены данные об изменении температуры реакционного потока. Из рисунка 2.4 видно, что на протяжении всего времени синтеза температура раствора не изменялась. Реакция получения циклогексадиена-1,3 из циклогексена является эндотермической, поэтому стагнация температуры свидетельствует о том, что плазмон обладает тепловым эффектом как минимум равным тепловому эффекту реакции с обратным знаком. Данный эффект свидетельствует о том, что в реакционную среду не нужно дополнительно вводить тепло, что значительно упрощает конструкцию разрабатываемого реактора.

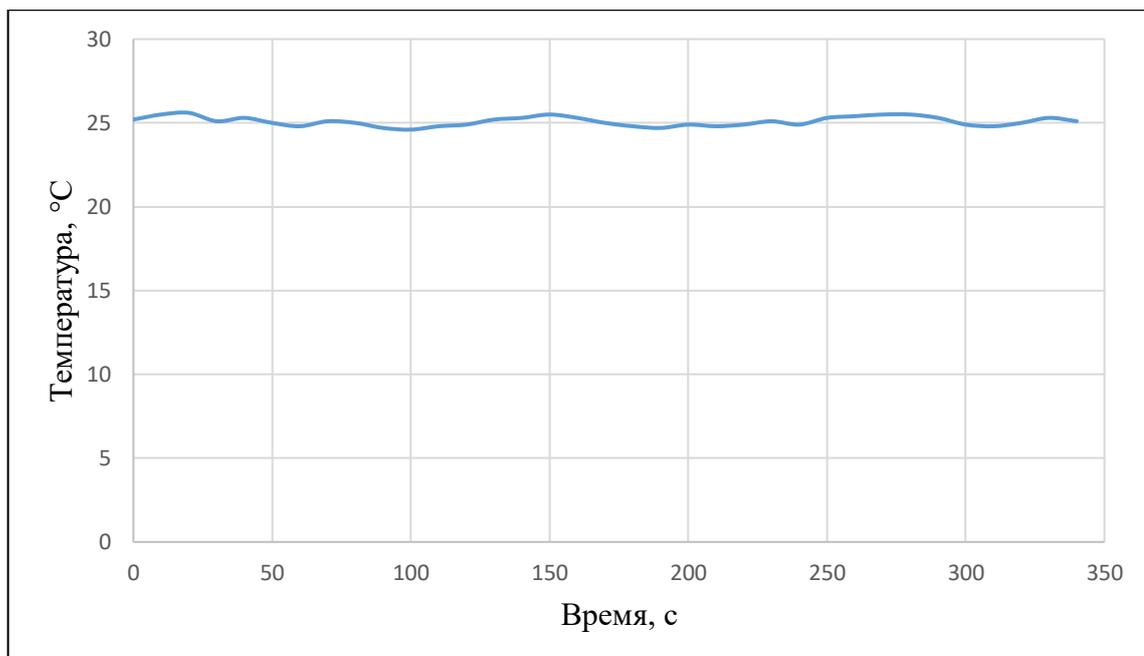


Рисунок 2.4 – Изменение температуры раствора во времени

Исходя из анализа полученных данных можно сказать, что плазмон-активный катализатор, на основе оптоволокна покрытого слоем золота, подходит для синтеза циклогексадиена-1,3. Использование данного катализатора существенно упрощает выделение целевого продукта (циклогексадиена-1,3) из реакционной смеси, а также позволяет проводить синтез в мягких условиях.

Разработка проточного плазмон-каталитического реактора будет производиться опираясь на данные полученные в ходе эксперимента.

3 Описание технологической схемы

Производство циклогексадиена-1,3 является важным для тонкого органического синтеза. Данный циклодиен широко используется в реакциях Дильса-Альдера для получения сложных циклических соединений, например, алдрина и его производных, тетрациклического дитерпеноида и т.д [27]. В настоящее время синтез данного вещества с высокой степенью конверсии и высокой селективностью невозможен, в связи с этим был разработан плазмон-каталитический реактор, который способен обеспечить высокую степень конверсии и высокую селективность процесса дегидрирования циклогексена с получением циклогексадиена-1,3 в мягких условиях ($t = 25^{\circ}\text{C}$, $P = 0.1 \text{ МПа}$).

На рисунке 3.1 представлена технологическая схема синтеза циклогексадиена-1,3 в проточном плазмон-каталитическом реакторе.

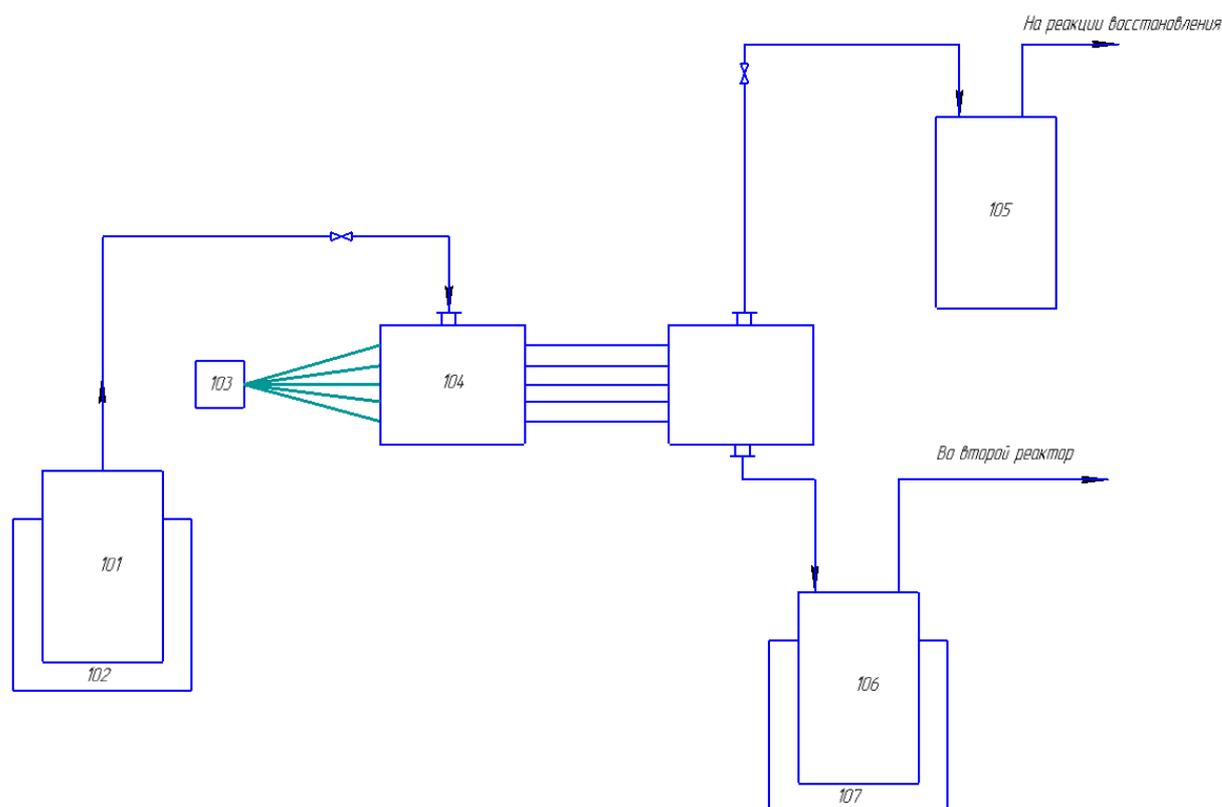


Рисунок 3.1 – Технологическая схема

Раствор циклогексена 95% с температурой 25°C из исходной емкости 101 перистальтическим насосом подается в реактор 104. Температура циклогексена

					<i>ФЮРА.ППКР.000.000.ПЗ</i>		
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>			
<i>Выполнил</i>	<i>Кузнецов М.Т.</i>				<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>	<i>Швалева Ю.Б.</i>				<i>Д</i>	28	2
<i>Н. Контр.</i>					<i>ТПУ ИШНПТ НОЦ Н.М. Кижнера Группа 4К51</i>		
<i>Утверд.</i>							

*Описание
технологической схемы*

поддерживается термостатом 102. В реакторе 104 раствор циклогексена проходит через трубки, содержащие катализатор, состоящий из оптоволоконной нити с нанесенным слоем золота. В ходе химической реакции циклогексен превращается в циклогексадиена-1,3 и водород. Степень конверсии и селективность процесса поддерживается лазерной установкой 103 при помощи регулирования мощности лазерного излучения.

Образовавшийся водород удаляется сверху реактора 104 и попадает в емкость хранения водорода 105, откуда направляется в качестве сырья на реакции восстановления. Давление в реакторе равно 0,1 МПа. Раствор целевого продукта (циклогексадиена-1,3), непрореагировавшего циклогексена и примесей подается в емкость 106, где его температура поддерживается термостатом 107. Из емкости 106 раствор отбирается для оценки степени конверсии и селективности, а далее используется в реакциях Дильса-Альдера.

					<i>ФЮРА.ППКР.000.000.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		29

4 Технологический расчет плазмон-каталитического реактора

Реактор представляет собой аппарат, схожий по конструкции с теплообменником типа ТН. Корпус аппарата представляет собой открытую трубчатку, закрепленную с двух сторон в цилиндрических обечайках при помощи сварки. Каждая обечайка содержит перфорированную крышку, закрепленную на ней при помощи фланцевого соединения. Трубки закреплены в трубных решетках при помощи клея, в каждой трубке находится катализатор, представляющий собой оптоволоконную нить с нанесенным на её поверхность слоем золота толщиной 50 нм. Оптоволоконные нити натянуты по всей длине реактора и выходят из него через перфорированные крышки. Оптоволокно закреплено в отверстиях перфорированной крышки при помощи клея.

Данная конструкция реактора была выбрана вследствие малого реакционного объема катализатора. Так как реакция идет фактически на поверхности катализатора, то эффективнее искусственно уменьшить объем реактора, чем увеличивать число нитей. Уменьшению объема способствует то, что катализатор находится в трубке малого диаметра. Малый диаметр трубки позволяет добиться высокой степени конверсии при небольшой длине трубки. Производительность всего реактора определяется количеством таких трубок с катализатором.

Технологический расчет включает в себя составление материального и теплового балансов, расчет полезного объема реактора, а также расчет штуцеров и подбор фланцев.

Реакция: $A \rightarrow^k B + C$, где А - циклогексен;

В - циклогексадиен-1,3;

С - водород.

4.1 Материальный баланс

G_a - массовый расход циклогексена, загружаемого в реактор, кг/ч;

G_b - массовый расход отводимого из реактора циклогексадиена-1,3, кг/ч;

G_{cm} - массовый расход раствора циклогексена, загружаемого в реактор, кг/ч;

ω_{a1} - массовая доля циклогексена в растворе, загружаемого в реактор;

$G_{a.o.}$ - массовый расход непрореагировавшего циклогексена, кг/ч;

$G_{c.o.}$ - массовый расход выделившегося водорода, кг/ч;

					<i>ФЮРА.ППКР.000.000.ПЗ</i>		
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>			
<i>Выполнил</i>	<i>Кузнецов М.Т.</i>				<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>	<i>Швалева Ю.Б.</i>				<i>Д</i>	<i>30</i>	<i>10</i>
<i>Н. Контр.</i>					<i>ТПУ ИШНПТ</i>		
<i>Утверд.</i>					<i>НОЦ Н.М. Кижнера</i>		
					<i>Группа 4К51</i>		

*Технологический расчет
плазмон-каталитического
реактора*

G_{Π} - массовый расход примесей в продукте, кг/ч;

ω_{a2} - массовая доля циклогексена в продукте;

ω_b - массовая доля циклогексадиена-1,3 в продукте;

ω_{Π} - массовая доля примесей в продукте;

ρ_1 - плотность, загружаемого раствора, кг/м³;

ρ_2 - плотность, выгружаемого раствора, кг/м³;

$\rho_{см}$ - плотность реакционной смеси, кг/м³;

V_c - объемный расход реакционной смеси, м³/ч.

Исходные данные для расчета материального баланса представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Исходные данные для расчета материального баланса

Название величин	Введенное обозначение и его значение
Степень конверсии	$\alpha = 0.9$
Массовый расход циклогексадиен-1,3	$G_b = 10$ кг/ч
Концентрация циклогексен в растворе	$\omega_{a1} = 0.95$

Расчет материального баланса требуется для определения массового расхода раствора циклогексена с учетом степени конверсии. Принимаем аппарат непрерывного действия, работающий в стационарном режиме.

Материальный баланс реактора составляется на основе закона сохранения масс.

$$\sum G_{исх} = \sum G_{кон}$$

$$\sum G_{исх} = G_{см}$$

$$\sum G_{кон} = G_{a.o} + G_b + G_c + G_{\Pi}$$

4.1.1 Определение массового расхода, загружаемого сырья исходя из массового расхода конечного продукта

Масса циклогексена в загружаемой смеси равна:

$$G_a := \frac{(2 - \alpha) \cdot G_b \cdot \mu_a}{\mu_b} = 11.275 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}$$

Общая масса, загружаемого сырья равна:

$$G_{см} := (2 - \omega_{a1}) \cdot G_a = 11.839 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}$$

4.1.2 Определение массы, непрореагировавшего сырья и массу выделившегося водорода

Массовый расход, непрореагировавшего циклогексана равна:

$$G_{a.o} := G_a \cdot (1 - \alpha) = 1.127 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}$$

Массовый расход, выделившегося водорода равна:

$$G_c := \frac{\alpha \cdot G_a \cdot \mu_c}{\mu_a} = 0.248 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}$$

Массовый расход примесей в конечном продукте:

$$G_{\Pi} := G_{\text{см}} \cdot 0.05 = 0.592 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}$$

Массовые доли циклогексана, примесей и циклогексадиена-1,3 в продукте:

$$\omega_{a2} := \frac{G_{a.o}}{G_{a.o} + G_b + G_{\Pi}} = 0.1$$

$$\omega_b := \frac{G_b}{G_{a.o} + G_b + G_{\Pi}} = 0.853$$

$$\omega_{\Pi} := \frac{G_{\Pi}}{(G_{a.o} + G_b + G_{\Pi})} = 0.051$$

4.1.3 Определение плотности реакционной смеси и объемного расхода реагентов

Плотностью примесей пренебрегаем ввиду их малого содержания.

В момент загрузки плотность раствора равна плотности циклогексана:

$$\rho_1 := \rho_a = 806 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

В момент выгрузки плотность раствора равна:

$$\rho_2 := \frac{G_a + G_b}{\frac{G_a}{\rho_a} + \frac{G_b}{\rho_b}} = 822 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Плотность реакционной смеси равна:

$$\rho_{\text{см}} := \frac{\rho_1 + \rho_2}{2} = 814 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Расчет объемного расхода реакционной смеси:

$$V_c := \frac{G_{см}}{\rho_{см}} = 0.015 \frac{м^3}{ч}$$

4.2 Тепловой баланс реактора непрерывного действия

Сырье поступает в реактор при температуре равной 25°C и вследствие эндотермической реакции может охладиться, что повлечет за собой снижение степени конверсии. Для предотвращения снижения производительности аппарата необходимо поддерживать температуру реакционной смеси в реакторе не ниже начальной температуры сырья. Исходя из вышесказанного, расчет теплового баланса проводится с целью определить количество теплоты, необходимое для поддержания температуры равной 25°C в реакторе.

В таблице 4.2. представлены термодинамические параметры веществ, входящих в состав реакционной смеси.

Таблица 4.2 – Термодинамические параметры веществ, входящих в состав реакционной смеси при температуре 25°C [28]

Название величины	Введенное обозначение и его значение
Теплоемкость циклогексена, кДж/кг·К	$C_{pa} = 1.771$
Теплоемкость циклогексадиена-1,3, кДж/кг·К	$C_{pb} = 1.753$
Теплоемкость водорода, кДж/кг·К	$C_{pc} = 14.300$
Энтальпия циклогексена, кДж/моль	$\Delta H_a = -38.828$
Энтальпия циклогексадиена-1,3, кДж/моль	$\Delta H_b = 108.366$
Энтальпия водорода, кДж/моль	$\Delta H_c = 0$

4.2.1 Определение количества теплоты, необходимое для поддержания температуры в реакторе

Тепловой баланс реактора составляется на основе закона сохранения энергии и в общем виде представляет собой следующее уравнение.

$$\sum Q_{исх} = \sum Q_{кон} - Q_{п}$$

Количество тепла, вносимое в реактор с сырьевым потоком:

$$\sum Q_{исх} = Q_1$$

Количество тепла, отводимое из реактора с продуктовым потоком + затрачиваемое на химическую реакцию + выделяющееся при нагреве катализатора:

$$\sum Q_{\text{кон}} = Q_2 + Q_3 - Q_4$$

Уравнение теплового баланса с учетом всех тепловых потоков:

$$Q_1 = Q_2 + Q_3 - Q_4 - Q_{\text{п}}$$

Где Q_1 - тепло, вносимое в аппарат при загрузке сырья, кДж/ч;

Q_2 - тепло, необходимое для поддержания температуры в реакторе, кДж/ч;

Q_3 - тепло, отводимое из реактора с сырьевым потоком, кДж/ч;

Q_4 - тепло, затрачиваемое на химическую реакцию, кДж/ч;

$Q_{\text{п}}$ - тепловые потери, кДж/ч.

Количество теплоты, вносимое в реактор реакционной смесью:

$$Q_1 := G_{\text{см}} \cdot C_{\text{ра}} \cdot T = 6248 \text{ кДж/ч}$$

Тепловые потери составляют 5% от Q_1 и равны:

$$Q_{\text{п}} := 0.05 \cdot Q_1 = 312 \text{ кДж/ч}$$

Количество теплоты, отводимое из реактора с сырьевым потоком:

$$Q_3 := [(G_{\text{а.о}} \cdot C_{\text{ра}} \cdot \omega_{\text{а2}} + G_{\text{б}} \cdot C_{\text{рб}} \cdot \omega_{\text{б}})T] + G_{\text{с}} \cdot C_{\text{рс}} \cdot T = 5569 \text{ кДж/ч}$$

Количество теплоты, затрачиваемое на химическую реакцию:

$$Q_4 := \left(\frac{\Delta H_{\text{б}} \cdot G_{\text{б}}}{\mu_{\text{б}}} - \frac{\Delta H_{\text{а}} \cdot G_{\text{а}}}{\mu_{\text{а}}} + \frac{\Delta H_{\text{с}} \cdot G_{\text{с}}}{\mu_{\text{с}}} \right) \cdot 10^3 = 18885 \text{ кДж/ч}$$

Определим количество теплоты, необходимое для поддержания температуры в реакторе:

$$Q_2 := Q_1 - Q_3 + Q_4 + Q_{\text{п}} = 19876 \text{ кДж/ч}$$

В ходе экспериментов было установлено, что плазмон, образующийся на поверхности оптоволоконной нити при мощности лазерной установки равной 9.6 Вт/м², выделяет около:

$$Q_{\text{к}} := 0.237 \text{ кДж/(ч} \cdot \text{мм}^2)$$

Определим минимальную суммарную длину всех оптоволоконных нитей, которая необходима для выделения количества теплоты Q_2 :

$$l_{\text{min}} := \frac{Q_2}{Q_{\text{к}} \cdot \pi \cdot d_{\text{в}}} = 1.335 \times 10^5 \text{ мм}$$

					ФЮРА.ППКР.000.000.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		34

4.3 Расчет полезного объема реактора

При проведении экспериментов было установлено, что степень конверсии равная 90% достигается в трубке с диаметром равным $d = 3.18 \times 0.4$ мм и длиной равной 450 мм [27]. Для удешевления изготовления трубок следует взять трубки серийного производства. Принимаем в качестве реакционных трубок иглы инъекционные [29] со следующими размерами:

Таблица 4.3 – Геометрические размеры игл инъекционных [29]

Название величины	Введенное обозначение и его значение
Наружный диаметр трубки, мм	$d_n = 3$
Внутренний диаметр трубки, мм	$d_{вн} = 2.2$
Толщина стенки трубки, мм	$s_T = 0.4$
Длина трубки, мм	$l = 450$

Также при проведении экспериментов было установлено, что максимальная степень конверсии достигается при линейной скорости потока равной $\omega = 0.737$ мм/с.

4.3.1 Определение требуемого реакционного пространства

Реакционное пространство представляет собой трубку со вставленным во внутрь оптическим волокном.

Определим объемный расход одной трубки:

$$V_{см} := \frac{(\omega \cdot \pi)}{4} \cdot (d_{вн}^2 - d_B^2) = 2.778 \frac{мм^3}{с}$$

где ω – линейная скорость потока, мм/с.

Определим количество трубок для заданной производительности реактора с учетом объемного расхода одной трубки:

$$n := \frac{V_c \cdot 10^9}{V_{см} \cdot 3600} = 1454$$

где V_c - объемный расход раствора, м³/ч;

$V_{см}$ - объемный расход одной трубки, мм³/с.

Исходя из рекомендаций, представленных в [30] реакционный объем следует увеличить на 15-20% относительно расчетного:

- количество трубок при 15% увеличении реакционного объема:

$$n_1 := \text{Ceil}(1.15 \cdot n, 100) = 1700$$

- количество трубок при 20% увеличении реакционного объема:

$$n_2 := \text{Ceil}(1.2 \cdot n, 100) = 1800$$

Точное определение количества трубок основывается на расположении их по вершинам правильного шестиугольника (Рисунок 4.1) и должно удовлетворять следующему условию:

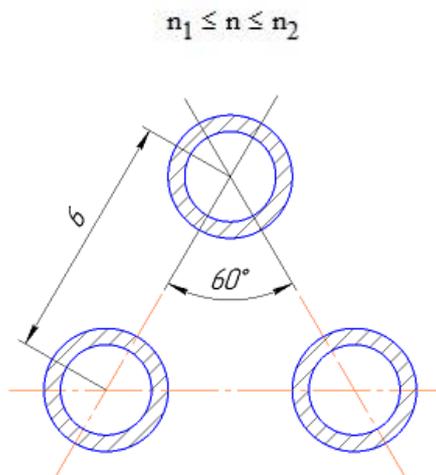


Рисунок 4.1 - Схема расположения труб по вершинам правильного шестиугольника

Данное расположение трубок в трубной решетке было выбрано из-за большего числа трубок приходящегося на единицу поверхности [31].

Определим число труб, расположенных на стороне наибольшего шестиугольника и по диагонали наибольшего шестиугольника:

- число труб, расположенных на стороне наибольшего шестиугольника равно:

$$a := \sqrt{\frac{2 \cdot n}{3 \cdot \sqrt{3}}} = 23.657$$

где n - количество трубок.

Для удобного расположения трубок в трубной решетке [31] принимаем $a = 26$.

- число труб, расположенных по диагонали наибольшего шестиугольника определяется по формуле 1.9 [31]:

$$b := 2 \cdot a - 1 = 51$$

Определим шаг между отверстиями:

Примем шаг в расположении трубок в трубной решетке по правильному шестиугольнику [31]:

Шаг между трубками определяется по формуле 1.10 [31]:

$$t := \text{Ceil}(1.2 \cdot d_H + 2, 1) = 6 \text{ мм}$$

					ФЮРА.ППКР.000.000.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		36

Пересчитаем количество трубок с учетом их расположения:

$$n_{\text{т}} := \frac{3 \cdot \sqrt{3} \cdot a^2}{2} = 1756$$

$1700 \leq 1756 \leq 1800$ Условие выполняется

4.3.2 Определение тепловой эффективности катализатора

Для упрощения расчета примем, что длина каталитического слоя на оптоволокне равна длине одной трубки, т.к. в каждой трубке находится по одной нити оптоволокна, то общее количество нитей равно количеству трубок $n_{\text{н}} = n$.

Общая длина оптоволоконных нитей равна:

$$l_{\text{общ}} := l \cdot n = 7.903 \times 10^5 \text{ мм}$$

Тепловая эффективность катализатора считается удовлетворительной если выполняется следующее условие $l_{\text{общ}} \geq l_{\text{мин}}$.

Проверка условия тепловой эффективности катализатора:

$$\text{prog_1} := \begin{cases} \text{"Условие эффективности выполняется"} & \text{if } \frac{l_{\text{общ}}}{l_{\text{мин}}} \geq 1 \\ \text{"Условие эффективности НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{prog_1} = \text{"Условие эффективности выполняется"} \quad \frac{l_{\text{общ}}}{l_{\text{мин}}} = 5.921$$

Из соотношения представленного выше видно, что общая длина оптоволоконных нитей в 6 раз больше, чем минимальная длина это свидетельствует о том, что температура в реакторе будет поддерживаться на уровне равном 25°C, избыток тепла пойдет на ускорение скорости химической реакции и повысит степень конверсии.

4.3.3 Определение расчетного диаметра трубной решетки

Расчетный диаметра трубной решетки определяется по формуле 1.10 [31]:

$$D_{\text{рр}} = t \cdot (b - 1) + d_{\text{внеш}}$$

где b - число труб, расположенных по диагонали на наибольшей стороне шестиугольника;

t - шаг между трубками, мм;

$d_{\text{н}}$ - наружный диаметр трубки, мм.

Расчетный диаметр трубной решетки аппарата равен:

					Лист
					37
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ФЮРА.ППКР.000.000.ПЗ

$$D_{pp} = t \cdot (b - 1) + d_H = 303 \text{ мм}$$

Принимаем диаметр трубной решетки равный внутреннему диаметру трубы, из которой будет изготовлена распределительная камера, но не менее расчетного значения.

4.4 Расчет штуцеров и подбор фланцев

Согласно рекомендациям [31] примем скорость движения жидкости в патрубке равной $\omega_1 = 0.01 \text{ м/с}$, а скорость движения газа равной $\omega_2 = 0.5 \text{ м/с}$.

Расчет штуцера заключается в определении диаметра патрубка по уравнению объемного расхода:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot V_c}{\pi \cdot \omega_1 \cdot 3600}}$$

где V_c - объемный расход загружаемого сырья, $\text{м}^3/\text{ч}$;

ω - линейная скорость потока в патрубке штуцера, м/с .

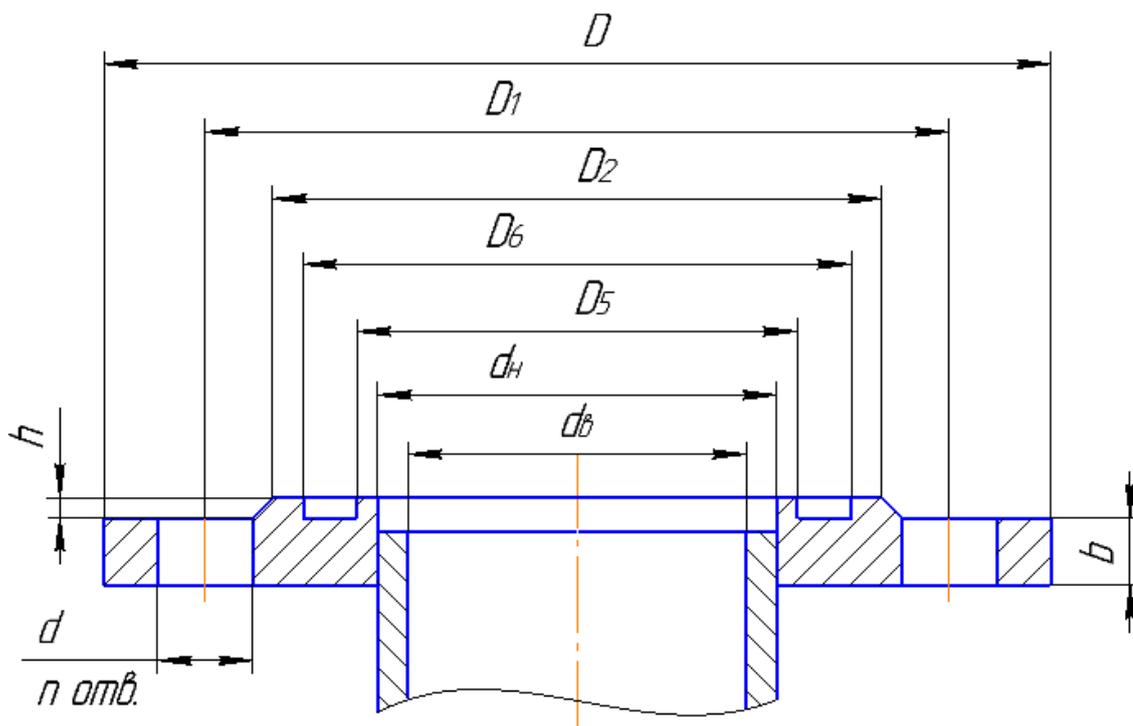


Рисунок 4.2 - Расчетная схема штуцера

После расчета по полученному значению d и рекомендации [32] подбираем стандартный штуцер. Так как сырье и продукт являются токсичными, пожаро- и взрывоопасными вещества, то на основе рекомендаций [33, 30] принимаем тип фланца шип-паз.

4.4.1 Штуцера для ввода реагента и отвода продукта

Примем штуцера для ввода реагентов в реактор и отвода продуктов из него одинаковыми с целью упрощения сборки аппарата.

Определим диаметр штуцера для ввода реагентов в реактор:

$$d_1 := \sqrt{\frac{4 \cdot V_c}{\pi \cdot \omega_1 \cdot 3600}} = 0.023 \text{ м}$$

Примем штуцер по [32] с условным проходом равным $d_1 = 25$ мм.

Таблица 4.4 – Основные размеры штуцера с $D_y = 25$ мм

D,мм	D ₁ ,мм	D ₂ ,мм	D ₅ ,мм	D ₆ ,мм	d _н ,мм	b,мм	h,мм	d,мм	n,мм	Номинальный диаметр резьбы болтов
100	75	60	40	52	33	10	2	11	4	10

4.4.2 Штуцера для отвода водорода

Определим диаметр штуцера для отвода водорода:

$$d_2 := \sqrt{\frac{4 \cdot G_c}{\pi \cdot \omega_2 \cdot 3600 \cdot \rho_c}} = 0.047 \text{ м}$$

Примем штуцер по [32] с условным проходом равным $d_2 = 50$ мм.

Таблица 4.5 - Основные размеры штуцера с $D_y = 50$ мм

D,мм	D ₁ ,мм	D ₂ ,мм	D ₅ ,мм	D ₆ ,мм	d _н ,мм	b,мм	h,мм	d,мм	n,мм	Номинальный диаметр резьбы болтов
140	110	90	65	81	59	10	3	14	4	12

4.5 Выводы по технологическому расчету

Итоги технологического расчета состоят из следующих конструктивно-технологических решений:

- из материального баланса и расчета полезного объема реактора были выбраны реакционные трубки со следующими геометрическими размерами $d = 3 \times 0.4$ мм, $l = 450$ мм, количество трубок, удовлетворяющее заданной производительности и с учетом рекомендаций [30], равно $n = 1756$, также было принято решение о расположении трубок в трубной решетке по углам правильно треугольника (шестиугольника);
- из теплового баланса и тепловой эффективности катализатора было определено, что количества теплоты, которое выделяет катализатор более чем достаточно, для поддержания температуры реакционной массы на уровне 25°C;

- из расчета диаметра трубной решетки был определен расчетный диаметр трубной решетки, который составил $D_{pp} = 303$ мм;
- исходя из того, что температура в реакторе не поднимается выше 25°C и реактор устанавливается в закрытом отапливаемом помещении, то тепловая изоляция не требуется;
- из расчета штуцеров и подбора фланце были подобраны стандартные штуцера с фланцем типа шип-паз.

					<i>ФЮРА.ППКР.000.000.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		40

5 Выбор конструкционного материала

Исходя из анализа литературных источников и рекомендаций [33, 30], а также учитывая тот факт, что конструируемый реактор будет являться опытным образцом, а, следовательно, на нем будут проводиться испытания по синтезу различных модельных субстратов, можно сделать следующие выводы:

- элементы аппарата, непосредственно контактирующие со средой следует выполнять из стали, стойкой к самым коррозионно-активным органическим жидкостям. В связи с этим и по рекомендации [33] была выбрана конструкционная сталь 12Х18Н10Т, способная обеспечить заданные требования;
- крепёжные изделия (болты, шайбы, гайки) следует выполнять из стали 40. Данные изделия не контактируют со средой реактора, а также сам аппарат будет располагаться в лаборатории, что минимизирует вероятность попадания любого электролита между крепежными изделиями и элементами аппарата, выполненными из стали 12Х18Н10Т;
- в качестве материала для прокладок по рекомендации [33] принимаем паронит. Данный материал является химически стойким, а также широко распространен, что делает его дешевле аналогов. Также паронит не деформируется при долгом хранении.

5.1 Определение расчетных параметров

Основной особенностью плазмон-каталитического реактора является то, что в данном аппарате возможно производить синтез различных веществ при комнатной температуре $t_c = 25^\circ\text{C}$ и атмосферном давлении, следовательно, все параметры будут определены при расчетной температуре равной [34]:

$$t_p := \max(20, t_c) = 25 \text{ }^\circ\text{C}$$

Принимаем расчетную температуру равной 25°C .

Допускаемое напряжение для стали 12Х18Н10Т при температуре 25°C определяется по таблице А.3 [34]:

$$t_w := \begin{pmatrix} 20 \\ 100 \end{pmatrix} \quad \sigma_d := \begin{pmatrix} 184 \\ 174 \end{pmatrix}$$

$$\sigma_d := \text{Ceil}(\text{linterp}(t, \sigma_d, t_p), 0.5) = 183.5 \text{ МПа}$$

					<i>ФЮРА.ППКР.000.000.ПЗ</i>		
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>			
<i>Выполнил</i>	<i>Кузнецов М.Т.</i>				<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>	<i>Швалева Ю.Б.</i>				<i>Д</i>	<i>41</i>	<i>3</i>
<i>Н. Контр.</i>					<i>ТПУ ИШНПТ</i>		
<i>Утверд.</i>					<i>НОЦ Н.М. Кижнера</i>		
					<i>Группа 4К51</i>		

Расчетное значение предела текучести при 20°C для стали 12X18H10T определим по таблице Б.7 [34]: $R_{p1.0} = 276$ МПа.

Допускаемое напряжение для стали 12X18H10T при 20°C определяется по таблице А.3 [34]: $\sigma_{20} = 184$ МПа.

Так как распределительные камеры аппарата изготавливаются из труб стальных бесшовных горячедеформированные, то коэффициент прочности сварных швов по [34] принимаем равным $\phi = 1$.

По рекомендации [34] при горизонтальном расположении аппарата расчетное давление принимается равным рабочему без учета гидростатического столба жидкости $P = 0.1$ МПа.

В качестве проверки аппарата на способность выдержать заданные нагрузки предлагается проводить гидравлические испытания, как наиболее простые и безопасные.

Допускаемое напряжение для стали 12X18H10T при температуре гидравлического испытания 20°C определяется по формуле 5 [34]:

$$\sigma_{\text{н}} := \text{Ceil} \left(\frac{R_{p1.0}}{1.1}, 0.5 \right) = 251 \text{ МПа}$$

Пробное давление гидроиспытания определяют по [34], и оно равно:

$$P_{\text{н}} := 1.25 \cdot P \cdot \frac{\sigma_{20}}{\sigma_{\text{д}}} = 0.125 \text{ МПа}$$

5.2 Определение прибавок на различные виды разрушений

Прибавку к расчетным толщинам вычисляют согласно [34] по формуле 13:

$$c = c_1 + c_2 + c_3$$

где c_1 - прибавка для компенсации коррозии и эрозии, мм;

c_2 - прибавка для компенсации минусового допуска, мм;

c_3 - прибавка для компенсации утонения стенки при технологических операциях, мм.

Определим прибавки к расчетной толщине стенки:

- прибавка для компенсации коррозии:

Примем срок службы аппарата $\tau = 5$ лет.

Скорость коррозии для стали 12X18H10T по [33] равна $K = 0.1$ мм/год.

$$c_1 := \tau \cdot K = 0.5 \text{ мм}$$

- прибавку для компенсации минусового допуска примем в соответствии с таблицей 3 [35] $c_2 = 1.2$ мм.

					<i>ФЮРА.ППКР.000.000.ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		42

- поскольку обечайки для распределительных камер выполнены из труб, то в соответствии с рекомендацией [12] прибавку для компенсации утонения стенки при технологических операциях примем равной $c_3 = 0$ мм.

Суммарная прибавка к расчетным толщинам равна:

$$\frac{c}{мм} = c_1 + c_2 + c_3 = 1.7 \text{ мм}$$

5.3 Выводы по выбору конструкционных материалов

1. Материалом для изготовления трубок, распределительной камеры, трубных решеток и перфорированных крышек является сталь 12Х18Н10Т.
2. Обечайки распределительных камер следует изготавливать из труб.
3. Материалом для изготовления крепежных изделий принимаем сталь 40.
4. Материалом для изготовления прокладок принимаем паронит.

					<i>ФЮРА.ППКР.000.000.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		43

6 Механический расчет плазмон-каталитического реактора

Главной целью механического расчета реактора является определение конструктивных размеров различных элементов аппарата. Проводится проверка их надежности в рабочих условиях и в условиях испытаний. Данные критерии разнятся от элемента к элементу, поэтому будут предварительно описаны в каждом подпункте данного раздела.

Наружный диаметр обечайки с учетом расчета приведенного в пункте 4.3.3 и сортамента труб [35] принимаем равным $D_{нар} = 325$ мм.

На рисунке 6.1 изображена расчетная схема проточного плазмон-каталитического реактора с отображением основных рассчитываемых конструкций.

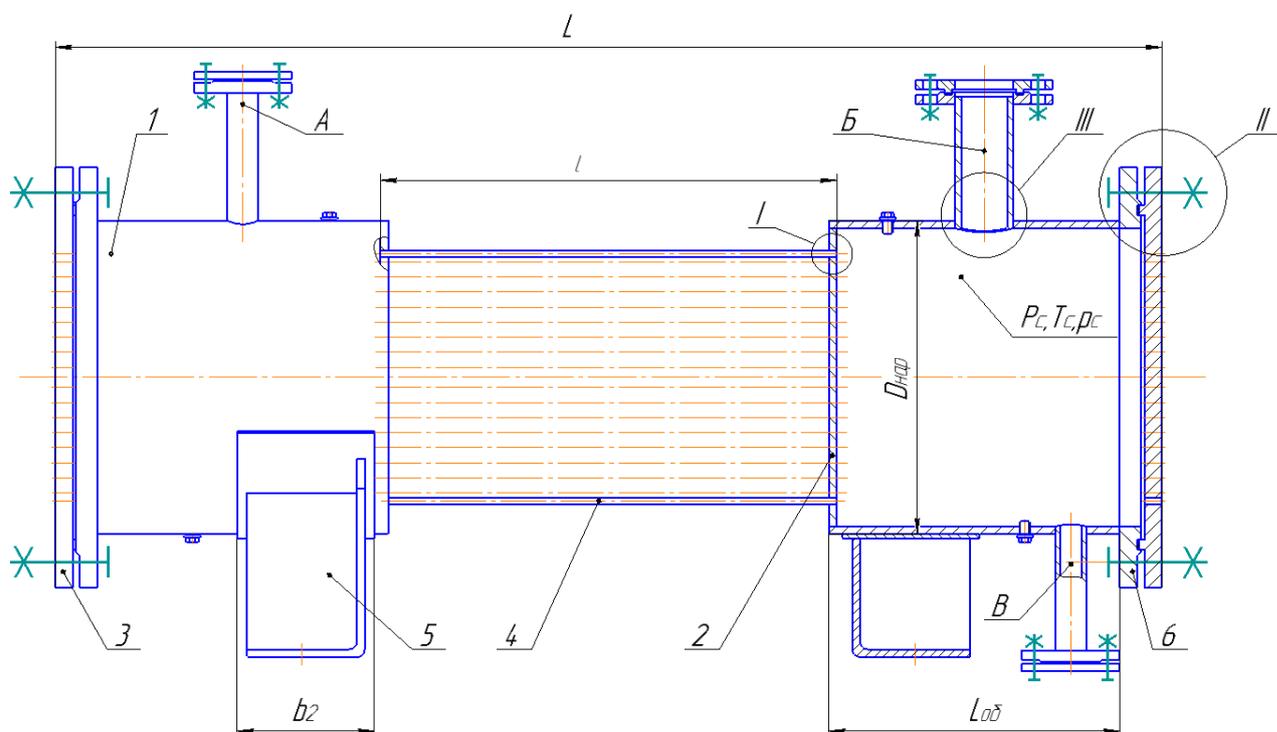


Рисунок 6.1 – Расчетная схема проточного плазмон-каталитического реактора для конверсии углеводородов

В таблице 6.1 приведены номера позиций и названия основных элементов проточного плазмон-каталитического реактора.

					ФЮРА.ППКР.000.000.ПЗ		
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			
Выполнил	Кузнецов М.Т.				Лит.	Лист	Листов
Провер.	Швалева Ю.Б.				Д	43	35
Н. Контр.					ТПУ ИШНПТ НОЦ Н.М. Кижнера Группа 4К51		
Утверд.							
Механический расчет плазмон-каталитического реактора							

Таблица 6.1 – Обозначения основных элементов и узлов реактора

Номер позиции	Название элемента	Количество
1	Цилиндрическая обечайка	2
2	Трубная решетка	2
3	Перфорированная плоская крышка	2
4	Трубка	1756
5	Седловая опора	2
6	Фланец	2
I	Клеевое соединение	-
II	Фланцевое соединение	-
III	Укрепление отверстия	-

Данные о штуцера представлены в таблице 6.2.

Таблица 6.2 – Таблица штуцеров

Обозначение	Наименование	Условный диаметр, мм	Условное давление, МПа
А	Вход раствора циклогексена	25	0.25
Б	Выход водорода	50	0.25
В	Выход раствора циклогексадиена -1,3	25	0.25

6.1 Расчет толщины стенки цилиндрической обечайки реактора

Целью данного расчета является определение толщины стенки цилиндрической обечайки, которая будет обеспечивать прочность конструкции.

Критерием надежности для рабочих условий является выполнение следующего условия:

$$P \leq P_d$$

где P – расчетное значение наружного давления при рабочих условиях, МПа; P_d – допускаемое значение наружного давления при рабочих условиях, МПа [30, 36].

Критерием надежности для условий испытания является выполнение условия:

$$P_{и} \leq P_{ди}$$

где $P_{и}$ – расчетное значение наружного давления при гидроиспытаниях, МПа; $P_{ди}$ – допускаемое значение наружного давления при гидроиспытаниях, МПа [30, 36].

На рисунке 6.2 представлена расчетная схема цилиндрической обечайки, позиция 1 на рисунке 6.1.

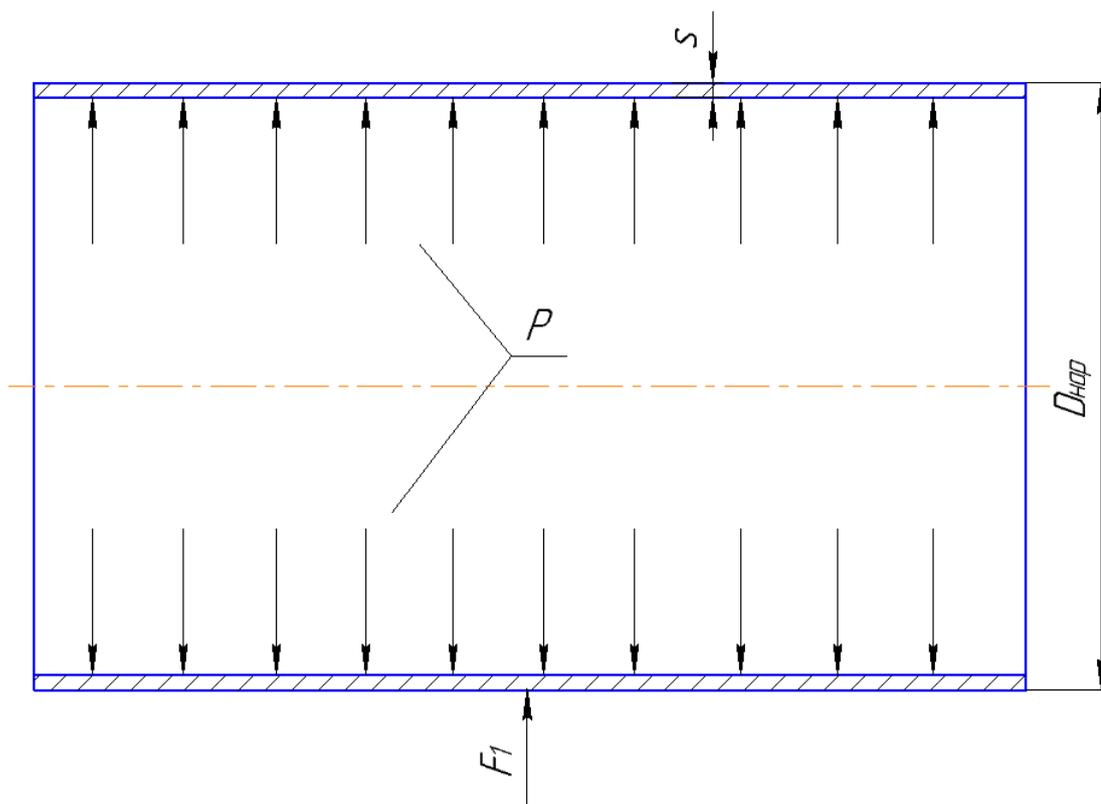


Рисунок 6.2 - Расчетная схема цилиндрической обечайки

Исходные данные для расчета толщины цилиндрической обечайки представлены в таблице 6.3:

Таблица 6.3 – Исходные данные для расчета

Название величины	Введенное обозначение и его значение
Наружный диаметр обечайки, мм	$D_{нар} = 325$
Прибавка к расчетным толщинам, мм	$c = 1.7$
Расчетное внутреннее избыточное давление, МПа	$P = 0.1$
Давление гидроиспытания, МПа	$P_{и} = 0.125$
Коэффициент прочности сварных швов	$\varphi = 1$
Допускаемое напряжение при рабочих условиях, МПа	$\sigma_{д} = 183.5$
Допускаемое напряжение при гидроиспытаниях, МПа	$\sigma_{и} = 251$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

6.1.1 Определение исполнительной толщины обечайки реактора

Исполнительную толщину стенки обечайки вычисляют по формуле 1 [36]:

$$s \geq s_p + c$$

где s – исполнительная толщина стенки, мм;

s_p – расчетная толщина стенки, мм;

c – прибавка к расчетным толщинам, мм.

Расчетную толщину стенки обечайки вычисляют исходя из рабочих условий и условий гидроиспытания [36, 37]:

$$s_p = \max \left(\frac{P \cdot D}{2 \cdot \sigma_d \cdot \varphi - P}, \frac{P_{II} \cdot D}{2 \cdot \sigma_{II} \cdot \varphi - P_{II}} \right)$$

где P, P_{II} – расчетное давление и пробное давление гидроиспытания соответственно, МПа;

D – внутренний диаметр обечайки, мм;

σ_d, σ_{II} – допускаемые напряжения материала при рабочих условиях и условий гидроиспытания соответственно, МПа;

φ – коэффициент прочности сварных швов.

Так как в формуле присутствует внутренний диаметр обечайки, то преобразуем её для расчета толщины стенки от наружного диаметра обечайки:

$$s_p := \max \left(\frac{P \cdot D_{\text{нар}}}{2 \cdot \sigma_d \cdot \varphi + P}, \frac{P_{II} \cdot D_{\text{нар}}}{2 \cdot \sigma_{II} \cdot \varphi + P_{II}} \right) = 0.089 \text{ мм}$$

Исполнительная толщина стенки обечайки с учетом суммы прибавок составляет:

$$s_{\text{исп}} := \text{ceil}(s_p + c) = 2 \text{ мм}$$

Принимаем исполнительную толщину стенки обечайки равной $s = 8$ мм, т.к. это минимальное значение толщины стенки трубы с $D_{\text{нар}} = 325$ мм по [35].

Определим внутренний диаметр распределительной камеры:

$$D := D_{\text{нар}} - 2 \cdot s = 309 \text{ мм}$$

Исполнительный диаметр трубной решетки основываясь на пункте 4.3.3 принимаем равным внутреннему диаметру распределительной камеры $D_{\text{ир}} = D = 309$ мм.

6.1.2 Проверка условия применимости расчетных формул

Ввиду того, что расчет представленный в [36] основывается на безмоментной теории, то полученное значение толщины стенки следует проверить на применимость формул безмоментной теории.

					Лист
					47
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	

Проверяем применимость формул безмоментной теории по [36]:

$$\text{Пров}_1 := \begin{cases} \text{"Условие применимости выполняется"} & \text{if } \frac{s - c}{D} \leq 0.1 \\ \text{"Условие применимости НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Пров}_1 = \text{"Условие применимости выполняется"} \quad \frac{s - c}{D} = 0.02$$

6.1.3 Проверка условий прочности цилиндрической обечайки

Так как полученное значение исполнительной толщины стенки цилиндрической обечайки должно обеспечивать надежность конструкции аппарата, то производим проверку условий прочности при рабочих условиях и условиях гидроиспытаний.

Допускаемое давление для рабочих условий вычисляется по формуле 3 [36]:

$$P_d := 2 \cdot \sigma_d \cdot \varphi \cdot \frac{(s - c)}{[D - (s - c)]} = 7.638 \text{ МПа}$$

Аналогично рассчитывается давления для гидроиспытаний:

$$P_{ди} := 2 \cdot \sigma_{и} \cdot \varphi \cdot \frac{(s - c)}{[D - (s - c)]} = 10.448 \text{ МПа}$$

Проверка условия прочности при рабочих условиях:

$$\text{Пров}_2 := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } \frac{P}{P_d} \leq 1 \\ \text{"Условие прочности НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Пров}_2 = \text{"Условие прочности выполняется"} \quad \frac{P}{P_d} = 0.013$$

Проверка условия прочности при условиях гидроиспытания:

$$\text{Пров}_3 := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } \frac{P_{и}}{P_{ди}} \leq 1 \\ \text{"Условие прочности НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Пров}_3 = \text{"Условие прочности выполняется"} \quad \frac{P_{и}}{P_{ди}} = 0.012$$

Из расчетов, представленных выше следует, что принятая исполнительная толщина стенки обеспечивает надежность конструкции аппарата. В связи с этим следовало бы уменьшить её значение, однако в серийном выпуске для трубы с диаметром 325 мм минимальное значение толщины стенки составляет 8 мм. Это значит, что уменьшение толщины стенки приведет к использованию обечайки не из трубы, а из свальцованного и сваренного листового проката, что приведет к увеличению конечной цены обечайки. К тому

					ФЮРА.ППКР.000.000.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		48

же большой запас прочности может позволить проводить эксперименты с температурами и давлениями выше расчетных.

Условия прочности для рабочих условий $P \leq P_d (0.1 \leq 7.6)$ МПа;

Условия прочности для гидроиспытания $P_i \leq P_{ди} (0.125 \leq 10.448)$ МПа.

6.2 Расчет толщины стенки трубной решетки и перфорированной плоской крышки

Целью данного расчета является определение толщин стенок трубной решетки и плоской перфорированной крышки, которые обеспечат надежность конструкции, а также проверка условия крепления трубок в трубной решетке. К критериям надежности относятся:

- условие прочности при рабочих условиях;
- условие прочности при гидроиспытаниях;
- условие крепления трубок в трубной решетке при рабочих условиях;
- условие крепления трубок в трубной решетке при гидроиспытаниях.

На рисунке 6.3 представлена расчетная схема трубной решетки, позиция 2 на рисунке 6.1.

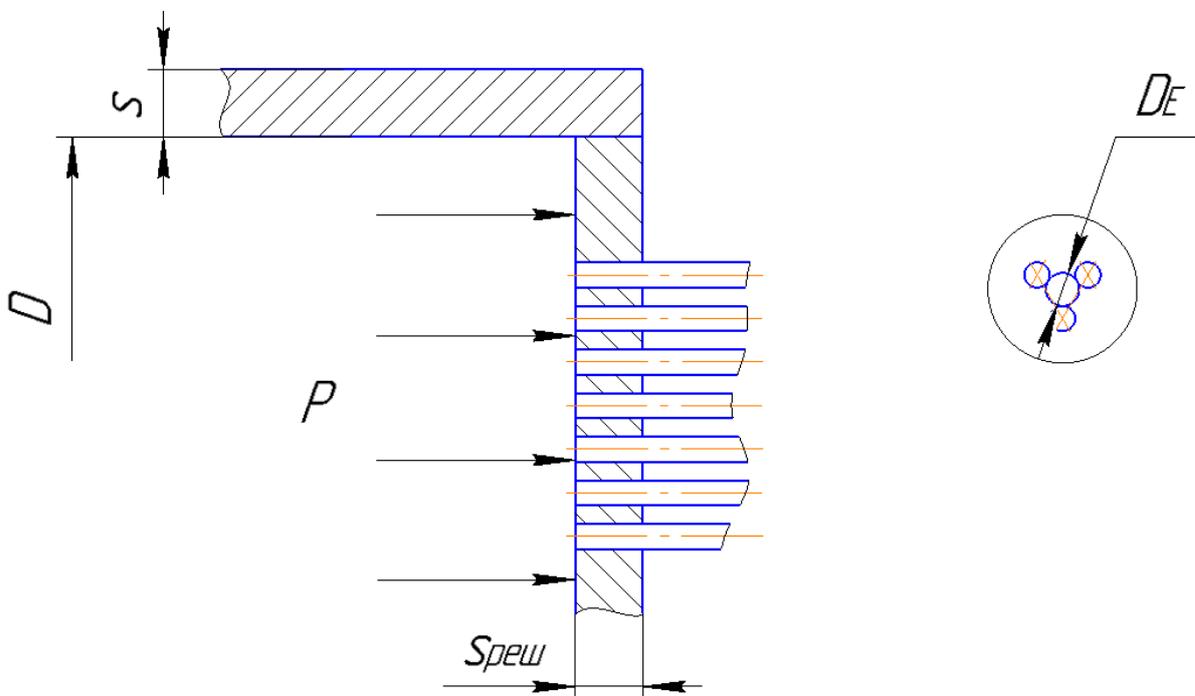


Рисунок 6.3 – Расчетная схема трубной решетки

Исходные данные для расчета толщины трубной решетки и перфорированной крышки представлены в таблице 6.4:

					ФЮРА.ППКР.000.000.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		49

Таблица 6.4 – Исходные данные для расчета

Название величины	Введенное обозначение и его значение
Диаметр окружности, вписанной в максимально беструбную площадку, мм	$D_E = 4$
Прибавка к расчетным толщинам, мм	$c = 1.7$
Расчетное внутреннее избыточное давление, МПа	$P = 0.1$
Давление гидроиспытания, МПа	$P_{и} = 0.125$
Допускаемое напряжение при рабочих условиях, МПа	$\sigma_{д} = 183.5$
Допускаемое напряжение при гидроиспытаниях, МПа	$\sigma_{и} = 251$

6.2.1 Определение толщины трубной решетки

Исполнительную толщину трубной решетки вычисляют по формуле 82 [13]:

$$s_{реш} \geq \max \left(0.5 \cdot D_E \cdot \sqrt{\frac{P}{\sigma_{д}}}, 0.5 \cdot D_E \cdot \sqrt{\frac{P_{и}}{\sigma_{и}}} \right) + c$$

где $s_{реш}$ - исполнительная толщина трубной решетки, мм;

D_E - диаметр окружности, вписанной в максимально беструбную площадку, мм;

c - прибавка к расчетным толщинам, мм;

P - расчетное давление, действующее на решетку аппарата, МПа;

$P_{и}$ - давление гидроиспытаний, действующее на трубную решетку аппарата, МПа;

$\sigma_{д}$ - допускаемое напряжение материала, МПа.

$\sigma_{и}$ - допускаемое напряжение при гидроиспытаниях материала, МПа.

Исходя из пункта 6.3.1 принимаем диаметр окружности, вписанной в максимально беструбную площадку, равным $D_E = 4$ мм.

$$s_{реш} := \max \left(0.5 \cdot D_E \cdot \sqrt{\frac{P}{\sigma_{д}}}, 0.5 \cdot D_E \cdot \sqrt{\frac{P_{и}}{\sigma_{и}}} \right) + c = 1.747 \text{ мм}$$

Исходя из того, что в отверстиях трубной решетки будут крепиться трубки при помощи склеивания, а также исходя из рекомендаций [33, 39] исполнительную толщину трубной решетки принимаем равной $s_{реш} = 8$ мм.

6.2.1.1 Проверка условий прочности трубной решетки

Так как полученное значение исполнительной толщины трубной решетки должно обеспечивать надежность конструкции аппарата, то производим проверку условий прочности при рабочих условиях и условиях гидроиспытаний.

Допускаемое давление для рабочих условий равно:

$$P_{др} := \frac{\sigma_d \cdot s_{реш}^2}{0.25 \cdot D_E^2} = 2.936 \times 10^3 \text{ МПа}$$

Допускаемое давления для гидроиспытаний равно:

$$P_{гир} := \frac{\sigma_{и} \cdot s_{реш}^2}{0.25 \cdot D_E^2} = 4.016 \times 10^3 \text{ МПа}$$

Проверка условия прочности при рабочих условиях:

$$Пров_1 := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } \frac{P}{P_{др}} \leq 1 \\ \text{"Условие прочности НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Пров_2 = \text{"Условие прочности выполняется"} \quad \frac{P}{P_{др}} = 3.406 \times 10^{-5}$$

Проверка условия прочности при условиях гидроиспытания:

$$Пров_3 := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } \frac{P_{и}}{P_{гир}} \leq 1 \\ \text{"Условие прочности НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Пров_3 = \text{"Условие прочности выполняется"} \quad \frac{P_{и}}{P_{гир}} = 3.121 \times 10^{-5}$$

6.2.1.2 Проверка условия крепления трубок в трубной решетке при гидроиспытаниях

Примем, что трубки крепятся в трубной решетке при помощи склеивания, так как склеивание трубок малого диаметра является более надежным способом крепления труб в трубной решетке, чем развальцовка или сварка. А также клеевое соединение легче и быстрее разбирается, что повышает его ремонтпригодность.

На рисунке 6.4 представлена расчетная схема крепления трубок в трубной решетке, позиция I на рисунке 6.1.

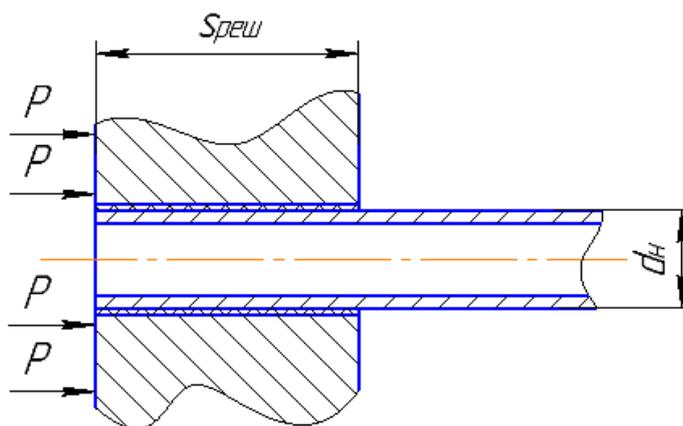


Рисунок 6.4 - Схема крепления трубок в трубной решетке

Исходные данные для расчета представлены в таблице 6.5:

Таблица 6.5 – Исходные данные для расчета

Название величины	Введенное обозначение и его значение
Наружный диаметр трубки, мм	$d_n = 3$
Толщина трубной решетки, мм	$s_{реш} = 8$
Расчетное давление, МПа	$P = 0.1$
Давление гидроиспытания, МПа	$P_{и} = 0.125$
Исполнительный диаметр трубной решетки, мм	$D_{ир} = 309$
Количество трубок	$n = 1756$

По рекомендации [33] принимаем клей К-300.

Допускаемая прочность клея К-300 при сдвиге при рабочих условиях определяем по таблице 1 [40]: $\tau_d = 16$ МПа.

Допускаемая прочность клея К-300 при сдвиге при гидроиспытаниях определяем по таблице 1 [40]: $\tau_{и} = 15.9$ МПа

Расчетная прочность при сдвиге определяется по формуле:

$$\tau_p = \frac{P \cdot D_{ир}^2}{4d_n \cdot s_{реш} \cdot n}$$

где P - рабочее давление и/или пробное давление гидроиспытания, МПа;

$D_{ир}$ - исполнительный диаметр трубной решетки, мм;

d_n - наружный диаметр трубки, мм;

$s_{реш}$ - толщина трубной решетки, мм;

n - количество трубок.

Расчетная прочность при сдвиге при рабочих условиях равна:

$$\tau_{др} := \frac{P \cdot D_{ир}^2}{4 \cdot d_H \cdot s_{реш} \cdot n} = 0.057 \text{ МПа}$$

Расчетна прочность при сдвиге при гидроиспытаниях равна:

$$\tau_{ир} := \frac{P_H \cdot D_{ир}^2}{4 \cdot d_H \cdot s_{реш} \cdot n} = 0.071 \text{ МПа}$$

Проверка условия крепления труб в трубной решетке при рабочих условиях:

$$\text{Пров}_1 := \begin{cases} \text{"Условие крепления выполняется"} & \text{if } \frac{\tau_{др}}{\tau_d} \leq 1 \\ \text{"Условие крепления НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Пров}_1 = \text{"Условие крепления выполняется"} \quad \frac{\tau_{др}}{\tau_d} = 3.539 \times 10^{-3}$$

Проверка условия крепления труб в трубной решетке при гидроиспытаниях:

$$\text{Пров}_2 := \begin{cases} \text{"Условие крепления выполняется"} & \text{if } \frac{\tau_{ир}}{\tau_H} \leq 1 \\ \text{"Условие крепления НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Пров}_2 = \text{"Условие крепления выполняется"} \quad \frac{\tau_{ир}}{\tau_H} = 4.464 \times 10^{-3}$$

Вывод по расчету:

Из расчета следует, что толщины трубной решетки в 8 мм с запасом хватает для обеспечения прочности аппарата как при рабочих условиях, так и при условиях гидроиспытаний, также из расчета видно, что подобранный клей К-300 обеспечивает прочность клеевого соединения.

Условие прочности при рабочих условиях $P \leq P_{др}$ ($0.1 \leq 2936$) МПа;

Условие прочности при гидроиспытаниях $P_H \leq P_{ир}$ ($0.125 \leq 4016$) МПа;

Условие крепления трубок в трубной решетке при рабочих условиях $\tau_{др} \leq \tau_d$ ($0.057 \leq 16$) МПа;

Условие крепления трубок в трубной решетке при гидроиспытаниях $\tau_{ир} \leq \tau_H$ ($0.071 \leq 15.9$) МПа.

6.2.2 Определение толщины перфорированной плоской крышки

Так как перфорированная плоская крышка фактически является трубной решеткой за исключением того, что в ней крепятся не трубки, а нити

					ФЮРА.ППКР.000.000.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		53

оптоволокна, то целесообразно производить расчет по формуле 82 [38].

В связи с тем, что диаметр окружности, вписанной в максимально беструбную площадку перфорированной крышки равен этому же значению для трубной решетки, то и их толщины будут равны $s_{реш} = s_k = 8$ мм, однако так как крышка с фланцем выполняется заодно, а толщина тарелки фланца равна 18 мм, то для упрощения изготовления примем толщину крышки равной 18 мм. Так как оптоволокно в отверстиях крышки крепится при помощи склеивания, а диаметр оптоволокна в обмотке равен диаметру трубки, то результаты проверки крепления оптоволокна в плоской крышке будут такими же, как в пункте 6.2.1.1. Из этого следует, что толщины крышки в 18 мм хватает, для обеспечения условия крепления оптоволокна в крышке.

6.3 Расчет фланцевого соединения корпуса с крышкой

Так как реактор проектируется как аппарат, в котором будут проводиться различные опыты, включающие и основную реакцию получения циклогексадиена-1,3 из циклогексена. Следует выбрать фланцевое соединение по привалочной поверхности, отвечающее требованиям пожаро-, взрывоопасности.

В связи с вышесказанным и по рекомендациям [30, 32, 33, 41, 42] принимаем фланцевое соединение с уплотнительной поверхностью шип-паз.

По [32] примем фланцевое соединение с исполнением CD, по [43] принимаем паронитовую прокладку ПОН с исполнением В.

Материалы для болтов, прокладок и фланце выбираем, основываясь на пункте 6.3.

На рисунке 6.5 представлена расчетная схема фланцевого соединения плоской крышки с обечайкой, позиция II на рисунке 6.1.

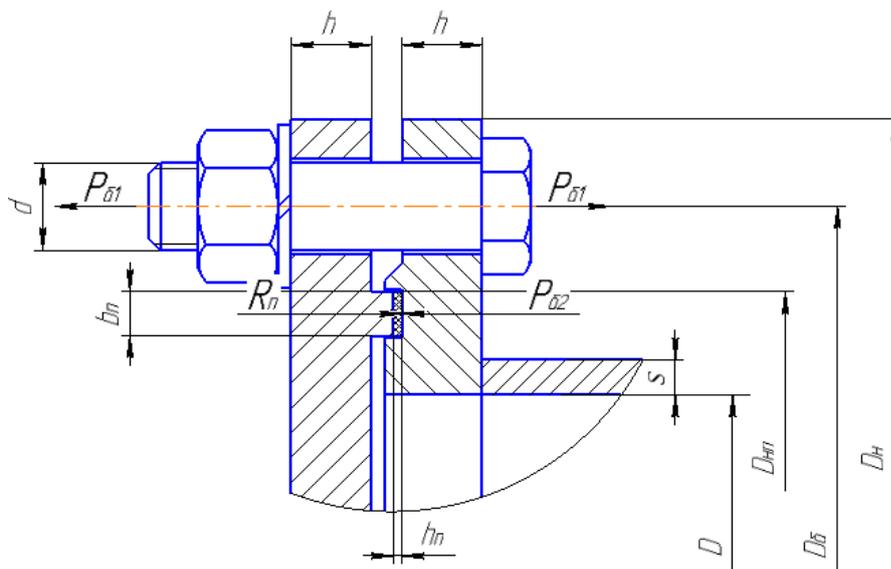


Рисунок 6.5 - Расчетная схема фланцевого соединения плоской крышки с обечайкой

Исходные данные для расчета приведены в таблице 6.6:

Таблица 6.6 – Исходные данные для расчета

Название величины	Введенное обозначение и его значение
Внутренний диаметр распределительной камеры, мм	$D = 309$
Пробное давление гидроиспытания в аппарате, МПа	$P_{и} = 0.125$
Число болтов	$n = 12$
Прибавка на коррозию, мм	$c_1 = 0.5$
Максимальная температура среды, °С	$t = 25$
Диаметр болтовой окружности, мм	$D_б = 395$
Наружный диаметр прокладки, мм	$D_{нп} = 356$
Наружный диаметр фланца, мм	$D_{н} = 435$
Ширина прокладки, мм	$b_{п} = 10$
Высота прокладки, мм	$h_{п} = 2$
Толщина тарелки фланца, мм	$h = 18$
Толщина обечайки, мм	$s = 8$

Целью расчета в данном подразделе является проверка надежности конструкции выбранного фланцевого соединения. К критериям надежности относятся:

- прочность болтов при затяжке и в рабочих условиях;
- статическая прочность соединения в рабочих условиях и при затяжке;
- прочность прокладки;
- соответствия угла поворота фланца допусжаемому значению.

6.3.1 Определение основных расчетных значений

Определение расчетных температур:

- расчетная температура неизолированных плоских фланцев по таблице В.1 [42] равна:

$$t_{ф} := 0.96 \cdot t = 24 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- расчетная температура шпилек по таблице В.1 [42] равна:

$$t_{б} := 0.85 \cdot t = 21.25 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Допускаемые напряжения для болтов из стали 40 определяем по таблице Г.1 [42]:

					<i>ФЮРА.ППКР.000.000.ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		55

$$t := \begin{pmatrix} 20 \\ 100 \end{pmatrix} \quad \sigma := \begin{pmatrix} 130 \\ 126 \end{pmatrix}$$

$$\sigma_{д,б} := \text{linterp}(t, \sigma, t_б) = 129.938 \text{ МПа}$$

Модуль упругости для болтов из стали 40 при расчетной температуре определяем по таблице Ж.1 [42]:

$$t := \begin{pmatrix} 20 \\ 100 \end{pmatrix} \quad E_б := \begin{pmatrix} 2.13 \cdot 10^5 \\ 2.10 \cdot 10^5 \end{pmatrix}$$

$$E_б := \text{linterp}(t, E_б, t_б) = 2.13 \times 10^5 \text{ МПа}$$

Допускаемое напряжение для болтов при $t = 20^\circ\text{C}$ определяем по таблице Г.1 [42]:
 $\sigma_{20б} = 130 \text{ МПа}$.

Модуль упругости для болтов при температуре равной 20°C определяем по таблице Ж.1 [42]: $E_{20б} = 2.13 \cdot 10^5 \text{ МПа}$.

Коэффициент линейного расширения стали 40 при $t = 20-100^\circ\text{C}$ определяем по таблице Ж.2 [42]: $\alpha_б = 11.1 \cdot 10^{-6} \text{ } 1/^\circ\text{C}$.

Допускаемые напряжения для фланцев и обечайки из стали 12X18H10T принимаем равным $\sigma_д$: $\sigma = \sigma_д = 183.5 \text{ МПа}$.

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

$$\sigma_{д,ф} := \eta \cdot \sigma = 183.5 \text{ МПа}$$

Модуль упругости для фланцев из стали 12X18H10T при расчетной температуре определяем по таблице В.1 [34]: $E = 2.15 \cdot 10^5 \text{ МПа}$.

Допускаемое напряжение для стали 12X18H10T при $t = 20^\circ\text{C}$ принимаем равным σ_{20} :

$$\sigma_{д20} := \eta \cdot \sigma_{20} = 184 \text{ МПа}$$

Модуль упругости для стали 12X18H10T при температуре испытания 20°C определяем по таблице В.1 [34]:

$$E_{20} := E = 2.15 \times 10^5 \text{ МПа}$$

Коэффициент линейного расширения стали 12X18H10T при $t = 20 - 100^\circ\text{C}$ определяем по таблице Ж.2 [42]: $\alpha_ф = 16.6 \cdot 10^{-6} \text{ } 1/^\circ\text{C}$.

Примем коэффициент увеличения допускаемых напряжений при затяжке по рекомендациям [42] равным $\zeta = 1.2$.

Коэффициент условий работы примем по рекомендациям [42]:

- для рабочих условий $K_{у,р} = 1$;

					<i>ФЮРА.ППКР.000.000.ПЗ</i>	Лист
						56
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

- для условий испытания $K_{y.p.и} = 1.35$.

Коэффициент условий затяжки при обычной неконтролируемой затяжке принимаем по рекомендациям [42] равным $K_{y.з} = 1$.

Коэффициент учета нагрузки от температурных деформаций при расчете фланцев с учетом нагрузки от температурных деформаций принимается по рекомендациям [42] равным $K_{y.т} = 1.3$.

Допускаемые напряжения для болтов из стали 40 при затяжке в рабочих условиях и при расчете на условия испытания вычисляются по формулам Г3 и Г4 [42] и равны соответственно:

$$\sigma_{дбм} := \xi \cdot K_{y.p.p} \cdot K_{y.з} \cdot K_{y.т} \cdot \sigma_{206} = 202.80 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{дбр} := \xi \cdot K_{y.p.и} \cdot K_{y.з} \cdot K_{y.т} \cdot \sigma_{206} = 273.78 \text{ МПа}$$

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

Эффективная ширина плоской прокладки определяется по формуле 5 [42]:

$$b_0 := 3.8 \cdot \sqrt{b_{п}} = 12.017 \text{ мм}$$

Расчетный диаметр плоской прокладки определяем по формуле 7 [42]:

$$D_{сп} := D_{нп} - b_0 = 343.983 \text{ мм}$$

Характеристики прокладки определяем по таблице И.1 [42]:

Таблица 6.7 – Характеристики прокладки

Прокладочный коэффициент (m)	Удельное давление обжатия прокладки, МПа ($q_{обж}$)	Допускаемое удельное давление, МПа (q_d)	Коэффициент обжатия ($K_{обж}$)	Условный модуль сжатия прокладки, МПа ($E_{п}$)
2.5	20	130	0.9	$0.02 \cdot 10^5$

Усилие, необходимое для смятия прокладки при затяжке определяем по формуле 8 [42]:

$$P_{обж} := 0.5 \pi \cdot D_{сп} \cdot b_0 \cdot q_{обж} = 1.299 \times 10^5 \text{ Н}$$

Усилие на прокладке в рабочих условиях, необходимое для обеспечения герметичности фланцевого соединения вычисляется по формуле 9 [42]:

$$R_{п} := \pi \cdot D_{сп} \cdot b_0 \cdot m \cdot P_{и} = 4.069 \times 10^3 \text{ Н}$$

6.3.3 Усилия в шпильках фланцевого соединения при затяжке и в рабочих условиях

Площадь поперечного сечений болтов для М20 определим по таблице Д.1 [42]: $f_6 = 225 \text{ мм}^2$.

Наружный диаметр болта равен $d = 20 \text{ мм}$.

Суммарная площадь сечения болтов по внутреннему диаметру резьбы или нагруженному сечению наименьшего диаметра определяется по формуле 10 [42]:

$$A_6 := n \cdot f_6 = 2.7 \times 10^3 \text{ мм}^2$$

Равнодействующая нагрузка от давления рассчитывается по формуле 11 [42]:

$$Q_d := \frac{\pi}{4} \cdot D_{\text{сп}}^2 \cdot P_{\text{н}} = 1.165 \times 10^4 \text{ Н}$$

6.3.3.1 Податливость прокладки и болтов

Податливость прокладки определяется по формуле К.1 [42]:

$$y_{\text{п}} := \frac{h_{\text{п}} \cdot K_{\text{обж}}}{E_{\text{п}} \cdot \pi \cdot D_{\text{сп}} \cdot b_{\text{п}}} = 8.328 \times 10^{-8} \text{ мм/Н}$$

Расстояние между опорными поверхностями гайки и болта принимаем равным $L_{60} = 47 \text{ мм}$.

Эффективная длина болта при определении податливости определяется по стр. 32 [42]:

$$L_6 := L_{60} + 0.56 \cdot d = 58.2 \text{ мм}$$

Податливость болтов определяем по формуле К.2 [42]:

$$y_6 := \frac{L_6}{E_{206} \cdot A_6} = 1.012 \times 10^{-7} \text{ мм/Н}$$

6.3.3.2 Расчетные параметры и угловая податливость фланцев

Параметр длины обечайки рассчитывается по формуле К.3 [42]:

$$l_0 := \sqrt{D \cdot s} = 49.719 \text{ мм}$$

Отношение наружного диаметра тарелки фланца к внутреннему диаметру определяется по формуле К.4 [42]:

$$K_{\text{мм}} := \frac{D_{\text{н}}}{D} = 1.408$$

					ФЮРА.ППКР.000.000.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		58

Коэффициенты, зависящие от соотношения размеров тарелки фланца, определяются по формулам К.5 - К.8 [42]:

$$\beta_T := \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \log(K)) - 1}{(1.05 + 1.945 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} = 1.749$$

$$\beta_U := \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \log(K)) - 1}{1.36(K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = 6.426$$

$$\beta_Y := \frac{1}{(K - 1)} \left[0.69 + 5.72 \cdot \frac{K^2 \cdot \log(K)}{(K^2 - 1)} \right] = 5.898$$

$$\beta_Z := \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = 3.037$$

Коэффициенты для фланцевых соединений с плоскими фланцами определяются по [42]:

$$\beta_F = 0.91;$$

$$\beta_V = 0.55;$$

$$f = 1.$$

Коэффициент λ определяется по формуле К.11 [42]:

$$\lambda := \frac{\beta_F \cdot h + l_0}{\beta_T \cdot l_0} + \frac{(\beta_V \cdot h^3)}{\beta_U \cdot l_0 \cdot s^2} = 1.088$$

Угловая податливость фланца при затяжке рассчитывается по формуле К.12 [42]:

$$y_\phi := \frac{0.91 \cdot \beta_V}{E_{20} \cdot \lambda \cdot l_0 \cdot s^2} = 6.723 \times 10^{-10} \frac{1}{\text{Н} \cdot \text{мм}}$$

Коэффициент, учитывающий изгиб тарелки фланца между болтами определяется по формуле К.18 [42]:

$$C_F := \max \left(1, \sqrt{\frac{\frac{\pi \cdot D_\phi}{n}}{2 \cdot d + \frac{6 \cdot h}{m + 0.5}}} \right) = 1.11$$

Приведенный диаметр плоского фланца определяется по рекомендации [42] и равен $D_{пр} = D$.

					<i>ФЮРА.ППКР.000.000.ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		59

6.3.3.3 Плечи действия сил и коэффициенты жесткости

Плечо действия усилий в болтах для плоских фланцев определяется по формуле Е.1 [42]:

$$b_{\text{мм}} := 0.5(D_6 - D_{\text{сп}}) = 25.508 \text{ мм}$$

Эквивалентная толщина плоских фланцев рассчитывается по формуле Е.7 [42]:

$$S_3 := s = 8 \text{ мм}$$

Плечо усилия от действия давления на фланец для всех типов фланцев определяется по формуле Е.4 [42]:

$$e_{\text{мм}} := 0.5 \cdot (D_{\text{сп}} - D - S_3) = 13.492 \text{ мм}$$

Коэффициент жесткости фланцевого соединения для плоских фланцев рассчитывается по формуле Е.8 [42]:

$$\gamma := \frac{1}{y_{\text{п}} + y_6 \cdot \frac{E_{206}}{E_6} + 2 \cdot b^2 \cdot y_{\text{ф}} \cdot \frac{E_{20}}{E}} = 9.44 \times 10^5 \frac{\text{Н}}{\text{мм}}$$

Коэффициент жесткости фланцевого соединения, нагруженного внутренним давлением или внешней осевой силой для плоских фланцев с плоскими прокладками, определяется по формуле Е.11 [42]:

$$\alpha_{\text{мм}} := 1 - \frac{y_{\text{п}} - 2 \cdot e \cdot y_{\text{ф}} \cdot b}{y_{\text{п}} + y_6 + 2 \cdot b^2 \cdot y_{\text{ф}}} = 1.358$$

Нагрузка, вызванная стесненностью температурных деформаций, в соединениях с плоскими фланцами определяется по формуле 13 [42]:

$$Q_t := \gamma \cdot [2\alpha_{\text{ф}} \cdot h \cdot (t_{\text{ф}} - 20) - 2\alpha_6 \cdot h \cdot (t_6 - 20)] = 2.182 \times 10^3 \text{ Н}$$

Расчетная нагрузка на болты при затяжке, необходимая для обеспечения в рабочих условиях давления на прокладку, достаточного для герметизации фланцевого соединения определяется по [42]:

$$P_{61} := \max \left(\left(\begin{array}{l} \alpha \cdot Q_{\text{д}} + R_{\text{п}} \\ \alpha \cdot Q_{\text{д}} + R_{\text{п}} - Q_t \end{array} \right) \right) = 1.989 \times 10^4 \text{ Н}$$

Расчетная нагрузка на болты при затяжке, необходимая для обеспечения обжатия прокладки и минимального начального натяжения болтов определяется по [42]:

$$P_{62} := \max [P_{\text{обж}}, 0.4 \cdot A_6 \cdot \sigma_{206}] = 1.404 \times 10^5 \text{ Н}$$

					Лист
					60
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	

Расчетная нагрузка на болты фланцевых соединений при затяжке фланцевого соединения определяется по формуле 17 [42]:

$$P_{6M} := \max(P_{61}, P_{62}) = 1.404 \times 10^5 \text{ Н}$$

Расчетная нагрузка на болты фланцевых соединений в рабочих условиях рассчитывается по формуле 18 [42]:

$$P_{6p} := P_{6M} + (1 - \alpha) \cdot Q_d + Q_t = 1.384 \times 10^5 \text{ Н}$$

6.3.4 Проверка прочности болтов и прокладки

Определим расчетные напряжения в болтах:

- при затяжке по формуле 19 [42]:

$$\sigma_{61} := \frac{P_{6M}}{A_6} = 52 \text{ МПа}$$

- в рабочих условиях по формуле 20 [42]:

$$\sigma_{62} := \frac{P_{6p}}{A_6} = 51.263 \text{ МПа}$$

Проверка условий прочности болтов при затяжке рабочих условиях по формулам 21,22 [42]:

$$Us1_1 := \begin{cases} \text{"Условия при затяжке НЕ выполняются"} & \text{if } \sigma_{61} > \sigma_{д6M} \\ \text{"Условия в рабочих условиях НЕ выполняются"} & \text{if } \sigma_{62} > \sigma_{д6p} \\ \text{"Условия прочности выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Us1_1 = "Условия прочности выполняются"

Удельное давление на прокладку определяется по [42]:

$$q := \frac{\max(P_{6M}, P_{6p})}{\pi \cdot D_{сп} \cdot b_{п}} = 12.992 \text{ МПа}$$

Так как прокладка выполняется из паронита, то по рекомендации [42] её необходимо проверить на прочность.

Проверка условия прочности прокладки:

$$Us1_2 := \begin{cases} \text{"Условие прочности прокладки НЕ выполняется"} & \text{if } q > q_d \\ \text{"Условие прочности прокладки выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Us1_2 = "Условие прочности прокладки выполняется"

					Лист
					61
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ФЮРА.ППКР.000.000.ПЗ

6.3.5 Расчет фланцев на статическую прочность

Расчетный изгибающий момент, действующий на плоский фланец при затяжке рассчитывается по формуле 24 [42]:

$$M_M := C_F \cdot P_{6M} \cdot b = 3.974 \times 10^6 \text{ Н}\cdot\text{мм}$$

Расчетный изгибающий момент, действующий на фланец в рабочих условиях определяется по формуле 26 [42]:

$$M_p := C_F \cdot \max[P_{6p} \cdot b + (Q_d) \cdot e, |Q_d| \cdot e] = 4.092 \times 10^6 \text{ Н}\cdot\text{мм}$$

6.3.5.1 Расчетные напряжения во фланце при затяжке

Меридиональное изгибное напряжение в обечайке плоского фланца определяется по формулам 30 [42]:

$$\sigma_{0M} := \frac{M_M}{\lambda \cdot (s - c)^2 \cdot D_{пр}}$$

$$\sigma_{1M} := \sigma_{0M} = 297.732 \text{ МПа}$$

Напряжения в тарелке плоского фланца в условиях затяжки по рассчитываются формулам 31,32 [42]:

- радиальное напряжение:

$$\sigma_{RM} := \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + l_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot l_0 \cdot D} \cdot M_M = 37.491 \text{ МПа}$$

- окружное напряжение:

$$\sigma_{TM} := \frac{\beta_Y \cdot M_M}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_{RM} = 42.843 \text{ МПа}$$

6.3.5.2 Расчетные напряжения во фланце в рабочих условиях

Меридиональные изгибные напряжения для плоских фланцев рассчитываются по формуле 34 [42]:

$$\sigma_{1p} := \frac{M_p}{\lambda \cdot (s - c)^2 \cdot D_{пр}}$$

$$\sigma_{0p} := \sigma_{1p} = 306.575 \text{ МПа}$$

					Лист
					62
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	

Меридиональные мембранные напряжения в обечайке плоского фланца определяется по формуле 38 [42]:

$$\sigma_{P0MM} := \frac{Q_d}{\pi \cdot (D + s) \cdot s - c} = 1.462 \text{ МПа}$$

Окружные мембранные напряжения от действия давления в обечайке плоского фланца вычисляются по формуле 39 [42]:

$$\sigma_{POMO} := \frac{P_H \cdot D}{2 \cdot (s - c)} = 3.074 \text{ МПа}$$

Определим напряжения в тарелке плоского фланца в рабочих условиях:

- радиальное напряжение по формуле 40 [42]:

$$\sigma_{Rp} := \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + l_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot l_0 \cdot D} \cdot M_p = 38.604 \text{ МПа}$$

- окружное напряжение по формуле 41 [42]:

$$\sigma_{Tp} := \frac{\beta_Y \cdot M_p}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_{Rp} = 44.115 \text{ МПа}$$

6.3.5.3 Проверка условий статической прочности фланцев

Несмотря на то, что в реакторе практически отсутствуют тепловые деформации, по рекомендации [42] $K_T = 1.3$.

Допускаемое значение общих мембранных и изгибных напряжений и допускаемое значение суммарных общих и местных условных упругих мембранных и изгибных напряжений рассчитываем в соответствии с п.8.10 [34].

$$\sigma_{д,М} := 1.5 \cdot \sigma = 275.25 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{д,Р} := 3 \cdot \sigma = 550.5 \text{ МПа}$$

Для плоских фланцев условия статической прочности вычисляются по формулам 47, 48 [42]:

- в рабочих условиях:

$$\sigma_{Pmax} := \max \left(\left(\begin{array}{l} |\sigma_{0p} - \sigma_{P0MM} + \sigma_{Rp}| \\ |\sigma_{0p} - \sigma_{P0MM} + \sigma_{Rp}| \\ |\sigma_{0p} + \sigma_{P0MM}| \end{array} \right) \right)$$

					ФЮРА.ППКР.000.000.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		63

Проверка условий прочности в рабочих условиях:

$$Usl_1 := \begin{cases} \text{"Условия прочности выполняются"} & \text{if } \sigma_{Rmax} \leq 1.3 \cdot \sigma_{д.м} \\ \text{"Условия прочности НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

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

- при затяжке

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

Проверка условий прочности при затяжке:

$$Usl_1 := \begin{cases} \text{"Условия прочности выполняются"} & \text{if } \sigma_{3max} \leq K_T \cdot \sigma_{д.м} \\ \text{"Условия прочности НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

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

Для фланцев всех типов в сечении S должно выполняться условие по формуле 53 [42]:

Проверка условий для фланцев в сечении S:

$$Usl_1 := \begin{cases} \text{"Условия прочности выполняются"} & \text{if } \max(|\sigma_{P0Mo}|, |\sigma_{P0Mm}|) \leq \sigma \\ \text{"Условия прочности НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

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

Для тарелок плоских фланцев должны выполняться следующие условия:

- при затяжке по формуле 54 [42]:

Проверка условий для тарелок плоских фланцев при затяжке:

$$Usl_1 := \begin{cases} \text{"Условия прочности выполняются"} & \text{if } \max(|\sigma_{RM}|, |\sigma_{TM}|) \leq K_T \cdot \sigma \\ \text{"Условия прочности НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

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

- в рабочих условиях по формуле 55 [42]:

Проверка условий для тарелок плоских фланцев в рабочих условиях:

$$Usl_1 := \begin{cases} \text{"Условия прочности выполняются"} & \text{if } \max(|\sigma_{Rp}|, |\sigma_{Tp}|) \leq K_T \cdot \sigma \\ \text{"Условия прочности НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

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

6.3.6 Проверка углов поворота фланцев

Угол поворота приварного встык фланца по формуле 58 [42]:

					ФЮРА.ППКР.000.000.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		64

$$\Theta := M_p \cdot y_f \cdot \frac{E_{20}}{E} = 2.751 \times 10^{-3} \text{ рад}$$

Допустимый угол поворота приварного встык фланца определяем по [42] и равен $\Theta_d = 0.006$ рад.

Проверка условия поворота фланца:

```
Us1_P := | "Условие при испытаниях НЕ выполняется" if  $\Theta > 1.3 \cdot \Theta_d$ 
          | "Условие в рабочих условиях НЕ выполняется" if  $\Theta > \Theta_d$ 
          | "Условие поворота фланца выполняется" otherwise
```

Us1_P = "Условие поворота фланца выполняется"

6.3.7 Проверка малоциклового прочностии элементов фланцевого соединения

Поскольку имеются положительные результаты эксплуатации аналогичных элементов фланцевого соединения, приведенного в [32], при тех же условиях работы и в течение времени не менее расчетной долговечности, расчет на малоцикловую прочность по [44] не проводится.

Вывод по расчету:

В данном подразделе были произведены расчеты прочности фланцев, болтов и прокладок, а также расчет герметичности фланцевого соединения. По произведенным расчетом можно сделать вывод, что конструкция фланцевого соединения отвечает всем критериям надежности.

Прочность болтов:

- при затяжке $\sigma_{b1} \leq \sigma_{dbm}$ ($52 \leq 202.8$) МПа;
- в рабочих условиях $\sigma_{b2} \leq \sigma_{dbr}$ ($51.3 \leq 273.8$) МПа;

Статическая прочность соединения:

- при затяжке $\sigma_{zmax} \leq K_T \cdot \sigma_{d,m}$ ($340.6 \leq 357.8$) МПа;
- в рабочих условиях $\sigma_{Pmax} \leq K_T \cdot \sigma_{d,m}$ ($343.7 \leq 357.8$) МПа;

Прочность прокладки $q \leq q_d$ ($13 \leq 130$) МПа;

Соответствия угла поворота фланца допускаемому значению:

- условия гидроиспытаний $\Theta \leq 1.3 \cdot \Theta_d$ ($0.003 \leq 0.008$) рад;
- рабочие условия $\Theta \leq \Theta_d$ ($0.003 \leq 0.006$) рад.

6.4 Расчет укрепления отверстий

Так как реактор имеет три отверстия под технологические штуцера, то проверку на укрепление отверстия следует производить по самому большому отверстию. В связи с этим

проведем проверку на укрепление отверстия под штуцер для отвода водорода с условным диаметром 50 мм. Расчет укрепления производится по принципу компенсации изъятого отверстием металла.

На рисунке 6.6 представлена расчетная схема укрепления отверстия, позиция III на рисунке 6.1.

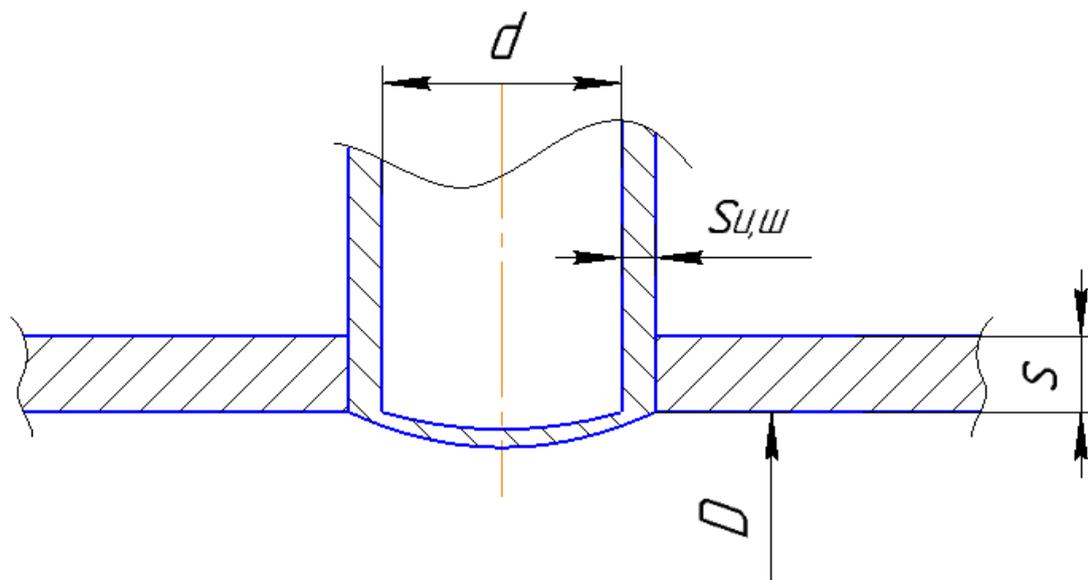


Рисунок 6.6 – Расчетная схема укрепления отверстия

Исходные данные для расчета приведены в таблице 6.8:

Таблица 6.8 – Исходные данные для расчета

Название величины	Введенное обозначение и его значение
Внутренний диаметр аппарата, мм	$D = 309$
Марка стали 12X18H10T	
Внутреннее расчетное давление, МПа	$P = 0.1$
Исполнительна толщина стенки обечайки, мм	$s = 8$
Прибавка к расчетной толщине стенки, мм	$c = 1.7$
Допускаемое напряжение при температуре 25°C, МПа	$\sigma_d = 183.5$
Коэффициент прочности сварных швов	$\varphi = 1$
Внутренний диаметр штуцера, мм	$d = 50$

Основной целью данного расчета является определение максимального диаметра неукрепленного отверстия и сравнение его с расчетным диаметром отверстия, если

расчетное значение диаметра превышает предельный диаметр, то данное отверстие подлежит укреплению в целях компенсации возникающих напряжений в зоне отверстия.

Расчетный диаметр отверстия вычисляется по формуле 12 [45]:

$$d_p := d + 2 \cdot c = 53.4 \text{ мм}$$

Проверка условий применения формул для расчета укрепления отверстий:

$$Us1_1 := \begin{cases} \text{"Отношение диаметров НЕ выполняется"} & \text{if } \frac{d_p - 2 \cdot c}{D} > 1 \\ \text{"Отношение толщины к диаметру НЕ выполняется"} & \text{if } \frac{s - c}{D} > 0.1 \\ \text{"Условия применения формул выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Us1_1 = "Условия применения формул выполняются"

Расчетная толщина стенки штуцера определяется по 16 [45]:

$$s_{p.ш} := \frac{P \cdot (d + 2 \cdot c)}{2 \cdot \varphi \cdot \sigma_d - P} = 0.015 \text{ мм}$$

Исполнительная толщина стенки штуцера равна:

$$s_{и.ш} := s_{p.ш} + c = 1.715 \text{ мм}$$

Исполнительную толщину стенки штуцера принимаем равной $s_{и.ш} = 3.5$ мм по [31].

По [45] d_{max} принимаем равным $d_{max} = D = 309$ мм.

Расчетный диаметр одиночного отверстия не требующего укрепления при наличии избыточной толщины стенки определяется по формуле 26 [45]:

$$d_0 := \min \left[2 \cdot \left(\frac{s - c}{s_p} - 0.8 \right) \cdot \sqrt{D \cdot (s - c)}, d_{max} + 2 \cdot c \right] = 312.4 \text{ мм}$$

Проверка условий расчета укреплений отверстий:

$$Us1_2 := \begin{cases} \text{"НЕ требуется укрепление отверстий"} & \text{if } d_0 \geq d_p \\ \text{"Требуется укрепление отверстий"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Us1_2 = "НЕ требуется укрепление отверстий"

Вывод по расчету:

Укрепление отверстия избыточной толщиной стенки обечайки достаточно, дальнейшее укрепление отверстия не требуется.

					ФЮРА.ППКР.000.000.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		67

6.5 Определение массы реактора и расчет обечайки от воздействия опорных нагрузок

Целью расчета является подбор седловых опор на основе рассчитанной максимальной массы проточного плазмон-каталитического реактора, а также провести проверку несущей способности корпуса аппарата от воздействия опорной нагрузки от веса аппарата.

6.5.1 Определение массы проточного плазмон-каталитического реактора

Исходные данные для расчета приведены в таблице 6.9

Таблица 6.9 – Исходные данные для расчета

Название величины	Введенное обозначение и его значение
Наружный диаметр обечайки, м	$D_{нар} = 0.325$
Внутренний диаметр обечайки, м	$D = 0.309$
Длина обечайки, м	$L_{об} = 0.300$
Диаметр трубной решетки, м	$D_{ир} = 0.309$
Толщина трубной решетки, м	$s_{реш} = 0.008$
Диаметр отверстия в крышке (трубной решетке), м	$d_n = 0.003$
Внутренний диаметр трубки, м	$d_{вн} = 0.0022$
Наружный диаметр трубки, м	$d_n = 0.003$
Длина трубки, м	$l = 0.450$
Количество трубок	$n = 1756$
Диаметр перфорированной плоской крышки, м	$D_k = D_{ир}$
Толщина перфорированной плоской крышки, м	$s_k = 0.018$
Плотность воды, кг/м ³	$\rho_v = 1000$
Плотность стали, кг/м ³	$\rho_{ст} = 7850$
Ускорение свободного падения, м/с ²	$g = 8.91$

Масса обечайки распределительной камеры аппарата:

$$m_o = \pi \cdot \left(\frac{D_{нар}^2 - D^2}{4} \right) \cdot L_{об} \cdot \rho_{ст} = 18.762 \text{ кг}$$

Масса трубного пучка:

$$m_{\text{тп}} := \pi \cdot \left(\frac{d_{\text{н}}^2 - d_{\text{вн}}^2}{4} \right) \cdot l \cdot \rho_{\text{ст}} \cdot n = 20.267 \text{ кг}$$

Масса трубной решетки:

$$m_{\text{тр}} := \pi \cdot \left(\frac{D_{\text{тр}}^2 - n \cdot d_{\text{н}}^2}{4} \right) \cdot s_{\text{реш}} \cdot \rho_{\text{ст}} = 3.93 \text{ кг}$$

Масса перфорированной плоской крышки:

$$m_{\text{к}} := \pi \cdot \left(\frac{D_{\text{к}}^2 - n \cdot d_{\text{н}}^2}{4} \right) \cdot s_{\text{к}} \cdot \rho_{\text{ст}} = 8.842 \text{ кг}$$

Примем, что фланцы, патрубки и пр. составляют 30% массы аппарата, тогда вес пустого аппарата равен:

$$G_{\text{пуст}} := 1.3 \cdot (2 \cdot m_{\text{о}} + m_{\text{тп}} + 2 \cdot m_{\text{тр}} + 2 \cdot m_{\text{к}}) \cdot g = 1063 \text{ Н}$$

Вес жидкости внутри аппарата при гидроиспытаниях:

$$G_{\text{жид}} := \frac{\pi}{4} \cdot (2D^2 \cdot L_{\text{об}} + n \cdot d_{\text{вн}}^2 \cdot l) \cdot \rho_{\text{в}} \cdot g = 471 \text{ Н}$$

Вес аппарата при гидроиспытаниях равен:

$$G_{\text{ап}} := G_{\text{пуст}} + G_{\text{жид}} = 1534 \text{ Н}$$

Нагрузка от собственной массы аппарата на одну опору равна:

$$F_{\text{оп}} := \frac{G_{\text{ап}}}{2} = 767 \text{ Н}$$

По полученным значениям по [46] принимаем опору 10-167-I ОСТ 26-2091-93.

6.5.2 Расчет обечайки плазмон-каталитического реактора от воздействия опорных нагрузок

Так как аппарата имеет переходы диаметров от цилиндрической обечайки к окружности наибольшего вписанного шестиугольника, то для упрощения расчета примем диаметр аппарата равным расчетному диаметру трубной решетки. Толщину стенки примем равной суммарной толщине стенок трубок. Расчет обечайки от воздействия опорных нагрузок будет производиться на условия гидроиспытания, так как в этот момент аппарат испытывает максимальные нагрузки. К критериям надежности относятся:

- условие прочности в сечении между опорами;
- условие устойчивости в сечении между опорами;

					Лист
					69
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ФЮРА.ППКР.000.000.ПЗ

- условие прочности в области опорного узла;
- условие устойчивости в области опорного узла.

На рисунке 6.7 представлена расчетная схема седловой опоры, позиция 5 на рисунке 6.1.

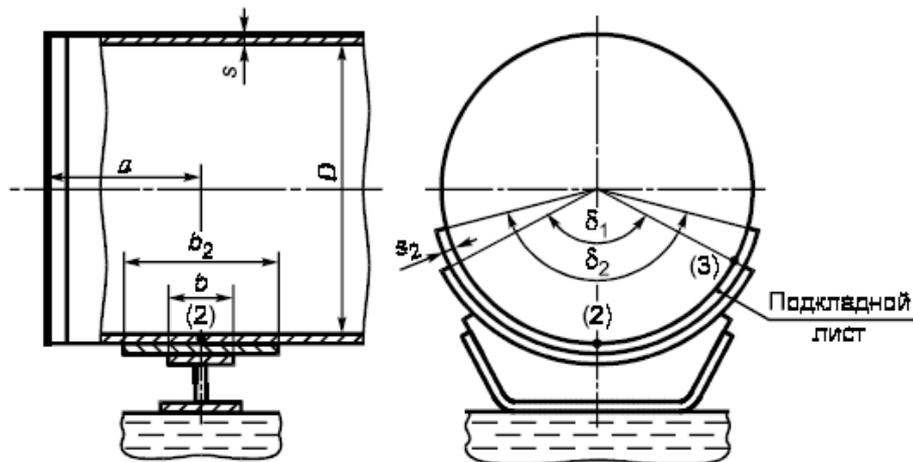


Рисунок 6.7 - Расчетная схема седловой опоры

В качестве основной расчётной схемы принимаем цилиндрический сосуд постоянного сечения, симметрично опёртый на две опоры [47].

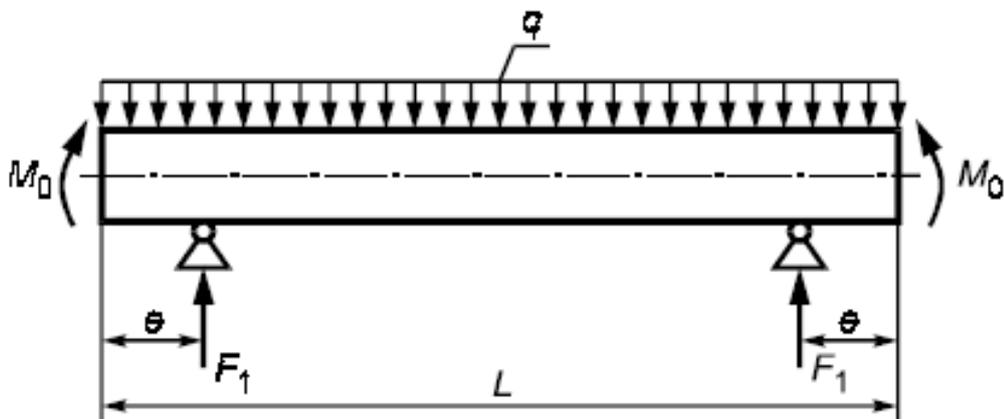


Рисунок 6.8 - Расчетная схема определения усилий

Исходные данные для расчета приведены в таблице 6.10.

Таблица 6.10 – Исходные данные для расчета

Название величины	Введенное обозначение и его значение
Безразмерный коэффициент, учитывающий условия гидроиспытаний	$K_2 = 1.05$
Длина цилиндрической части сосуда, мм	$L = 1088$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

Продолжение таблицы 6.10

Суммарный внутренний диаметр трубок, мм	$D_{pp} = 303$
Внутреннее избыточное давление, МПа	$P_{и} = 0.125$
Коэффициент прочности сварных швов обечайки, расположенных в области опорного узла;	$\varphi = 1$
Ширина седловой опоры, мм	$b = 120$
Исполнительная толщина подкладного листа, мм	$s_2 = 6$
Ширина подкладного листа, мм	$b_2 = 140$
Допускаемое напряжение при 20°C, МПа	$\sigma_{20} = 184$
Длина выступающей цилиндрической части сосуда, мм	$a = 235$
Длина свободно выступающей части эквивалентного сосуда, мм	$e = a$
Угол охвата седловой опоры, °	$\delta_1 = 120$
Угол охвата сосуда подкладным листом, °	$\delta_2 = 140$
Вес аппарата при гидроиспытаниях, Н	$G_{ап} = 1584$
Модуль продольной упругости при 20°C, МПа	$E_{20} = 2.15 \cdot 10^5$
Суммарная толщина стенок труб, мм	$s_{\Sigma} := \frac{(n \cdot d_{вн} \cdot s_T)}{D_{pp}} = 5.1$

Определим площадь поперечного сечения кольца жесткости:

$$A_k := \frac{\pi}{4} \cdot D_{pp}^2 = 237.976 \text{ мм}^2$$

Проверка применимости формул [47]:

$$Us1_2 := \begin{cases} \text{"Формулы применимы"} & \text{if } \begin{cases} A_k \geq s \cdot \sqrt{D} \\ 60 \cdot \text{deg} \leq \delta_1 \leq 180 \cdot \text{deg} \\ \frac{s}{D_{pp}} \leq 0.5 \\ s_2 \geq s \end{cases} \\ \text{"Формулы НЕ применимы"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$Us1_2 = \text{"Формулы применимы"}$

Распределенную нагрузку и изгибающий момент, действующие на обечайку (Рисунок 6.8) вычисляют по формулам 28,29 [47]:

- распределенная нагрузка:

$$q := \frac{G_{\text{ап}}}{L} = 1.41 \frac{\text{Н}}{\text{мм}}$$

- изгибающий момент:

$$M_0 := q \cdot \frac{D_{\text{PP}}^2}{16} = 8.088 \times 10^3 \text{ Н}\cdot\text{мм}$$

Опорное усилие вычисляют по формуле 30 [47]:

$$F_1 := F = 766.825 \text{ Н}$$

Момент над опорой вычисляют по формуле 31 [47]:

$$M_1 := \left| \frac{q \cdot e^2}{2} - M_0 \right| = 3.083 \times 10^4 \text{ Н}\cdot\text{мм}$$

$$M_2 := M_1 = 3.083 \times 10^4 \text{ Н}\cdot\text{мм}$$

Максимальный момент между опорами вычисляют по формуле 32 [47]:

$$M_{12} := M_0 + F_1 \cdot \left(\frac{L}{2} - a \right) - \frac{q}{2} \cdot \left(\frac{L}{2} \right)^2 = 3.646 \times 10^4 \text{ Н}\cdot\text{мм}$$

Поперечное усилие в сечении оболочки над опорой вычисляют по формуле 33 [47]:

$$Q_1 := \frac{L - 2 \cdot a}{L} \cdot F_1 = 435.568 \text{ Н}$$

Условие проверки несущей способности обечайки в сечении между опорами:

$$\text{Пров}_{\text{нес.сп.}} := \begin{cases} \text{"Проверка требуется"} & \text{if } M_{12} \geq M_1 \\ \text{"Проверка НЕ требуется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Пров}_{\text{нес.сп.}} = \text{"Проверка требуется"}$$

6.5.2.1 Проверка несущей способности обечайки в сечении между опорами

Примем по [47]:

$$y := \frac{D_{\text{PP}}}{s} = 59.413 \quad x := \frac{L}{D_{\text{PP}}} = 3.591$$

Определим коэффициент, учитывающий частичное заполнение жидкостью по формуле 36 [47]:

					ФЮРА.ППКР.000.000.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		72

$$K_9 = \max(a_{11} - a_{12} - a_{13}, 1)$$

$$a_{11} := 1.6 - 0.20924 \cdot (x - 1) + 0.028702 \cdot x \cdot (x - 1) + 0.4795 \cdot 10^{-3} \cdot y \cdot (x - 1) - 0.2391 \cdot 10^{-6} \cdot y \cdot x \cdot (x - 1)$$

$$a_{12} := 0.29936 \cdot 10^{-2} \cdot (x - 1) \cdot x^2 - 0.85692 \cdot 10^{-6} \cdot (x - 1) \cdot y^2 + 0.88174 \cdot 10^{-6} \cdot x^2 \cdot (x - 1) \cdot y$$

$$a_{13} := 0.75955 \cdot 10^{-8} \cdot y^2 \cdot (x - 1) \cdot x + 0.82748 \cdot 10^{-4} \cdot (x - 1) \cdot x^3 + 0.48168 \cdot 10^{-9} \cdot (x - 1) \cdot y^3$$

$$K_9 := \max(a_{11} - a_{12} - a_{13}, 1) = 1.294$$

Проверка условия прочности:

$$\text{Пров}_\Pi := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } \left(\frac{P \cdot D_{PP}}{4 \cdot s} + \frac{4 \cdot M_{12} \cdot K_9}{\pi \cdot D_{PP}^2 \cdot s} \right) \leq \sigma_{\text{д}} \cdot \varphi \\ \text{"Условие прочности НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Пров_Π = "Условие прочности выполняется"

Допускаемый изгибающий момент определяем по формуле 21 [36]:

$$M_{\text{д}} = \frac{M_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{M_{\Pi}}{M_{\text{E}}}\right)^2}}$$

где M_{Π} - допускаемый изгибающий момент из условия прочности, Н·мм;

M_{E} - допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости, Н·мм.

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности определяется по формуле 22 [36]:

$$M_{\Pi} := \frac{\pi}{4} \cdot D_{PP} \cdot (D + s) \cdot s \cdot \sigma_{20} = 1.208 \times 10^6 \text{ Н·мм}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости определяется по формуле 23 [36]:

$$M_{\text{E}} := \frac{8.9 \cdot 10^{-5} \cdot E_{20}}{1.8} \cdot D_{PP}^3 \cdot \left(\frac{100 \cdot s}{D_{PP}} \right)^{2.5} = 1.087 \times 10^9 \text{ Н·мм}$$

Допускаемый изгибающий момент равен:

$$M_{\text{д}} := \frac{M_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{M_{\Pi}}{M_{\text{E}}}\right)^2}} = 1.208 \times 10^6 \text{ Н·мм}$$

					Лист
					73
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	

Проверка условия устойчивости:

$$\text{Проверка3} := \begin{cases} \text{"Условие устойчивости выполняется."} & \text{if } \frac{M_{12}}{M_d} \leq 1 \\ \text{"Условие устойчивости НЕ выполняется."} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Проверка3 = "Условие устойчивости выполняется."

6.5.2.2 Проверка несущей способности обечайки в области опорного узла

Несущая способность по рекомендации [47] проверяется в точках 2 и 3 рисунок 6.7.

Параметр, определяемый расстоянием до днища вычисляются по формуле 39 [47]:

$$\alpha_w := 2.83 \cdot \frac{a}{D_{pp}} \cdot \sqrt{\frac{s}{D_{pp}}} = 0.285$$

Параметр, определяемый шириной пояса опоры вычисляются по формуле 40 [47]:

$$\beta_1 := 0.91 \cdot \frac{b}{\sqrt{D_{pp} \cdot s}} = 2.778$$

Общее меридиональное мембранное напряжение изгиба, действующие в области опорного узла вычисляются по формуле 41 [47]:

$$\sigma_{mx} := \frac{4 \cdot M_1}{\pi \cdot D_{pp}^2 \cdot s} = 0.084 \text{ МПа}$$

Определим коэффициенты, учитывающие влияние ширины пояса опоры по [47]:

$$K_{10} := \max \left(\frac{e^{-\beta_1} \cdot \sin(\beta_1)}{\beta_1}, 0.25 \right) = 0.25$$

$$K_{11} := \frac{1 - e^{-\beta_1} \cdot \cos(\beta_1)}{\beta_1} = 0.36$$

$$K_{17} := \frac{1}{1 + 0.6 \cdot \frac{D_{pp}}{\sqrt{s \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{s_2}{s}\right)^2}} \cdot \frac{b_2}{D_{pp}} \cdot \delta_2}} = 0.304$$

Определим коэффициенты, учитывающие влияние угла охвата по [47]:

$$K_{12} := \frac{1.15 - 0.1432 \cdot \delta_2}{\sin(0.5 \cdot \delta_2)} = 0.851$$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

$$K_{13} := \frac{\max\left(1.7 - \frac{2.1 \cdot \delta_2}{\pi}, 0\right)}{\sin(0.5 \cdot \delta_2)} = 0.071$$

$$K_{14} := \frac{1.45 - 0.43 \cdot \delta_2}{\sin(0.5 \cdot \delta_2)} = 0.425$$

Определим коэффициенты, учитывающие влияние расстояния до днища по [47]:

$$K_{15} := \min\left(1, \frac{0.8 \cdot \sqrt{\gamma} + 6 \cdot \gamma}{\delta_2}\right) = 0.874$$

$$K_{16} := 1 - \frac{0.65}{1 + (6 \cdot \gamma)^2} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{3 \cdot \delta_2}} = 0.891$$

По таблице 1 [47] определим безразмерные коэффициенты:

$$v_{12} := \frac{-0.23 \cdot K_{13} \cdot K_{15}}{K_{12} \cdot K_{10}} = -0.067$$

$$v_{13} := \frac{-0.53 \cdot K_{11}}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17} \cdot \sin(0.5 \cdot \delta_2)} = -1.762$$

$$v_{212} := -\sigma_{\text{mx}} \cdot \frac{1}{K_2 \cdot \sigma_{20}} = -4.34 \times 10^{-4}$$

$$v_{213} := 0$$

$$v_{222} := \left[\frac{P_{\text{H}} \cdot D_{\text{pp}}}{4 \cdot \left[s \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{s_2}{s}\right)^2} \right]} - \sigma_{\text{mx}} \right] \cdot \frac{1}{K_2 \cdot \sigma_{20}} = 5.807 \times 10^{-3}$$

$$v_{223} := \frac{P_{\text{H}} \cdot D_{\text{pp}}}{2 \cdot \left[s \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{s_2}{s}\right)^2} \right]} \cdot \frac{1}{K_2 \cdot \sigma_{20}} = 0.012$$

$$K_{112} := \frac{1 - v_{212}^2}{\left(\frac{1}{3} + v_{12} \cdot v_{212}\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + v_{12} \cdot v_{212}\right)^2 + (1 - v_{212}^2) \cdot v_{12}^2}} = 1.485$$

$$K_{122} := \frac{1 - v_{213}^2}{\left(\frac{1}{3} + v_{13} \cdot v_{213}\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + v_{13} \cdot v_{213}\right)^2 + (1 - v_{213}^2) \cdot v_{13}^2}} = 0.47$$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

$$K_{113} := \frac{1 - \nu_{222}^2}{\left(\frac{1}{3} + \nu_{12} \cdot \nu_{222}\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \nu_{12} \cdot \nu_{222}\right)^2 + (1 - \nu_{222}^2) \cdot \nu_{12}^2}} = 1.487$$

$$K_{123} := \frac{1 - \nu_{223}^2}{\left(\frac{1}{3} + \nu_{13} \cdot \nu_{223}\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \nu_{13} \cdot \nu_{223}\right)^2 + (1 - \nu_{223}^2) \cdot \nu_{13}^2}} = 0.476$$

Определим безразмерные коэффициенты для определения предельного напряжения изгиба:

$$K_{1,2} := \min(K_{112}, K_{122}) = 0.47$$

$$K_{1,3} := \min(K_{113}, K_{123}) = 0.476$$

Предельное напряжение изгиба для 2 и 3 точки соответственно определяет по формуле 1 [47]:

$$\sigma_2 := K_{1,2} \cdot K_2 \cdot \sigma_{20} = 90.86 \text{ МПа}$$

$$\sigma_3 := K_{1,3} \cdot K_2 \cdot \sigma_{20} = 91.974 \text{ МПа}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в меридиональном направлении определяется по формуле 43 [47]:

$$F_{d2} := \frac{0.7 \cdot \sigma_2 \cdot \sqrt{D} \cdot \left[s \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{s_2}{s}\right)^2} \right] \cdot \left[s \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{s_2}{s}\right)^2} \right]}{K_{10} \cdot K_{12}} = 3.67 \times 10^3 \text{ Н}$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в окружном направлении определяется по формуле 44 [47]:

$$F_{d3} := \frac{0.9 \cdot \sigma_3 \cdot \sqrt{D} \cdot \left[s \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{s_2}{s}\right)^2} \right] \cdot \left[s \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{s_2}{s}\right)^2} \right]}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17}} = 8.823 \times 10^3 \text{ Н}$$

Проверка условия прочности:

$$\text{Проверка3} := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется."} & \text{if } F_1 \leq \min(F_{d2}, F_{d3}) \\ \text{"Условие прочности НЕ выполняется."} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Проверка3 = "Условие прочности выполняется."

Эффективное осевое усилие от местных мембранных напряжений, действующих в области опоры по формуле 46 [47]:

					Лист
					76
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	

$$F_e := F_1 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \frac{D_{pp}}{\sqrt{s \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{s_2}{s}\right)^2}}} \cdot K_{13} \cdot K_{15} = 231.631 \text{ Н}$$

Допускаемое осевое растягивающее усилие определяем по формуле 13 [36]:

$$F_d := \pi \cdot (D_{pp} + s) \cdot s \cdot \sigma_{20} \cdot \varphi = 9.083 \times 10^5 \text{ Н}$$

По рисунку 7 [36] определим безразмерный коэффициент, который равен $\varphi_3 = 1$.

Проверка условия устойчивости:

$$\text{Проверка3} := \begin{cases} \text{"Условие устойчивости выполняется."} & \text{if } \frac{M_1}{M_d} + \frac{F_e}{F_d} \leq 1 \\ \text{"Условие устойчивости НЕ выполняется."} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Проверка3 = "Условие устойчивости выполняется."

Вывод по расчету:

По расчетам, произведенным в данном подпункте можно сделать вывод о том, что седловые опоры, подобранные в пункте 5.5.1 не оказывают на обечайку аппарата воздействий, которые могли бы привести к потере прочности и устойчивости реактора.

$$\text{Условие прочности в сечении между опорами } \frac{P \cdot D_{pp}}{4 \cdot s} + \frac{4 \cdot M_{12} \cdot K_9}{\pi \cdot D_{pp}^2 \cdot s} \leq \sigma_d \cdot \varphi \quad (1.6 \leq 183.5)$$

МПа;

$$\text{Условие устойчивости в сечении между опорами } M_{12} \leq M_d \quad (3.6 \cdot 10^4 \leq 120 \cdot 10^4) \text{ Н} \cdot \text{мм};$$

$$\text{Условие прочности в области опорного узла } F_1 \leq \min(F_{d2}, F_{d3}) \quad (0.8 \leq 3.7) \text{ Н};$$

$$\text{Условие устойчивости в области опорного узла } \frac{M_1}{M_d} + \frac{F_e}{F_d} \leq 1 \quad (0.026 \leq 1).$$

6.6 Общий вывод по механическому расчету

Итоги механического расчета состоят в следующем:

- из расчета толщины стенки цилиндрической обечайки реактора была определена толщина стенки цилиндрической обечайки, удовлетворяющая условиям надежности, которая составила 8 мм;
- из расчета толщины стенки трубной решетки и перфорированной плоской крышки, были определены толщины трубной решетки и перфорированной плоской крышки, удовлетворяющие условиям надежности, которые составили 8 мм и 18 мм соответственно, также был выбран клей К-300 для крепления трубок в трубной решетки и оптоволокну в плоской перфорированной крышки;

					Лист
					77
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ФЮРА.ППКР.000.000.ПЗ

- ввиду токсичности и взрыво-, пожароопасности реакционной среды реактора, было принято фланцевое соединение типа шип-паз, а также произведен расчет фланцевого соединения корпуса с крышкой и подобран фланец типа 300-2,5-11-2-D, С ГОСТ 3259-2015, который обеспечивает надежность и герметичность фланцевого соединения;
- из расчета укрепления отверстий было определено, что укрепление отверстий избыточной толщиной стенки корпуса достаточно для обеспечения надежности аппарата;
- была определена масса пустого аппарата, которая составила 106,3 кг, также были подобраны седловые опоры типа 10-167-I ОСТ 26-2091-93, которые не оказывают на обечайку аппарата воздействий, которые могли бы привести к потере прочности и устойчивости реактора.

					<i>ФЮРА.ППКР.000.000.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		78

7 Гидравлический расчет и подбор насоса

Гидравлический расчет требуется для определения мощности требуемого насоса.

Мощность, потребляемая двигателем насоса для перемещения реакционной смеси в реакторе, определяется по формуле 1.33 [48]:

$$N = \frac{V_c \cdot \Delta P}{\eta}$$

где N - мощность насоса, Вт;

V_c - объемный расход раствора циклогексена, м³/с;

ΔP - повышение давления, сообщаемое насосом перекачиваемому потоку и равное полному гидравлическому сопротивлению сети, Па;

η - КПД насоса.

Полное гидравлическое сопротивление определяется по формуле 1.34 [48]:

$$\Delta P = \Delta P_{тр} + \Delta P_{мс} + \Delta P_h$$

где $\Delta P_{тр}$ - потери на трение, Па;

$\Delta P_{мс}$ - потери на преодоление местных сопротивлений, Па;

ΔP_h - потери на высоту, Па.

В расписанном виде формула для определения полного гидравлического сопротивления имеет следующие вид:

$$\Delta P = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\omega^2 \cdot \rho_{см}}{2} + \sum \zeta \cdot \frac{\omega^2 \cdot \rho_{см}}{2} + \rho_{см} \cdot g \cdot h$$

где l - длина труб, мм;

λ - коэффициент сопротивления трению;

h - высота подъема теплоносителя, м;

$\sum \zeta$ - суммарный коэффициент местного сопротивления;

d - внутреннее свободное сечение трубки, мм;

ω - линейная скорость жидкости в трубках, м/с;

$\rho_{см}$ - плотность реакционно смеси, кг/м³.

Примем высоту подъема реакционной смеси равной h = 0, т.к. насос стоит на одном уровне с реактором и емкостями откуда подается реагент и куда отводится продукт.

					ФЮРА.ППКР.000.000.ПЗ		
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>			
<i>Выполнил</i>	<i>Кузнецов М.Т.</i>				<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>	<i>Швалева Ю.Б.</i>				Д	79	2
<i>Н. Контр.</i>					<i>ТПУ ИШНПТ</i>		
<i>Утверд.</i>					<i>НОЦ Н.М. Кижнера</i>		
					<i>Группа 4К51</i>		

Определим критерий Re для трубок, так как циклогексен обладает большей вязкостью, то в уравнении будем использовать именно её.

Уравнение для определения эквивалентного диаметра d_3 кольца имеет следующий вид:

$$d_3 := d_{BH} - d_B = 2 \text{ мм}$$

$$Re := \frac{(\omega \cdot d_3 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_{CM})}{\mu_1} = 1.932$$

Расчет коэффициентов сопротивления трению производится по формуле 1.38 [48]:

$$\lambda := \frac{64}{Re} = 33.123$$

Определим все коэффициенты местных сопротивлений по таблице XIII [33] и сведём их в таблицу 7.1:

Таблица 7.1 – Коэффициенты местных сопротивлений

Вид сопротивления	$\sum \zeta$
Вход в камеру, поворот на 90°, вход в трубки, выход из трубок, поворот на 90°, выход из камеры	1,5+1,5+1+1+1,5+1,5

$$\sum \zeta = 8.$$

Примем $d = d_3 = 2 \text{ мм}$.

Рассчитаем повышение давления:

$$\Delta P := \lambda \cdot \frac{1}{d} \cdot \frac{\omega^2 \cdot \rho_{CM} \cdot 10^{-3}}{2} + \sum \zeta \cdot \frac{\omega^2 \cdot \rho_{CM} \cdot 10^{-6}}{2} + \rho_{CM} \cdot g \cdot h = 2 \text{ Па}$$

Примем $\eta = 0.9$ по рекомендации [49].

Определим мощность насоса:

$$N := \frac{V_{CM} \cdot \Delta P}{\eta \cdot 3600} = 1.414 \times 10^{-3} \text{ Вт}$$

Подберем насос исходя из мощности насоса и объемного расхода [49], основные характеристика насоса сведем в таблицу 7.2.

Таблица 7.2 – Основные характеристики насоса НП-10

Тип насоса	Расход, м ³ /ч	Предельное давление нагнетания, МПа	n, об/мин	η_n	Электродвигатель		
					тип	N, кВт	Скорость якоря, об/мин.
НП-10	$2.4 \cdot 10^{-3}$	11,3	16	0.9	АИР71В6	0.55	-

8 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Целью данного раздела является проектирование и создание конкурентоспособных разработок и технологий, отвечающих предъявляемым требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

Целью дипломной работы является проектирование проточного плазмон-каталитического реактора для конверсии углеводородов.

8.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Для анализа потребителей результатов исследования необходимо рассмотреть целевой рынок и провести его сегментирование.

Целевой рынок – сегменты рынка, на котором будет продаваться в будущем разработка. В свою очередь, сегмент рынка – это особым образом выделенная часть рынка, группы потребителей, обладающих определенными общими признаками.

Сегментирование – это разделение покупателей на однородные группы, для каждой из которых может потребоваться определенный товар (услуга). Можно применять географический, демографический, поведенческий и иные критерии сегментирования рынка потребителей, возможно применение их комбинаций с использованием таких характеристик, как возраст, пол, национальность, образование, любимые занятия, стиль жизни, социальная принадлежность, профессия, уровень дохода.

Для анализа потребителей результатов исследования необходимо рассмотреть целевой рынок и провести его сегментирование. На рисунке 8.1 представлена карта сегментирования рынка по потребности производства в плазмон-каталитических реакторах.

Потребитель	Вид услуги		
	Изучение химических процессов	Продажа оборудования	Техническое обслуживание оборудования
Заводы тонкого органического синтеза			
Образовательные учреждения			
Заводы тяжелого органического синтеза			

Рисунок 8.1 - Карта сегментирования рынка услуг:



- ОАО ПО «ТОС»



- ООО «Томскнеfteхим»



- VŠCHT

					ФЮРА.ППКР.000.000.ПЗ		
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			
Выполнил	Провер.	Кузнецов М.Т.	Швалева Ю.Б.		Лит.	Лист	Листов
Н. Контр.	Утверд.				Д	81	12
					Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение		
					ТПУ ИШНПТ НОЦ Н.М. Кижнера Группы 4К51		

Таким образом, наиболее благоприятным сегментом для производства плазмон-каталитических реакторов является заводы тонкого органического синтеза.

8.2 SWOT – анализ

Для комплексной оценки научно-исследовательского проекта необходимо составить SWOT-анализ, результатом которого является описание сильных и слабых сторон проекта, выявление возможностей и угроз для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде.

Таблица 8.1 - Матрица SWOT-анализа

	Сильные стороны проекта: С1. Заявленная экономичность и энергоэффективность технологии; С2. Более низкая стоимость аппарата по сравнению с аналогами. С3. Возможность других веществ.	Слабые стороны проекта: Сл1. Научная разработка, которая ещё не применялась в промышленных масштабах; Сл2. Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров по работе с разрабатываемым аппаратом; Сл3. Хрупкость материала катализатора.
Возможности: В1. Возможность увеличения производительности за счет блочной конструкции; В2. Развитие потребительской способности рынка на выпускаемый продукт; В3. Возможность работы аппарата с агрессивными средами.	1. Аппарат имеет габариты, которые позволят затратить меньше металла для его сборки.; 2. Развитие торговых отношений отечественных и иностранных производителей; 3. Параллельный синтез различных веществ;	1. Внедрение данной технологической схемы в промышленные масштабы с дальнейшим выявлением слабых сторон и оптимизации производства.; 2. Повышение квалификации кадров у потребителя; 3. Необходимость использования более долговечных и прочных материалов.
Угрозы: У1. Угроза разрушения катализатора при неправильной эксплуатации; У2. Угроза нарушения герметичности при неправильной эксплуатации; У3. Угроза нарушения технологического процесса, вследствие неправильной эксплуатации.	1. Использование подходящих прокладок; 2. Вероятность продвижение аппарата на мировой рынок за счет новизны технологии и снижения стоимости; 3. Качественный подбор рабочего персонала, осуществление контроля над технологией.	1. Внедрение систем блокировки, выявляющих минимальные отклонения в работе аппаратов уже на начальном этапе; 2. Снижение цен на выпускаемую продукцию; 3. Продвижение новой технологии с целью появления спроса.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

Проанализировав SWOT – анализ, можно сделать вывод, что для выхода на лидирующие позиции на рынке необходимо провести ряд следующих преобразований:

- после внедрения реактора на производство, выявить его слабые стороны и устранить их;
- применять только качественные материалы, обеспечивающие долговечность и стабильную работу аппарата и установки в целом;
- подобрать персонал, который способен качественно обслуживать оборудование и поддерживать оптимальную работу установки.

8.3 Планирование научно-исследовательских работ

8.3.1 Структура работ в рамках научного исследования

Для выполнения научных исследований сформирована рабочая группа, в чей состав входят: бакалавр, в качестве инженера проекта; научный руководитель выпускной квалификационной работы. Составлен перечень этапов и работ в рамках проведения научного исследования и проведено распределение исполнителей по видам работ (Таблица 8.2).

Таблица 8.2 - Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель
Выбор направления исследований	2	Выбор направления исследований	Инженер
	3	Обзор современных методов исследований по выбранному направлению	Инженер
	4	Календарное планирование работ по теме	Руководитель, инженер
Теоретическое и экспериментальные исследования	5	Проведение теоретических расчетов и обоснований	Инженер
	6	Проведение экспериментов	Руководитель, Инженер

Продолжение таблицы 8.2

	7	Сопоставление результатов экспериментов с теорией	Руководитель, Инженер
Обобщение полученных результатов, выводы по проделанной работе	8	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель
	9	Определение целесообразности проведения ВКР	Руководитель, Инженер
Проведение ВКР			
Разработка технической документации и проектирование	10	Проектирование модели аппарата в КОМПАС 3D на основе расчетов	Инженер
	11	Оценка эффективности производства и применения разработки	Инженер
	12	Разработка социальной ответственности по теме	Инженер
Оформление отчета по ВКР	13	Составление пояснительной записки и оформление чертежей	Руководитель, инженер
	14	Сдача работы на рецензию	Инженер
	15	Предзащита	Инженер, руководитель
	16	Подготовка к защите дипломной работы	Инженер
	17	Защита дипломной работы	Инженер, руководитель

8.3.2 Определение трудоемкости выполнения работ

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов.

Для определения, ожидаемого (среднего) значения трудоемкости $t_{ож\ i}$ используется формула:

$$t_{ож\ i} = \frac{3t_{min\ i} + 2t_{max\ i}}{5},$$

где $t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i – ой работы, чел. – дн.;

$t_{minі}$ – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i – ой работы, чел. – дн.;

$t_{maxі}$ – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной

i – ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел. – дн.

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях T_p , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями:

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i},$$

где T_{pi} – продолжительность выполнения одной работы, раб.дн.;

$t_{ож і}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел. – дн.;

$Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

8.3.3 Разработка графика проведения научного исследования

Коэффициент календарности равен $K_{кал} = \frac{365}{365 - (44 + 48) - 14} = 1,3$

Результаты расчетов занесены в таблицу 8.3.

Таблица 8.3 - Временные показатели проведения научного исследования

№ работы	Трудоемкость работы			Исполнители	Длительность работ в рабочих днях T_{pi}	Длительность в календарных днях T_{ki}
	t_{min} , чел-дни	t_{max} , чел-дни	$t_{ожі}$, чел-дни			
1	1	1	1	Руководитель	1	1
2	7	9	8	Руков., Инженер	8	10
3	22	25	23	Руков., Инженер	23	28
4	10	14	12	Руков., инженер	12	14
5	22	25	23	Инженер	23	28
6	17	21	19	Руков., инженер	19	23
Итого	79	95	86		86	104

На основании таблицы 7.3 составляем календарный план-график, который наглядно показывает продолжительность работы исполнителей. План-график представлен в таблице Б.1 приложения Б.

8.3.4 Бюджет научно-технического исследования

При планировании бюджета научного исследования должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов планируемых расходов, необходимых для его выполнения. В процессе формирования бюджета, планируемые затраты группируются по статьям:

- материальные затраты НТИ;
- затраты на специальное оборудование для научных исследований
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- накладные расходы.

8.3.4.1 Расчет материальных затрат НТИ

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_M = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{расх\ i}$$

$$K = 20\%$$

В таблице 8.4 отражены материальные затраты, необходимые для данной разработки.

Таблица 8.4 - Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, (Z _м), руб.
Бумага	листов	120	1,5	216
Чернила для принтера	мл	110	1,1	145
Тетрадь	шт.	2	15	36
Ручка	шт.	3	75	270
Карандаш	шт.	3	35	126
Итого				793

8.3.4.2 Расчет затрат на специальное оборудование для научных работ

Все расчеты по приобретению спецоборудования, включая 15% на затраты по доставке и монтажу, отображены в таблице 8.5, затраты по пунктам 1, 2, 3 не учитываются по причине того, что программное обеспечение было приобретено ранее.

Таблица 8.5 – Расчет бюджета затрат на приобретение спецоборудования для научных работ

№ п/п	Наименование оборудования	Единицы измерения	Количество единиц оборудования	Цена единицы оборудования, тыс. руб.	Общая стоимость оборудования, тыс. руб.
1	ПО Microsoft office	шт	1	6	6
2	Mathcad Application	шт	1	30	30
3	КОМПАС 3D	шт	1	33	33
4	Насос перистальтический	шт	1	16	16
5	Химические реагенты	кг	12	0,21	2,52
6	Лабораторная установка	шт	1	10	10
Итого					97,52

8.3.4.3 Основная заработная плата исполнителей темы

Статья заработной платы исполнителей темы включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НИИ, (включая премии и доплаты) и дополнительную заработную плату. Также включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20 – 30 % от тарифа или оклада:

$$Z_{\text{НИ}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}},$$

где $Z_{\text{осн}}$ – основная заработная плата;

$Z_{\text{доп}}$ – дополнительная заработная плата (12-20 % от $Z_{\text{осн}}$).

Основная заработная плата ($Z_{\text{осн}}$) руководителя от предприятия рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_p,$$

где $Z_{\text{осн}}$ – основная заработная плата одного работника;

T_p – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_m \cdot M}{F_2},$$

где Z_m – месячный должностной оклад работника, руб.;

М – количество месяцев работы без отпуска в течение года:
 при отпуске в 24 раб.дня М = 11,2 месяца, 5-дневная неделя;
 при отпуске в 48 раб.дней М = 10,4 месяца, 6-дневная неделя;

Ф_д – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб.дн.

Таблица 8.6 - Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней		
- выходные	44	48
- праздничные дни	14	14
Потери рабочего времени		
- отпуск	56	28
- невыходы по болезни	2	2
Действительный годовой фонд рабочего времени	249	273

Месячный должностной оклад работника:

$$З_{н} = З_{тс} * k_p$$

где З_{тс} – заработная плата по окладу, руб.;

k_p – районный коэффициент, равный 1,3 для Томска.

Расчет основной заработной платы приведен в таблице 8.7.

Основная заработная плата руководителя (преподавателя ТПУ) с учетом должности доцента и степени кандидата технических наук, и заработная плата инженера в роли студента без районного коэффициента, руб.:

Основная заработная плата рабочих:

- при 5 рабочих днях руководителя: 9066,5 руб.;

- при 65 рабочих днях инженера: 40274 руб.

Таблица 8.7 - Расчет основной заработной платы

Исполнители	З _б , руб.	k _p	З _м , руб.	З _{дн} , руб.	T _p , раб. дн.	З _{осн} , руб.
Руководитель	36300	1,3	47190	1970,99	5	9854,95
Инженер	28000	1,3	36400	1493,33	65	97066,45
Итого						106921,40

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование графических материалов, оплата услуг связи, электроэнергия, транспортные расходы и т.д. Их величина определяется по следующей формуле:

$$Z_{\text{накл}} = (\text{сумма статей 1-5}) \cdot k_{\text{нр}}$$

где $k_{\text{нр}}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы.

Величину коэффициента накладных расходов $k_{\text{нр}}$ допускается взять в размере 16%.

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции.

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект приведен в таблице 8.9.

Таблица 8.9 – Затраты на научно-исследовательский проект

Наименование статьи	Сумма, руб.	Примечание
1. Материальные затраты НТИ	793,00	Таблица 8.4
2. Затраты на специальное оборудование для научных работ	28,52	Таблица 8.5
3. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	106921,4	Таблица 8.7
4. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	12830,56	-
5. Отчисления во внебюджетные фонды	32452,78	Таблица 8.8
6. Затраты на научные и производственные командировки	-	-
7. Контрагентские расходы	-	-
8. Накладные расходы	24484,20	16 % от суммы ст. 1-7
9. Бюджетные затраты НТИ	177510,46	Сумма ст. 1- 8

8.4 Определение ресурсосберегающей, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности проекта

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности проекта. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

В качестве исполнения 1 примем получение циклогексадиена-1,3 путем плазмонного катализа, в качестве исполнения 2 примем получение циклогексадиена-1,3 как побочного продукта при каталитическом риформинге.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}}$$

где $I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i}$ - интегральный финансовый показатель разработки;

Φ_{pi} - стоимость каждого варианта исполнения;

Φ_{max} - максимальная стоимость исполнения проекта.

$$I_{\text{финр.1}} = \frac{177510,46}{218632,56} = 0,81$$

$$I_{\text{финр.2}} = \frac{218632,56}{218632,56} = 1$$

Таблица 8.10 - Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии	Объект исследования	Весовой	Исп. 1	Исп. 2
		коэффициент параметра		
1. Способствует росту производительности труда.		0,15	5	4
2. Энергосбережение		0,15	4	3
3. Использование отходов производства в качестве сырья		0,10	4	4
4. Время нахождения в реакторе		0,30	4	5
5. Селективность процесса		0,30	5	3
ИТОГО		1	4,5	3,9

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i$$

где I_{pi} - интегральный показатель ресурсоэффективности для i-го варианта исполнения разработки;

a_i - весовой коэффициент i-го варианта исполнения разработки;

b_i - бальная оценка i-го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

n – число параметров сравнения.

$$I_{p-исп1} = 0,15 \cdot 5 + 0,15 \cdot 4 + 0,10 \cdot 4 + 0,30 \cdot 4 + 0,30 \cdot 5 = 4,5$$

$$I_{p-исп2} = 0,15 \cdot 4 + 0,15 \cdot 3 + 0,10 \cdot 4 + 0,30 \cdot 5 + 0,30 \cdot 3 = 3,9$$

Определяем интегральный показатель эффективности вариантов исполнения на основании выше рассчитанных показателей:

$$I_{исп.1} = \frac{I_{p-исп1}}{I_{фин.1}} = \frac{4,5}{0,81} = 5,6$$

$$I_{исп.2} = \frac{I_{p-исп2}}{I_{фин.2}} = \frac{3,9}{1} = 3,9$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных:

$$\mathcal{E}_{ср} = \frac{I_{исп1}}{I_{исп2}}$$

Таблица 8.11 - Сравнительная эффективность разработки

№	Показатели	Исп. 1	Исп. 2
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,81	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,5	3,9
3	Интегральный показатель эффективности	5,6	3,9
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1	0,7

Вывод:

В данном разделе был произведен анализ сильных и слабых сторон рассчитываемого аппарата, выявление возможностей и опасностей для его реализации, оценили конкурентоспособность разработки в сравнении с уже существующими на рынке аппаратами. Также дали сравнительную оценку характеристикам различным аналогов и пришли к выводу, что разрабатываемый реактор наиболее оптимален.

В результате выполненного анализа, можно сделать вывод, что наша разработка не уступает промышленным аналогам. Поэтому для конкурентоспособности нужно усовершенствовать технологию плазмон-каталитического синтеза и более подробно разобраться во влиянии плазмонного эффекта на химические реакции.

9 Социальная ответственность

В данной дипломной работе производится расчет проточного плазмон-каталитического реактора для конверсии углеводородов. Обеспечение безопасности условий работы достигается путем поддержания оборудования и технических средств в исправном состоянии, своевременным ремонтом, герметизацией аппаратов, поддержанием режима, утвержденного в технологическом регламенте для установки.

Область применения для данного проточного плазмон-каталитического реактора – химическая промышленность, нефтехимическая промышленность.

Производственная безопасность представляет собой систему организационных мероприятий и технических средств, уменьшающих вероятность воздействия на персонал опасных производственных факторов, вредных воздействий технологических процессов, энергии, средств, предметов, условий и режимов труда до приемлемого уровня. Необходимо выявить вредные и опасные производственные факторы, которые могут возникать при разработке и эксплуатации данных аппаратов.

9.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Законодательство РФ об охране труда основывается на Конституции РФ и состоит из федерального закона, других федеральных законов и иных нормативных правовых актов субъектов РФ. Среди них можно выделить федеральный закон “Об обязательном социальном страховании от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний”. Для реализации этих законов приняты Постановления Правительства РФ “О государственном надзоре и контроле за соблюдением законодательства РФ о труде и охране труда”, “О службе охраны труда”, “О Федеральной инспекции труда” и др. [50].

Управление охраной труда осуществляет блок федеральных органов исполнительной власти, руководимый Министерством здравоохранения и социального развития Российской Федерации (Минздравсоцразвития). Оно осуществляет функции государственной политики и нормативно-правовому регулированию в сфере здравоохранения и социального развития, социального страхования, условий и охраны труда и т. д.

					<i>ФЮРА.ППКР.000.000.ПЗ</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Выполнил</i>	<i>Кузнецов М.Т.</i>					<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>	<i>Швалева Ю.Б.</i>				<i>Д</i>		<i>93</i>	<i>11</i>
<i>Н. Контр.</i>					<i>Социальная ответственность</i>			<i>ТПУ ИШНПТ НОЦ Н.М. Кижнера Группа 4К51</i>
<i>Утверд.</i>								

Функции по контролю и надзору, которые ранее осуществлялись Санэпиднадзором Минздрава России, переданы Федеральной службе по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека (Роспотребнадзор).

Федеральная служба по труду и занятости (Роструд) осуществляет функции по надзору и контролю в сфере труда, а также государственный надзор и контроль за соблюдением, в частности, трудового законодательства и нормативных правовых актов, содержащих нормы трудового права; установленного порядка расследования и учета несчастных случаев на производстве.

Федеральное агентство по здравоохранению и социальному развитию (Росздрав) организует деятельность по установлению связи заболевания с профессией, государственной службы медико-социальной экспертизы и др.

Федеральная служба по надзору в сфере здравоохранения и социального развития (Росздравнадзор) осуществляет контроль за порядком организации осуществления медико-социальной экспертизы; порядком установления степени утраты профессиональной трудоспособности в результате несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний и др.

Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека (Роспотребнадзор) — государственный санитарно-эпидемиологический надзор за соблюдением санитарного законодательства; организует деятельность системы санитарно-эпидемиологической службы РФ. В федеральном законе “О пожарной безопасности” (1994) определяются общие правовые, экономические и социальные основы обеспечения пожарной безопасности в России, дается регулирование отношений между органами государственной власти, органами местного самоуправления, предприятиями, организациями, крестьянскими хозяйствами и иными юридическими лицами независимо от форм собственности. Федеральный закон “О промышленной безопасности опасных производственных объектов” (1997) определяет правовые, экономические и социальные основы обеспечения безопасной эксплуатации опасных производственных объектов и направлен на предупреждение аварий на опасных производственных объектах и обеспечение готовности организаций к локализации последствий аварий.

Федеральный закон “О радиационной безопасности населения” (1995) характеризует правовые основы обеспечения радиационной безопасности населения в целях охраны его здоровья.

					<i>ФЮРА.ППКР.000.000.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		94

9.2 Производственная безопасность

Производственная безопасность представляет собой систему организационных мероприятий и технических средств, уменьшающих вероятность воздействия на персонал опасных производственных факторов, вредных воздействий технологических процессов, энергии, средств, предметов, условий и режимов труда до приемлемого уровня. Необходимо выявить вредные и опасные производственные факторы, которые могут возникать при разработке, эксплуатации и изготовлении данного прибора. Выявленные факторы перечислены в таблице 9.1.

Таблица 9.1 - Опасные и вредные факторы при монтаже и эксплуатации проточного плазмон-каталитического реактора

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разработка	Изготовление	Эксплуатация	
1.Повышенный уровень вибрации		+	+	ГОСТ 26568-85. Вибрация. Метод и средства защиты. Классификация
2.Повышенный уровень шума		+	+	ГОСТ 12.4.011-89 (ССБТ). Средства защиты работающих. Общие требования и классификация
3.Электрический ток		+	+	ГОСТ 12.4.011-89 (ССБТ). Средства защиты работающих. Общие требования и классификация
4.Повышенная температура поверхности оборудования		+	+	ГОСТ 12.2.003–91 ССБТ. Оборудование производственное. Общие требования безопасности. ГОСТ 14202-69. Трубопроводы промышленных предприятий. Опознавательная окраска, предупреждающие знаки и маркировочные щитки.

Анализ выявленных вредных факторов при разработке, изготовлении и

					ФЮРА.ППКР.000.000.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		95

эксплуатации проектируемого проточного плазмон-каталитического реактора.

Производственное оборудование должно обеспечивать безопасность работающих при монтаже (демонтаже), вводе в эксплуатацию и эксплуатации как в случае автономного использования, так и в составе технологических комплексов при соблюдении требований (условий, правил), предусмотренных эксплуатационной документацией [51, 52].

1. Повышенный уровень вибрации:

Появление данного вредного фактора вызвано тем, что через проточный плазмон-каталитический реактор проходит поток реагентов со скоростью от 0.7 мм/с. При этом поток подается перпендикулярно течению жидкости в реакторе. Вследствие этого возникает вибрация. Под воздействием вибрации может возникать усталость, а как следствие низкий уровень производительности труда оператора.

Режим труда должен устанавливаться при показателе превышения вибрационной нагрузки на оператора не менее 1 дБ (в 1,12 раза), но не более 12 дБ (в 4 раза). При показателе превышения более 12 дБ (в 4 раза) запрещается проводить работы и применять машины, генерирующие такую вибрацию [51].

Основным способом обеспечения вибробезопасности должно быть создание и применение вибробезопасных машин.

Создание вибробезопасных машин должно обеспечиваться применением методов, снижающих вибрацию в источнике возбуждения, которые приведены в [51].

2. Повышенный уровень шума:

Шум непосредственно связан с вибрацией. В реакторе поток подается перпендикулярно течению жидкости в реакторе. Кроме того, основной шум создает насос, который перекачивает реакционный поток.

Шум и вибрация не только ухудшают самочувствие человека и снижают производительность труда в среднем на 10-15%, но и очень часто приводят к профессиональным заболеваниям. Физиопатологические последствия могут проявляться в форме нарушения слуха и других анализаторов.

Шумы создаются работающими приборами, вентиляторами. В большинстве случаев технически трудно снизить шум до очень малых уровней, поэтому при нормировании исходят не из оптимальных, а из терпимых условий, т.е. таких, когда вредное действие шума на человека не проявляется или проявляется незначительно. Нормирование допустимых уровней звукового давления производится в соответствии с [52]. По данному ГОСТу уровень звука в производственных помещениях не должен превышать 85 дБА и не более 60 дБА в лабораториях.

					<i>ФЮРА.ППКР.000.000.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		96

В качестве средств индивидуальной защиты от шума в зависимости от конструктивного исполнения используются [53]:

- противошумные наушники, закрывающие ушную раковину снаружи;
- противошумные вкладыши, перекрывающие наружный слуховой проход или прилегающие к нему;
- противошумные шлемы и каски; противошумные костюмы.

Анализ выявленных опасных факторов при разработке, изготовлении и эксплуатации проектируемого проточного плазмон-каталитического реактора.

1. Электрический ток:

При сборке, настройке, подключении и эксплуатации разрабатываемого устройства возможно поражение электрическим током, что является опасным фактором

Согласно требованиям конструкция производственного оборудования, приводимого в действие электрической энергией, должна включать устройства (средства) для обеспечения электробезопасности.

Технические средства и способы обеспечения электробезопасности (например, ограждение, заземление, зануление, изоляция токоведущих частей, защитное отключение и др.) должны устанавливаться в стандартах и технических условиях на производственное оборудование конкретных групп, видов, моделей (марок) с учетом условий эксплуатации и характеристик источников электрической энергии.

Производственное оборудование должно быть выполнено так, чтобы исключить накопление зарядов статического электричества в количестве, представляющем опасность для работающего, и исключить возможность пожара и взрыва.

- Основные способы и средства электрозащиты:
- изоляция токоведущих частей и ее непрерывный контроль;
- установка оградительных устройств;
- предупредительная сигнализация и блокировки;
- использование знаков безопасности и предупреждающих плакатов;
- использование малых напряжений;
- электрическое разделение сетей;
- защитное заземление;
- выравнивание потенциалов;
- зануление;
- защитное отключение;
- средства индивидуальной электрозащиты.

					<i>ФЮРА.ППКР.000.000.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		97

2. Повышенная температура поверхности оборудования:

На реактор необходимо установить защитный экран для предотвращения разбрызгивания жидкости в случае выхода из строя прокладок, а также от воздействия других факторов. Защитный экран может быть изготовлен из листа оцинкованной или нержавеющей стали толщиной от 0,5 до 0,8 мм и размещается между пакетом пластин и болтами, стягивающими реактор. Защитный экран в комплект поставки не входит [54].

Так как проектируемый реактор для синтеза циклогексадиен-1,3 работает при стандартных условиях, то фактически тепловая изоляция не требуется, однако учитывая тот факт, что реактор является исследовательским и в нем возможны экзотермические реакции, то при необходимости нахождения людей вблизи горячих частей оборудования должны быть приняты меры по их защите от ожогов и действия высокой температуры (ограждение действующего оборудования, вентиляция, спецодежда и т.п.) [55].

Все горячие части оборудования, трубопроводы, баки и другие элементы, прикосновение к которым может вызвать ожоги, должны иметь тепловую изоляцию. Температура на поверхности изоляции при температуре окружающего воздуха 25°C должна быть не выше 45°C. Окраска, условные обозначения, размеры букв и расположение надписей должны соответствовать [56].

Трубопроводы агрессивных, легковоспламеняющихся, горючих, взрывоопасных или вредных веществ должны быть герметичными. В местах возможных утечек (краны, вентили, фланцевые соединения) должны быть установлены защитные кожухи, а при необходимости - специальные устройства со сливом из них продуктов утечек в безопасное место [55].

9.3 Экологическая безопасность

Мероприятия, направленные на сокращение и уменьшение воздействия на окружающую среду, условно подразделяются на профилактические и технологические.

Профилактические обеспечивают безаварийную работу оборудования. Технологические способствуют сокращению объемов выбросов и снижению их приземных концентраций.

Общие профилактические мероприятия, направленные на сокращение и уменьшение воздействия на окружающую среду:

- устройство и озеленение площадки;
- поддержание в полной технической исправности и герметичности резервуаров и емкостей, содержащих циклогексен и циклогексадиен-1,3 и нефтепродукты, технологического оборудования и трубопроводов;

					<i>ФЮРА.ППКР.000.000.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		98

- планово-предупредительные ремонты технологического оборудования, выполняемые по утвержденным планам-графикам специализированными бригадами предприятия;

- контроль сварных стыков физическими методами;
- гидравлическое испытание трубопроводов, резервуаров и оборудования на прочность и герметичность;
- контролируемый и планируемый слив воды после гидроиспытаний;
- высокие требования к качеству металла труб;
- необходимый запас надежности по толщине стенки труб;

Общие технологические мероприятия, направленные на сокращение и уменьшение воздействия на окружающую среду:

- покрытие оборудования и трубопроводов антикоррозионной изоляцией;
- защита оборудования от атмосферной коррозии;
- система постоянного контроля регламентированных значений технологических параметров, автоматическое регулирование и система ПАЗ при отклонении от заданных параметров для предупреждения аварийных ситуаций.

1. Основные мероприятия по охране атмосферного воздуха:

С целью снижения неорганизованных выбросов вредных веществ в атмосферу через неплотности аппаратов, арматуры, фланцевых соединений, уплотнений предусмотрены следующие мероприятия:

- применение герметичных аппаратов и трубопроводов под давлением;
- герметичность трубопроводов за счет максимального соединения элементов трубопроводов сваркой;
- применение технологического оборудования и запорно-регулирующей арматуры в соответствии с рабочими параметрами процесса и коррозионной активностью среды;
- предусмотрена система предохранительных клапанов для защиты аппаратов и трубопроводов от превышения давления;
- сброс реагента и продукта от предохранительных клапанов направляется в резервуары;
- оборудование резервуаров надежными и эффективными не примерзающими предохранительными клапанами;
- хранение нефти в резервуарах предусмотрено под «азотной подушкой»;
- предусмотрены насосы с двойными торцевыми уплотнениями;

					<i>ФЮРА.ППКР.000.000.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		99

- на установке отсутствуют открытые поверхности аппаратов и трубопроводов с температурой выше температуры самовоспламенения обрабатываемых веществ;
- контроль и управление процессом осуществляется автоматически и дистанционно из операторной с использованием электронной системы приборов;
- предусмотрены система аварийного освобождения аппаратов от продуктов в аварийную емкость и аварийный сброс на факел;
- на наружной установке, где расположено оборудование, в котором обращаются взрывопожароопасные вещества, предусмотрены датчики загазованности, сигналы от которых поступают в операторную.

1.2 Способы и средства пожаротушения

В соответствии с требованием норм по пожаротушению на установке должны быть предусмотрены первичные и стационарные средства пожаротушения, а также пожарная сигнализация.

На установке предусмотрены следующие средства пожаротушения:

- первичные средства пожаротушения (огнетушители – пенные ОХП-10, корюшковые ОПУ-10, ОПС-10г, углекислотные ОУ-5, ОУ-8; кошмы, ящики с песком, лопаты и т.д.);
- стационарная система пенотушения открытой насосной;
- водяная оросительная система колонных аппаратов;
- пожарные краны в помещении компрессорной [59].

2. Безопасность при чрезвычайных ситуациях:

Чрезвычайные ситуации (ЧС) - совокупность таких обстоятельств, которые сопровождаются разрушениями, поражениями людей, изменением экологической обстановки.

К чрезвычайным ситуациям относятся: производственные аварии, стихийные бедствия, военные конфликты.

В условиях ЧС необходимо знать правила поведения во избежание паники и несчастных случаев.

Стихийные бедствия - ураганы, наводнения, землетрясения предотвратить нельзя, поэтому, отключив электричество в здании, его необходимо покинуть или спуститься в подвальное помещение (бомбоубежище).

При возникновении военного конфликта нужно эвакуировать из здания людей или спуститься в подвал (бомбоубежища).

Эвакуационные пути - это пути, ведущие к эвакуационным выходам. Наиболее

					ФЮРА.ППКР.000.000.ПЗ	Лист
						102
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

распространенными путями эвакуации являются проходы, коридоры, фойе и лестницы.

Самое главное - при любой чрезвычайной ситуации сохранять спокойствие и не забывать отключить электроэнергию и электроприборы. Иначе, это приведет к ещё большим разрушениям.

При поступлении сигнала об угрозе нападения противника все работники лаборатории должны быть обеспечены средствами индивидуальной защиты, после чего должны удалиться в убежище согласно плану эвакуации из помещения.

Вывод:

Проточный плазмон-каталитический реактор спроектирован в соответствии с требованиями [56].

Герметичность технологической обвязки узлов исключает загрязнение воздуха рабочей зоны вредными и взрывоопасными веществами в соответствии с [60, 61] и исключает недопустимые возможные тепловыделения.

					<i>ФЮРА.ППКР.000.000.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		103

Заключение

Методом плазмонного катализа получено вещество циклогексадиен-1,3. Анализ экспериментальных данных показал, что в ходе химического превращения циклогексена в циклогексадиен-1,3 побочных продуктов обнаружено не было. Это дает основание полагать, что селективность данной реакции с использованием в качестве катализатора оптоволоконной нити, с нанесенным слоем золота, стремится к 1.

Для процесса конверсии углеводородов разработан проточный плазмон-каталитический реактор. Произведен технологический, механический и гидравлический расчеты данного аппарата. Реактора соответствует всем ГОСТам, СНиПам и т.д., а также обеспечивает заданную производительность по циклогексадиену-1,3.

В разделе «Социальная ответственность» проведен анализ вредных факторов, связанных с эксплуатацией данного реактора. Также даны и обоснованы рекомендации по снижению воздействия вредоносных факторов на организм человека и окружающую среду.

В разделе «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» была проведена оценка эффективности данного реактора, а также были проанализированы его сильные и слабые стороны.

Список публикаций

СПИСОК

опубликованных и приравненных к ним научных и учебно-методических работ

№ п/п	Наименование работы, ее вид	Форма работы	Выходные данные	Объем работы, с.	Соавторы
Научные работы					
1	Правильные многогранники или Платоновы тела	печатный	Молодежь и современные информационные технологии: сборник трудов XIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, г. Томск, 9-13 ноября 2015 г.: в 2 т. — Томск: Изд-во ТПУ, 2016. — Т. 2. — С. 164-165.	2	
2	Разработка непрерывного метода синтеза алюмината Ва-Са	печатный	Функциональные материалы: разработка, исследование, применение: сборник тезисов V Всероссийского конкурса научных докладов студентов (22–23 мая 2018 г.) / Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2018. – С. 30.	1	
3	Модель плазмон-каталитического реактора для органического синтеза	печатный	Химия и химическая технология в XXI веке: материалы XX Международной научно-практической конференции имени профессора Л.П. Кулёва студентов и молодых ученых (Томск, 20–23 мая 2019 г.) / Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2019. – С. 371-372.	1,5	

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. X. Zhang, X. Ke and J. Yao, *J. Mater. Chem. A*, 2017, 175, P. 2-20.
2. P. V. Kamat, *J. Phys. Chem. B*, 2002, 106, 7729-7744.
3. W. L. Barnes, A. Dereux and T. W. Ebbesen, *Nature*, 2003, 424, P. 824-830.
4. S. Linic, P. Christopher and D. B. Ingram, *Nat Mater*, 2011, 10, P. 911-921.
5. Z. Zhang and J. T. Yates, *Chem. Rev.*, 2012, 112, 5520-5551.
6. C. K. Prier, D. A. Rankic and D. W. C. MacMillan, *Chem. Rev.*, 2013, 113, P. 5322-5363.
7. Y. Jin, *Adv. Mater.*, 2012, 24, P. 5153-5165.
8. C. An, S. Wang, Y. Sun, Q. Zhang, J. Zhang, C. Wang and J. Fang, *J. Mater. Chem. A*, 2016, 4, P. 4336-4352.
9. H. Chen, L. Shao, Q. Li and J. Wang, *Chem. Soc. Rev.*, 2013, 42, P. 2679-2724.
10. M. Sun and H. Xu, *Small*, 2012, 8, P. 2777-2786.
11. D. Agarwal, C. O. Aspetti, M. Cargnello, M. Ren, J. Yoo, C. B. Murray and R. Agarwal, *Nano Lett.*, 2017, 17, P. 1839-1845.
12. C. B. S. Link, Z.L. Wang, M.A. El-Sayed, *J. Chem. Phys.*, 1999, 111, P. 1255-1264.
13. H. Yuan, W. Ma, C. Chen, J. Zhao, J. Liu, H. Zhu and X. Gao, *Chem. Mater.*, 2007, 19, P. 1592-1600.
14. K. Kimura, S.-i. Naya, Y. Jin-nouchi and H. Tada, *J. Phy. Chem. C*, 2012, 116, P. 7111-7117.
15. Z. Zhang, Z. Wang, S.-W. Cao and C. Xue, *J. Phy. Chem. C*, 2013, 117, P. 25939-25947.
16. S. Shuang, R. Lv, Z. Xie and Z. Zhang, *Sci. Rep.*, 2016, 6, 26670 p.
17. A. Tanaka, K. Hashimoto and H. Kominami, *J. Am. Chem. Soc.*, 2014, 136, P. 586-589.
18. L. Liu, S. Ouyang and J. Ye, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2013, 52, P. 6689-6693
19. D. Tsukamoto, Y. Shiraishi, Y. Sugano, S. Ichikawa, S. Tanaka and T. Hirai, *J. Am. Chem. Soc.*, 2012, 134, P. 6309-6315.
20. Z. Zheng, B. Huang, X. Qin, X. Zhang, Y. Dai and M.-H. Whangbo, *J. Mater. Chem.*, 2011, 21, P. 9079-9087.
21. X. Ke, X. Zhang, J. Zhao, S. Sarina, J. Barry and H. Zhu, *Green Chem.*, 2013, 15, P. 236-244.

22. J. Y. Park, L. R. Baker and G. A. Somorjai, *Chem. Rev.*, 2015, 115, P. 2781-2817.
23. Y. K. Lee, C. H. Jung, J. Park, H. Seo, G. A. Somorjai and J. Y. Park, *Nano Lett.*, 2011, 11, P. 4251-4255.
24. C. Boerigter, U. Aslam and S. Linic, *ACS Nano*, 2016, 10, P. 6108- 6115.
25. T. Tatsuma, H. Nishi and T. Ishida, *Chem. Sci.*, 2017, 8, P. 3325- 3337.
26. H. Tran, K. Chiang, J. Scott and R. Amal, *Photochem. Photobio. Sci.*, 2005, 4, P. 565-567.
27. Postnikov P. et al. // *Adv. Mat. Interf.* 2018, 1800725.
28. Досон Р., Эллиот Д., Эллиот У., Джонс К. Справочник биохимика. - М.: Мир, 1991. - 90с.
29. ГОСТ Р ИСО 6009-2013. Иглы инъекционные однократного применения. - Изд. официальное. - М.: Стандартинформ, 2014. – 14с.
30. Беляев В.М. Конструирование и расчет элементов оборудования отрасли. Ч.1: Тонкостенные сосуды и аппараты химических производств / В.М. Беляев, В.М. Миронов. - Томск: Изд-во Томского Политехнического университета, 2016. - 313с.
31. Семакина О.К. Машины и аппараты химических производств. Ч. 1. Учеб. пособие. - Томск: Изд-во Томского Политехнического университета, 2003. - 118с.
32. ГОСТ 33259-2015. Фланцы арматуры, соединительных частей и трубопроводов на номинальное давление до PN 250. Конструкция, размеры и общие технические требования (с Поправками). - М.: Стандартинформ, 2016. – 105с.
33. Лашинский А.А. Основы конструирования и расчета химической аппаратуры. Справочник. / А.А. Лашинский, А.Р. Толчинский - Л.: Машиностроение, 1970. - 752с.
34. ГОСТ 34233.1-2017. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Общие требования. - М.: Стандартинформ, 2018. - 35с.
35. ГОСТ 8732-78. Трубы стальные бесшовные горячедеформированные. Сортамент (с Изменениями N 1,2). - М.: ИПК Изд-во стандартов, 2004. – 9с.
36. ГОСТ 34233.2-2017. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет цилиндрических и конических обечаек, выпуклых и плоских днищ и крышек. - М.: Стандартинформ, 2018. – 58 с.
37. Михалев М.Ф. Расчет и конструирование машин и аппаратов химических производств. Примеры и задачи. / М.Ф. Михалев, Н.П. Третьяков, А.И. Мильченко, В.В. Зобнин. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1984. – 301с.
38. ГОСТ 34233.7-2017. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Теплообменные аппараты. - М.: Стандартинформ, 2018. – 58с.

39. ГОСТ 19903-2015. Прокат листовой горячекатаный. Сортамент. - М.: Стандартиформ, 2016. – 15с.
40. Полимерные модифицированные клеи. Каталог. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://instplast.ru/ru/polimernye-modificirovannye-klei> (дата обращения: 14.03.2019).
41. ГОСТ 1255-67. Фланцы с соединительным выступом стальные плоские приварные. Конструкция, размеры и технологические требования. - М.: Изд-во комитет стандартов СССР, 1967. – 12с.
42. ГОСТ 34233.4-2017. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет на прочность и герметичность фланцевых соединений. - М.: Стандартиформ, 2018. – 46с.
43. ГОСТ 15180-86. Прокладки плоские эластичные. Основные параметры и размеры. – М.: Изд-во стандартов, 1993. – 12с.
44. ГОСТ 34233.6-2017. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет на прочность при малоцикловых нагрузках. - М.: Стандартиформ, 2018. – 23с.
45. ГОСТ 34233.3-2017. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Укрепление отверстий в обечайках и днищах при внутреннем и наружном давлениях. Расчет на прочность обечаек и днищ при внешних статических нагрузках на штуцер. - М.: Стандартиформ, 2018. – 45с.
46. ОСТ 26-2091-93. Опоры горизонтальных сосудов и аппаратов. Конструкция. - М.: Изд-во стандартов, 1994. – 38с.
47. ГОСТ 34233.5-2017. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет обечаек и днищ от воздействия опорных нагрузок. - М.: Стандартиформ, 2018. – 36с.
48. Павлов К.Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. / К.Ф. Павлов, П.Г. Романков, А.А. Носков - М.: ООО ИД «Альянс», 2007. - 576с.
49. Перистальтические шланговые насосы. Каталог. [Электронный ресурс] - Режим доступа: http://oilzip.ru/nasos_np_th.pdf (дата обращения: 14.03.2019).
50. "Трудовой кодекс Российской Федерации" от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 01.04.2019). Статья 354.
51. ГОСТ 26568-85. Вибрация. Метод и средства защиты. Классификация. (с Изменением N 1). - М.: Издательство стандартов, 1987. – 17с.

52. ГОСТ 12.1.003-2014. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Шум. Общие требования безопасности. - М.: Стандартинформ, 2015. – 27с.
53. ГОСТ 12.4.011-89. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Средства защиты работающих. Общие требования и классификация. - М.: ИПК Издательство стандартов, 2001. – 8с.
54. ГОСТ 12.2.003-91. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Оборудование производственное. Общие требования безопасности. - М.: ИПК Издательство стандартов, 2001. – 11с.
55. Назаренко О. Б. Безопасность жизнедеятельности: учебное пособие / О. Б. Назаренко, Ю. А. Амелькович; Томский политехнический университет. – 3-е изд., перераб. и доп. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 178 с.
56. Приказ Ростехнадзора от 25.03.2014 N 116 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/542627299> (дата обращения 22.05.2019).
57. ГОСТ 14198-78. Циклогексен технический. Технические условия. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1999. – 7с.
58. СНиП 21-01-97*. Пожарная безопасность зданий и сооружений (с Изменениями N 1, 2). - М.: ГУП ЦПП, 2002. – 38с.
59. Рекомендации по устройству и безопасной эксплуатации технологических трубопроводов. Приказ от 27 декабря 2012 года N 784 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/542627299> (дата обращения 22.05.2019).
60. Ибрагимов Г.З., Артемьев В.Н. Техника и технология добычи и подготовки нефти и газа. – М.: МГОУ, 2005. – 243с.
61. Касаткин, А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А.Г. Касаткин. – М.: ООО «Издательский дом Альянс», 2015. – 753 с.
62. ГОСТ 14202-69. Трубопроводы промышленных предприятий. Опознавательная окраска, предупреждающие знаки и маркировочные щитки. - М.: ИПК Издательство стандартов, 2004. – 20с.

Приложение А

(справочное)

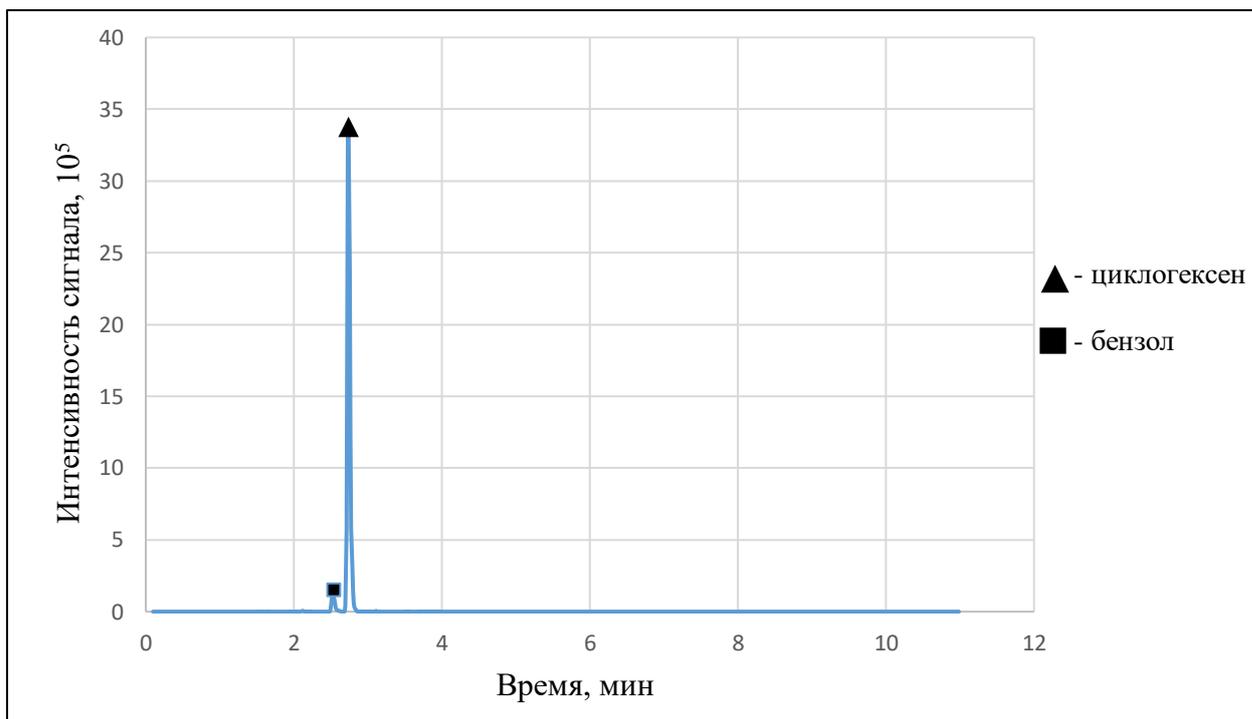


Рисунок А.1 – Хроматограмма циклогексена, при использовании трубки $d = 4.5$ мм

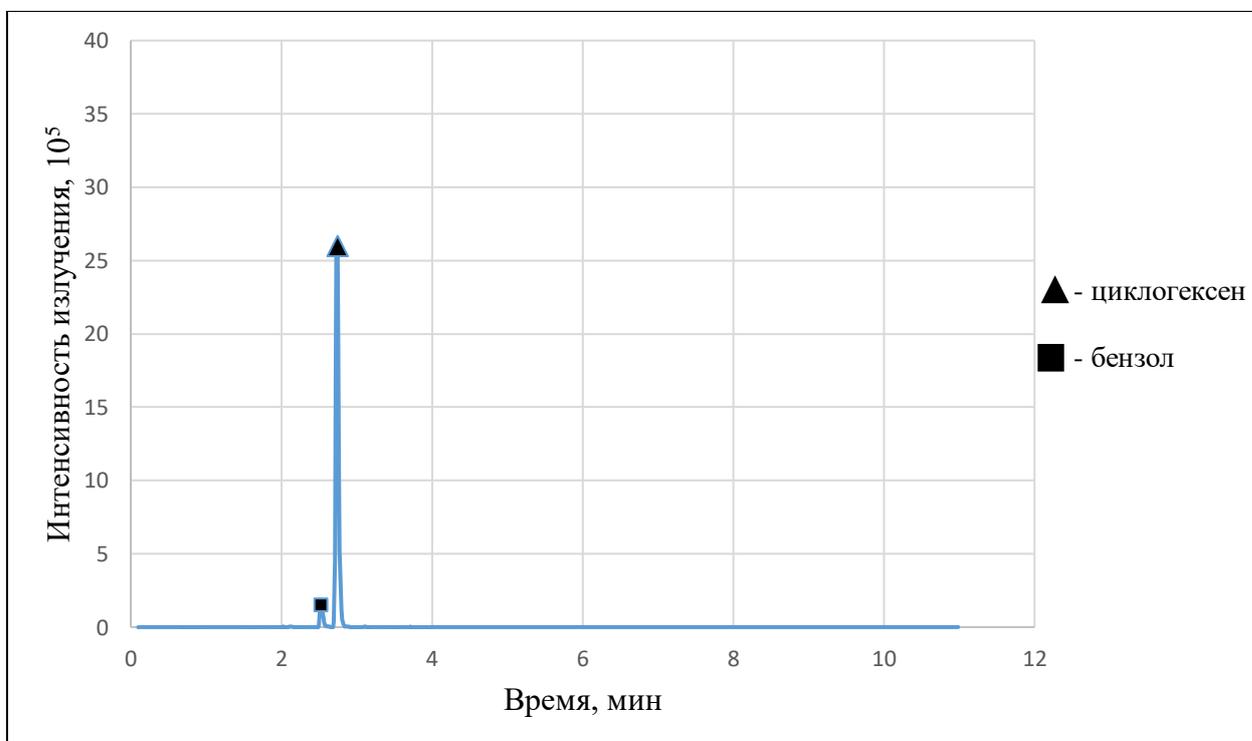


Рисунок А.2 – Хроматограмма циклогексена, при использовании трубки $d = 4.2$ мм

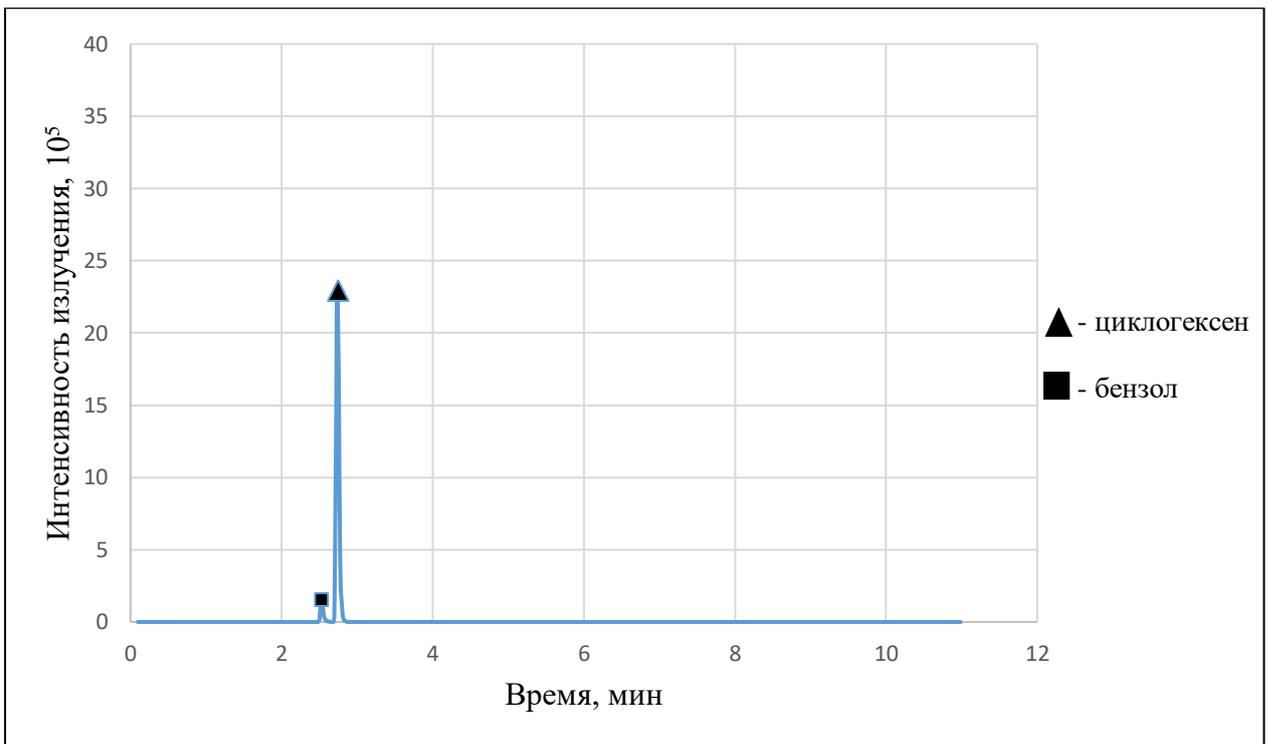


Рисунок А.3 – Хроматограмма циклогексена, при использовании трубки $d = 4.0$ мм

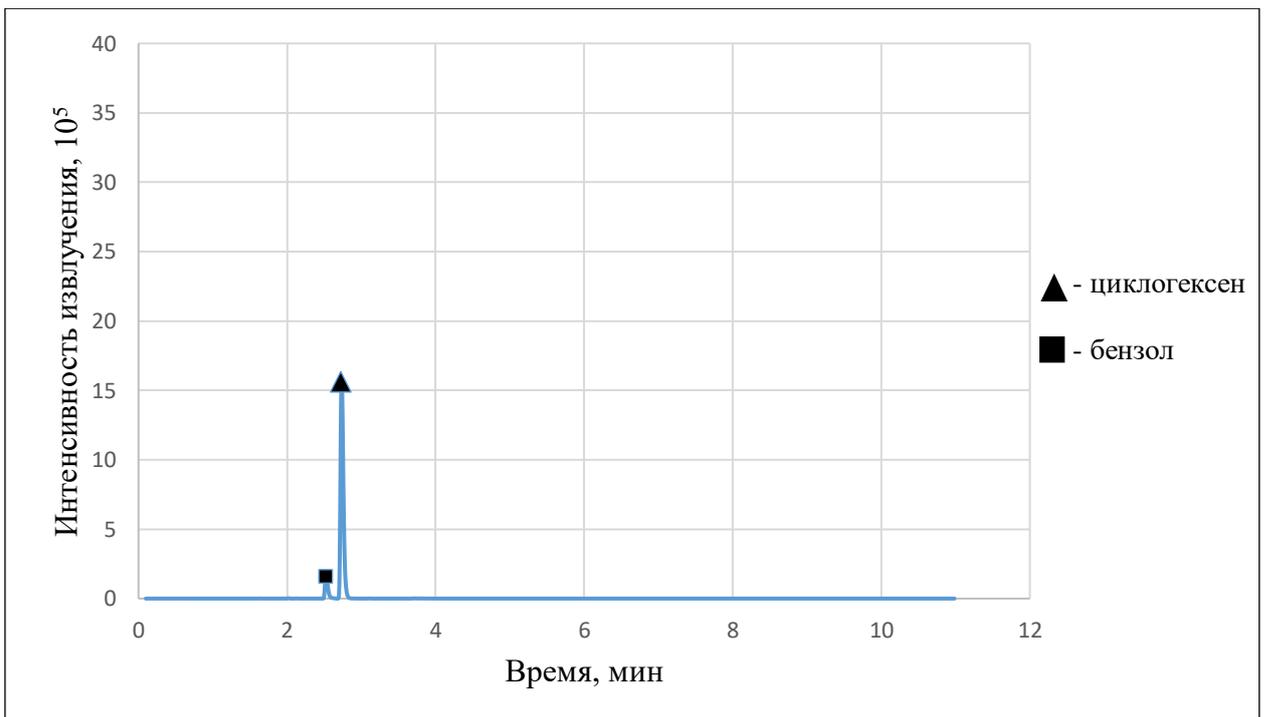


Рисунок А.4 – Хроматограмма циклогексена, при использовании трубки $d = 3.8$ мм

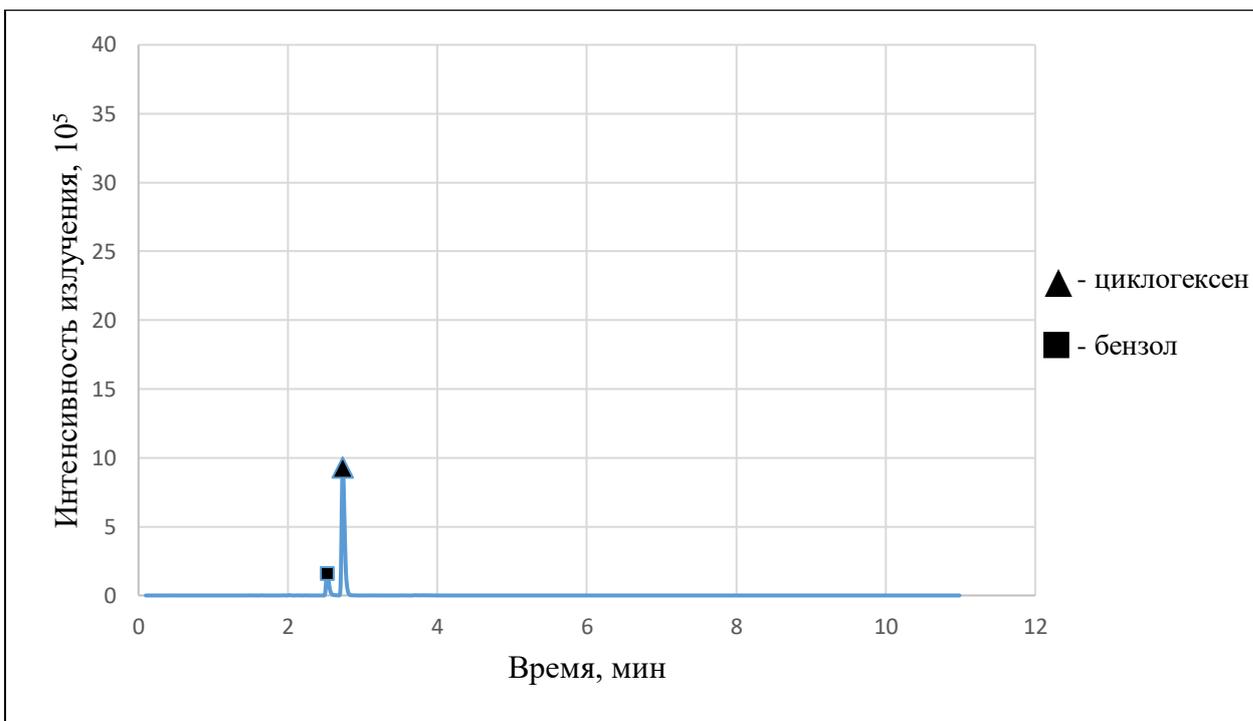


Рисунок А.5 – Хроматограмма циклогексена, при использовании трубки $d = 3.6$ мм

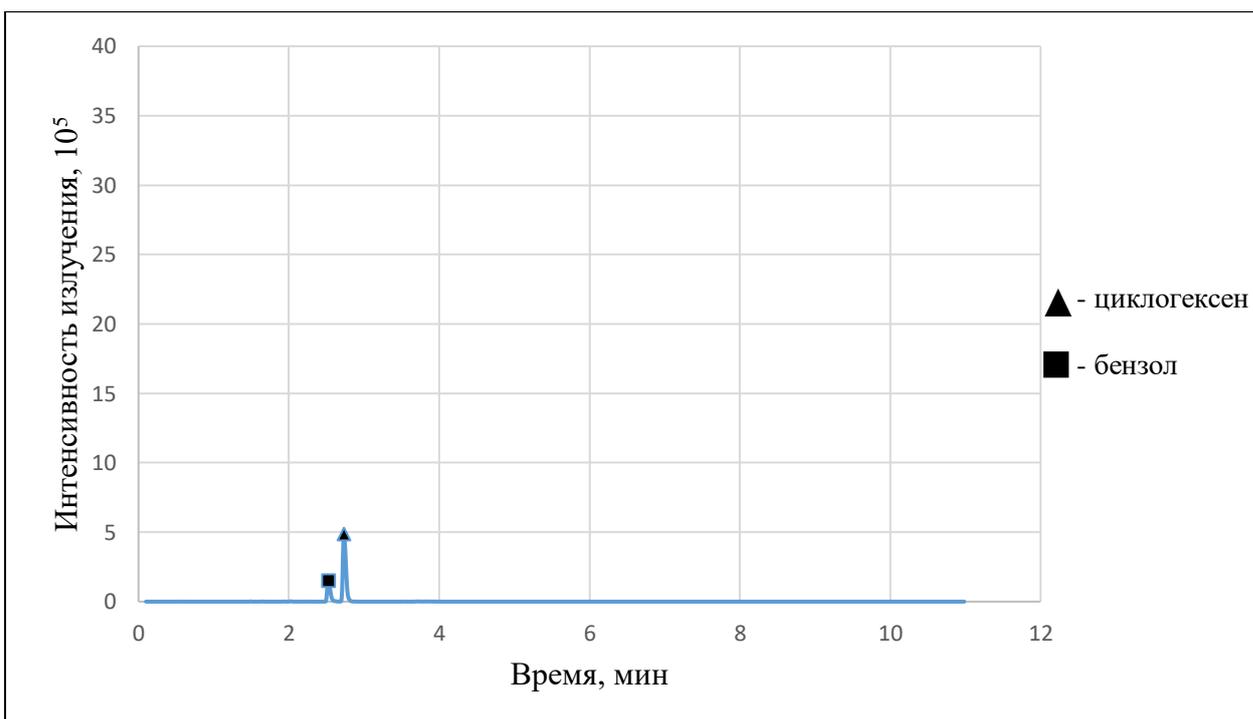


Рисунок А.6 – Хроматограмма циклогексена, при использовании трубки $d = 3.5$ мм

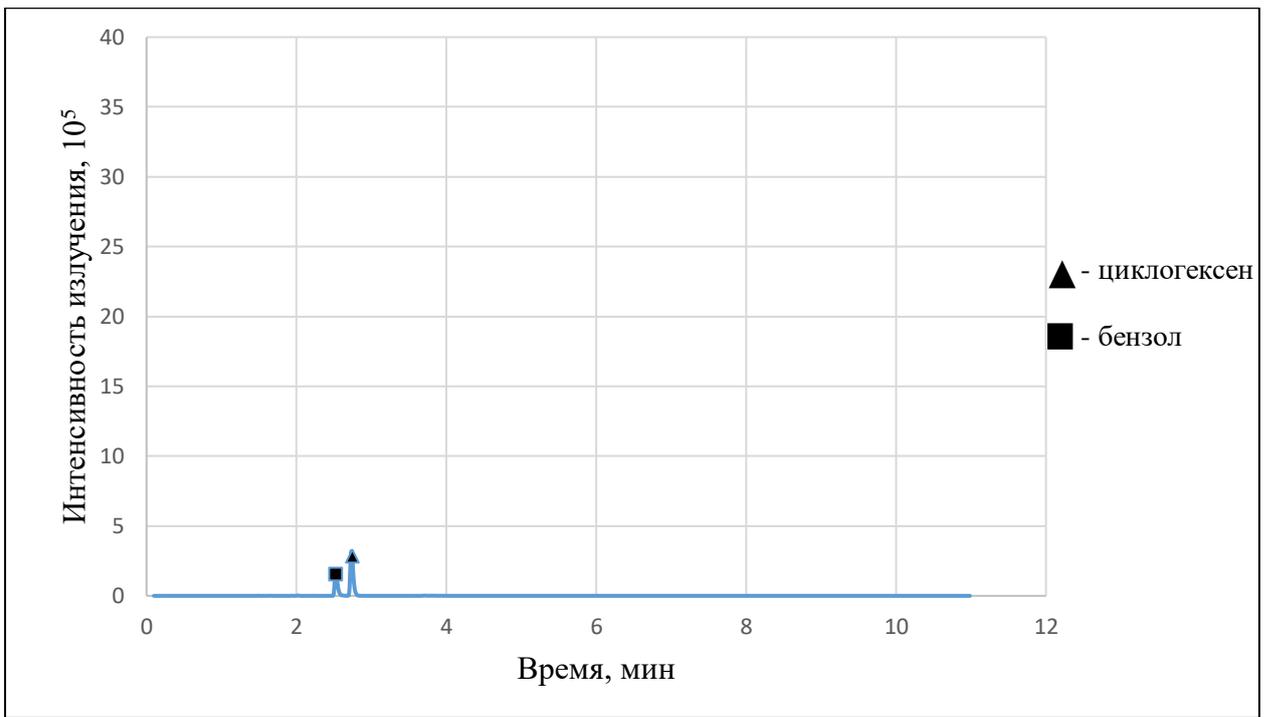


Рисунок А.7 – Хроматограмма циклогексена, при использовании трубки $d = 3.4$ мм

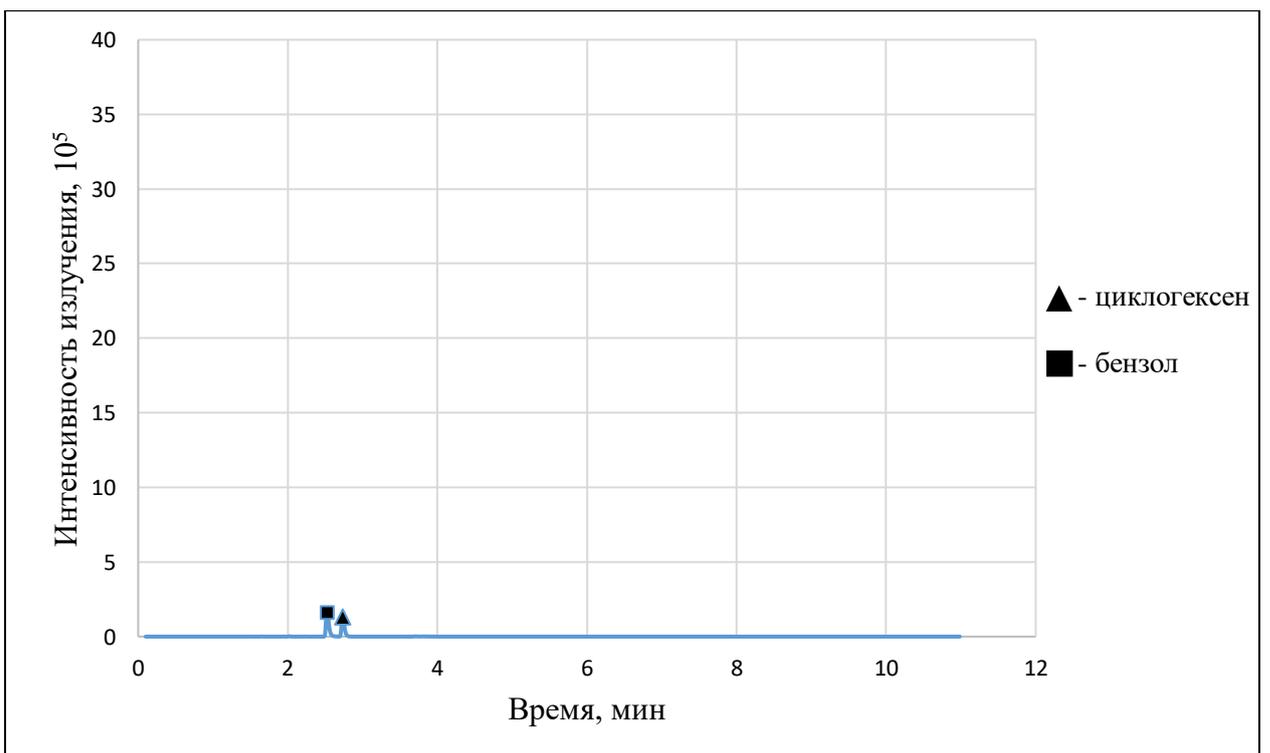


Рисунок А.8 – Хроматограмма циклогексена, при использовании трубки $d = 3.0$ мм

Приложение Б

(справочное)

Таблица Б.1 - Календарный план-график проведения НИОКР по теме

№ работ	Вид работ	Исполнители	Т _{кi} , кал. дн.	Продолжительность выполнения работ													
				февраль			март			апрель			май				
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3		
1	Разработка технического задания	Руководитель	1	█													
2	Выбор направления исследований	Руков., Инженер	8	█	█												
3	Теоретическое и экспериментальные исследования	Руков., Инженер	23		█	█											
4	Обобщение полученных результатов, выводы по проделанной работе	Руков., Инженер	12				█	█									
5	Разработка технической документации и проектирование	Инженер	23						█	█							
6	Оформление отчета по ВКР	Руков., Инженер	19									█	█				

- Инженер

- Руководитель

ТТЭ ИШНПТ
НОЦ Н.М. Кузнера

Формат	Зона	Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание
		9	ФЮРА ППКР 000000.001.04 Д	Пробка	4	
		10	ФЮРА ППКР 000000.001.05 Д	Прокладка	4	
		11	ФЮРА ППКР 000000.002.01 Д	Трудная решетка	2	
		12	ФЮРА ППКР 000000.002.02 Д	Трубка 3x0,4	790,2	п.м.
		13	ФЮРА ППКР 000000.003.01 Д	Подкладной лист	2	
		14	ФЮРА ППКР 000000.003.02 Д	Лист стальной	2	
		15	ФЮРА ППКР 000000.004.01 Д	Фланец 25-2,5-03-2-Д	2	
				ГОСТ 3259-2015		
		16	ФЮРА ППКР 000000.004.02 Д	Фланец 25-2,5-03-2-С	2	
				ГОСТ 3259-2015		
		17	ФЮРА ППКР 000000.004.03 Д	Патрубок 32x2,5	0,255	п.м.
				ГОСТ 3259-2015		
		18	ФЮРА ППКР 000000.005.01 Д	Фланец 50-2,5-05-2-Д	1	
				ГОСТ 3259-2015		
		19	ФЮРА ППКР 000000.005.02 Д	Фланец 25-2,5-05-2-С	1	
				ГОСТ 3259-2015		
		20	ФЮРА ППКР 000000.005.03 Д	Патрубок 57x3,5	0,130	п.м.
				ГОСТ 3259-2015		
				Стандартные изделия		
		7		Болт М20x75	24	
				ГОСТ 15591-70		
		25		Болт М12x45	4	
				ГОСТ 15591-70		
		29		Болт М10x35	8	
				ГОСТ 15591-70		
		22		Гайка М20-6Н	24	
				ГОСТ 15591-70		
		26		Гайка М12-6Н	4	

Ишв. № подл. Подп. и дата. Взам. инв. № Инв. № дцкл. Подп. и дата.

ФЮРА.ППКР.000000.ПЗ

Лист
116

