

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

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы

Разработка и проектирование основных аппаратов для получения глиоксаля

УДК 66.02.001.63:547.44

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4KM71	Амеличкин Иван Вячеславович		

Руководитель

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

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

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

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ст. преподаватель	Романова С.В	-		

Консультант по разделу «Механический расчет оборудования»

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

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

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

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

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

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

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

Студенту:

Группа	ФИО
4КМ71	Амеличкин Иван Вячеславович

Тема работы:

Разработка и проектирование основных аппаратов для получения глиоксаля	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	1236/с от 18.02.2019

Срок сдачи студентом выполненной работы:	18.06.2019
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе</p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p><u>Реактор для синтеза ВЭОС и нутч-фильтр</u></p> <p>Среда – воздушная; Рабочее давление – 0.6 МПа/0.9 МПа; Рабочая температура – 75 °С; <u>Исполнение по материалу:</u> Все основные элементы конструкции должны быть выполнены из стали 12Х18Н10Т. Режим работы: периодический Требования к эксплуатации и обслуживанию:</p>
---	--

	Простота ремонта и доступность для обслуживания.
<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	Конструктивный и механический расчеты, а также раздел социальной ответственности и финансового менеджмента, ресурсоэффективности и ресурсосбережения
<p>Перечень графического материала</p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	Лист 1. Технологическая схема А1; Лист 2. Общий вид реактора синтеза ВЭОС А1; Лист 3. Выносные элементы реактора синтеза ВЭОС А1; Лист 4. Изометрия реактора синтеза ВЭОС А1; Лист 5. Общий вид нутч-фильтра А1; Лист 6. Изометрия нутч-фильтра А1; Лист 7. Техничко-экономические показатели А1; Лист 8. Исследовательская часть А1.
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i>	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Креницына Зоя Васильевна
Социальная ответственность	Романова Светлана Владимировна
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Реферат	
Литературный обзор	

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

Задание выдал руководитель / консультант (при наличии):

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

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4КМ71	Амеличкин Иван Вячеславович		

Планируемые результаты обучения по ООП 18.04.02 выпуска 2019 г.

Код	Результат обучения	Требования ФГОС ВО, СУОС, критериев АИОР, и/или заинтересованных сторон
P1	Осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ), <i>CDIO Syllabus</i> . Критерии АИОР, согласованные с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> , требования профессиональных стандартов: 40.011 «Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским работам»
P2	Осуществлять управление проектом на всех этапах его жизненного цикла	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ, <i>CDIO Syllabus</i> . Критерии АИОР, согласованные с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> , требования профессиональных стандартов: 40.011 - «Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским работам», 28.004 «Инженер-проектировщик установок для утилизации и обезвреживания медицинских и биологических отходов»
P3	Организовывать и руководить работой команды, вырабатывать командную стратегию для достижения цели	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ, <i>CDIO Syllabus</i> . Критерии АИОР, согласованные с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> , требования профессиональных стандартов: 40.011 - «Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским работам»,
P4	Применять современные коммуникативные технологии в том числе на иностранном языке (-ах) для академического и профессионального взаимодействия	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ, <i>CDIO Syllabus</i> . Критерии АИОР, согласованные с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> , требования профессиональных стандартов: 40.011 - «Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским работам», 01.004 «Педагог профессионального обучения, профессионального образования и дополнительного профессионального образования»
P5	Проводить анализ и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ, <i>CDIO Syllabus</i> . Критерии АИОР, согласованные с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> , требования профессиональных стандартов: 01.004 «Педагог профессионального обучения, профессионального образования и дополнительного профессионального образования»
P6	Определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности, разрабатывать способы ее совершенствования на основе самооценки	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ, <i>CDIO Syllabus</i> . Критерии АИОР, согласованные с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> , требования профессиональных стандартов: 01.004 «Педагог профессионального обучения, профессионального образования и дополнительного профессионального образования»
P7	Формулировать, разрабатывать и реализовывать методы решения научно-исследовательских задач, в области проектирования и конструирования энерго и ресурсоэффективных химических, нефтегазоперерабатывающих и нефтехимических производств, представлять и защищать результаты	Требования ФГОС ВО, СУОС, <i>CDIO Syllabus</i> . Критерии АИОР, согласованные с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> , требования профессиональных стандартов: 28.004 - «Инженер-проектировщик установок для утилизации и обезвреживания медицинских и биологических отходов», 40.011- «Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским работам»

Код	Результат обучения	Требования ФГОС ВО, СУОС, критериев АИОР, и/или заинтересованных сторон
Р8	Проводить все стадии проектирования с использованием компьютерного 3-х мерного моделирования, коммерческих симуляторов и пакетов прикладных программ, в области проектирования и конструирования энерго и ресурсоэффективных химических, нефтегазоперерабатывающих и нефтехимических производств, представлять и защищать результаты	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ, <i>CDIO Syllabus</i> . Критерии АИОР, согласованные с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> , требования профессиональных стандартов: 40.011- «Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским работам», 19.002 - «Специалист по химической переработке нефти и газа», 19.003 - «Специалист по обслуживанию и ремонту нефтезаводского оборудования»
Р9	Формулировать, разрабатывать и реализовывать методы решения научно-исследовательских задач, в области проектирования и конструирования энерго и ресурсоэффективных химических, нефтегазоперерабатывающих и нефтехимических производств	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ, <i>CDIO Syllabus</i> . Критерии АИОР, согласованные с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> , требования профессиональных стандартов: 40.011 «Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским работам », 19.00- «Специалист по химической переработке нефти и газа», 19.003 «Специалист по обслуживанию и ремонту нефтезаводского оборудования», 19.008 «Специалист по диспетчерско-технологическому управлению нефтегазовой отрасли»

Реферат

Данная магистерская работа включает в себя расчет двух аппаратов из схемы получения высокоэнтропийных оксидных систем для синтеза глиоксаля. Были произведены технологический и механический расчеты оборудования.

В разделе «Социальная ответственность» рассмотрены вопросы обеспечения безопасной работы персонала и охраны окружающей среды.

В разделе «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» рассчитаны технико-экономические показатели и построен график безубыточности.

Цель работы – изучение возможностей синтеза и проектирование основного оборудования для получения катализаторов на основе ВЭОС РЗЭ в производстве глиоксаля.

В лабораторных условиях получены ВЭОС РЗЭ, установлена возможность их применения для создания катализаторов процесса синтеза глиоксаля.

Магистерская диссертация состоит из графической части и пояснительной записки. Графическая часть состоит из 8 листов формата А1. Пояснительная записка состоит из 232 страниц, и включает в себя: 51 таблицу, 50 рисунков и 46 источников литературы.

Abstract

This master's work includes the calculation of two devices from the scheme for obtaining high-entropy oxide systems for the synthesis of glyoxal. Technological and mechanical calculations of the equipment were made.

In the section “Social responsibility”, questions of ensuring the safe work of personnel and environmental protection are considered.

In the section “Financial Management, Resource Efficiency and Resource Saving”, technical and economic indicators were calculated and the break-even schedule was drawn up.

The purpose of the work is to study the possibilities of synthesis and design of the main equipment for the production of catalysts based on HEOS REE in the production of glyoxal.

The master thesis consists of a graphic part and an explanatory note. The graphic part consists of 8 sheets of A1 format. Explanatory note consists of 232 pages, and includes 51 tables, 50 figures and 46 sources of literature.

Содержание

Введение	10
1 Литературный обзор	13
1.1 Глиоксаль и его производные	13
1.2 Использование катализаторов на основе РЗЭ.....	15
1.3 Заключение по литературному обзору	18
1.4 Теоретические и экспериментальные исследования.....	18
1.4.1 Теоретические аспекты и выбор методики получения ВЭОС на основе РЗЭ.....	18
1.4.2 Синтез ВЭОС в лабораторных условиях.....	20
1.5 Выбор аппаратного оформления для полупромышленного синтеза ВЭОС на основе РЗЭ	28
2 Технологическая схема установки по производству ВЭОС на основе РЗЭ	30
2.1 Описание технологической схемы производства ВЭОС на основе РЗЭ	30
3 Технологические расчёты реактора и нутч-фильтра для синтеза ВЭОС на основе РЗЭ	31
3.1 Материальный баланс процесса синтеза ВЭОС на основе РЗЭ.....	31
3.1.1 Расчет объема реактора в соответствии с материальным балансом	32
3.1.2 Гидродинамический расчет аппарата с внутренними устройствами	34
3.1.3 Конструктивный расчёт реактора синтеза ВЭОС на основе РЗЭ.....	37
3.2 Расчет и подбор нутч-фильтра в соответствии с материальным балансом.....	38
3.2.1 Расчет средней скорости фильтрования за цикл обработки суспензии	39
3.2.2 Расчет времени цикла работы фильтра	40
3.2.3 Выбор фильтрующей перегородки	41
3.2.4 Выбор нутч-фильтра	42
3.3 Выводы по результатам технологических расчётов	43
4 Выбор конструкционных материалов	44
4.1 Расчёт основных характеристик материала.....	45
4.2 Определение прибавок к толщине стенок реактора на различные виды разрушений ...	47
4.3. Выводы по выбору конструкционных материалов	48
5 Механический расчет реактора и нутч-фильтра для синтеза ВЭОС на основе РЗЭ	49
5.1 Механический расчет реактора.....	50
5.1.1 Расчёт толщины стенки цилиндрической обечайки реактора	51
5.1.2 Расчёт толщины стенки эллиптических днища и крышки реактора.....	59
5.1.3 Расчёт толщины стенки цилиндрической обечайки рубашки	64
5.1.4 Расчёт толщины стенки эллиптического днища рубашки	69
5.1.5 Расчет сопряжения обечайки корпуса и днища.....	71
5.1.6 Расчёт сопряжения обечайки рубашки и днища	77

5.1.7 Расчёт сопряжения рубашки с корпусом	83
5.1.8 Расчёт фланцевого соединения корпуса с крышкой	87
5.1.9 Расчёт опор аппарата.....	98
5.1.10 Расчёт вала для перемешивающего устройства реактора	103
5.1.11 Расчет сальникового уплотнения.....	113
5.1.12 Расчет укрепления отверстий.....	114
5.1.13 Расчет болтового соединения.....	121
5.2 Механический расчет нутч-фильтра.....	123
5.2.1 Расчет толщины стенки верхней цилиндрической обечайки нутч-фильтра	124
5.2.2 Расчет толщины стенки нижней цилиндрической обечайки нутч-фильтра	127
5.2.3 Расчет толщины стенки эллиптического днища нутч-фильтра	132
5.2.4 Расчет сопряжения цилиндрической обечайки и эллиптического днища	133
5.2.5 Расчет круглой перфорированной пластины	139
5.2.6 Расчет фланцевого соединения	145
5.2.7 Расчет опор нутч-фильтра	154
6 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	156
6.1 Потенциальные потребители результатов исследования	156
6.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	157
6.3 Диаграмма Исикавы	159
6.4 Оценка готовности проекта к коммерциализации	161
6.5 Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования.....	163
6.6 Инициация проекта	163
6.7 Рабочая группа проекта	164
6.8 Планирование управления научно-техническим проектом	166
6.8.1 Организационная структура проекта.....	166
6.8.2 Контрольные события проекта.....	166
6.8.3 План проекта	168
6.9 Бюджет научного исследования.....	172
6.9.1 Сырье и материалы.....	172
6.9.2 Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	173
6.9.3 Расчет основной заработной платы	174
6.9.4 Дополнительная заработная плата научно-производственного персонала	176
6.9.5 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления).....	177
6.10 Оценка ресурсоэффективности	178
6.10.1 Определение ресурсной, финансовой, бюджетной социальной и экономической эффективности исследования.....	178

6.10.2 Организация труда на проектируемом объекте.....	182
6.10.3 Построение графика сменности	182
6.10.4 Проектирование годового баланса рабочего времени	183
6.10.5 Определение профессионально-квалификационного состава и численности промышленно-производственного персонала проектируемого объекта.....	184
6.10.6 Организация заработной платы на проектируемом объекте.....	186
6.11 Расчёт производственной мощности и эффективного фонда времени оборудования	188
6.12 Расчет затрат на производство продукции.....	191
6.12.1 Расчет годовой потребности в сырье и материалах	191
6.12.2 Расчет амортизационных отчислений и калькуляция себестоимости на производство и реализацию продукции	191
6.12.3 Определение цены готовой продукции	192
6.13 Анализ безубыточности по производству.....	193
6.14 Расчет ТЭП.....	194
7 Социальная ответственность.....	196
7.1 Введение.....	196
7.2 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	197
7.2.1 Специальные нормы трудового законодательства.....	197
7.2.2 Компоновка оборудования	198
7.3 Производственная безопасность. Анализ вредных и опасных факторов проектируемой производственной среды	198
7.3.1 Отклонения показателей микроклимата	199
7.3.2 Повышенный уровень шума.....	200
7.3.3 Отсутствие или недостаток естественного света.	201
7.3.4 Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека	202
7.4 Экологическая безопасность	203
7.5 Защита в чрезвычайных ситуациях	203
Заключение	208
Список научных трудов	210
Список используемых источников	213
Приложение А.....	217

Введение

В связи с большим распространением аппаратов постоянно существует необходимость в проектировании нового, более высокоэффективного оборудования. К каждому из химических процессов, для которого проектируется аппарат, необходим особый подход, предполагающий всесторонний и детальный анализ. Для правильного претворения проекта в жизнь необходимо учитывать такие факторы, как термо- и гидродинамический режимы процесса, подходящие ему конструктивные решения, разработанные в соответствии с принципами энерго- и ресурсоэффективности, наконец, методы контроля процесса и его автоматического регулирования, без которого не обходится ни одно производство.

Общая характеристика диссертационного исследования. Работа посвящена расчету и проектированию основного оборудования для процесса синтеза новых катализаторов в производстве глиоксаля.

Актуальность темы. Большинство реакций проводимых в химической промышленности требует катализа. Катализ способствует сокращению времени протекания процесса, а также увеличению выхода полезного продукта. Производство новых катализаторов на сегодняшний день является одним из перспективных направлений развития химической промышленности Российской Федерации. В связи с этим, стратегически важной задачей перед инженерами становится проектирование оборудования для получения высокоактивных катализаторов. В Томске было создано первое в России и пятое в мире после США, Германии, Китая и Японии производство глиоксаля. Это не было бы возможным без разработки уникальных катализаторов. Однако, даже сейчас, использование современных катализаторов не в полной мере обеспечивает должный выход продукта. Поэтому, по сей день продолжают исследования в области получения наиболее эффективных катализаторов для синтеза глиоксаля. Одним из перспективных является катализатор на основе высокоэнтропийных оксидных порошков

редкоземельных элементов (РЗЭ). Для производства таких порошков необходимо проектирование отдельной технологической установки.

Объект исследования. Высокоэнтропийные оксидные системы на основе (ВЭОС) РЗЭ как основной компонент катализаторов процесса синтеза глиоксаля.

Предмет исследования:

1. изучение свойств ВЭОС на основе РЗЭ;
2. изучение способов синтеза ВЭОС на основе РЗЭ;
3. основное оборудование для промышленного синтеза ВЭОС на основе РЗЭ.

Степень разработанности проблемы. Сведения о синтезе и строении ВЭОС имеются в работах зарубежных авторов, таких как: Witte R., Sarkar A., Berardan D., Dragoe D., Wang J., Abbas F., Tariq J., Badshah N. и других.

Среди авторов, активно занимающихся исследованиями условий синтеза, физико-химических свойств и практического применения оксидных порошков на основе РЗЭ, следует отметить зарубежных ученых (Sarkar A., Berardan D., Dragoe D. и др.).

Цель работы: изучение возможностей синтеза и проектирование основного оборудования для получения катализаторов на основе ВЭОС РЗЭ в производстве глиоксаля.

Для осуществления поставленной цели были определены следующие **задачи:**

1. проведение синтеза ВЭОС на основе РЗЭ в лабораторных условиях;
2. исследование свойств полученных систем;
3. расчет и проектирование основного оборудования для синтеза ВЭОС на основе РЗЭ.

Научно-практическая значимость исследования состоит в разработке новейших материалов в производстве катализаторов для синтеза глиоксаля от стадии лабораторных исследований до создания

полупромышленной установки. А также в оценке экологической и экономической эффективности научной разработки.

Полученные результаты представляют определенный теоретический и практический интерес и вносят значительный вклад в решение ряда актуальных вопросов современной химической инженерии.

Личный вклад автора заключается в непосредственном участии при проведении экспериментов на всех его этапах, разработки основного оборудования, интерпретации и обсуждении полученных результатов, обобщении и написании выводов диссертации.

Достоверность результатов подтверждается использованием современных методов анализа структуры полученных соединений и воспроизводимостью результатов. Достоверность и обоснованность научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, обеспечивается внутренней непротиворечивостью результатов исследования, их соответствием теоретическим положениям неорганической и органической химии. Расчеты оборудования выполнены в соответствии с государственными стандартами.

Методологическая база исследования. В процессе исследования были применены следующие физико-химические методы анализа: рентгенофазовый анализ (РФА), сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) с системой энергодисперсионного микроанализа и магнитометрия.

Апробация работы. Результаты работы были представлены в материалах XVI Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук» (2019).

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, проект № 10.3031.2017/4.6.

1 Литературный обзор

В рамках данного раздела магистерской диссертации проведен анализ имеющихся литературных данных, посвященных синтезу и реакционной способности глиоксаля. Дан обзор основных методов создания и совершенствования катализаторов, содержащих оксиды РЗЭ.

1.1 Глиоксаль и его производные

Химически чистый глиоксаль $C_2H_2O_2$ существует в транс-или цис-форме и представляет собой растворимую в воде, спирте и эфире слабо окрашенную жидкость желтоватого цвета. Химическое название глиоксаля – этандиаль. Температура плавления – (15 °С). Широкое применение глиоксаля в большей степени обусловлено его низкой токсичностью. Глиоксаль достаточно легко окисляется на свету и воздухе в отсутствие антиоксидантов. Стабильным соединением глиоксаля является его бисульфитное производное. Товарный глиоксаль на мировом рынке производится в виде очищенного 40% водного раствора (ТУ 2633-003-67017122-2011).

Способы каталитического окисления согласно [1]:

- ферментативное окисление органического субстрата;
- свободнорадикальное автоокисление, инициированное переходными катионами Me;
- окисление координированных субстратов ионами металлов;
- перенос кислорода к органическому субстрату внутри металл-оксо-комплекса;
- окислительное дегидрирование на поверхности металла.

Последний способ представляется наиболее перспективным для производства глиоксаля, поскольку он является наименее опасным для окружающей среды. В 1951 годы были опубликованы первые сведения о промышленной установке для синтеза глиоксаля из этиленгликоля [2].

В работах [3,4] авторами была изучена природа химического взаимодействия на металлической поверхности, выделены особенности процесса окислительного дегидрирования этиленгликоля до глиоксаля.

Дегидрирование протекает по схеме:

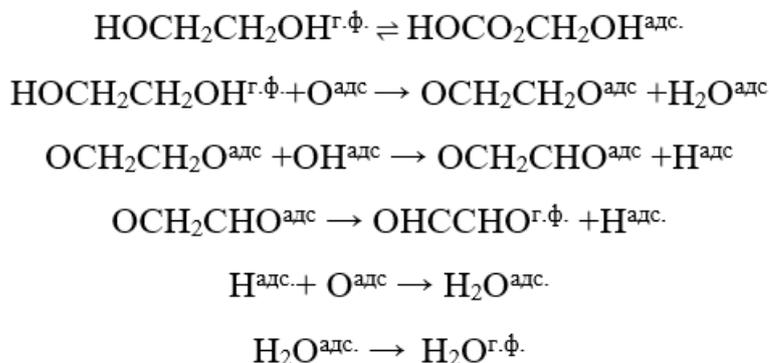


Рисунок 1.1 – Схема процесса дегидрирования этиленгликоля до глиоксаля.

Авторами [5] были описаны основные принципы окисления этиленгликоля в газовой фазе на различных трегерных и массивных металлических катализаторах.

В таблице 1.1 представлены патентные исследования в области синтеза глиоксаля.

Таблица 1.1 - Патентные исследования в области синтеза глиоксаля

№ п/п	№ патента	Авторы изобретения	Описание
1	GB 140.478	Edward Charles, Robert Marks (GB)	Глиоксаль получают окислением ацетилена воздухом в присутствии разбавителей (воздух, Н ₂ , СО ₂) и паров воды.
2	GB 516.740	William W Groves (GB)	Из растворов моно- и полимерного глиоксаля выделяют тетраацитат глиоксаля, переводят его в соответствующий тетраацеталь, который затем омыляют сильной минеральной кислотой, этерифицируют уксус кислотой и перегоняют, получая чистый водный глиоксаль (выход 96 % от теоретического).
3	GB 836.828	Farbwerke Hoechst AG	Орошение оксида циркулирующей водой в двух насадочных колоннах на кольцах Рашига.
4	GB 1.041.376	Rolf P., Werner F.	Глиоксаль получают, окисляя этилен азотной кислотной (2-20 % от реакционной массы). Водный раствор глиоксаля, содержащий

			полупродукты, очищают на ионообменных смолах.
5	US 3.948.997	Brian K., Francis R.	В паровой фазе э.г. реагирует с глиоксалем в эквимольных количествах образуя 2,3-гидроксидиоксан. Фракция, содержащая азот, смешивается с чистым э.г. при 300 °С. Распыляясь через форсунки 2,3-гидроксидиоксан диссоциирует на э.г. и глиоксаль. Формальдегид отдувают абгазом при 100 °С.

1.2 Использование катализаторов на основе РЗЭ

Катализаторы на основе оксидов РЗЭ все чаще используются в качестве носителей в процессах органического и неорганического синтеза.

В работе Дроботу Д. В. [6] описываются возможности использования редких металлов в создании автомобильных катализаторов, содержащих в качестве основных компонентов платиноиды и оксиды РЗЭ, преимущественно CeO_2 [7].

В работах [8–10] описывается использование катализаторов на основе РЗЭ в процессе нефтепереработки. В патенте [8] был предложен способ превращения алифатических углеводородов в высокооктановый бензиновый компонент в присутствии катализатора, содержащего оксиды РЗЭ. Авторами патента [9] описан способ получения моторных топлив путем крекинга нефтяных фракций в присутствии шарикового алюмосиликатного платиноцеолитсодержащего катализатора, который был активирован с использованием нитратов РЗЭ.

Для риформинга гептана с применением диоксида углерода используется в качестве катализатора $\text{Ru/La}_2\text{O}_3$. Данный катализатор быстро становится непригоден для работы [11]. В работе [12] было предложено использовать CeO_2 в качестве носителя для палладиевого катализатора при окислении диоксида углерода и метана. В дополнении к предыдущим исследованиям было установлено, что присутствие катализаторов на основе железа и кобальта, нанесенных на оксид алюминия с добавками РЗЭ в той же реакции, способствует уменьшению значения предэкспоненциального

множителя в основном уравнении теории активных столкновений Аррениуса в следствии уменьшения энергетического барьера реакции. Данный фактор должен позволить снизить температуру протекания процесса, как утверждают авторы работы [13].

В работе [14] была исследована активность катализаторов на основе оксидов РЗЭ, полученных методом осаждения гидроксидов из раствора нитратов, в реакциях полного окисления метана. Высокая активность катализаторов способствует протеканию реакции по механизму окислительной конденсации метана с последующим быстрым окислением образующихся промежуточных продуктов.

Влияния различных условий синтеза и соотношения компонентов на структуру, состав и каталитические свойства оксидных систем на основе РЗЭ отображено в работе [15]. Присутствие РЗЭ в системе при определенной концентрации способствует расширению спектра составов, в которых сохраняется структура флюорита. С повышением температуры синтеза катализаторов, уменьшается удельная поверхность образцов. Наличие РЗЭ либо увеличивает удельную поверхность системы, либо делает ее более устойчивой к термообработке.

В работах [16,17] изучено влияние состава систем оксида железа, содержащих РЗЭ, на каталитическую активность в реакции окисления диоксида углерода. Изучены закономерности получения и состав железоцерийоксидных систем, а также их каталитическая активность в реакции синтеза стирола.

В работе [18] авторами был предложен метод получения катализаторов путем нанесения ионов РЗЭ на образцы алюмосиликатного цеолита. Полученные катализаторы проявляли высокую каталитическую активность в реакциях алкилирования толуола метанолом. Повышенная селективность в реакциях алкилирования объясняется наличием ионов РЗЭ, которые образуют новые кислотные центры. Использование катализаторов на основе РЗЭ способствуют решению ряда экологических проблем, связанных с процессами

окисления выхлопных газов автомобилей. Было исследовано влияние присутствия диоксида церия, который используется в качестве носителя для платиновых катализаторов, на температурный режим реакции окисления диоксида углерода (CO_2) в оксид углерода (CO).

В работе [19] авторами были исследованы возможности развития производства катализаторов для очистки выхлопных газов в Китае и дано подробное описание получения катализаторов на основе РЗЭ, соответствующих современным требованиям для двигателей внутреннего сгорания.

В работе [20] было предложено использование оксида гадолиния для получения катализатора селективного каталитического восстановления оксидов азота, в качестве альтернативы ванадию. Каталитически активное покрытие состоит полностью или частично из смешанного оксида церия и оксида циркония. Смешанный оксид церия и циркония «легируют» оксидом редкоземельного элемента, выбранным из группы, включающей скандий, иттрий, лантан, празеодим, неодим, самарий, европий и гадолиний или смеси их оксидов.

В работе [21] методом соосаждения была получена система смешанных оксидных порошков $\text{CeO}_2\text{-ZrO}_2\text{-MeO}_x$ (Me - редкоземельные металлы), а также изучена зависимость введения оксидов РЗЭ на величину удельной поверхности. Было установлено, что при $1000\text{ }^\circ\text{C}$ оксиды РЗЭ практически не снижают удельную поверхность катализаторов.

Исследования в этой области не ограничиваются только созданием новых катализаторов. Например, авторы патента [22] предлагают новый подход приготовления катализаторов на основе оксидов РЗЭ в качестве носителей с использованием воды в субкритическом и сверхкритическом состояниях.

1.3 Заключение по литературному обзору

Таким образом, в результате рассмотрения имеющихся данных в литературных источниках были показаны основные способы получения глиоксаля и его производных, продемонстрирована высокая каталитическая активность оксидов РЗЭ, которая способствует созданию новых каталитических систем с их участием для процесса синтеза глиоксаля. Оптимальным, по нашему мнению, является способ получения катализаторов на основе РЗЭ методом осаждения гидроксидов из раствора нитратов. Обоснования выбора данного метода изложено в следующем подразделе.

1.4 Теоретические и экспериментальные исследования

В исследовательской части магистерской диссертации представлена методика получения в лабораторных условиях систем высокоэнтропийных оксидов на основе РЗЭ. Исследованы свойства полученных порошков. Систематизированы данные по расчету основных продуктов для синтеза ВЭОС на основе РЗЭ в полупромышленных масштабах. Представлен выбор оборудования.

1.4.1 Теоретические аспекты и выбор методики получения ВЭОС на основе РЗЭ

Высокоэнтропийные оксидные системы (ВЭОС) – системы, содержащие более трех компонентов с равномерным распределением ионов в кристаллической решетке, для которых характерны повышенные значения энтропии смешения. Основная идея получения ВЭОС исходит из области высокоэнтропийных сплавов (ВЭС). ВЭС обладают рядом важных механических, физических (магнитная, проводимость) и химических (коррозионная стойкость) свойств по сравнению с обычными сплавами с одним или двумя основными элементами. В таких металлических системах энтропия смешения термодинамически стабилизирует однофазный твердый раствор, уменьшая свободную энергию Гиббса. Кинетика фазового превращения в ВЭС медленнее, чем у обычных сталей. Такое поведение объясняется медленной диффузией. Процесс диффузии в ВЭС протекает

медленно из-за сложных взаимодействий между легирующими элементами и высокой энергией активации. Взаимосвязь между конфигурационной энтропией и энтальпией смешения является ключевым фактором для определения фазовых превращений. По аналогии с ВЭС можно ожидать похожего эффекта в оксидных системах.

Одним из важных направлений современных исследований в области синтеза ВЭОС и материалов на их основе является разработка и совершенствование конкретных методик их получения. Выбор методов синтеза таких материалов влияет на состав, структуру, размеры частиц и определяет технологичность процесса их получения. Перспективными по сравнению с высокотемпературными методами твердофазного синтеза являются так называемые методы «мягкой химии» или растворные методы. В последнем случае возможно получение различных форм простых и сложных по составу оксидов на основе РЗЭ, в том числе наноразмерных оксидов в виде порошков. Также, данный способ позволяет моделировать свойства ВЭОС путем изменения количества РЗЭ, входящих в систему и их концентраций. В совокупности все эти признаки стали основополагающими для выбора методики получения оксидных порошков в производстве катализаторов для процесса синтеза глиоксаля.

Стоит отметить, что из многих редкоземельных оксидов, оксид церия (CeO_2) наиболее часто применяется из-за его широкой запрещенной зоны и нестехиометричности. Наблюдаемая нестехиометричность возникает из-за присутствия кислородных вакансий, что делает CeO_2 отличным материалом для блокаторов УФ-излучения, газовых датчиков, ёмкостей для хранения кислорода и катализаторов.

Выбор РЗЭ входящих в систему высокоэнтропийных оксидов осуществлялся эмпирическим способом. В качестве основных элементов в системе были выбраны Рг и Се. Обоснование и методика выбора остальных элементов в настоящем диссертационном исследовании описаны не будут ввиду уникальности разработки.

1.4.2 Синтез ВЭОС в лабораторных условиях

Синтез ВЭОС на основе РЗЭ условно может быть разделен на пять стадий (рис. 1.2). В качестве исходных веществ были использованы: $\text{Sc}(\text{NO}_3)_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Pr}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Gd}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, $\text{Ho}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, NaOH .

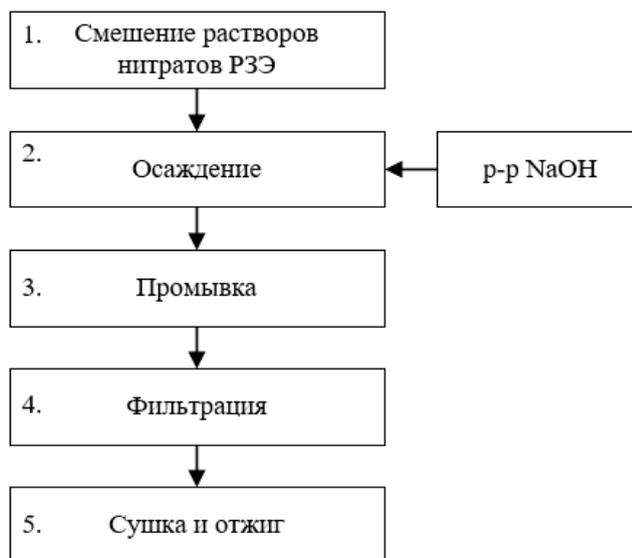


Рисунок 1.2 – Общая схема стадий синтеза ВЭОС

Синтез ВЭОС $(\text{Sc}_{0.2}\text{Ce}_{0.2}\text{Pr}_{0.2}\text{Gd}_{0.2}\text{Ho}_{0.2})_2\text{O}_{3\pm\delta}$ с теоретическим выходом продукта в количестве 1.6 г.

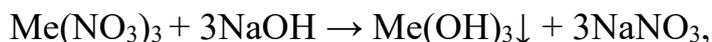
Первая стадия – смешение водных растворов нитратов РЗЭ. Одно из условий получения данных ВЭОС – равные мольные соотношения каждого компонента в системе. Объем аликвоты (V_a) был рассчитан исходя из концентраций растворов нитратов РЗЭ и количества молей (0.002). Концентрации исходных растворов и объем аликвоты (V_a) приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Концентрация и объем аликвоты (V_a) необходимый для приготовления смеси растворов нитратов РЗЭ

Нитраты РЗЭ	Концентрация (ммоль/мл)	V_a (мл)
Sc(NO ₃) ₃ *4H ₂ O	0,330	6,060
Ce(NO ₃) ₃ *6H ₂ O	0,229	8,700
Pr(NO ₃) ₃ *6H ₂ O	0,230	8,680
Gd(NO ₃) ₃ *5H ₂ O	0,230	8,660
Ho(NO ₃) ₃ *5H ₂ O	0,226	8,820

Смешение растворов осуществлялось в стакане объемом 250 мл на магнитной мешалке в течение одного часа при комнатной температуре.

Вторая стадия - осаждение гидроксидов из смеси азотнокислых растворов РЗЭ. Процесс осаждения в общем виде описывается химической реакцией:



где Me = Sc, Ce, Pr, Gd, Ho.

Осаждение проводилось раствором NaOH, который интенсивно перемешивался на магнитной мешалке. Объем раствора NaOH, взятый с 10-и процентным избытком для полного осаждения смеси гидроксидов РЗЭ данной системы рассчитывали исходя из максимального pH осаждения гидроксидов из раствора нитратов в системе [23].

Таблица 1.3 – Условия осаждения гидроксидов из нитратных растворов

Элемент	pH осаждения гидроксида из раствора нитрата	ПР Ln(OH) ₃ (25 °C)	Растворимость, моль/л
La	7,82	$1,0 \cdot 10^{-19}$	$8,8 \cdot 10^{-6}$
Ce	7,60	$1,5 \cdot 10^{-20}$	
Pr	7,35	$2,7 \cdot 10^{-20}$	
Nd	7,31	$1,9 \cdot 10^{-21}$	
Sm	6,92	$6,8 \cdot 10^{-22}$	
Eu	6,82	$3,4 \cdot 10^{-22}$	
Gd	6,83	$2,1 \cdot 10^{-22}$	

Er	6,75	$1,3 \cdot 10^{-23}$	
Tu	6,40	$3,3 \cdot 10^{-24}$	
Yb	6,30	$2,5 \cdot 10^{-24}$	
Lu	6,30	$1,0 \cdot 10^{-25}$	$0,5 \cdot 10^{-6}$

Избыток раствора NaOH рассчитывали умножением стехиометрического весового количества на принятую величину его избытка. Чтобы сократить время протекания реакции необходимо единоразово, при интенсивном перемешивании, влить смесь азотнокислых растворов РЗЭ в раствор NaOH. Данный метод условно назвали «обратным» методом синтеза. Образовавшийся в результате смешения раствор с осадком гидроксидов РЗЭ выдерживали в течение двух часов при комнатной температуре.

Третья стадия – промывка раствора дистиллированной водой до pH = 8. Измерение pH проводили потенциометрическим методом на приборе «рН-метр рН-150МИ». Объем промывочной дистиллированной воды составил более 500 мл. Присутствие нитрат-ионов определяли с помощью качественной реакции с дифениламином (рис. 1.3).

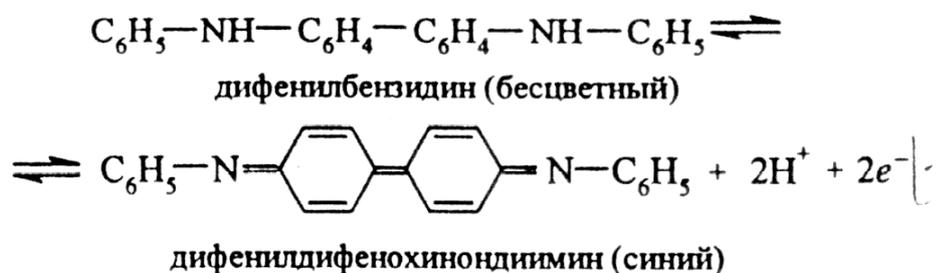


Рисунок 1.3 - Качественная реакция с дифениламином

Эта реакция основана на окислении дифениламина. При этом вначале образуется бесцветный дифенилбензидин, который при дальнейшем окислении превращается в хиноидное производное дифенилбензидина, имеющее синюю окраску.

Четвертая стадия – фильтрация раствора. Процесс фильтрации проводили с помощью вакуумной воронки Бюхнера и колбы Бунзена на

фильтрах «синяя лента». Общее время промывки и фильтрации составило 8 часов.

Пятая стадия – сушка и отжиг гелеобразной смеси оксидов РЗЭ. Сушку проводили в сушильных шкафах при температуре 70 °С в течение 12 часов. Отжиг проводили в муфельных печах при температуре 800 °С в течение часа. Практический выход оксидов составлял 97 - 99% от теоретического. Методика «прямого» синтеза включала в себя аналогичные стадии, что и методика «обратного» синтеза, но на второй стадии, наоборот, раствор NaOH вливали в смесь азотнокислых растворов РЗЭ. Последний метод оказался наименее эффективным с точки зрения чистоты конечного продукта.

Методом рентгенофазового анализа (РФА) «Дифрактометр ДРОН-3М» и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) «QUANTA 200 3D FEI» с системой рентгеновского энергодисперсионного микроанализа выполнены исследования фазового состава.

Результаты. Важным требованием, предъявленным к порошкам, является их однофазность. Структурные свойства системы ВЭОС $(\text{Sc}_{0.2}\text{Ce}_{0.2}\text{Pr}_{0.2}\text{Gd}_{0.2}\text{Ho}_{0.2})_2\text{O}_{3\pm\delta}$ были исследованы методом РФА в диапазоне 2θ от 15° до 95° с использованием небольшого шага (0.2°) и излучения Си-К α с длиной волны 0.154 нм. (рис. 1.4).

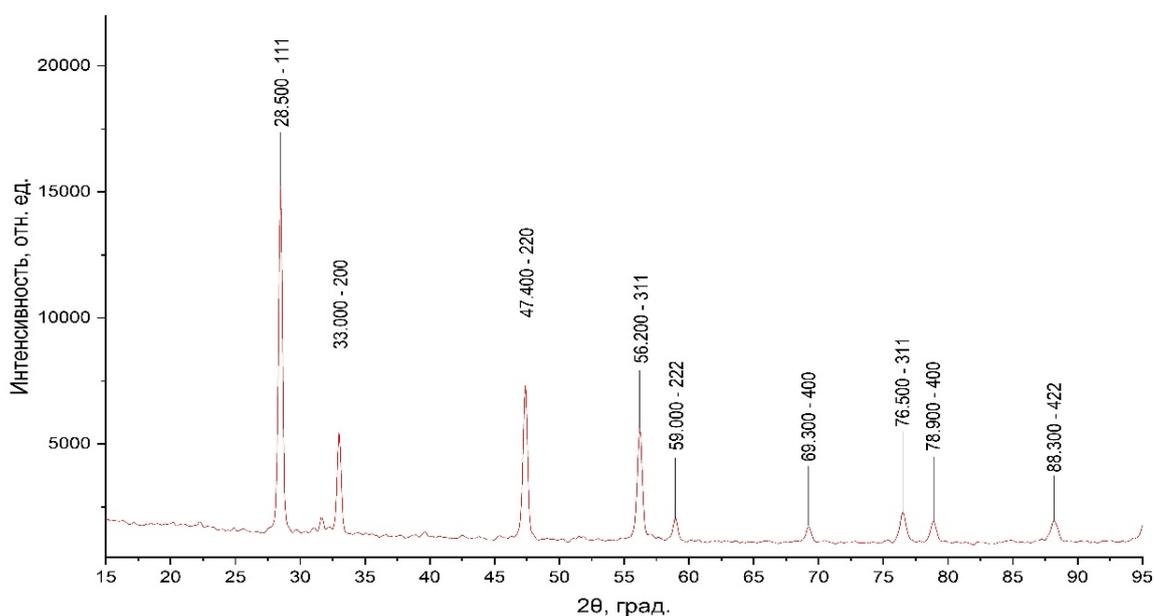


Рисунок 1.4 - Рентгенограмма ВЭОС $(\text{Sc}_{0.2}\text{Ce}_{0.2}\text{Pr}_{0.2}\text{Gd}_{0.2}\text{Ho}_{0.2})_2\text{O}_{3\pm\delta}$

На рентгенограмме представлены выраженные пики 28.5, 33.0, 47.4, 56.2, 59.0, 69.3, 76.5, 78.9, 88.3 при угле 2Θ (табл. 1.4). Все дифракционные пики соответствовали кристаллическим плоскостям (111), (200), (220), (311), (222), (400), (311), (400) и (422). Средние размеры кристаллов системы ВЭОС $(\text{Sc}_{0.2}\text{Ce}_{0.2}\text{Pr}_{0.2}\text{Gd}_{0.2}\text{Ho}_{0.2})_2\text{O}_{3\pm\delta}$ определяли по ширине пиков с использованием уравнения Шеррера. Средние размеры кристаллов полученного образца составили от 13.4 до 15.7 нм. Полученные рентгенограммы сравнивали со стандартными данными для CeO_2 (JCPDS file No. 34-0394). Характерные пики очень близки к гранецентрированной кубической решетке CeO_2 . Это указывает на то, что все образцы могут быть идентифицированы как оксид церия со структурой кубического флюорита. Параметры решетки полученного образца ВЭОС $(\text{Sc}_{0.2}\text{Ce}_{0.2}\text{Pr}_{0.2}\text{Gd}_{0.2}\text{Ho}_{0.2})_2\text{O}_{3\pm\delta}$ равны $a = 0.54181$ нм. Эти параметры решетки схожи со стандартными параметрами для CeO_2 (0.54111 nm) (рис. 1.5).

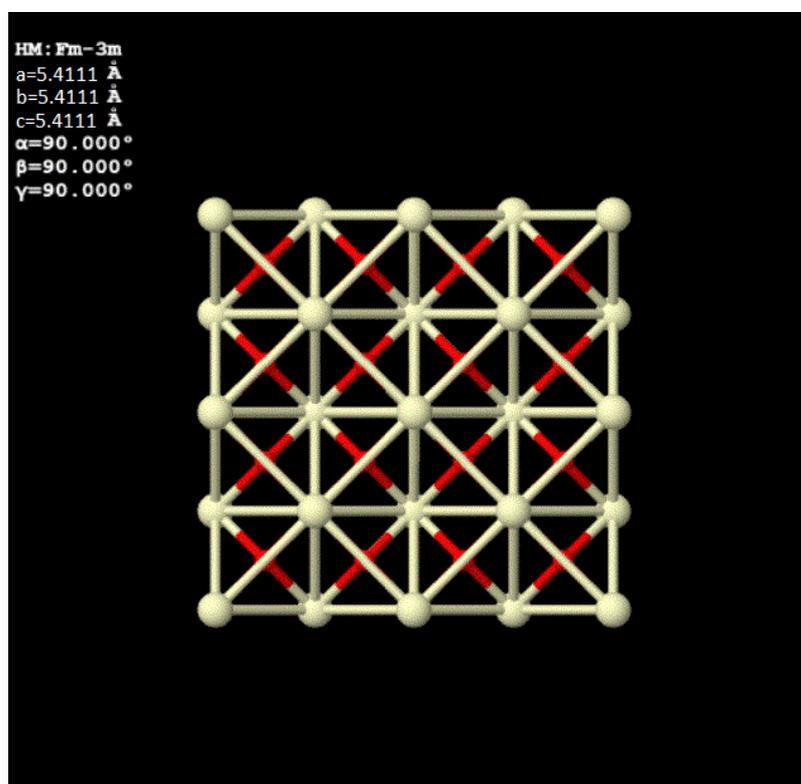


Рисунок 1.5 – Кристаллическая решетка CeO_2

Таблица 1.4 – Результаты рентгенофазового анализа

2θ	d, Å	FWHM, °	Area ^A	Area ^R	CeO ₂ Кубическая a=5.41 Å;
28.500	3,1291	0.2150	2988.83	1.000	111
33.000	2,7120	0.2150	976.65	0.327	200
47.400	1,9163	0.2150	1446.39	0.484	220
56.200	1,6353	0.2150	1108.70	0.371	311
59.000	1,5642	0.2150	247.03	0.083	222
69.300	1,3547	0.2150	171.72	0.057	400
76.500	1,2442	0.2150	353.02	0.118	311
78.900	1,2122	0.2150	228.51	0.076	400
88.300	1,1058	0.2150	211.06	0.071	422

Химический состав полученных порошков $(Sc_{0.2}Ce_{0.2}Pr_{0.2}Gd_{0.2}Ho_{0.2})_2O_{3\pm\delta}$ определяли методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДС); результаты представлены на рисунке 1.6. Спектры ЭДС четко указывают на то, что все ионы РЗЭ присутствуют в образце в состоянии окисления 3^+ , за исключением Ce и Pr, которые присутствуют в (4^+) и в смешанном $(3^+/4^+)$ состояниях окисления соответственно. Присутствие Ce^{4+} существенно влияет на наблюдаемую стабильность однофазной структуры. Эти новые оксидные системы имеют узкие прямые и непрямые запрещённые зоны, что позволяет поглощать свет во всем видимом спектральном диапазоне. Кроме того, концентрация вакансий кислорода быстро возрастает, а затем насыщается РЗЭ, которые включены в систему. Обнаружено, что снижение ширины запрещенной зоны тесно связано с наличием поливалентного Pr. Учитывая наличие кислородных вакансий и низкую ширину запрещённой зоны, эти новые оксидные системы могут иметь важное значение, когда присутствие кислородных вакансий является существенным или в тех случаях, когда желательна узкая ширина запрещённой зоны.

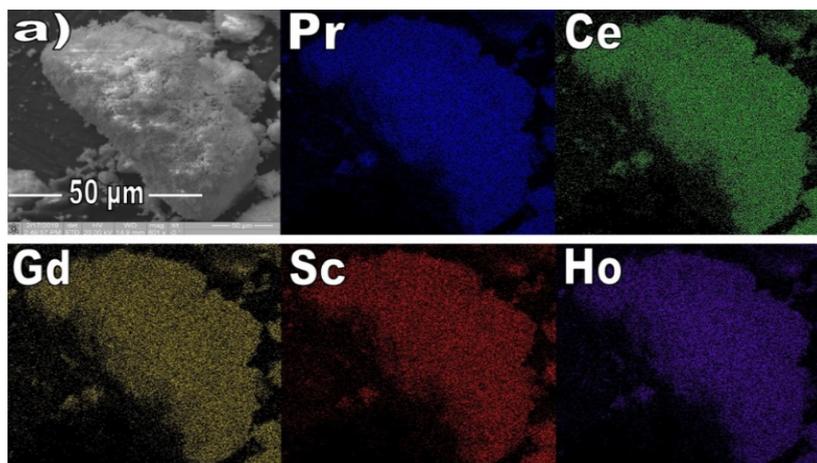


Рисунок 1.7 - СЭМ изображение морфологии (а) и карты распределения элементов по поверхности образца

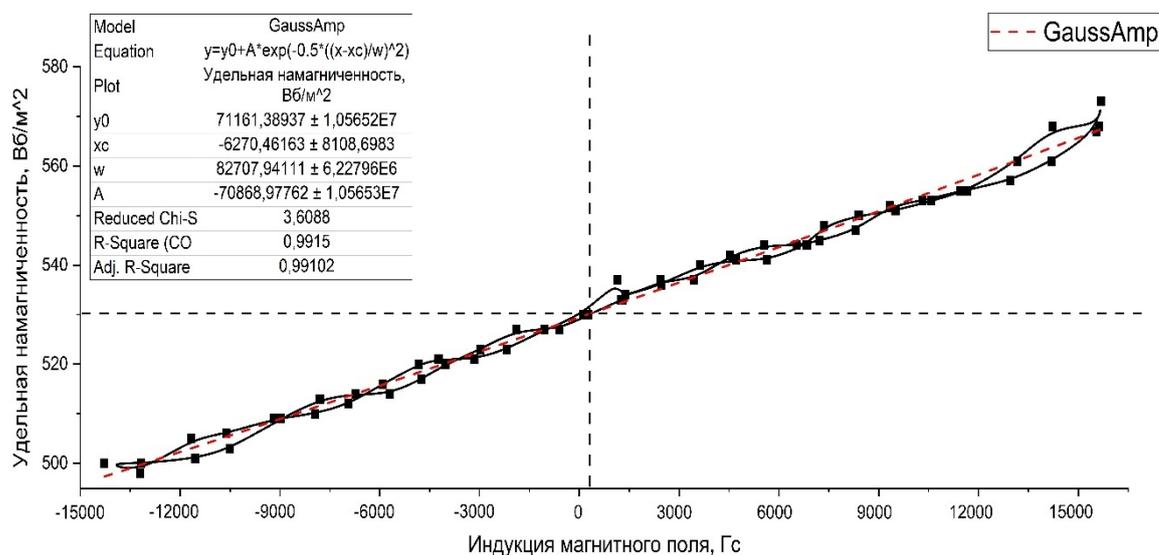


Рисунок 1.8 – Магнитные характеристики ВЭОС $(Sc_{0.2}Ce_{0.2}Pr_{0.2}Gd_{0.2}Ho_{0.2})_2O_{3\pm\delta}$

Полученный порошок является парамагнетиком согласно данным индукционного магнитометра (рис. 1.8).

В таблице 1.5 приведены данные по расчету основных параметров для приготовления смеси растворов нитратов РЗЭ в лабораторных и полупромышленных условиях, и расчетная теоретическая масса полученных после отжига оксидных порошков.

Таблица 1.5 – Расчетные данные для лабораторных и полупромышленных условий

Лабораторные условия			
Нитраты РЗЭ	m, г	V, мл	V _a , мл
Sc(NO ₃) ₃ *4H ₂ O	1,00	10,00	6,06
Ce(NO ₃) ₃ *6H ₂ O	1,00	10,00	8,70
Pr(NO ₃) ₃ *6H ₂ O	1,00	10,00	8,68
Gd(NO ₃) ₃ *5H ₂ O	1,00	10,00	8,66
Ho(NO ₃) ₃ *5H ₂ O	1,00	10,00	8,82
Итого:	5,00	50,00	41,00
Полупромышленные условия			
Sc(NO ₃) ₃ *4H ₂ O	2 500,00	25 000,00	15 150,00
Ce(NO ₃) ₃ *6H ₂ O	2 500,00	25 000,00	21 750,00
Pr(NO ₃) ₃ *6H ₂ O	2 500,00	25 000,00	21 700,00
Gd(NO ₃) ₃ *5H ₂ O	2 500,00	25 000,00	21 650,00
Ho(NO ₃) ₃ *5H ₂ O	2 500,00	25 000,00	22 050,00
Итого:	12 500	125 000,00	102 300,00
Масса оксидного порошка (Sc _{0.2} Ce _{0.2} Pr _{0.2} Gd _{0.2} Ho _{0.2}) ₂ O _{3+δ} после отжига			
Лабораторные условия		Полупромышленные условия	
1,56		4465,71	

1.5 Выбор аппаратного оформления для полупромышленного синтеза ВЭОС на основе РЗЭ

Исходя из данных, приведённых в разделе 1.2 настоящей работы, наиболее эффективным для реализации и наиболее простым для расчёта является способ осаждения гидроксидов из раствора нитратов РЗЭ. Для реализации данного метода в полупромышленных масштабах было выбрано следующее оборудование:

- Для смешения водных растворов нитратов РЗЭ необходима ёмкость, снабжённая перемешивающим устройством. Наиболее удобное с точки зрения занимаемого пространства положение ёмкости – вертикальное.
- Для осаждения растворов нитратов РЗЭ необходим реактор с рубашкой и механическим перемешивающим устройством. Пригодность рубашки обуславливается возможностью влиять на процесс получения гидроксидов РЗЭ путем изменения температуры.

- Полученные в результате осаждения растворов нитратов гидроксиды РЗЭ необходимо тщательно промыть и отфильтровать. Промывку и фильтрацию гидроксидов целесообразнее всего проводить на фильтрах. Для реализации этих процессов был выбран нутч-фильтр открытого типа.

- Процесс сушки осуществляется в сушильных камерах при температуре 70 °С в течение 12 часов.

- Отжиг проводится в муфельных печах при температуре 800 °С в течении часа.

Выводы по разделу:

В результате лабораторных исследований была получена ВЭОС ($\text{Sc}_{0.2}\text{Ce}_{0.2}\text{Pr}_{0.2}\text{Gd}_{0.2}\text{Ho}_{0.2}$) $_2\text{O}_{3\pm\delta}$ методом осаждения водных растворов нитратов РЗЭ. Было установлено, что комбинация Се и Рг в системе обеспечивает большую гибкость при моделировании количества дефектов (вакансий кислорода) и позволяет предсказывать свойства системы (путем добавления необходимых катионов РЗЭ) без ущерба для чистоты фазы. Фазовый состав, структура и морфология поверхности полученных порошков были определены методами РФА, СЭМ и ЭДС; исследованы магнитные свойства системы. Были рассчитаны основные параметры для приготовления смеси растворов нитратов РЗЭ в лабораторных и полупромышленных условиях.

Был произведен выбор аппаратов для полупромышленного синтеза ВЭОС. Основными аппаратами, подлежащими автоматизированному расчёту, приняты: химический реактор периодического действия с перемешивающим устройством и нутч-фильтр. В следующем разделе настоящей магистерской диссертации будет рассмотрена технологическая схема процесса синтеза ВЭОС на основе РЗЭ.

2 Технологическая схема установки по производству ВЭОС на основе РЗЭ

2.1 Описание технологической схемы производства ВЭОС на основе РЗЭ

Технологическая схема производства ВЭОС на основе РЗЭ отражена на рисунке 2.1

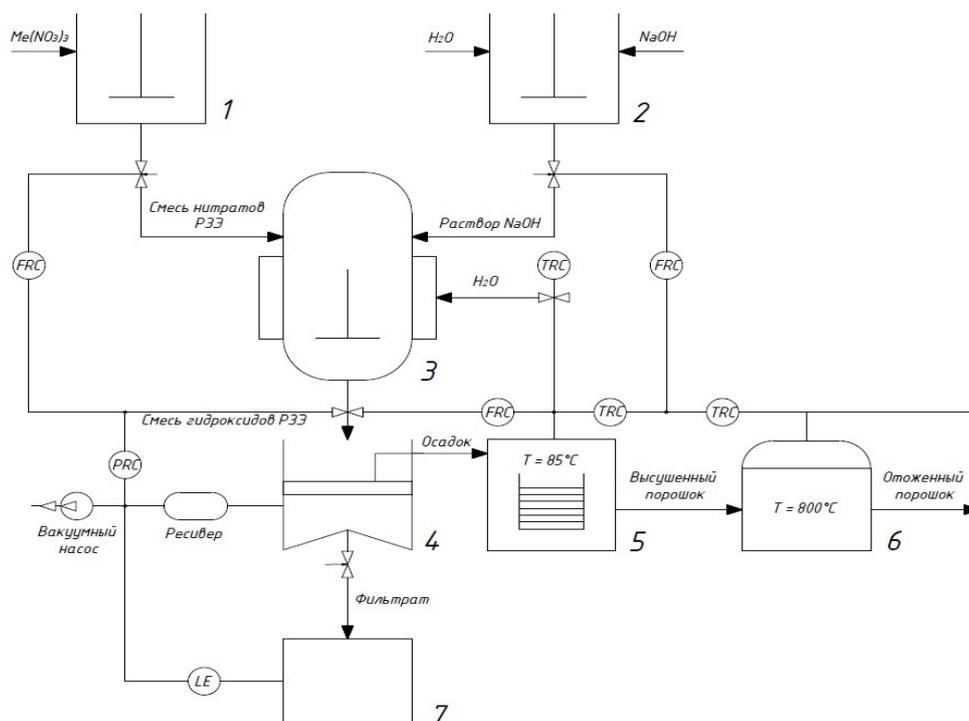


Рисунок 2.1 - Технологическая схема производства ВЭОС на основе РЗЭ

Растворы нитратов РЗЭ смешивают в эквимольных количествах в емкости с мешалкой 1. Во второй емкости (2) приготавливают 0.5М раствор NaOH. В реактор 3 сначала загружают раствор NaOH, затем загружают приготовленную смесь нитратов РЗЭ. Полученная смесь гидроксидов РЗЭ поступает на нутч-фильтр 4. Фильтрат отделяется в емкость 7, а осадок высушивают в сушильном шкафу (5) при температуре 80-85 °С до полного удаления влаги. Высушенный осадок отжигают в муфельной печи при температуре 800 °С в течение часа. В результате получают оксидный порошок, который используется в качестве катализатора процесса синтеза глиоксаля.

3 Технологические расчёты реактора и нутч-фильтра для синтеза ВЭОС на основе РЗЭ

В данном разделе приведён технологический расчёт основных аппаратов схемы: реактора для синтеза ВЭОС и нутч-фильтра. Технологический расчёт состоит из следующих частей:

- материальный баланс реактора и нутч-фильтра;
- гидродинамический расчёт реактора и нутч-фильтра;
- конструктивный расчёт реактора и нутч-фильтра.

В соответствии с этим целями технологического расчёта являются:

- для материального баланса - определение основных материальных потоков и объёма реактора, выбор соответствующего внутреннего диаметра, выбор нутч-фильтра;
- для гидродинамического расчёта - определение параметров гидродинамического режима аппарата в соответствии с процессом, выбор перемешивающего устройства, стойки, типа привода и мотор-редуктора;
- для конструктивного расчёта - выбор диаметров основных технологических штуцеров для ввода и отвода веществ.

3.1 Материальный баланс процесса синтеза ВЭОС на основе РЗЭ

Таблица 3.1 - Материальный баланс процесса смешения водных растворов нитратов РЗЭ

Приход на операцию				Расход на операцию			
Состав	Массовая доля, %	кг	м ³	Состав	Массовая доля, %	кг	м ³
1. Загрузка водных растворов нитратов РЗЭ в т.ч.:				1. Выгрузка смеси нитратов РЗЭ			
Sc(NO ₃) ₃ *4H ₂ O	14,809	15,80	0,015	Me(NO ₃) ₃	100	109,826	0,102
Pr(NO ₃) ₃ *6H ₂ O	21,261	23,33	0,021				
Ce(NO ₃) ₃ *6H ₂ O	21,212	24,30	0,021				
Gd(NO ₃) ₃ *5H ₂ O	21,163	23,18	0,021				
Ho(NO ₃) ₃ *5H ₂ O	21,554	23,19	0,022				
Всего:	100	109,826	0,102	Всего:	100	109,826	0,102

Таблица 3.2 - Материальный баланс процесса получения гидроксидов РЗЭ в реакторе

Приход на операцию					Расход на операцию		
Состав	Массовая доля, %	кг	м ³	G, кг/ч	Состав	Массовая доля, %	G, кг/ч
1. Загрузка раствора щелочи					1. Выгрузка гелеобразной смеси гидроксидов РЗЭ		
р-р NaOH	12,56	16,12	0,01	4528,8	Me(OH)3	100	13283,99
3. Загрузка смеси нитратов РЗЭ							
Me(NO3)3	87,44	109,82	0,1023	8755,19			
Всего:	100	125,95	0,11	13283,99	Всего:	100	13283,99

Таблица 3.3 - Материальный баланс процесса фильтрации гидроксидов РЗЭ

Приход на операцию					Расход на операцию		
Состав	Массовая доля, %	кг	м ³	G, кг/ч	Состав	Массовая доля, %	G, кг/ч
1. Загрузка смеси гидроксидов РЗЭ					1. Выгрузка гелеобразной смеси гидроксидов РЗЭ		
Me(OH)3	16,4	125,95	0,11	13283,99	82,26	15,3	2300,23
2. Загрузка промывочной воды					2. Выгрузка р-ра NaNO3 + пром. вода.		
H2O	83,6	99,98	0,1	12076,35	32,45	84,7	365,4
Всего:	100	225,93	0,21	25360,34	Всего:	100	25360,34

3.1.1 Расчет объема реактора в соответствии с материальным балансом

Исходные данные:

Массовые доли (%) и плотность компонентов в смеси, кг./м.куб:

Sc(NO ₃) ₃ *4H ₂ O _____	x ₁ := 17.488	ρ ₁ := 1043
Pr(NO ₃) ₃ *6H ₂ O _____	x ₂ := 17.488	ρ ₂ := 1073
Ce(NO ₃) ₃ *6H ₂ O _____	x ₃ := 17.488	ρ ₃ := 1120
Gd(NO ₃) ₃ *5H ₂ O _____	x ₄ := 17.488	ρ ₄ := 1071
Ho(NO ₃) ₃ *5H ₂ O _____	x ₅ := 17.488	ρ ₅ := 1052
р-р NaOH _____	x ₆ := 12.56	ρ ₆ := 1290
Расход по загрузке, кг./ч _____	G := 13284	
Коэффициент заполнения аппарата _____	φ = 0.75	
Время загрузки компонентов, сек _____	t _{заг} := 80	

$$\rho_{\text{см}} := \frac{1}{\left(\frac{x_1 \cdot \%}{\rho_1}\right) + \left(\frac{x_2 \cdot \%}{\rho_2}\right) + \left(\frac{x_3 \cdot \%}{\rho_3}\right) + \left(\frac{x_4 \cdot \%}{\rho_4}\right) + \left(\frac{x_5 \cdot \%}{\rho_5}\right) + \left(\frac{x_6 \cdot \%}{\rho_6}\right)} = 1.094 \times 10^3$$

Расход по загрузке аппарата принимаем согласно материальному балансу $G = 13284$ кг/ч, коэффициент заполнения аппарата принимаем равным $\phi = 0,85$. Тогда объем реактора, м^3 :

$$V_p := \frac{G}{\rho_{\text{см}} \cdot t_{\text{заг}}} \cdot \phi = 0.1138$$

Рабочий объем реактора принимается на 15 – 20% больше, чем расчетный. Из технических соображений выбираем конструкцию аппарата с эллиптической крышкой и днищем. Принимаем ближайший стандартный объем равным 0.16 м^3 . Общая конструкция аппарата отражена на рисунке 3.1.

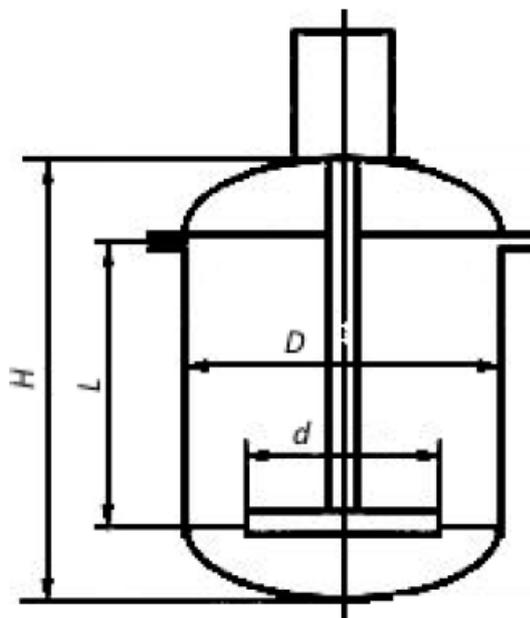


Рисунок 3.1 – Аппарат с перемешивающим устройством и эллиптическими крышкой и днищем

В соответствии со стандартом и исходя из конструкторских соображений принимаем: $D = 600$ мм, $H = 600$ мм, $L = 300$ мм.

3.1.2 Гидродинамический расчет аппарата с внутренними устройствами

Целью гидродинамического расчета является определение усредненных характеристик поля скоростей в объеме аппарата, значений осевой и радиальной сил, действующих на мешалку, глубины воронки и мощности перемешивания.

Исходные данные:

Диаметр аппарата, м _____	$D := 0.6$
Высота заполнения аппарата средой, м _____	$H_1 := 0.42$
Плотность жидкой фазы суспензии, кг./м.куб _____	$\rho_{ж} := 1092$
Плотность материала взвешанных частиц, кг./м.куб _____	$\rho_T := 2801$
Средний диаметр взвешанных частиц, м _____	$d_{cp} := 0.00001$
Концентрация твердой фазы в суспензии, масс. доли _____	$X_{cp} := 0.2$
Кинематическая вязкость перемешиваемой среды, м.кв/с _____	$\nu := 0.00001$
Ускорение свободного падения, м/с.кв _____	$g := 9.807$
Внутренние устройства _____	отражающие перегородки
Число отражающих перегородок _____	$Z_{оп} := 3$
Высота отражающей перегородки, м _____	$h_{оп} := 0.25$
Ширина отражающей перегородки, м _____	$b_{оп} := 0.05$
Число мешалок на валу _____	$z_M := 1$
Тип мешалки _____	турбинная
Коэффициент сопротивления мешалки _____	$\zeta_M := 8.4$
Диаметр мешалки, м _____	$d_M := 0.2$
Частота вращения мешалки, 1/с _____	$n := 3$

В результате лабораторных испытаний было установлено, что время протекания реакции напрямую зависит от состава конечного продукта. Таким образом, выбор турбинной мешалки обусловлен необходимостью интенсивного перемешивания реакционной смеси. Конструкция турбинной мешалки представлена на рисунке 3.2.

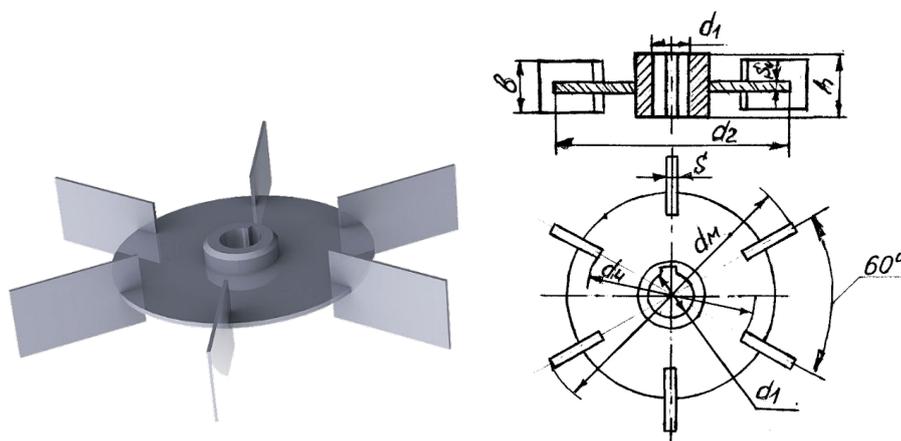


Рисунок 3.2 – Турбинная мешалка открытого типа

При перемешивании в аппарате суспензий при помощи быстроходных мешалок рекомендуется включить в конструкцию аппарата отражательные перегородки (рис. 3.3).

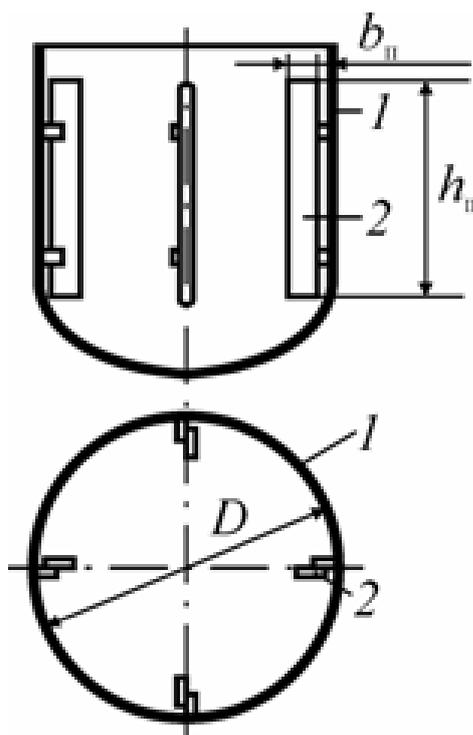


Рисунок 3.3 - Схема установки отражательных перегородок

Плотность суспензии, кг/м³:

$$\rho_c := \frac{\rho_T \cdot \rho_{ж}}{\rho_T - X_{ср} \cdot (\rho_T - \rho_{ж})} = 1243.775$$

Отношение диаметров аппарата и мешалки:

$$\Gamma_D := \frac{D}{d_M} = 3$$

Критерий Рейнольдса:

$$Re_{ц} := \frac{n \cdot d_M^2}{\nu} = 12000$$

Параметр высоты заполнения аппарата:

$$\gamma := 4 \cdot \frac{H_1}{D} + 1 = 3.8$$

Осредненное значение скорости потока:

$$V_{cp} := 4.35 \cdot n \cdot d_M \cdot \left(\frac{z_M \cdot \zeta_M}{\Gamma_D^2 \cdot \gamma} \right)^{\frac{1}{3}} = 1.635$$

Параметр сопротивления перегородок:

$$\theta := \frac{2 \cdot \Gamma_D \cdot Z_{оп} \cdot h_{оп}}{\zeta_M \cdot D \cdot z_M} \cdot \ln \left(\frac{D}{D - 2b_{оп}} \right) = 0.163$$

Коэффициент мощности K_1 принимаем равным 0,13. Коэффициент мощности K_N по принимаем равным 8.3. Тогда мощность, потребляемая мешалкой при перемешивании, Вт:

$$N := K_N \cdot \rho_c \cdot n^3 \cdot d_M^5 = 89.194$$

Необходимая мощность привода с учетом пусковых нагрузок принимается на 20% больше, то есть:

$$N_{п} := 1.2 \cdot N = 107.032$$

По результатам расчета выбираем МРВ02-0,75/180 с электродвигателем АИР71В4. Частота вращения вала $n = 180$ об/мин. Номинальная мощность $N_{ном} = 0,75$ кВт.

3.1.3 Конструктивный расчёт реактора синтеза ВЭОС на основе РЗЭ

Расчётный диаметр технологического штуцера:

$$d := \sqrt{\frac{4 \cdot G}{\pi \cdot \omega \cdot \rho}}$$

где G – массовый расход, кг/с; ω – скорость потока, м/с; ρ – плотность поступающего вещества, кг/м³.

Массовые расходы веществ определены в рамках материального баланса аппарата. Скорости потоков в соответствии с рекомендациями принимаются в интервале от 0,5 и до 2 м/с для жидкостей. Размеры стандартных штуцеров приведены в таблице 3.5.

Таблица 3.4 – Расчёт диаметров штуцеров

Обозначение	Назначение	G, кг/с	w, м/с	ρ , кг/м ³	d, м	Dy, м	s, мм	l, мм
А	Ввод смеси нитратов РЗЭ	2,432	2	1073	0,038	0,040	3,5	150
Б	Ввод р-ра NaOH	0,650	0,5	1290	0,036	0,040	3,5	150
В	Ввод теплоносителя	0,225	0,5	998	0,024	0,025	3,5	150
Г	Вывод продукта	2,530	0,5	2801	0,048	0,050	4	150
Д	Вывод теплоносителя	0,225	0,5	998	0,024	0,025	3,5	150
Е	Технологический штуцер					0,025	3,5	150
Ж	Технологический штуцер					0,025	3,5	150

3.2 Расчет и подбор нутч-фильтра в соответствии с материальным балансом

Расчет нутч-фильтра произведен на основе прямого моделирования результатов лабораторных испытаний.

Открытый нутч-фильтр, работающий под вакуумом, представляет собой резервуар, внутри которого расположена пористая подложка, называемая ложным дном. Пористая подложка поддерживает фильтрованную перегородку. Суспензия загружается в фильтр сверху, а в пространстве под подложкой создается разрежение при помощи вакуум-насоса. Благодаря этому возникает перепад давления по разные стороны фильтровальной перегородки, за счет чего жидкая фаза проходит через перегородку и в виде фильтрата попадает в нижнюю часть фильтра, после чего удаляется через штуцер. Дисперсная фаза суспензии задерживается на фильтровальной перегородке и образует слой осадка. Нутч-фильтр в случае необходимости может заполняться промывной жидкостью, с помощью которой проводится отмывка осадка. После окончания процесса фильтрации нутч-фильтр еще какое-то время остается под вакуумом, что позволяет уменьшить влажность осадка. После этого осадок может быть удален с фильтра вручную сверху.

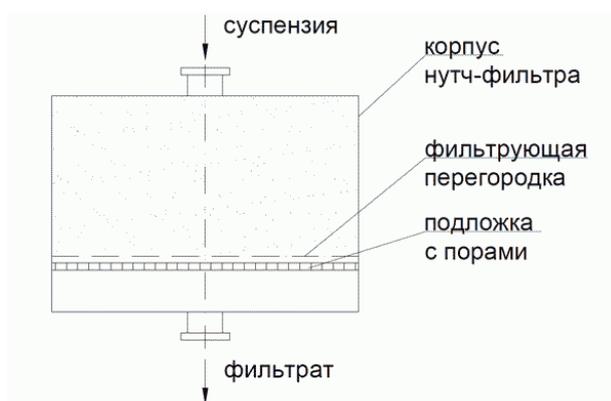


Рисунок 3.4 – Принципиальная схема работы нутч-фильтра

3.2.1 Расчет средней скорости фильтрования за цикл обработки суспензии

Исходные данные:

Плотность жидкой фазы суспензии, кг./м.куб _____ $\rho_{ж} := 1092$

Плотность материала взвешанных частиц, кг./м.куб _____ $\rho_{т} := 2801$

Концентрация твердой фазы в суспензии, масс. доли _____ $X_{ср} := 0.2$

Заданная массовая влажность осадка, масс. доли _____ $W := 0.4$

Производительность фильтра по суспензии, м³/сек _____ $G_c := 12.07$

Поверхность фильтра, м² _____ $F_{\phi} := 0.6$

Поправочный коэффициент сопротивления перегородки _____ $k_{п} := 0.8$

Поправочный коэффициент, учитывающий масштабный переход от лабораторной модели к промышленному фильтру $k_{м} := 0.7$

Плотность суспензии, кг/м³:

$$\rho_c := \frac{\rho_t \cdot \rho_{ж}}{\rho_t - X_{ср} \cdot (\rho_t - \rho_{ж})} = 1243.775$$

Плотность твердой и жидкой фазы суспензии, влажного осадка, кг/м³:

$$\rho_0 := \frac{\rho_t \cdot \rho_{ж}}{\rho_{ж} + W \cdot (\rho_t - \rho_{ж})} = 1722.624$$

Отношение объема осадка к объему полученного фильтрата, м³/м³:

$$x_0 := \frac{X_{ср} \cdot \rho_{ж}}{\rho_0 \cdot (1 - W - X_{ср})} = 0.317$$

Производительность фильтра по фильтрату, м³/сек:

$$V_{\phi} := \frac{G_c}{\rho_c \cdot (1 + x_0)} = 0.00737$$

Средняя скорость фильтрования за цикл обработки суспензии, м/с:

$$w_{ц} := \frac{V_{\phi}}{F_{\phi} \cdot k_{п} \cdot k_{м}} = 0.02193$$

3.2.2 Расчет времени цикла работы фильтра

Исходные данные:

Плотность жидкой фазы суспензии, кг./м.куб _____	$\rho_{ж} := 1092$
Плотность материала взвешанных частиц, кг./м.куб _____	$\rho_{т} := 2801$
Концентрация твердой фазы в суспензии, масс. доли _____	$X_{ср} := 0.2$
Заданная массовая влажность осадка, масс. доли _____	$W := 0.4$
Удельное сопротивление фильтрующей перегородки, 1/м _____	$R_{п} := 0.0021$
Динамическая вязкость фильтрата, МПа*с _____	$\mu := 1023$
Среднее массовое удельное сопротивление осадка, м/кг _____	$r_{т} := 0.0762$
Величина слоя осадка, м _____	$h_0 := 0.08$
Разность давлений для вакуум-фильтров, МПа _____	$\Delta p := 0.086$

Масса твердой фазы суспензии, оставшейся на перегородке после получения единицы объема (1 м^3) фильтрата, кг:

$$x_{т} := \frac{X_{ср} \cdot \rho_{ж} \cdot (1 - W)}{(1 - W - X_{ср})} = 327.6$$

Коэффициент b_1 :

$$b_1 := \frac{\mu \cdot x_{т} \cdot r_{т}}{2 \cdot \Delta p} = 1.485 \times 10^5$$

Коэффициент ν_0 :

$$\nu_0 := \frac{R_{п}}{x_{т} \cdot r_{т}} = 0.0000841$$

Продолжительность фильтрования, сек:

$$\tau := \frac{b_1 \cdot h_0}{x_0^2} \cdot (h_0 + 2 \cdot x_0 \cdot \nu_0) = 9464.798$$

Время промывки и время вспомогательных операций составляет: $\tau_{пр+во}$
= 4216 сек.

Время цикла работы фильтра:

$$\tau_{ц} := \tau_{пр.ос} + \tau = 13680.798$$

3.2.3 Выбор фильтрующей перегородки

К фильтрующим перегородкам предъявляются следующие основные требования:

- наличие сквозных пор, которые легко пропускают фильтрат и задерживают твердые частицы осадка;
- устойчивость к химическому воздействию суспензии и промывной жидкости;
- достаточная механическая прочность.

В большинстве фильтров применяют гибкие перегородки - прессованное волокно или ткань, уложенная на перфорированную поверхность, металлическая или полимерная сетка (рис. 3.4). В качестве материала перегородки была выбрана ткань фильтровальная полипропиленовая КС-34. Ткань устойчива к действию всех кислот, щелочей и органических растворителей.

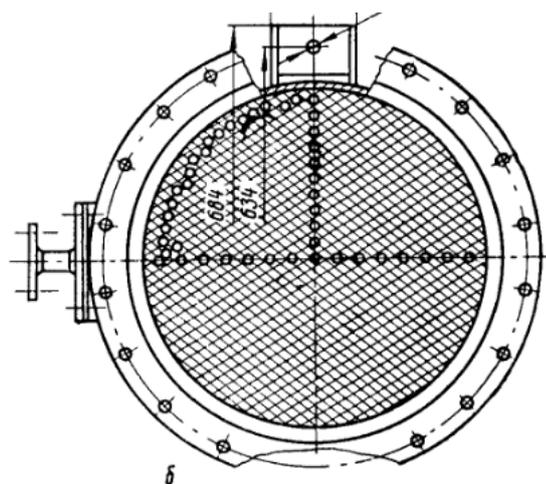


Рисунок 3.4 – Условное изображение металлической перфорированной поверхности нутч-фильтра

3.2.4 Выбор нутч-фильтра

На основе материального баланса с учетом свойств суспензии и осадка, требований к чистоте фильтрата и влажности осадка, экономических соображений был выбран нутч-фильтр периодического действия открытого типа условная схема которого представлена на рисунке 3.5.

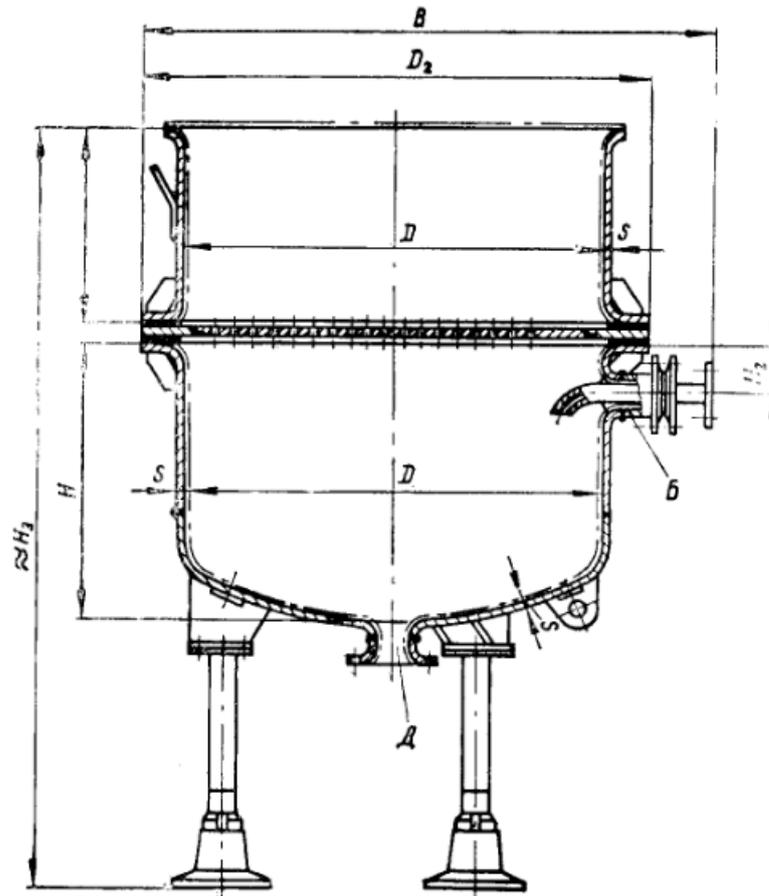


Рисунок 3.5 – Условная схема нутч-фильтра открытого типа

Принимаем площадь фильтрации $F_{\phi} = 0,6 \text{ м}^2$; $D = 0,9 \text{ м}$; $H = 0,75 \text{ м}$; $H_1 = 0,51 \text{ м}$.

Таблица 3.5 – Диаметры штуцеров

Обозначение	Назначение штуцера	Условный проход штуцера,
		мм
Б	Подвод вакуума	50
Д	Выпуск фильтрата	80

3.3 Выводы по результатам технологических расчётов

В рамках технологического расчёта были приняты следующие конструктивные решения:

- по материальному балансу – выбран реактор объёмом $0,16 \text{ м}^3$, внутренним диаметром 600 мм, высотой 600 мм и длиной цилиндрической обечайки 300 мм; нутч-фильтр с площадью фильтрации $F_{\text{ф}} = 0,6 \text{ м}^2$; $D = 0,9 \text{ м}$; $H = 0,75 \text{ м}$; $H_1 = 0,51 \text{ м}$.

- по гидравлическому расчёту – была выбрана быстроходная турбинная мешалка с диаметром 200 мм, частотой вращения 180 об/мин. Для этой мешалки был подобран редуктор МРВ02-0,75/180 с электродвигателем АИР71В4. Частота вращения вала $n = 180 \text{ об/мин}$. Номинальная мощность $N_{\text{ном}} = 0,75 \text{ кВт}$;

- по конструктивному расчёту – выбраны стандартные технологические штуцера для всех потоков, входящих в аппараты и выходящих из них.

4 Выбор конструкционных материалов

Основными требованиями, которым должны отвечать химические аппараты, являются механическая надёжность, долговечность, конструктивное совершенство, простота изготовления, удобство транспортирования, монтажа и эксплуатации. К конструкционным материалам проектируемой аппаратуры предъявляются следующие требования:

Кроме того, при выборе конструкционных материалов необходимо учитывать физические свойства материалов (теплопроводность, линейное расширение и т. д.).

Для проведения конструктивно-механического расчёта аппарата необходимо определить материалы следующих его частей:

- детали, подверженные коррозионному воздействию реакционной среды, находящейся в аппарате для реактора: корпус, днище, фланец, крышка, соответствующие штуцеры, мешалка, вал и его уплотнение; для нутч-фильтра: корпус, днище, перфорированная поверхность, штуцеры.
- детали, подверженные коррозионному воздействию охлаждающей воды (рубашка, отдельные части корпуса и днища, соответствующие штуцеры);
- крепёжные элементы, не контактирующие с реакционной средой или охлаждающей водой (болты, гайки, шайбы);
- прокладки (в частности, прокладка во фланце).

В результате анализа различных литературных источников, рекомендаций и стандартов можно прийти к следующим выводам:

- для элементов, контактирующих с реакционной массой назначить сталь 12X18H10T в качестве конструкционного материала. Данная сталь является достаточно надёжной для работы в агрессивных средах с высокой коррозионной активностью;
- для теплообменной рубашки, контактирующей только с водой, позволительно использовать сталь 15ХМ;

- для крепёжных деталей (болтов, гаек, шайб) позволительно использовать сталь 20, поскольку она рекомендована для данных изделий, а температурный диапазон её применимости также соответствует технологическому режиму. Крепёжные элементы не контактируют с коррозионными и агрессивными средами, что также является аргументом в пользу использования данной стали;

- для изготовления прокладок предлагается использовать фторопласт-4 как материал, устойчивый в средах средней и высокой агрессивности, а также соответствующий температурному режиму протекания процесса в реакторе.

Для дальнейшего расчёта аппаратов необходимо определить основные показатели их конструкционных материалов.

4.1 Расчёт основных характеристик материала

Средами, воздействующими на стенку цилиндрической обечайки, эллиптической крышки и днища реактора, являются: вода, смесь водных растворов нитратов РЗЭ, раствор NaOH.

Средами, воздействующими на стенку цилиндрической обечайки, перфорированную поверхность, эллиптическое днище нутч-фильтра, являются: промывочная вода, смесь гидроксидов РЗЭ.

Процесс осаждения гидроксидов РЗЭ из раствора нитратов протекает при комнатной температуре. При эксплуатации полупромышленного реактора может возникнуть необходимость в изменении температуры протекания процесса, поэтому целесообразно подобрать сталь, которая могла бы удовлетворять будущим потребностям производства.

В результате лабораторных испытаний были установлены пределы температур (от 46 – 75 °С), при которых химические свойства гидроксидов РЗЭ незначительно изменяются, однако, с экономической точки зрения, стоит учесть эти изменения на данном этапе проектирования. В соответствии с данным условием примем рабочую температуру равной 75 °С. Тогда, расчетная температура, °С:

$$t_p := \max(t_n, 20) = 75$$

Исходные данные для стали 12Х18Н10Т:

Поправочный коэффициент к допускаемым напряжениям _____ $\eta := 1$

Минимальное значение временного сопротивления (предела прочности) при 20 °С, МПа _____ $R_{m.20} := 540$

Коэффициент запаса прочности по пределу текучести _____ $n_T := 1.3$

Коэффициент запаса прочности при гидравлических испытаниях $n_T := 1.1$

Коэффициент запаса прочности по временному сопротивлению $n_B := 3$

Минимальное значение условного предела текучести при остаточном удлинении 0,2% при 20 °С, МПа _____ $R_{p.02.20} := 240$

Модуль упругости, МПа _____ $E := 2 \cdot 10^5$

Коэффициент линейного расширения, °С⁻¹ _____ $\alpha := 16.6 \cdot 10^{-6}$

Предел текучести при рабочей температуре, МПа:

$$R_{p.02.75} := \text{Floor} \left[\text{linterp} \left[\left(\begin{array}{c} 20 \\ 100 \end{array} \right), \left(\begin{array}{c} R_{p.02.20} \\ 228 \end{array} \right), 75 \right], 0.5 \right] = 231.5$$

Временное сопротивление при рабочей температуре, МПа:

$$R_{m.75} := \text{Floor} \left[\text{linterp} \left[\left(\begin{array}{c} 20 \\ 100 \end{array} \right), \left(\begin{array}{c} R_{m.20} \\ 500 \end{array} \right), 75 \right], 0.5 \right] = 512.5$$

Допускаемое напряжение для стали 12Х18Н10Т, МПа:

$$\sigma_d := \eta \cdot \min \left(\frac{R_{p.02.75}}{n_T}, \frac{R_{m.75}}{n_B} \right) = 170.833$$

Допускаемое напряжение при гидравлическом испытании, МПа:

$$\sigma_{d.20} := \eta \cdot \frac{R_{p.02.20}}{n_T} = 218.182$$

Основные характеристики остальных конструкционных материалов приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 - Характеристики выбранных конструкционных материалов

Марка стали	t, °C	σ_d , МПа	E, МПа	α , °C ⁻¹
12X18H10T	20	184	$2 \cdot 10^5$	$16,6 \cdot 10^{-6}$
	75	171	$2 \cdot 10^5$	$16,6 \cdot 10^{-6}$
15XM	20	155	$2 \cdot 10^5$	$11,9 \cdot 10^{-6}$
	75	154	$2,06 \cdot 10^5$	$11,9 \cdot 10^{-6}$
20	20	147	$1,99 \cdot 10^5$	$11,6 \cdot 10^{-6}$
	75	144	$1,93 \cdot 10^5$	$11,6 \cdot 10^{-6}$

Таблица 4.2 - Характеристики выбранных неметаллических конструкционных материалов

Материал	Разрушающее напряжение $\sigma_{ср}$, МПа	Модуль упругости на сжатие $E_{ср}$, МПа	Коэффициент линейного расширения α , °C ⁻¹
Фторопласт - 4	11,8	686	$25 \cdot 10^{-5}$

Таблица 4.3 - Характеристики выбранной фильтровальной полипропиленовой ткани КС - 34

Показатели	Норма
Поверхностная плотность, г/м ²	427 ± 30
Вид сырья	76Тх2 полипропилен
Количество нитей на 10 см	170 ± 6
Толщина ткани, мм	$1,3 \pm 0,2$

4.2 Определение прибавок к толщине стенок реактора на различные виды разрушений

Исходные данные:

Показатель глубинной коррозии, мм _____ $\Pi := 0.1$

Срок эксплуатации аппарата, год _____ $T_3 := 20$

Прибавка на эррозию, мм _____ $c_3 := 0$

Прибавка на другие виды разрушений, мм _____ $c_d := 1$

Прибавка на коррозию, мм:

$$c_k := \Pi \cdot T_3 = 2$$

Сумма прибавок на различные виды разрушений, мм:

$$c := c_k + c_d + c_3 = 3$$

Детали, изготовленные из сталей 12Х18Н10Т и 15ХМ подвержены коррозионным разрушениям ввиду контакта с реакционной массой и водой.

Таким образом, примем общее значение прибавок к толщине стенок для реактора равное 3 мм.

4.3. Выводы по выбору конструкционных материалов

В соответствии с рекомендациями и исходя из опыта эксплуатации подобного оборудования в рамках данного раздела были приняты следующие решения:

- принять сталь 12Х18Н10Т в качестве материала для изготовления корпуса, концевых элементов, фланцевого соединения, штуцеров и перемешивающего устройства реактора, а также для изготовления корпуса, перфорированной поверхности и штуцеров нутч-фильтра;
- принять сталь 15ХМ в качестве материала для изготовления теплообменной рубашки реактора;
- принять сталь 20 в качестве материала для изготовления крепёжных элементов фланцевых соединений;
- принять фторопласт-4 в качестве материала для прокладки во фланцевом соединении;
- принять полипропиленовую ткань КС – 34 в качестве материала фильтровальной перегородки.

5 Механический расчет реактора и нутч-фильтра для синтеза ВЭОС на основе РЗЭ

Целью механического расчёта нутч-фильтра и химического реактора является определение конструктивных размеров составных частей аппаратов и их проверка по критериям прочности в рабочих условиях и в условиях испытаний. Все расчеты выполнены в соответствии с государственными стандартами РФ. В следующем разделе представлен расчет аппарата с рубашкой и перемешивающим устройством.

5.1 Механический расчет реактора

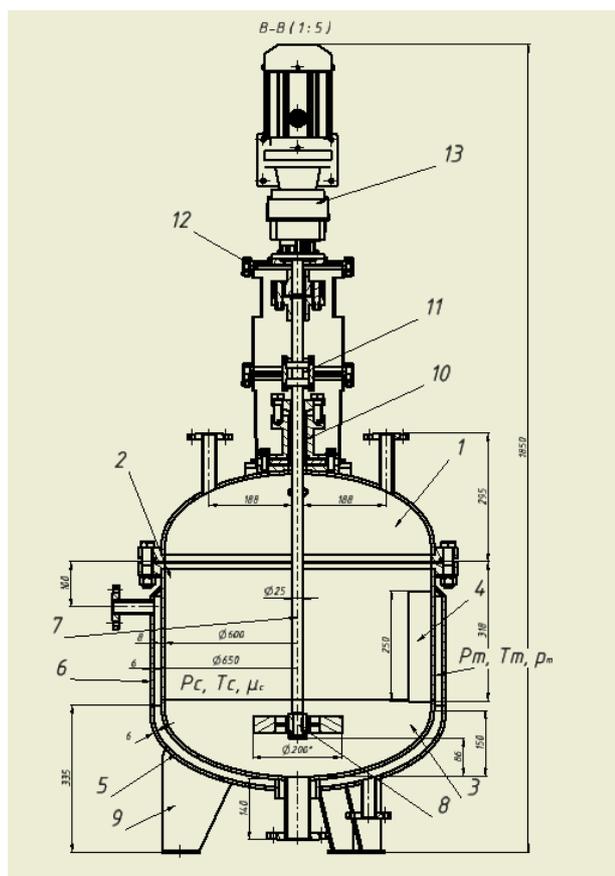


Рисунок 5.1 – Расчетная модель аппарата с рубашкой и перемешивающим устройством

1 - крышка эллиптическая съемная; 2 - обечайка корпуса цилиндрическая; 3 - днище приварное эллиптическое; 4 – отражательные перегородки; 5 - днище рубашки эллиптическое приварное; 6 - обечайка рубашки цилиндрическая; 7 - вал; 8 - мешалка турбинная открытая; 9 - стойка опорная; 10 - уплотнение сальниковое; 11 - подшипник опорной стойки; 12 - опорная стойка привода; 13 - мотор-редуктор.

					ФЮРА ОСГ 000 000 ПЗ		
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			
Выполнил	Амеличкин И.В.				Лит.	Лист	Листов
Провер.	.Беляев В.М.						
Н. Контр.					Реактор синтеза ВЭОС		
Утверд.							

5.1.1 Расчёт толщины стенки цилиндрической обечайки реактора

Название элемента - цилиндрическая обечайка. Номер позиции на расчётной модели – 2.

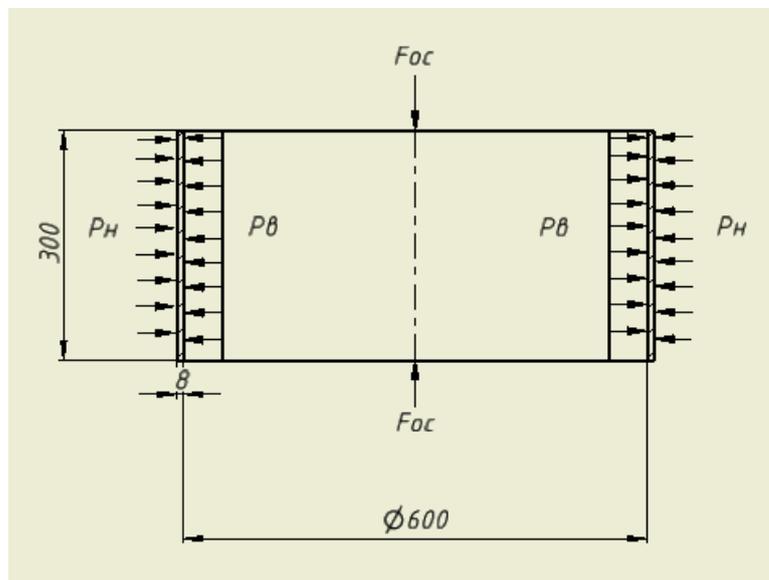


Рисунок 5.2 – Расчётная схема цилиндрической обечайки

где $P_{в}$ – расчётное внутреннее избыточное давление или пробное давление при гидравлическом испытании, МПа; $P_{н}$ - расчётное наружное избыточное давление или пробное давление при гидравлическом испытании, МПа; $F_{ос}$ – осевое сжимающие усилие, Н.

Исходные данные:

Внутренний диаметр обечайки, м	_____	$D := 0.6$
Внутреннее рабочее давление, МПа	_____	$P_{раб} := 0.6$
Плотность смеси в реакторе, кг./м.куб.	_____	$\rho_c := 1243.775$
Высота заполнения реактора, м	_____	$H1 := 0.42$
Допускаемое напряжение стали 12X18H10T	_____	$\sigma_d = 171$
Допускаемое напряжение стали 12X18H10T при гидравлических испытаниях	_____	$\sigma_{д.20} = 218.182$
Коэффициент прочности сварного шва	_____	$\phi := 1$
Расчетная длина гладкой обечайки	_____	$l := 0.3$
Давление в рубашке, МПа	_____	$P_{руб} := 0.3$

Допускаемое напряжение стали 15ХМ для рабочих условий, МПа _____ $\sigma_{д.р} := 155$

Допускаемое напряжение стали 15ХМ для условий гидравлических испытаний, МПа _____ $\sigma_{д.р.20} := 211$

Ускорение свободного падения, м/с² _____ $g := 9.8$

Целью выполнения расчёта является подбор толщины стенки цилиндрической обечайки, обеспечивающей прочность данной конструкции. Расчеты выполнены в соответствии с [24], а также, на основе методических указаний, данных в [25].

Расчетное значение внутреннего избыточного давления при рабочих условиях, МПа:

$$P_p := P_{раб} + \frac{\rho_c \cdot g \cdot 1 \cdot 10^3}{10^9} = 0.604$$

Для корпуса нагруженным давлением является давление в рубашке. Расчетное значение наружного давления, МПа:

$$P_{н.р.} := P_{руб} = 0.3$$

Пробное давление для гидравлических испытаний внутри аппарата, МПа:

$$P_{и} := 1.25 \cdot P_{раб} \cdot \frac{\sigma_{д.20}}{\sigma_{д}} = 0.957$$

Пробное давление при гидравлическом испытании в рубашке, МПа:

$$P_{и.р.} := 1.25 \cdot P_{раб} \cdot \frac{\sigma_{д.р.20}}{\sigma_{д.р}} = 0.51$$

Максимальная исполнительная толщина стенки из условия прочности, мм:

$$S_p := \max \left(\frac{P_p \cdot D \cdot 10^3}{2 \cdot \sigma_{д} \cdot \phi - P_p}, P_{н.р.} \cdot \frac{D \cdot 10^3}{2 \cdot \sigma_{д} \cdot \phi - P_{н.р.}}, P_{и} \cdot \frac{D \cdot 10^3}{2 \cdot \sigma_{д} \cdot \phi - P_{и}} \right) = 1.684$$

$$S_1 := \text{Ceil}(S_p + c, 1) = 5$$

Максимальная исполнительная толщина стенки из условий устойчивости, мм:

$$B := \max \left[1, 0.47 \cdot \left(\frac{P_{н.р.}}{E \cdot 10^{-5}} \right)^{0.067} \cdot \left(\frac{1 \cdot 10^3}{D \cdot 10^3} \right)^{0.4} \right] = 1$$

$$S_p := \max \left[1.06 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{D \cdot 10^3}{B} \cdot \left(\frac{P_{н.р.} \cdot 1 \cdot 10^3}{10^{-5} \cdot E \cdot D \cdot 10^3} \right)^{0.4}, 1.2 \cdot P_{н.р.} \cdot \frac{D \cdot 10^3}{|2 \cdot \sigma_d - P_{н.р.}|} \right]$$

$$S_p = 2.257$$

$$S_2 := \text{Ceil}(S_p + c, 1) = 6$$

$$S := (\max(S_1, S_2)) = 6$$

Принимаем толщину стенки $S = 8$ мм с учетом возможности использования полупромышленного реактора в целях, отличных от целей данной работы и с учетом опыта эксплуатации подобных реакторов. Увеличение толщины стенки также способствует увеличению массы аппарата, что приводит к снижению вибраций в аппарате [26].

Проверка условия применения формул для обечаек при $D > 200$ мм:

$$\text{Prov1} := \begin{cases} \text{"Условия применения формул выполняются"} & \text{if } \frac{S - c}{D \cdot 10^3} < 0.1 \\ \text{"Условия применения формул выполняются"} & \text{if } \frac{S - c}{D \cdot 10^3} > 0.1 \end{cases}$$

$$\text{Prov1} = \text{"Условия применения формул выполняются"}$$

Допускаемое внутреннее избыточное давление на цилиндрическую обечайку для рабочих условий, МПа:

$$P_d := \frac{[2 \cdot \sigma_d \cdot \phi \cdot (S - c)]}{D \cdot 10^3 + (S - c)} = 2.826$$

Допускаемое внутреннее избыточное давление на цилиндрическую обечайку для условий испытания, МПа:

$$P_{Д.И} := \frac{[2 \cdot \sigma_{д.20} \cdot \phi \cdot (S - c)]}{D \cdot 10^3 + (S - c)} = 3.606$$

Расчет цилиндрической обечайки на устойчивость в рабочих условиях:

Коэффициент запаса $n_y = 2,4$.

Допускаемое давление из условия прочности, МПа:

$$P_{Д.П} := 2 \cdot \sigma_{д} \cdot \frac{(S - c)}{D \cdot 10^3 + S - c} = 2.826$$

Допускаемое давление из условия устойчивости в пределах упругости, МПа:

$$B_1 := \min \left[1, 9.45 \cdot \frac{D \cdot 10^3}{1 \cdot 10^3} \cdot \sqrt{\frac{D \cdot 10^3}{100 \cdot (S - c)}} \right] = 1$$

$$P_{дЕ} := \left(\frac{2.08 \cdot E \cdot 10^{-5} \cdot D \cdot 10^3}{n_y \cdot B_1 \cdot 1 \cdot 10^3} \right) \left[\frac{100 \cdot (S - c)}{D \cdot 10^3} \right]^{2.5} = 2.198$$

Допускаемое наружное давление, МПа:

$$P_{д} := \frac{P_{Д.П}}{\sqrt{1 + \left(\frac{P_{Д.П}}{P_{дЕ}} \right)^2}} = 1.735$$

Осевое сжимающее усилие от давления на днище, МН:

$$F := 0.25 \cdot \pi \cdot (D \cdot 10^3 + 2S)^2 \cdot P_{н.р.} \cdot 10^{-6} = 0.089$$

Допускаемое осевое сжимающие усилие из условия прочности.

При расчетной схеме (рис. 5.3).

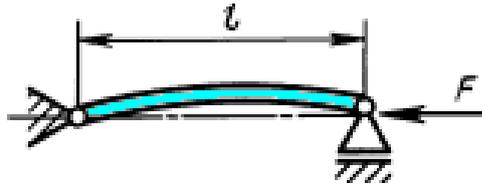


Рисунок 5.3 – Расчетная схема для определения $I_{пр}$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия прочности, МН:

$$F_{d\sigma} := \pi \cdot (D \cdot 10^3 + S - c) \cdot (S - c) \cdot \sigma_d \cdot 10^{-6} = 1.625$$

Гибкость:

$$\lambda := \frac{2.83 \cdot I_{пр} \cdot 10^3}{D \cdot 10^3 + S - c} = 1.403$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие в пределах упругости из условия устойчивости, МН:

$$F_{dE} := \begin{cases} \text{if } \frac{I_{пр} \cdot 10^3}{D \cdot 10^3} \geq 10 & = 5.896 \\ \left| \begin{array}{l} F_{dE1} \leftarrow 31 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{E}{n_y} \cdot (D \cdot 10^3)^2 \cdot \left[100 \cdot \frac{(S - c)}{D \cdot 10^3} \right]^{2.5} \\ F_{dE2} \leftarrow \left(\frac{\pi}{\lambda} \right)^2 \cdot \frac{\pi \cdot (D \cdot 10^3 + S - c) \cdot (S - c) \cdot E \cdot 10^{-6}}{n_y} \\ F_{dE} \leftarrow \min(F_{dE1}, F_{dE2}) \end{array} \right. \\ F_{dE} \leftarrow 31 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{E}{n_y} \cdot (D \cdot 10^3)^2 \cdot \left[100 \cdot \frac{(S - c)}{D \cdot 10^3} \right]^{2.5} \text{ otherwise} \end{cases}$$

$$F_{dE} = 5.896$$

Тогда суммарное допускаемое осевое сжимающее усилие будет вычислено по формуле, МН:

$$F_d := \frac{F_{d\sigma}}{\sqrt{1 + \left(\frac{F_{d\sigma}}{F_{dE}}\right)^2}} = 1.567$$

Проверка условия устойчивости:

$$\text{Prov2} := \begin{cases} \text{"Условие устойчивости выполняется"} & \text{if } \frac{P_{\text{руб}}}{P_d} + \frac{F}{F_d} < 1 \\ \text{"Условие устойчивости не выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Prov2} = \text{"Условие устойчивости выполняется"} \quad \frac{P_{\text{руб}}}{P_d} + \frac{F}{F_d} = 0.23$$

Расчет цилиндрической обечайки на устойчивость в условиях испытаний:

Коэффициент запаса $n_y = 1,8$.

Допускаемое давление из условия прочности, МПа:

$$P_{\text{и.дп}} := 2 \cdot \sigma_{\text{д.20}} \cdot \frac{(S - c)}{D \cdot 10^3 + S - c} = 3.606$$

Допускаемое давление из условия устойчивости в пределах упругости,

МПа:

$$B_1 := \min \left[1, 9.45 \cdot \frac{D \cdot 10^3}{1 \cdot 10^3} \cdot \sqrt{\frac{D \cdot 10^3}{100 \cdot (S - c)}} \right] = 1$$

$$P_{\text{и.дЕ}} := \left(\frac{2.08 \cdot E \cdot 10^{-5} \cdot D \cdot 10^3}{n_y \cdot B_1 \cdot 1 \cdot 10^3} \right) \left[\frac{100 \cdot (S - c)}{D \cdot 10^3} \right]^{2.5} = 2.93$$

Допускаемое наружное давление, МПа:

$$P_{\text{и.д}} := \frac{P_{\text{д.п}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{P_{\text{и.дп}}}{P_{\text{и.дЕ}}}\right)^2}} = 1.782$$

Осевое сжимающие усилие от давления на днище, МН:

$$F_{и} := 0.25 \cdot \pi \cdot (D \cdot 10^3 + 2S)^2 \cdot P_{и.р.} \cdot 10^{-6} = 0.112$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия прочности, МН:

$$F_{и.d\sigma} := \pi \cdot (D \cdot 10^3 + S - c) \cdot (S - c) \cdot \sigma_{д.20} \cdot 10^{-6} = 2.073$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие в пределах упругости из условия устойчивости, МН:

$$F_{и.dE} := \left\{ \begin{array}{l} \text{if } \frac{l_{ип} \cdot 10^3}{D \cdot 10^3} \geq 10 \\ \left\{ \begin{array}{l} F_{dE1} \leftarrow 31 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{E}{n_y} \cdot (D \cdot 10^3)^2 \cdot \left[100 \cdot \frac{(S - c)}{D \cdot 10^3} \right]^{2.5} \\ F_{dE2} \leftarrow \left(\frac{\pi}{\lambda} \right)^2 \cdot \frac{\pi \cdot (D \cdot 10^3 + S - c) \cdot (S - c) \cdot E \cdot 10^{-6}}{n_y} \\ F_{dE} \leftarrow \min(F_{dE1}, F_{dE2}) \end{array} \right. \\ F_{dE} \leftarrow 31 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{E}{n_y} \cdot (D \cdot 10^3)^2 \cdot \left[100 \cdot \frac{(S - c)}{D \cdot 10^3} \right]^{2.5} \text{ otherwise} \end{array} \right. = 7.861$$

$$F_{и.dE} = 7.861$$

Тогда, суммарное допускаемое осевое сжимающее усилие будет вычислено по формуле, МН:

$$F_{и.д} := \frac{F_{и.d\sigma}}{\sqrt{1 + \left(\frac{F_{и.d\sigma}}{F_{и.dE}} \right)^2}} = 2.005$$

Проверка условия устойчивости:

$$Prov3 := \left\{ \begin{array}{l} \text{"Условие устойчивости выполняется"} \text{ if } \frac{P_{и.р.}}{P_{и.д}} + \frac{F_{и}}{F_{и.д}} < 1 \\ \text{"Условие устойчивости не выполняется"} \text{ otherwise} \end{array} \right.$$

$$Pr_{ov3} = \text{"Условие устойчивости выполняется"} \quad \frac{P_{и.р.}}{P_{и.д}} + \frac{F_{и.}}{F_{и.д}} = 0.266$$

Анализ напряжений, возникающих в цилиндрической обечайке с помощью программы Inventor. Напряжение по Мизесу определяет момент истощения несущей способности путем сравнения эквивалентного напряжения с пределом текучести.

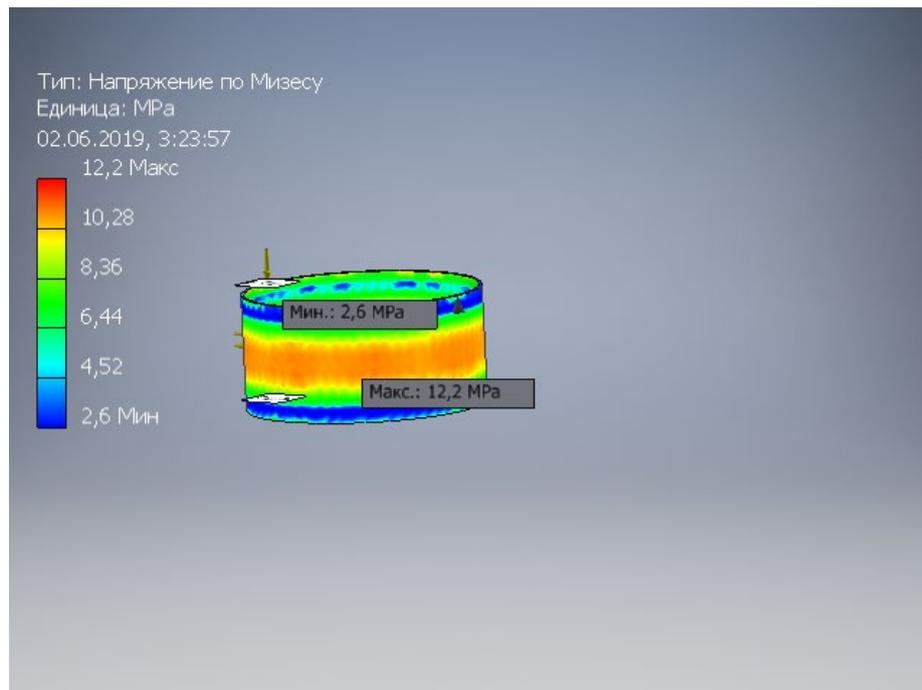


Рисунок 5.4 – Напряжение по Мизесу

Максимальное напряжение по Мизесу 12,2 МПа, т.е. при данном значении напряжения и температуре 75 °С в конструкции будут образовываться необратимые деформации.

Проверка надежности конструкции для рабочих условий:

$$P_p = 0.604 < P_d = 2.826$$

Проверка надежности конструкции для условий гидравлического испытания:

$$P_{и} = 0.957 < P_{д.и} = 3.606$$

Проверка условия применимости расчетных формул стандарта:

$$\frac{S - c}{D \cdot 10^3} = 0.008 < 0.1$$

5.1.2 Расчёт толщины стенки эллиптических днища и крышки реактора

Название элемента – эллиптическое днище и крышка. Номер позиции на расчётной модели – 1,3.

Исходные данные:

Внутренний диаметр днища или крышки, м _____	$D = 0.6$
Внутренняя высота выпуклой части днища или крышки, м _____	$H_2 := 0.150$
Высота отбортовки днища или крышки, м _____	$h_0 := 0.025$
Внутреннее расчетное давление, МПа _____	$P_p = 0.604$
Пробное давление при гидравлических испытаниях, МПа _____	$P_{и} = 0.957$
Допускаемое напряжение стали 12X18Н10Т, МПа _____	$\sigma_{д} = 171$
Допускаемое напряжение стали 12X18Н10Т при гидравлических испытаниях, МПа _____	$\sigma_{д,20} = 218.182$
Радиус кривизны в вершине днища или крышки, м _____	$R := D$
Давление в рубашке, МПа _____	$P_{руб} = 0.3$

Целью выполнения расчёта является подбор толщины стенки эллиптических днища и крышки реактора, обеспечивающей прочность данной конструкции. Расчеты выполнены в соответствии с [24], а также, на основе методических указаний, данных в [25].

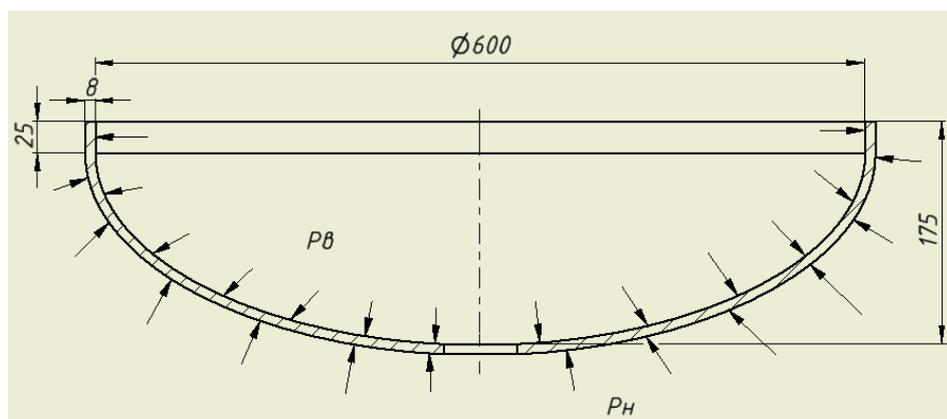


Рисунок 5.6 – Расчетная схема эллиптического днища

где P_v – расчётное внутреннее избыточное давление или пробное давление при гидравлическом испытании, МПа; P_n - расчётное наружное избыточное давление или пробное давление при гидравлическом испытании, МПа.

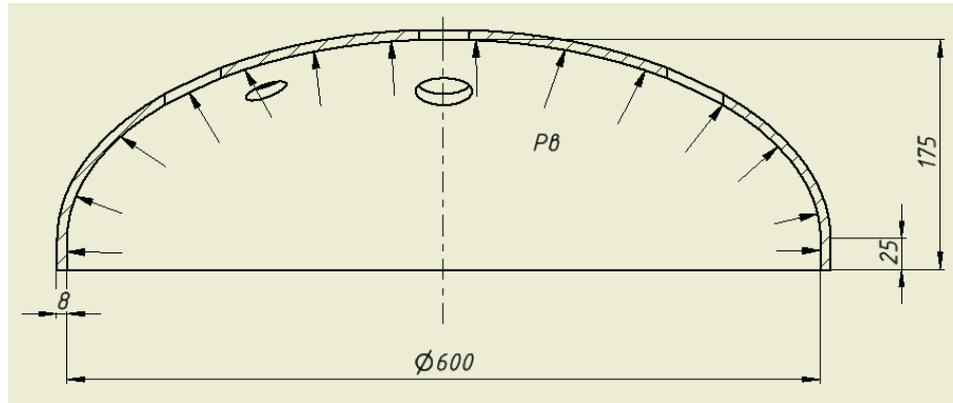


Рисунок 5.7 – Расчетная схема эллиптической крышки

где P_v – расчётное внутреннее избыточное давление или пробное давление при гидравлическом испытании, МПа; P_n - расчётное наружное избыточное давление или пробное давление при гидравлическом испытании, МПа.

Эллиптическое днище и крышка, нагруженное внутренним избыточным давлением

Расчётная толщина эллиптических днища и крышки, нагруженных внутренним избыточным давлением, рассчитывается для рабочих условий и условий гидравлического испытания, после чего выбирается максимальное значение, мм:

$$S_{1p} := \max \left(\frac{P_p \cdot R \cdot 10^3}{2 \cdot \phi \cdot \sigma_d - 0.5 \cdot P_p}, \frac{P_n \cdot R \cdot 10^3}{2 \cdot \phi \cdot \sigma_{d.20} - 0.5 \cdot P_n} \right) = 1.317$$

$$S_1 := S_{1p} + c = 4.317$$

Принимаем толщину стенки $S = 8$ мм с учетом возможности использования реактора в целях, отличных от целей данной работы, а также с учетом опыта эксплуатации подобных реакторов.

Допускаемое давление для рабочих условий, МПа:

$$P_{д.1} := \frac{2 \cdot (S1 - c) \cdot \phi \cdot \sigma_d}{D \cdot 10^3 + 0.5 \cdot (S1 - c)} = 2.838$$

Допускаемое давление для условий испытания, МПа:

$$P_{д.1.и} := \frac{2 \cdot (S1 - c) \cdot \phi \cdot \sigma_{д.20}}{D \cdot 10^3 + 0.5 \cdot (S1 - c)} = 3.621$$

Проверим надёжность конструкции для рабочих условий:

$$P_p = 0.604 < P_{д.1} = 2.838$$

Проверим надёжность конструкции для условий гидравлического испытания:

$$P_{и} = 0.957 < P_{д.1.и} = 3.621$$

Проверка условия применимости расчетных формул стандарта:

$$0.002 < \frac{S1 - c}{D \cdot 10^3} = 0.008 < 0.1$$

$$0.2 < \frac{H2}{D} = 0.25 < 0.5$$

Таким образом, можно сделать вывод, что условие прочности выполняется, а надёжность эллиптического днища и крышки для условий испытаний обеспечена. Условия применимости формул для данной исполнительной толщины днища и крышки выполняются.

Эллиптическое днище, нагруженное наружным давлением

Определение толщины стенки эллиптического днища, мм:

Для приближенного расчета коэффициент $K_э$ для эллиптических днищ принимают равным 0,9.

$$S1p := \max \left(\frac{K_э \cdot R \cdot 10^3}{161} \cdot \sqrt{\frac{n_y \cdot P_{руб}}{10^{-5} \cdot E}}, \frac{1.2 \cdot P_{руб} \cdot R \cdot 10^3}{2 \cdot \sigma_d} \right) = 2.012$$

$$S1 := S1p + c = 5.012$$

Принимаем толщину стенки $S = 8$ мм.

Определение коэффициента K_3 :

$$x := 10 \cdot \frac{S1 - c}{D \cdot 10^3} \left(\frac{D \cdot 10^3}{2 \cdot H2 \cdot 10^3} - \frac{2 \cdot H2 \cdot 10^3}{D \cdot 10^3} \right) = 0.125$$

$$K_3 := \frac{[1 + (2.4 + 8 \cdot x) \cdot x]}{[1 + (3 + 10 \cdot x) \cdot x]} = 0.931$$

Допускаемое наружное давление из условия устойчивости в пределах упругости, МПа:

$$P_E := \frac{2.6 \cdot 10^{-5} \cdot E}{n_y} \cdot \left[\frac{100 \cdot (S1 - c)}{K_3 \cdot R \cdot 10^3} \right]^2 = 1.737$$

Допускаемое давление из условия прочности, МПа:

$$P_{II} := \frac{2 \cdot \sigma_d \cdot (S1 - c)}{R \cdot 10^3 + 0.5 \cdot (S1 - c)} = 2.838$$

Допускаемое наружное давление, МПа:

$$P := \frac{P_{II}}{\sqrt{1 + \left(\frac{P_{II}}{P_E} \right)^2}} = 1.482$$

Проверка надежности конструкции:

$$P_{руб} = 0.3 < P = 1.482$$

Проверка условия применимости расчетных формул стандарта:

$$0.002 < \frac{S1 - c}{D \cdot 10^3} = 0.008 < 0.1$$

$$0.2 < \frac{H2}{D} = 0.25 < 0.5$$

Таким образом, можно сделать вывод, что условие прочности и надёжность эллиптического днища обеспечена. Условия применимости формул для данной исполнительной толщины днища выполняются.

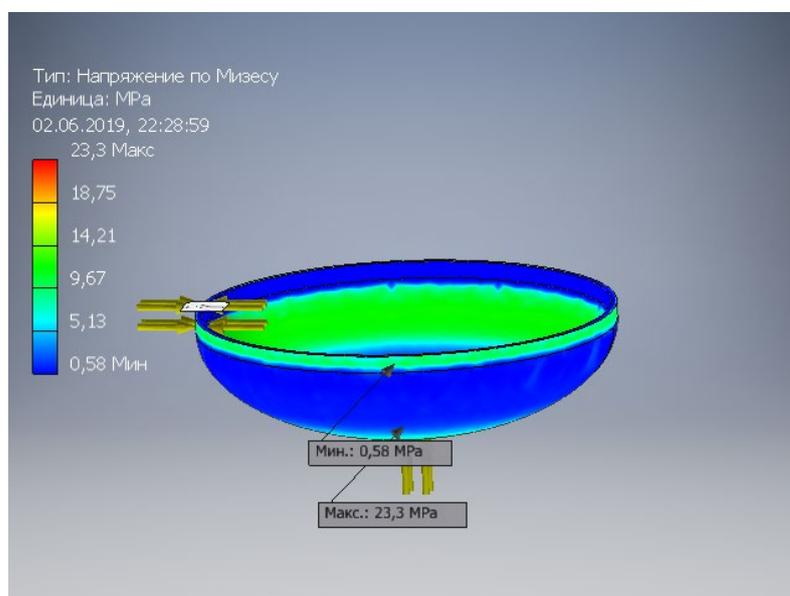


Рисунок 5.8 – Напряжение по Мизесу в эллиптическом днище

Максимальное напряжение по Мизесу 23,3 МПа, т.е. при данном значении напряжения и температуре 75 °С в конструкции будут образовываться необратимые деформации.

5.1.3 Расчёт толщины стенки цилиндрической обечайки рубашки

Название элемента - цилиндрическая обечайка рубашки. Номер позиции на расчётной модели – 6.

Исходные данные:

Внутренний диаметр рубашки, м _____	$D_p := 0.65$
Высота цилиндрической части рубашки, м _____	$l_p := 0.2$
Внутренний диаметр эллиптического элемента рубашки, м _____	$D_{p,э} := 0.65$
Высота отбортованной части эллиптического элемента рубашки, м _____	$h_{0p} := 0.025$
Внутренняя высота выпуклой части эллиптического элемента рубашки, м _____	$H_{2p} := 0.162$
Внутреннее рабочее давление, МПа _____	$P_{раб} := 0.3$
Допускаемое напряжение стали 15ХМ для рабочих условий, МПа _____	$\sigma_{д,р} := 155$
Допускаемое напряжение стали 15ХМ для условий гидравлических испытаний, МПа _____	$\sigma_{д,р.20} := 211$
Модуль упругости стали 15ХМ, МПа _____	$E := 2 \cdot 10^5$
Коэффициент линейного расширения для стали 15ХМ, °С ⁻¹ _____	$\alpha := 11.9 \cdot 10^{-6}$
Плотность воды в рубашке, кг/м ³ _____	$\rho_B := 999.841$

Целью выполнения расчёта является подбор толщины стенки цилиндрической обечайки рубашки, обеспечивающей прочность данной конструкции. Расчёты выполнены в соответствии с [24], а также, на основе методических указаний, данных в [25].

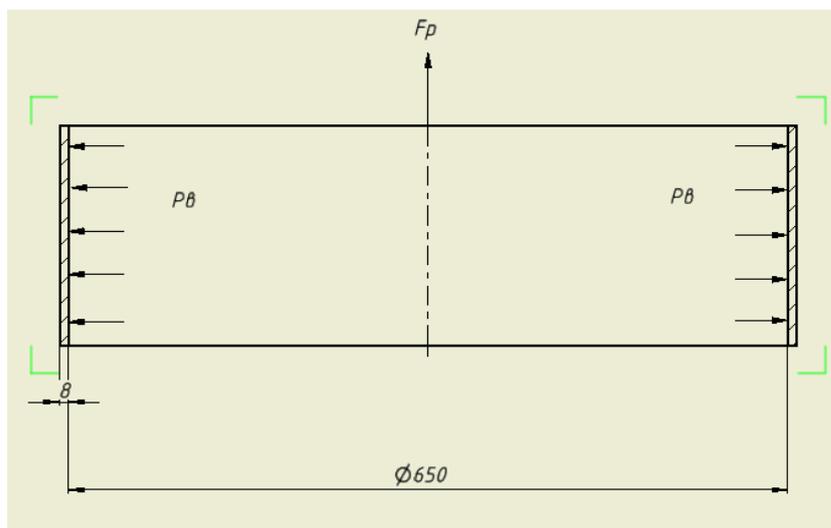


Рисунок 5.9 – Расчетная схема цилиндрической обечайки рубашки где $P_{в}$ – расчётное внутреннее избыточное давление или пробное давление при гидравлическом испытании, МПа; F_p – осевое растягивающие усилие, Н.

Расчетное значение внутреннего избыточного давления при рабочих условиях, МПа:

$$P_p := P_{раб} + \frac{\rho_{в} \cdot g \cdot 1 \cdot 10^3}{10^9} = 0.303$$

Пробное давление для гидравлических испытаний, МПа:

$$P_{и.р} := 1.25 \cdot P_{раб} \cdot \frac{\sigma_{д.р.20}}{\sigma_{д.р}} = 0.51$$

Максимальная исполнительная толщина стенки из условия прочности, мм:

$$S_p := \max \left(\frac{P_p \cdot D_p \cdot 10^3}{2 \cdot \sigma_{д.р} \cdot \phi - P_p}, P_{и.р} \cdot \frac{D_p \cdot 10^3}{2 \cdot \sigma_{д.р.20} \cdot \phi - P_{и.р}} \right) = 0.787$$

$$S_1 := \text{Ceil}(S_p + c, 1) = 4$$

Максимальная исполнительная толщина стенки из условий устойчивости, мм:

$$B := \max \left[1, 0.47 \cdot \left(\frac{P_p}{E \cdot 10^{-5}} \right)^{0.067} \cdot \left(\frac{l_p \cdot 10^3}{D_p \cdot 10^3} \right)^{0.4} \right] = 1$$

$$S_p := \max \left[1.06 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{D_p \cdot 10^3}{B} \cdot \left(\frac{P_p \cdot l_p \cdot 10^3}{10^{-5} \cdot E \cdot D_p \cdot 10^3} \right)^{0.4}, 1.2 \cdot P_p \cdot \frac{D_p \cdot 10^3}{|2 \cdot \sigma_{д.р} - P_p|} \right]$$

$$S_p = 2.021$$

$$S_2 := \text{Ceil}(S_p + c, 1) = 6$$

$$S := (\max(S_1, S_2)) = 6$$

Принимаем толщину стенки $S = 6$ мм.

Проверка условия применения формул для обечаек при $D > 200$ мм:

$$\text{Prov1} := \begin{cases} \text{"Условия применения формул выполняются"} & \text{if } \frac{S - c}{D_p \cdot 10^3} < 0.1 \\ \text{"Условия применения формул выполняются"} & \text{if } \frac{S - c}{D_p \cdot 10^3} > 0.1 \end{cases}$$

$$\text{Prov1} = \text{"Условия применения формул выполняются"} \quad \frac{S - c}{D_p \cdot 10^3} = 0.005$$

Допускаемое внутреннее избыточное давление на цилиндрическую обечайку для рабочих условий, МПа:

$$P_{Д} := \frac{[2 \cdot \sigma_{д.р} \cdot \phi \cdot (S - c)]}{D_p \cdot 10^3 + (S - c)} = 1.424$$

Допускаемое внутреннее избыточное давление на цилиндрическую обечайку для условий испытания, МПа:

$$P_{Д.И} := \frac{[2 \cdot \sigma_{д.р.20} \cdot \phi \cdot (S - c)]}{D_p \cdot 10^3 + (S - c)} = 1.939$$

Расчет цилиндрической обечайки на устойчивость в рабочих условиях

Коэффициент запаса $n_y = 2,4$.

Допускаемое давление из условия прочности, МПа:

$$P_{д.п} := 2 \cdot \sigma_{д.р} \cdot \frac{(S - c)}{D_p \cdot 10^3 + S - c} = 1.424$$

Допускаемое давление из условия устойчивости в пределах упругости, МПа:

$$B_1 := \min \left[1, 9.45 \cdot \frac{D_p \cdot 10^3}{l_p \cdot 10^3} \cdot \sqrt{\frac{D_p \cdot 10^3}{100 \cdot (S - c)}} \right] = 1$$
$$P_{д.е} := \left(\frac{2.08 \cdot E \cdot 10^{-5} \cdot D_p \cdot 10^3}{n_y \cdot B_1 \cdot l_p \cdot 10^3} \right) \left[\frac{100 \cdot (S - c)}{D_p \cdot 10^3} \right]^{2.5} = 0.815$$

Осевое растягивающее усилие, МН:

$$F_p := \pi \frac{(D_p \cdot 10^3)^2 \cdot 10^{-6}}{4} \cdot P_p = 0.101$$

Толщина стенки от осевого растягивающего усилия, мм:

$$S_2 := \frac{F_p \cdot 10^6}{\pi \cdot (D_p \cdot 10^3) \cdot \sigma_{д.р} \cdot \phi} = 0.318$$

Допускаемое осевое растягивающее усилие, МН:

$$F_{д\sigma} := \pi \cdot (D_p \cdot 10^3 + S - c) \cdot (S - c) \cdot \sigma_{д.р} \cdot 10^{-6} = 0.954$$

$$\text{Prov2} := \begin{cases} \text{"Условие устойчивости выполняется"} & \text{if } \frac{P_{руб}}{P_d} + \frac{F_p}{F_{д\sigma}} < 1 \\ \text{"Условие устойчивости не выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Prov2} = \text{"Условие устойчивости выполняется"} \quad \frac{P_{\text{руб}}}{P_{\text{д}}} + \frac{F_{\text{Р}}}{F_{\text{д}\sigma}} = 0.278$$

Расчет цилиндрической обечайки на устойчивость в условиях испытаний

Коэффициент запаса $n_y = 1,8$.

Допускаемое давление из условия прочности, МПа:

$$P_{\text{и.дп}} := 2 \cdot \sigma_{\text{д.р.20}} \cdot \frac{(S - c)}{D_p \cdot 10^3 + S - c} = 1.939$$

Допускаемое давление из условия устойчивости в пределах упругости, МПа:

$$B_1 := \min \left[1, 9.45 \cdot \frac{D_p \cdot 10^3}{1 \cdot 10^3} \cdot \sqrt{\frac{D_p \cdot 10^3}{100 \cdot (S - c)}} \right] = 1$$

$$P_{\text{и.дЕ}} := \left(\frac{2.08 \cdot E \cdot 10^{-5} \cdot D_p \cdot 10^3}{n_y \cdot B_1 \cdot l_p \cdot 10^3} \right) \left[\frac{100 \cdot (S - c)}{D_p \cdot 10^3} \right]^{2.5} = 1.087$$

Осевое растягивающие усилие, МН:

$$F_{\text{Р.И}} := \pi \frac{(D_p \cdot 10^3)^2 \cdot 10^{-6}}{4} \cdot P_{\text{и.р.}} = 0.124$$

Допускаемое осевое растягивающие усилие, МН:

$$F_{\text{ир.д}\sigma} := \pi \cdot (D_p \cdot 10^3 + S - c) \cdot (S - c) \cdot \sigma_{\text{д.р.20}} \cdot 10^{-6} = 1.299$$

Проверка условия устойчивости:

$$\text{Prov3} := \begin{cases} \text{"Условие устойчивости выполняется"} & \text{if } \frac{P_{\text{и.р.}}}{P_{\text{и.д}}} + \frac{F_{\text{Р.И}}}{F_{\text{ир.д}\sigma}} < 1 \\ \text{"Условие устойчивости не выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Prov3} = \text{"Условие устойчивости выполняется"} \quad \frac{P_{\text{и.р.}}}{P_{\text{и.д}}} + \frac{F_{\text{Р.И}}}{F_{\text{ир.д}\sigma}} = 0.306$$

5.1.4 Расчёт толщины стенки эллиптического днища рубашки

Название элемента - эллиптическое днище рубашки. Номер позиции на расчётной модели – 5.

Исходные данные:

Высота цилиндрической части рубашки, м _____	$l_p := 0.2$
Внутренний диаметр эллиптического элемента рубашки, м _____	$D_{p,э} := 0.65$
Высота отбортованной части эллиптического элемента рубашки, м _____	$h_{0p} := 0.025$
Внутренняя высота выпуклой части эллиптического элемента рубашки, м _____	$H_{2p} := 0.162$
Внутреннее рабочее давление, МПа _____	$P_p := 0.3$
Допускаемое напряжение стали 15ХМ для рабочих условий, МПа _____	$\sigma_{д.р} := 155$
Допускаемое напряжение стали 15ХМ для условий гидравлических испытаний, МПа _____	$\sigma_{д.р.20} := 211$
Модуль упругости стали 15ХМ, МПа _____	$E := 2 \cdot 10^5$
Коэффициент линейного расширения для стали 15ХМ, °С ⁻¹ _____	$\alpha := 11.9 \cdot 10^{-6}$
Плотность воды в рубашке, кг/м ³ _____	$\rho_B := 999.841$
Радиус кривизны в вершине днища или крышки, м _____	$R := D_{p,э}$

Целью выполнения расчёта является подбор толщины стенки эллиптического днища рубашки, обеспечивающей прочность данной конструкции. Расчеты выполнены в соответствии с [24], а также, на основе методических указаний, данных в [25].

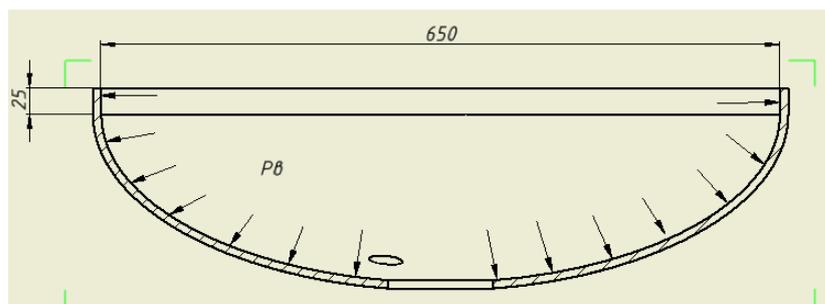


Рисунок 5.10 – Расчетная схема эллиптического днища рубашки

Пробное давление для гидравлических испытаний рубашки, МПа:

$$P_{p.и} := 1.25 \cdot P_p \cdot \frac{\sigma_{д.р.20}}{\sigma_{д.р}} = 0.51$$

Расчётная толщина эллиптического элемента рубашки, нагруженной внутренним давлением, рассчитывается для рабочих условий и условий гидравлического испытания, после чего выбирается максимальное значение, мм:

$$S1_{p.p} := \max \left(\frac{P_p \cdot R \cdot 10^3}{2 \cdot \sigma_{д.р} \cdot \phi - 0.5P_p}, \frac{P_{p.и} \cdot R \cdot 10^3}{2 \cdot \sigma_{д.р.20} \cdot \phi - 0.5P_{p.и}} \right) = 0.787$$

$$S1_p := S1_{p.p} + c = 3.787$$

Принимаем толщину стенки $S = 6$ мм.

Допускаемое давление для рабочих условий, МПа:

$$P_{д.1р} := \frac{2 \cdot (S1_p - c) \cdot \phi \cdot \sigma_{д.р}}{D_{p.э} \cdot 10^3 + 0.5 \cdot (S1_p - c)} = 1.427$$

Допускаемое давление для условий испытания, МПа:

$$P_{д.1р.и} := \frac{2 \cdot (S1_p - c) \cdot \phi \cdot \sigma_{д.р.20}}{D_{p.э} \cdot 10^3 + 0.5 \cdot (S1_p - c)} = 1.943$$

Проверка надежности конструкции для рабочих условий:

$$P_p = 0.3 < P_{д.1р} = 1.427$$

Проверка надежности конструкции для условий гидравлического испытания:

$$P_{p.и} = 0.51 < P_{д.1р.и} = 1.943$$

Проверка условия применимости расчетных формул стандарта:

$$0.002 < \frac{S1_p - c}{D_p \cdot 10^3} = 0.005 < 0.1$$

$$0.002 < \frac{S1_p - c}{D_{p.э} \cdot 10^3} = 0.005 < 0.1$$

$$0.2 < \frac{H2_p}{D_{p.э}} = 0.249 < 0.5$$

Таким образом, можно сделать вывод, что условие прочности и надёжность эллиптического днища рубашки обеспечена. Условия применимости формул для данной исполнительной толщины днища выполняются.

5.1.5 Расчет сопряжения обечайки корпуса и днища

Названия элементов – цилиндрическая обечайка корпуса, эллиптическое днище корпуса. Номера позиций на расчётной модели – 2 и 3.

P – внутреннее давление, действующее на обечайки со стороны среды в аппарате, Па;

P_н – внешнее давление, действующее на обечайки со стороны теплоносителя в рубашке, Па;

Q₀ – краевая сила, действующая на соединённые обечайки, Н/м;

M₀ – краевой момент, действующий на соединённые обечайки, Н*м;

U – радиальное усилие на краю обечаек, Н;

Δ – краевые радиальные деформации обечаек от действия краевых нагрузок, усилий и моментов, м;

θ – краевые угловые деформации обечаек от действия краевых нагрузок, усилий и моментов, °.

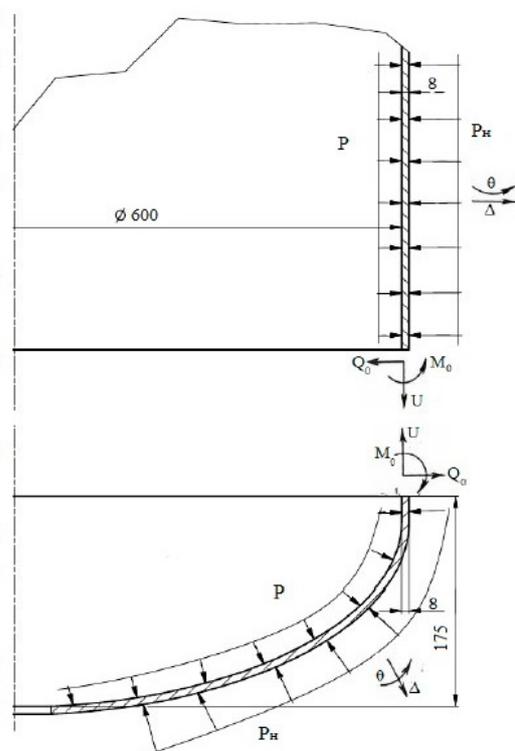


Рисунок 5.11 – Расчётная схема сопряжения цилиндрической обечайки с эллиптическим днищем

Цель расчёта - прочностная проверка устойчивости соединения цилиндрической обечайки с днищем от возникающих при сопряжении краевых напряжений. Расчеты выполнены в соответствии с [27].

Исходные данные:

Внутренний диаметр аппарата, м _____	$D = 0.6$
Радиус аппарата, м _____	$R := 0.3$
Первый радиус эллипса крышки, м _____	$a := 0.3$
Второй радиус эллипса крышки, м _____	$b := 0.15$
Высота обечайки, м _____	$H_3 := 0.3$
Толщина стенки обечайки аппарата, м _____	$S := 0.008$
Толщина стенки днища, м _____	$S_1 := 0.008$
Рабочее давление в корпусе, Па _____	$P := 600000$
Рабочее давление в рубашке, Па _____	$P_p := 300000$
Допускаемое напряжение для стали 12Х18Н10Т для рабочих условий, Па _____	$\sigma_d := 171 \cdot 10^6$
Рабочая температура среды, воздействующая на сопряжение, гр. С _____	$t_p = 75$
Коэффициент прочности сварных швов _____	$\phi = 1$
Сумма прибавок к расчетной толщине стенок, м _____	$c := 0.003$
Коэффициент запаса устойчивости для рабочих условий _____	$n_p := 2.4$
Коэффициент запаса устойчивости для условий испытания _____	$n_{и} := 1.8$
Модуль упругости стали при рабочей температуре среды, Па _____	$E := 2.0 \cdot 10^{11}$
Коэффициент Пуассона для стали _____	$\mu := 0.3$
Коэффициент затухания для цилиндрической обечайки, 1/м:	

$$\beta := \frac{4 \sqrt{3 \cdot (1 - \mu^2)}}{\sqrt{[R \cdot (S - c)]^2}} = 33.189$$

Коэффициент затухания для эллиптической обечайки, 1/м:

$$\beta_3 := \sqrt[4]{\frac{3 \cdot (1 - \mu^2)}{[a \cdot (S1 - c)]^2}} = 33.189$$

Угловые и линейные деформации для цилиндрической обечайки:

$$\Delta_{\text{цPp}} := \frac{(2 - \mu) \cdot R^2}{2 \cdot E \cdot (S - c)} \cdot P_p = 2.295 \times 10^{-5}$$

$$\Delta_{\text{цQ0}} := 2 \cdot \beta \cdot \frac{R^2}{(S - c) \cdot E} = 5.974 \times 10^{-9}$$

$$\Delta_{\text{цP}} := \frac{(2 - \mu) \cdot R^2}{2 \cdot E \cdot (S - c)} \cdot P = 4.59 \times 10^{-5}$$

$$\Delta_{\text{цM0}} := 2 \cdot \beta^2 \cdot \frac{R^2}{(S - c) \cdot E} = 1.983 \times 10^{-7}$$

$$\theta_{\text{цPp}} := 0$$

$$\theta_{\text{цP}} := 0$$

$$\theta_{\text{цQ0}} := 2 \cdot \beta^2 \cdot \frac{R}{(S - c) \cdot E} = 6.609 \times 10^{-7}$$

$$\theta_{\text{цM0}} := 4 \cdot \beta^3 \cdot \frac{R^2}{(S - c) \cdot E} = 1.316 \times 10^{-5}$$

Угловые и линейные деформации эллиптической крышки:

$$\Delta_{\text{эPp}} := P_p \cdot \frac{a^2}{[2 \cdot E \cdot (S1 - c)]} \cdot \left(2 \cdot \mu - \frac{a^2}{b^2} \right) = -4.59 \times 10^{-5}$$

$$\Delta_{\text{эP}} := P \cdot \frac{a^2}{[2 \cdot E \cdot (S1 - c)]} \cdot \left(2 \cdot \mu - \frac{a^2}{b^2} \right) = -9.18 \times 10^{-5}$$

$$\Delta_{\text{эQ0}} := 2 \cdot \beta_3 \cdot \frac{a^2}{(S1 - c) \cdot E} = 5.974 \times 10^{-9}$$

$$\Delta_{\varepsilon M0} := 2 \cdot \beta_3^2 \cdot \frac{a^2}{(S1 - c) \cdot E} = 1.983 \times 10^{-7}$$

$$\theta_{\varepsilon Pp} := 0$$

$$\theta_{\varepsilon P} := 0$$

$$\theta_{\varepsilon Q0} := 2 \cdot \beta_3^2 \cdot \frac{a^2}{(S1 - c) \cdot E} = 1.983 \times 10^{-7}$$

$$\theta_{\varepsilon M0} := 4 \cdot \beta_3^3 \cdot \frac{a^2}{(S1 - c) \cdot E} = 1.316 \times 10^{-5}$$

$$Q_0 := 0 \quad M_0 := 0$$

Подставляем значения угловых и линейных деформаций в систему уравнений:

$$-\Delta_{\varepsilon Pp} + \Delta_{\varepsilon P} - \Delta_{\varepsilon Q0} \cdot Q_0 + \Delta_{\varepsilon M0} \cdot M_0 = -\Delta_{\varepsilon Pp} + \Delta_{\varepsilon P} + \Delta_{\varepsilon Q0} \cdot Q_0 + \Delta_{\varepsilon M0} \cdot M_0$$

$$-\theta_{\varepsilon Pp} + \theta_{\varepsilon P} - \theta_{\varepsilon Q0} \cdot Q_0 + \theta_{\varepsilon M0} \cdot M_0 = \theta_{\varepsilon Pp} - \theta_{\varepsilon P} - \theta_{\varepsilon Q0} \cdot Q_0 - \theta_{\varepsilon M0} \cdot M_0$$

Решив систему, получим следующие значения нагрузок:

$$Q_0 = 5.762 \times 10^3 \quad \frac{\text{Н}}{\text{м}}$$

$$M_0 = 101.281 \quad \text{Н} \cdot \frac{\text{м}}{\text{м}}$$

Вычисление напряжений на краю эллиптического днища и цилиндрической обечайки.

Суммарные напряжения на краю эллиптического днища, Па:

- меридиональное:

$$\sigma_{m\pi 1} := -P_p \cdot \frac{a}{[2 \cdot (S1 - c)]} + P \cdot \frac{a}{[2 \cdot (S1 - c)]} + 0 + 6 \cdot \frac{M_0}{(S1 - c)^2}$$

$$\sigma_{m\alpha 2} := -P_p \cdot \frac{a}{[2 \cdot (S1 - c)]} + P \cdot \frac{a}{[2 \cdot (S1 - c)]} + 0 - 6 \cdot \frac{M_0}{(S1 - c)^2}$$

$$\sigma_{m\alpha} := \max(|\sigma_{m\alpha 1}|, |\sigma_{m\alpha 2}|) = 3.331 \times 10^7$$

- кольцевое:

$$\sigma_{t\alpha 1} := -P_p \cdot a \cdot \frac{\left(2 - \frac{a^2}{b^2}\right)}{[2 \cdot (S1 - c)]} + P \cdot a \cdot \frac{\left(2 - \frac{a^2}{b^2}\right)}{[2 \cdot (S1 - c)]} + 2 \cdot Q_0 \cdot \beta_3 \cdot \frac{a}{(S1 - c)} + 2 \cdot M_0 \cdot \beta_3^2 \cdot \frac{a}{(S1 - c)} + 6 \cdot \mu \cdot \frac{M_0}{(S1 - c)^2}$$

$$\sigma_{t\alpha 2} := -P_p \cdot a \cdot \frac{\left(2 - \frac{a^2}{b^2}\right)}{[2 \cdot (S1 - c)]} + P \cdot a \cdot \frac{\left(2 - \frac{a^2}{b^2}\right)}{[2 \cdot (S1 - c)]} + 2 \cdot Q_0 \cdot \beta_3 \cdot \frac{a}{(S1 - c)} + 2 \cdot M_0 \cdot \beta_3^2 \cdot \frac{a}{(S1 - c)} - 6 \cdot \mu \cdot \frac{M_0}{(S1 - c)^2}$$

$$\sigma_{t\alpha} := \max(|\sigma_{t\alpha 1}|, |\sigma_{t\alpha 2}|) = 2.563 \times 10^7$$

Суммарные напряжения на краю цилиндрической обечайки, Па:

- меридиональное:

$$\sigma_{m\sigma 1} := -P_p \cdot \frac{R}{[2 \cdot (S - c)]} + P \cdot \frac{R}{[2 \cdot (S - c)]} - 0 + 6 \cdot \frac{M_0}{(S - c)^2}$$

$$\sigma_{m\sigma 2} := -P_p \cdot \frac{R}{[2 \cdot (S - c)]} + P \cdot \frac{R}{[2 \cdot (S - c)]} - 0 - 6 \cdot \frac{M_0}{(S - c)^2}$$

$$\sigma_{m\sigma} := \max(|\sigma_{m\sigma 1}|, |\sigma_{m\sigma 2}|) = 3.331 \times 10^7$$

- кольцевое:

$$\sigma_{t\sigma 1} := -P_p \cdot \frac{R}{(S - c)} + P \cdot \frac{R}{(S - c)} - 2 \cdot Q_0 \cdot \beta \cdot \frac{R}{(S - c)} + 2 \cdot M_0 \cdot \beta^2 \cdot \frac{R}{(S - c)} + 6 \cdot \mu \cdot \frac{M_0}{(S - c)^2}$$

$$\sigma_{t\sigma 2} := -P_p \cdot \frac{R}{(S - c)} + P \cdot \frac{R}{(S - c)} - 2 \cdot Q_0 \cdot \beta \cdot \frac{R}{(S - c)} + 2 \cdot M_0 \cdot \beta^2 \cdot \frac{R}{(S - c)} - 6 \cdot \mu \cdot \frac{M_0}{(S - c)^2}$$

$$\sigma_{to} := \max(|\sigma_{to1}|, |\sigma_{to2}|) = 1.573 \times 10^7$$

Проверка условия прочности для узла сопряжения обечайки и днища цилиндрической обечайки.

Допускаемое напряжение на краю элемента, Па:

$$\sigma_{кр.д} := 1.3 \cdot \sigma_d = 2.223 \times 10^8$$

Максимальное напряжение на краю, Па:

- эллиптического днища:

$$\sigma_{maxэ} := \max(\sigma_{mэ}, \sigma_{tэ}) = 3.331 \times 10^7$$

$$\sigma_{maxэ} < \sigma_{кр.д}$$

- цилиндрической обечайки:

$$\sigma_{maxо} := \max(\sigma_{mo}, \sigma_{to}) = 3.331 \times 10^7$$

$$\sigma_{maxэ} < \sigma_{кр.д}$$

Таким образом, условие прочности в месте сопряжения элементов выполняется.

5.1.6 Расчёт сопряжения обечайки рубашки и днища

Названия элементов – цилиндрическая обечайка рубашки, эллиптическое днище рубашки. Номера позиций на расчётной модели – 6 и 5.

Расчётная схема сопряжения цилиндрической обечайки рубашки с её эллиптическим днищем представлена на рисунке 5.12.

P – внутреннее давление, действующее на обечайку со стороны теплоносителя в рубашке, Па;

Q_0 – краевая сила, действующая на соединённые обечайки, Н/м;

M_0 – краевой момент, действующий на соединённые обечайки, Н*м;

U – радиальное усилие на краю обечаек, Н;

Δ – краевые радиальные деформации обечаек от действия краевых нагрузок, усилий и моментов, м;

θ – краевые угловые деформации обечаек от действия краевых нагрузок, усилий и моментов, °.

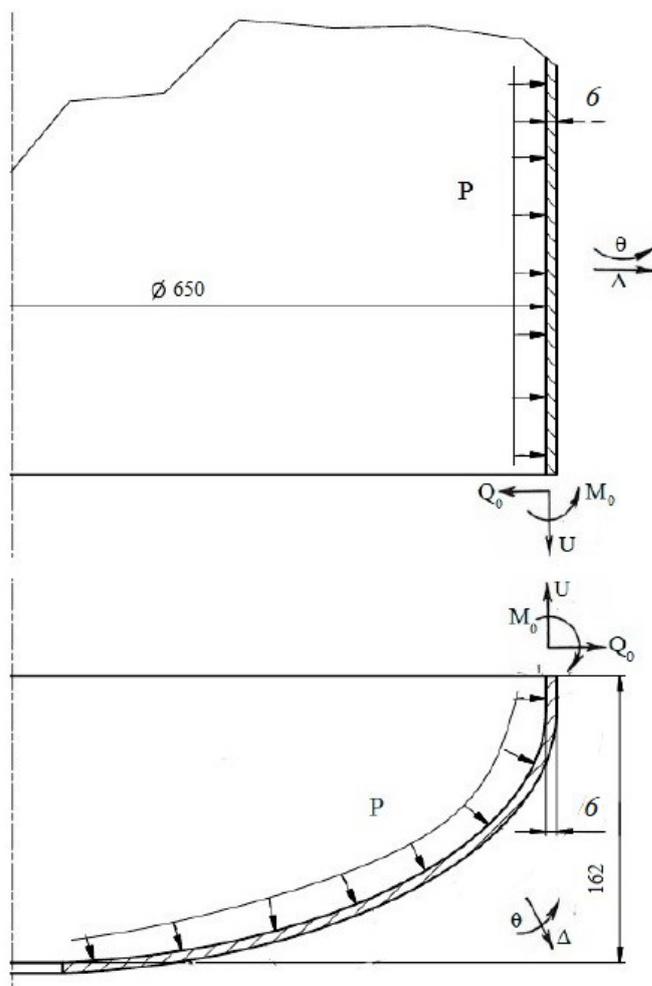


Рисунок 5.12 – Расчётная схема сопряжения цилиндрической обечайки рубашки и эллиптического днища

Цель расчёта - прочностная проверка устойчивости соединения цилиндрической обечайки рубашки с днищем от возникающих при сопряжении краевых напряжений. Расчёты выполнены в соответствии с [27].

Исходные данные:

Внутренний диаметр аппарата, м _____	$D := 0.65$
Радиус аппарата, м _____	$R := 0.325$
Первый радиус эллипса крышки, м _____	$a := 0.325$
Второй радиус эллипса крышки, м _____	$b := 0.162$
Толщина стенки обечайки рубашки, м _____	$S := 0.006$
Толщина стенки днища, м _____	$S1 := 0.006$
Рабочее давление в рубашке, Па _____	$P_p := 300000$
Допускаемое напряжение стали 15ХМ для рабочих условий, МПа _____	$\sigma_d := 155 \cdot 10^6$
Рабочая температура среды, воздействующая на сопряжение, °С _____	$t_c := 75$
Коэффициент прочности сварных швов _____	$\phi = 1$
Сумма прибавок к расчётной толщине стенок, м _____	$c = 0.003$
Коэффициент запаса устойчивости для рабочих условий _____	$n_p = 2.4$
Коэффициент запаса устойчивости для условий испытания, безразмерный _____	$n_{и} := 1.8$
Модуль упругости материала аппарата при рабочей температуре среды, Па _____	$E = 2 \times 10^{11}$
Коэффициент Пуассона для стали _____	$\mu = 0.3$

Коэффициент затухания для цилиндрической обечайки рубашки, 1/м:

$$\beta := \frac{4 \sqrt{3 \cdot (1 - \mu^2)}}{\sqrt{[R \cdot (S - c)]^2}} = 41.166$$

Коэффициент затухания для эллиптического днища рубашки, 1/м:

$$\beta_э := \frac{4 \sqrt{3 \cdot (1 - \mu^2)}}{\sqrt{[a \cdot (S1 - c)]^2}} = 41.166$$

Угловые и линейные деформации для цилиндрической обечайки рубашки:

$$\Delta_{\text{иPp}} := \frac{(2 - \mu) \cdot R^2}{2 \cdot E \cdot (S - c)} \cdot P_p = 4.489 \times 10^{-5}$$

$$\Delta_{\text{иQ0}} := 2 \cdot \beta \cdot \frac{R^2}{(S - c) \cdot E} = 1.449 \times 10^{-8}$$

$$\Delta_{\text{иP}} := \frac{(2 - \mu) \cdot R^2}{2 \cdot E \cdot (S - c)} \cdot P = 8.978 \times 10^{-5}$$

$$\Delta_{\text{иM0}} := 2 \cdot \beta^2 \cdot \frac{R^2}{(S - c) \cdot E} = 5.967 \times 10^{-7}$$

$$\theta_{\text{иPp}} := 0$$

$$\theta_{\text{иP}} := 0$$

$$\theta_{\text{иQ0}} := 2 \cdot \beta^2 \cdot \frac{R}{(S - c) \cdot E} = 1.836 \times 10^{-6}$$

$$\theta_{\text{иM0}} := 4 \cdot \beta^3 \cdot \frac{R^2}{(S - c) \cdot E} = 4.912 \times 10^{-5}$$

Угловые и линейные деформации эллиптического днища рубашки:

$$\Delta_{\text{эPp}} := P_p \cdot \frac{a^2}{[2 \cdot E \cdot (S1 - c)]} \cdot \left(2 \cdot \mu - \frac{a^2}{b^2} \right) = -9.043 \times 10^{-5}$$

$$\Delta_{\text{эP}} := P \cdot \frac{a^2}{[2 \cdot E \cdot (S1 - c)]} \cdot \left(2 \cdot \mu - \frac{a^2}{b^2} \right) = -1.809 \times 10^{-4}$$

$$\Delta_{\text{эQ0}} := 2 \cdot \beta_3 \cdot \frac{a^2}{(S1 - c) \cdot E} = 1.449 \times 10^{-8}$$

$$\Delta_{\text{эM0}} := 2 \cdot \beta_3^2 \cdot \frac{a^2}{(S1 - c) \cdot E} = 5.967 \times 10^{-7}$$

$$\theta_{\text{эPp}} := 0$$

$$\theta_{\text{эP}} := 0$$

$$\theta_{\varepsilon Q0} := 2 \cdot \beta_3^2 \cdot \frac{a^2}{(S1 - c) \cdot E} = 5.967 \times 10^{-7}$$

$$\theta_{\varepsilon M0} := 4 \cdot \beta_3^3 \cdot \frac{a^2}{(S1 - c) \cdot E} = 4.912 \times 10^{-5}$$

$$Q_0 := 0 \quad M_0 := 0$$

Подставляем значения угловых и линейных деформаций в систему уравнений:

$$-\Delta_{\text{цРр}} + \Delta_{\text{цР}} - \Delta_{\text{цQ0}} \cdot Q_0 + \Delta_{\text{цM0}} \cdot M_0 = -\Delta_{\varepsilon\text{Рр}} + \Delta_{\varepsilon\text{Р}} + \Delta_{\varepsilon\text{Q0}} \cdot Q_0 + \Delta_{\varepsilon\text{M0}} \cdot M_0$$

$$-\theta_{\text{цРр}} + \theta_{\text{цР}} - \theta_{\text{цQ0}} \cdot Q_0 + \theta_{\text{цM0}} \cdot M_0 = \theta_{\varepsilon\text{Рр}} - \theta_{\varepsilon\text{Р}} - \theta_{\varepsilon\text{Q0}} \cdot Q_0 - \theta_{\varepsilon\text{M0}} \cdot M_0$$

Решив систему, получим следующие значения нагрузок:

$$Q_0 := 1.004 \cdot 10^4 \quad \frac{\text{Н}}{\text{м}}$$

$$M_0 := 163.562 \quad \text{Н} \cdot \frac{\text{м}}{\text{м}}$$

Вычисление напряжений на краю эллиптического днища и цилиндрической обечайки рубашки.

Суммарные напряжения на краю эллиптического днища рубашки, Па:

- меридиональное:

$$\sigma_{\text{мэ1}} := -P_p \cdot \frac{a}{[2 \cdot (S1 - c)]} + P \cdot \frac{a}{[2 \cdot (S1 - c)]} + 0 + 6 \cdot \frac{M_0}{(S1 - c)^2}$$

$$\sigma_{\text{мэ2}} := -P_p \cdot \frac{a}{[2 \cdot (S1 - c)]} + P \cdot \frac{a}{[2 \cdot (S1 - c)]} + 0 - 6 \cdot \frac{M_0}{(S1 - c)^2}$$

$$\sigma_{\text{мэ}} := \max(|\sigma_{\text{мэ1}}|, |\sigma_{\text{мэ2}}|) = 1.253 \times 10^8$$

- кольцевое:

$$\sigma_{t31} := -P_p \cdot a \cdot \frac{\left(2 - \frac{a^2}{b^2}\right)}{[2 \cdot (S1 - c)]} + P \cdot a \cdot \frac{\left(2 - \frac{a^2}{b^2}\right)}{[2 \cdot (S1 - c)]} + 2 \cdot Q_0 \cdot \beta_3 \cdot \frac{a}{(S1 - c)} + 2 \cdot M_0 \cdot \beta_3^2 \cdot \frac{a}{(S1 - c)} + 6 \cdot \mu \cdot \frac{M_0}{(S1 - c)^2}$$

$$\sigma_{t32} := -P_p \cdot a \cdot \frac{\left(2 - \frac{a^2}{b^2}\right)}{[2 \cdot (S1 - c)]} + P \cdot a \cdot \frac{\left(2 - \frac{a^2}{b^2}\right)}{[2 \cdot (S1 - c)]} + 2 \cdot Q_0 \cdot \beta_3 \cdot \frac{a}{(S1 - c)} + 2 \cdot M_0 \cdot \beta_3^2 \cdot \frac{a}{(S1 - c)} - 6 \cdot \mu \cdot \frac{M_0}{(S1 - c)^2}$$

$$\sigma_{t3} := \max(|\sigma_{t31}|, |\sigma_{t32}|) = 1.494 \times 10^8$$

Суммарные напряжения на краю цилиндрической обечайки рубашки,

Па:

- меридиональное:

$$\sigma_{mo1} := -P_p \cdot \frac{R}{[2 \cdot (S - c)]} + P \cdot \frac{R}{[2 \cdot (S - c)]} - 0 + 6 \cdot \frac{M_0}{(S - c)^2}$$

$$\sigma_{mo2} := -P_p \cdot \frac{R}{[2 \cdot (S - c)]} + P \cdot \frac{R}{[2 \cdot (S - c)]} - 0 - 6 \cdot \frac{M_0}{(S - c)^2}$$

$$\sigma_{to} := \max(|\sigma_{to1}|, |\sigma_{to2}|) = 3.572 \times 10^7$$

- кольцевое:

$$\sigma_{to1} := -P_p \cdot \frac{R}{(S - c)} + P \cdot \frac{R}{(S - c)} - 2 \cdot Q_0 \cdot \beta \cdot \frac{R}{(S - c)} + 2 \cdot M_0 \cdot \beta^2 \cdot \frac{R}{(S - c)} + 6 \cdot \mu \cdot \frac{M_0}{(S - c)^2}$$

$$\sigma_{to2} := -P_p \cdot \frac{R}{(S - c)} + P \cdot \frac{R}{(S - c)} - 2 \cdot Q_0 \cdot \beta \cdot \frac{R}{(S - c)} + 2 \cdot M_0 \cdot \beta^2 \cdot \frac{R}{(S - c)} - 6 \cdot \mu \cdot \frac{M_0}{(S - c)^2}$$

$$\sigma_{mo} := \max(|\sigma_{mo1}|, |\sigma_{mo2}|) = 1.253 \times 10^8$$

Проверка условия прочности для узла сопряжения цилиндрической обечайки и эллиптического днища рубашки:

Допускаемое напряжение на краю элемента, Па:

$$\sigma_{кр.д} := 1.3 \cdot \sigma_d = 2.015 \times 10^8$$

Максимальное напряжение на краю, Па:

- *эллиптического днища:*

$$\sigma_{\max\text{э}} := \max(\sigma_{\text{мэ}}, \sigma_{\text{тэ}}) = 5.527 \times 10^7$$

$$\sigma_{\max\text{э}} < \sigma_{\text{кр.д}}$$

- *цилиндрической обечайки:*

$$\sigma_{\text{тo}} := \max(|\sigma_{\text{то1}}|, |\sigma_{\text{то2}}|) = 3.572 \times 10^7$$

$$\sigma_{\text{махо}} < \sigma_{\text{кр.д}}$$

Таким образом, условие прочности в месте сопряжения элементов выполняется.

5.1.7 Расчёт сопряжения рубашки с корпусом

Целью выполнения расчёта является проверка надёжности конструкции сопряжения теплообменной рубашки с корпусом аппарата. Расчёты выполнены в соответствии с [27].

Названия элементов – обечайка корпуса цилиндрическая (2), обечайка рубашки цилиндрическая (6).

p – внутреннее давление теплоносителя в рубашке, МПа.

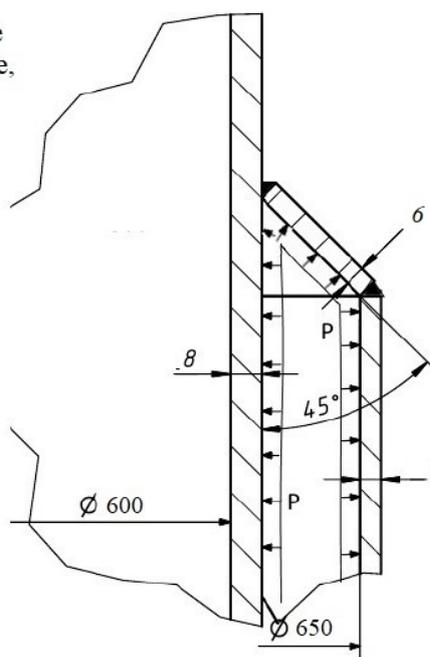


Рисунок 5.12 – Расчётная схема сопряжения цилиндрической обечайки с гладкой теплообменной рубашкой

Исходные данные:

Внутренний диаметр аппарата, мм _____	$D_1 := 600$
Внутренний диаметр рубашки, мм _____	$D_2 := 650$
Диаметр сопряжения рубашки с корпусом у днища, мм _____	$d_1 := 75$
Толщина стенки обечайки аппарата, мм _____	$S_1 := 8$
Толщина стенки обечайки рубашки, мм _____	$S_2 := 6$
Прибавка к толщине стенки, мм _____	$c := 3$
Угол сопряжения, гр. _____	$\alpha := 45$
Расстояние от середины стенки рубашки до наружной стенки аппарата, мм _____	$e_0 := 21$
Расчетное давление в аппарате, МПа _____	$P_{\text{кор}} := 0.605$
Рабочее давление в рубашке, МПа _____	$P_{\text{руб}} := 0.3$
Допускаемое напряжение стали 12Х18Н10Т для рабочих условий, МПа _____	$\sigma_{\text{д.кор}} := 171$
Допускаемое напряжение стали 12Х18Н10Т для рабочих условий, МПа _____	$\sigma_{\text{д.кор}} := 171$
Допускаемое напряжение стали 15ХМ для рабочих условий, МПа _____	$\sigma_{\text{д.руб}} := 155$
Коэффициент прочности сварных швов _____	$\phi_{T1} := 1$

Коэффициент осевого усилия, мм:

$$A := \frac{(D_1 \cdot D_2 - d_1^2)}{D_2^2} = 0.91$$

Коэффициент, учитывающий расстояние между корпусом сосуда и рубашкой:

$$\varepsilon := \frac{e_0}{\sqrt{D_2 \cdot (S_2 - c)}} = 0.476$$

Коэффициент радиуса конической отбортовки ρ принимаем равным нулю:

$$\rho := 0$$

Коэффициент длины сопряжения при угле сопряжения 45°:

$$\lambda := \varepsilon \cdot \sqrt{2} + 0.45 \cdot \rho = 0.673$$

Коэффициент отношения прочности корпуса сосуда и рубашки:

$$\chi := 1.25 \cdot \left[\frac{[\sigma_{д.кор} \cdot (S_1 - c) \cdot \sqrt{D_1 \cdot (S_1 - c)}]}{\sigma_{д.руб} \cdot (S_2 - c) \cdot \sqrt{D_2 \cdot (S_2 - c)}} \right] \left[\sqrt{1 - \frac{(P_{кор} \cdot D_1)}{2 \cdot \sigma_{д.кор} \cdot (S_1 - c)}} + \sqrt{1 - \frac{(P_{кор} - P_{руб}) \cdot D_1}{2 \cdot \sigma_{д.кор} \cdot (S_1 - c)}} \right]$$

$$\chi = 5.224$$

Расчетные коэффициенты прочности сварного шва:

$$\phi_{p1} := \phi_{T1} \cdot \frac{\min(\sigma_{д.кор}, \sigma_{д.руб})}{\sigma_{д.руб}} = 1$$

Коэффициент ϕ_{p2} принимается равным единице, поскольку исполнительная длина укрепления стенки рубашки в месте сопряжения с помощью конуса равна.

$$\phi_{p2} := 1$$

$$l_R := 0.5 \sqrt{D_2 \cdot (S_2 - c)} = 22.079$$

Относительная эффективная несущая длина конуса:

$$\mu := \min \left[\frac{\varepsilon}{\sin(\alpha)}, \sqrt{\frac{(\phi_{p1} + \phi_{p2})}{4 \cdot \cos(\alpha)}} \right] = 0.559$$

Расчет коэффициент сопряжения с помощью конуса.

Первый коэффициент при выполнении условия:

$$\lambda = 0.673 < \frac{|\chi - 1|}{2} = 2.112$$

$$f_1 := \lambda + \min(1, \chi) = 1.673$$

Формула второго коэффициента выбирается исходя из угла сопряжения. Предварительно рассчитываются следующие вспомогательные величины.

$$\varepsilon_0 := 0.60 \cdot \sqrt{1 + 0.83 \cdot \rho + 0.73 \cdot \rho^2} = 0.6$$

$$\varepsilon = 0.368 < \varepsilon_0 = 0.6$$

$$z := 1 + \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon} \right)^2 = 2.592$$

$$f_2 := 0.71 + 0.52 \cdot \rho + \varepsilon \cdot z = 1.943$$

Третий вспомогательный коэффициент:

$$f_3 := 1 + \left[\frac{\left[12 \cdot \rho^3 \cdot \left(\frac{0.2}{\varepsilon} \right)^4 \right]}{12 \cdot \varepsilon + \rho^2 \cdot \max \left[0, \left(\frac{0.5}{\varepsilon} \right)^3 - 1 \right]} \right] = 1$$

Формула для четвёртого вспомогательного коэффициента также берётся исходя из того, что угол сопряжения равен 45°:

$$f_4 := \max \left[1, \min \left[1, 0.8 + \left(\frac{6.0}{100 \cdot \varepsilon} \right) + \left(\frac{\rho}{2} \right) \right] \min \left[1, \frac{\left(\frac{4}{3} \right)}{1 + \varepsilon \cdot [1 + \varepsilon \cdot (1 + 5.5 \cdot \varepsilon)]} \right] \right] = 1$$

Вспомогательные коэффициенты X1, X2, X3:

$$X_1 := \left(\frac{\cos(\alpha)}{\varepsilon} \right) \left[\left[\frac{(\phi_{p1} + \phi_{p2})}{4 \cdot \cos(\alpha)} \right] + \lambda \cdot f_1 \right] = 2.294$$

$$X_2 := f_2 \cdot \sqrt{1 + \phi_{p2}} = 2.747$$

$$X_3 := \chi \cdot f_3 + \left[\left(\frac{\phi_{p1} + \phi_{p2}}{4 \cdot \mu \cdot \cos(\alpha)} \right) + \mu \right] f_4 = 7.486$$

$$B := 2 \cdot \sqrt{\frac{(S_2 - c)}{D_2}} \cdot \min(X_1, X_2, X_3) = 0.312$$

Допускаемое давление в рубашке, МПа

Коэффициент прочности сварного шва рубашки:

$$\phi_{п2} := 1$$

$$P_{д.руб} := \frac{2 \cdot \sigma_{д.руб} \cdot (S_2 - c) \cdot \Phi_{п2}}{D_2 + (S_2 - c)} \cdot \frac{B}{A} = 0.488$$

Проверка критерия прочности:

$$P_{руб} = 0.3 < P_{д.руб} = 0.488$$

Условие прочности по допускаемому избыточному давлению выполняется.

5.1.8 Расчёт фланцевого соединения корпуса с крышкой

Названия элементов – цилиндрическая обечайка корпуса, эллиптическая крышка корпуса, фланцевое соединение. Номера позиций на расчётной модели – 1, 2.

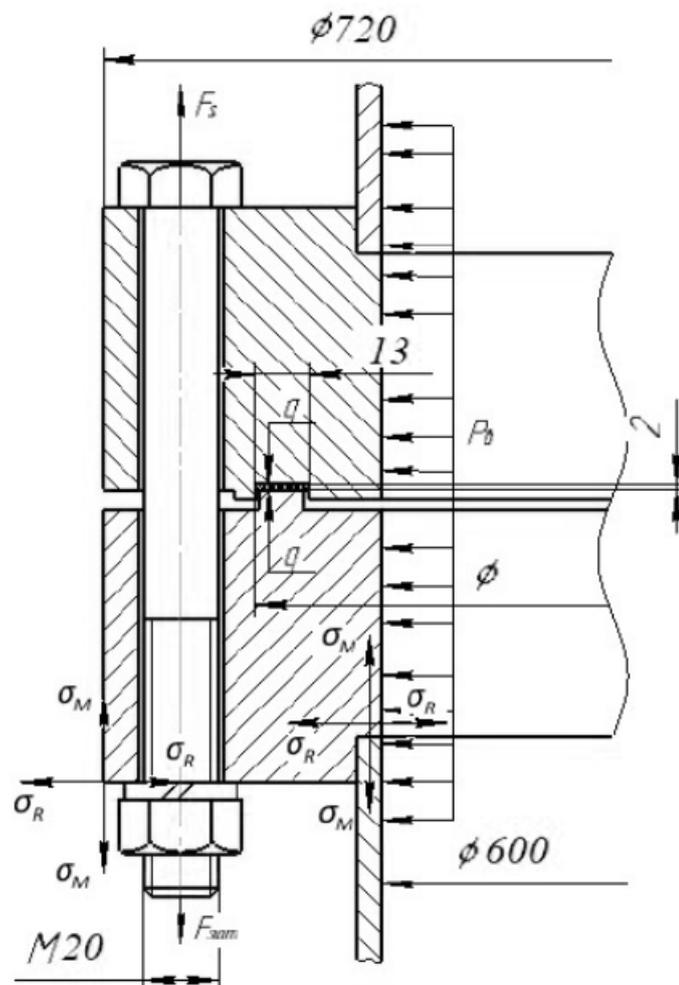


Рисунок 5.13 – Расчётная схема фланцевого соединения крышки с корпусом

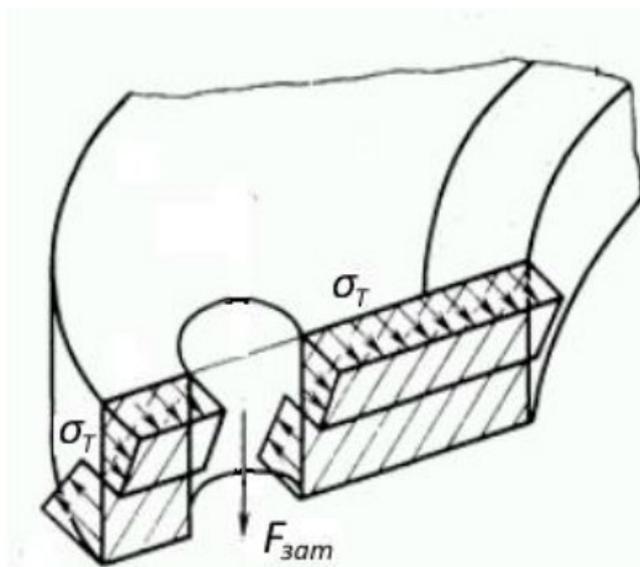


Рисунок 5.14 – Уточняющая расчётная схема фланцевого соединения крышки с корпусом

где P_0 – внешнее давление атмосферы на аппарат, МПа; F_s – усилие, действующее на болты со стороны среды аппарата, Н; $F_{зат}$ – усилие, действующее на болты при затяжке, Н; q – удельное давление обжатия прокладки, МПа; σ_R , σ_M , σ_T – соответственно радиальные, меридиональные и кольцевые напряжения в тарелке или обечайке фланца, МПа.

Целью выполнения расчёта является проверка надёжности конструкции фланцевого соединения. Показателями механической надёжности являются прочность болтов при затяжке и в рабочих условиях, прочность прокладки, статическая прочность соединения при затяжке и в рабочих условиях, а также соответствия угла поворота фланца допусжаемому значению. Расчёты выполнены в соответствии с [28,29].

Исходные данные:

Внутренний диаметр аппарата, мм _____	$D := 600$
Наружный диаметр фланца, мм _____	$D_H := 720$
Диаметр болтовой окружности, мм _____	$D_G := 680$
Наружный диаметр прокладки, мм _____	$D_{H.П} := 643$
Ширина прокладки, мм _____	$b_{П} := 13$
Высота фланца, мм _____	$h := 30$
Высота прокладки, мм _____	$h_{П} := 2$
Толщина обечайки и крышки, мм _____	$S_0 := 8$
Диаметр болтов, мм _____	$d := 22$
Число болтов, шт _____	$n := 24$
Площадь поперечного сечения болта, мм.кв. _____	$f_G := 225$
Расстояние между опорными поверхностями гайки и головки болта, мм _____	$L_{G0} := 62$
Расчётное наружное давление на крышке, МПа _____	$P := 0.605$
Внешняя осевая сжимающая сила, Н _____	$F := 0$
Внешний изгибающий момент, Н*мм _____	$M := 0$
Прибавка к толщине стенки, мм _____	$c_o := 3$
Температура среды в аппарате, °C _____	$t := 75$

Определение расчетных параметров:

Расчетная температура неизолированных плоских фланцев $t_{\phi} = 0,96 t$, °C:

$$t_{\phi} := 0.96 \cdot t = 72$$

Расчетная температура болтов, °C:

$$t_G := 0.85 \cdot t = 63.75$$

Эффективная ширина плоской прокладки, мм:

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

$$b_0 = 13$$

Расчетный диаметр плоских прокладок, мм:

$$D_{\text{сп}} := D_{\text{н.п}} - b_0 = 630$$

Характеристики прокладки по таблице 4.6:

$$m := 2.5$$

$$q_{\text{обж}} := 10 \text{ МПа}$$

$$q_d := 40 \text{ МПа}$$

$$K_{\text{обж}} := 1$$

$$E_{\text{п}} := 2000 \text{ МПа}$$

Усилие, необходимое для смятия прокладки при затяжке:

$$P_{\text{обж}} := 0.5\pi \cdot D_{\text{сп}} \cdot b_0 \cdot m \cdot q_{\text{обж}} = 3.216 \times 10^5$$

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

$$R_{\text{п}} := \begin{cases} \pi \cdot D_{\text{сп}} \cdot b_0 \cdot m \cdot P & \text{if } P \geq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$
$$R_{\text{п}} = 3.892 \times 10^4$$

Суммарная площадь сечения болтов по внутреннему диаметру резьбы или нагруженному сечению наименьшего диаметра, мм²:

$$A_{\text{б}} := n \cdot f_{\text{б}} = 5.4 \times 10^3$$

Равнодействующая нагрузка от давления, Н:

$$Q_{\text{д}} := \frac{\pi}{4} \cdot (D_{\text{сп}})^2 \cdot P = 1.886 \times 10^5$$

Приведенная нагрузка, вызванная воздействием внешней силы и изгибающего момента, Н:

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

Податливость прокладки, мм/Н:

$$y_{\Pi} := \frac{h_{\Pi} \cdot K_{\text{обж}}}{E_{\Pi} \cdot \pi \cdot D_{\text{сп}} \cdot b_{\Pi}} = 3.887 \times 10^{-8}$$

Эффективная длина болта при определении податливости, мм:

$$L_{\text{б}} := L_{\text{б0}} + 0.28 \cdot d = 68.16$$

Податливость болтов, мм/Н:

$$y_{\text{б}} := \frac{L_{\text{б}}}{E_{206} \cdot A_{\text{б}}} = 6.343 \times 10^{-8}$$

Расчетные параметры фланцев:

- параметр длины обечайки, мм:

$$l_0 := \sqrt{D \cdot S_0} = 69.282$$

- отношение наружного диаметра тарелки фланца к внутреннему диаметру:

$$K := \frac{D_{\text{н}}}{D} = 1.2$$

- коэффициенты, зависящие от соотношения размеров тарелки фланца:

$$\beta_{\text{T}} := \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \log(K)) - 1}{(1.05 + 1.945 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} = 1.837$$

$$\beta_{\text{U}} := \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \log(K)) - 1}{1.36(K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = 11.822$$

$$\beta_{\text{Y}} := \frac{1}{(K - 1)} \cdot \left[0.69 + 5.72 \cdot \frac{K^2 \cdot \log(K)}{(K^2 - 1)} \right] = 10.861$$

$$\beta_{\text{Z}} := \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = 5.545$$

$$\beta_{\text{F}} := 0.91$$

$$\beta_V := 0.55$$

ε = 1

- коэффициент λ:

$$\lambda := \frac{\beta_F \cdot h + l_0}{\beta_T \cdot l_0} + \frac{\beta_V \cdot h^3}{\beta_U \cdot l_0 \cdot (S_0)^2} = 1.042$$

Угловая податливость фланцев

Угловая податливость фланца при затяжке:

$$y_\phi := \frac{0.91 \cdot \beta_V}{E_{20} \cdot \lambda \cdot l_0 \cdot S_0^2} = 5.416 \times 10^{-10}$$

Угловая податливость фланца, нагруженного внешним изгибающим моментом:

$$y_{\phi H} := \left(\frac{\pi}{4} \right)^3 \cdot \frac{D_\phi}{E_{20} \cdot h^3 \cdot D_H} = 8.473 \times 10^{-11}$$

Коэффициент, учитывающий изгиб тарелки фланца между болтами:

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

Приведенный диаметр плоского фланца:

$$D_{пр} := D = 600$$

Плечо действия усилий в болтах для приварных встык и плоских фланцев, мм:

$$b := 0.5(D_\phi - D_{сп}) = 25$$

Плечо усилия от действия давления на фланец для всех типов фланцев, мм:

$$e := 0.5 \cdot (D_{сп} - D - S_0) = 11$$

Эквивалентная толщина плоских фланцев:

Эквивалентная тол

$$S_3 := S_0 = 8$$

Коэффициент жесткости фланцевого соединения для приварных встык и плоских фланцев, Н/мм:

$$\gamma := \frac{1}{y_{\Pi} + y_{\delta} \cdot \frac{E_{20\delta}}{E_6} + 2 \cdot b^2 \cdot y_{\Phi} \cdot \frac{E_{20}}{E}} = 1.284 \times 10^6$$

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

$$\alpha := 1 - \frac{y_{\Pi} - 2 \cdot e \cdot y_{\Phi} \cdot b}{y_{\Pi} + y_{\delta} + 2 \cdot b^2 \cdot y_{\Phi}} = 1.333$$

Коэффициент жесткости фланцевого соединения, нагруженного внешним изгибающим моментом:

$$\alpha_M := \frac{y_{\delta} + 2 \cdot y_{\Phi H} \cdot b \cdot \left(b + e - \frac{e^2}{D_{\text{сп}}} \right)}{y_{\delta} + y_{\Pi} \cdot \left(\frac{D_{\delta}}{D_{\text{сп}}} \right)^2 + 2 \cdot y_{\Phi H} \cdot b^2} = 1.002$$

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

$$Q_t := \gamma \cdot [2\alpha_{\Phi} \cdot h \cdot (t_{\Phi} - 20) - 2\alpha_{\delta} \cdot h \cdot (t_{\delta} - 20)] = 2.741 \times 10^4$$

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

$$P_{\text{б1}} := \max \left[\begin{array}{l} \alpha \cdot (Q_{\text{д}} + F) + R_{\text{п}} + \frac{4 \cdot \alpha_{\text{М}} \cdot |M|}{D_{\text{сп}}} \\ \alpha \cdot (Q_{\text{д}} + F) + R_{\text{п}} + \frac{4 \cdot \alpha_{\text{М}} \cdot |M|}{D_{\text{сп}}} - Q_{\text{т}} \end{array} \right] = 2.902 \times 10^5$$

Расчетная нагрузка на болты при затяжке, необходимая для обеспечения обжатия прокладки и минимального начального натяжения болтов, Н:

$$P_{\text{б2}} := \max(P_{\text{обж}}, 0.4 \cdot A_{\text{б}} \cdot \sigma_{20\text{б}}) = 3.216 \times 10^5$$

$$P_{\text{обж}} = 3.216 \times 10^5$$

Расчетная нагрузка на болты фланцевых соединений при затяжке фланцевого соединения, Н:

$$P_{\text{бм}} := \max(P_{\text{б1}}, P_{\text{б2}}) = 3.216 \times 10^5$$

Расчетная нагрузка на болты фланцевых соединений в рабочих условиях, Н:

$$P_{\text{бр}} := P_{\text{бм}} + (1 - \alpha) \cdot (Q_{\text{д}} + F) + Q_{\text{т}} + \frac{4 \cdot (1 - \alpha_{\text{М}}) \cdot |M|}{D_{\text{сп}}} = 2.863 \times 10^5$$

Проверка прочности болтов и прокладки.

Расчетные напряжения в болтах, МПа:

- при затяжке:

$$\sigma_{\text{б1}} := \frac{P_{\text{бм}}}{A_{\text{б}}} = 59.559$$

- в рабочих условиях:

$$\sigma_{\text{б2}} := \frac{P_{\text{бр}}}{A_{\text{б}}} = 53.023$$

Проверка условий прочности болтов при затяжке и в рабочих условиях.

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

Usl_1 = "Условия прочности выполняются"

Удельное давление на прокладку, МПа:

$$q := \frac{\max(P_{6M}, P_{6P})}{\pi \cdot D_{сш} \cdot b_{ш}} = 12.5$$

Условие прочности прокладки:

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

Usl_2 = "Условие прочности прокладки выполняется"

Расчет фланцев на статическую прочность

Расчетный изгибающий момент, действующий на приварной встык фланец или плоский фланец при затяжке, Н*мм:

$$M_M := C_F \cdot P_{6M} \cdot b = 8.041 \times 10^6$$

Расчетный изгибающий момент, действующий на фланец в рабочих условиях, Н*мм:

$$M_P := C_F \cdot \max[P_{6P} \cdot b + (Q_d + Q_{FM}) \cdot e, |Q_d + Q_{FM}| \cdot e] = 9.232 \times 10^6$$

Расчетные напряжения во фланце при затяжке, МПа:

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

$$\sigma_{0M} := \frac{M_M}{\lambda \cdot (S_0 - c_0)^2 \cdot D_{пр}} = 514.376$$

- радиальное напряжение:

$$\sigma_{RM} := \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + l_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot l_0 \cdot D} \cdot M_M = 21.776$$

- окружное напряжение:

$$\sigma_{TM} := \frac{\beta_Y \cdot M_M}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_{RM} = 40.964$$

Расчетные напряжения во фланце в рабочих условиях:

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

$$\sigma_{0p} := \frac{M_p}{\lambda \cdot (S_0 - c_0)^2 \cdot D_{пр}} = 590.604$$

- максимальные меридиональные мембранные напряжения в обечайке плоского фланца, МПа:

$$\sigma_{0mp} := \max \left[\frac{Q_d + F + \frac{4|M|}{D_{сп}}}{\pi \cdot (D + S_0) \cdot (S_0 - c_0)}, \frac{Q_d + F - \frac{4|M|}{D_{сп}}}{\pi \cdot (D + S_0) \cdot (S_0 - c_0)} \right] = 19.747$$

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

- радиальное напряжение:

$$\sigma_{Rp} := \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + l_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot l_0 \cdot D} \cdot M_p = 25.005$$

- окружное напряжение:

$$\sigma_{Tp} := \frac{\beta_Y \cdot M_p}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_{Rp} = 47.038$$

Проверка условий статической прочности фланцев с учетом стесненности температурных деформаций ($K_T = 1.3$):

PR_1 := "Условия статической прочности при затяжке НЕ выполняются"

PR_2 := "Условия статической прочности в рабочих условиях НЕ выполняются"

PR_3 := "Условия статической прочности выполняются"

$$Usl_3 := \begin{cases} PR_1 & \text{if } \max(|\sigma_{0M} + \sigma_{RM}|, |\sigma_{0M} + \sigma_{TM}|) > K_T 3\sigma_{20} \\ PR_2 & \text{if } \max\left(\left(\left(\begin{array}{l} |\sigma_{0p} - \sigma_{0MP} + \sigma_{Tp}| \\ |\sigma_{0p} - \sigma_{0MP} + \sigma_{Rp}| \\ |\sigma_{0p} + \sigma_{0MP}| \end{array}\right)\right)\right) > K_T 3\sigma_{д.ф} \\ PR_3 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Usl_3 = "Условия статической прочности выполняются"

Проверка углов поворота фланцев:

Угол поворота приварного встык фланца, плоского фланца:

$$\Theta := M_p \cdot y_\phi \cdot \frac{E_{20}}{E} = 5 \times 10^{-3}$$

Допустимый угол поворота плоского фланца:

$$\Theta_d := 0.015$$

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

Usl_P = "Условие поворота плоского фланца выполняется"

Таким образом, принятые исполнения фланцев обеспечивают полную надёжность конструкции соединения.

5.1.9 Расчёт опор аппарата

Названия элементов – опорные стойки. Номер позиции на расчётной модели – 9.

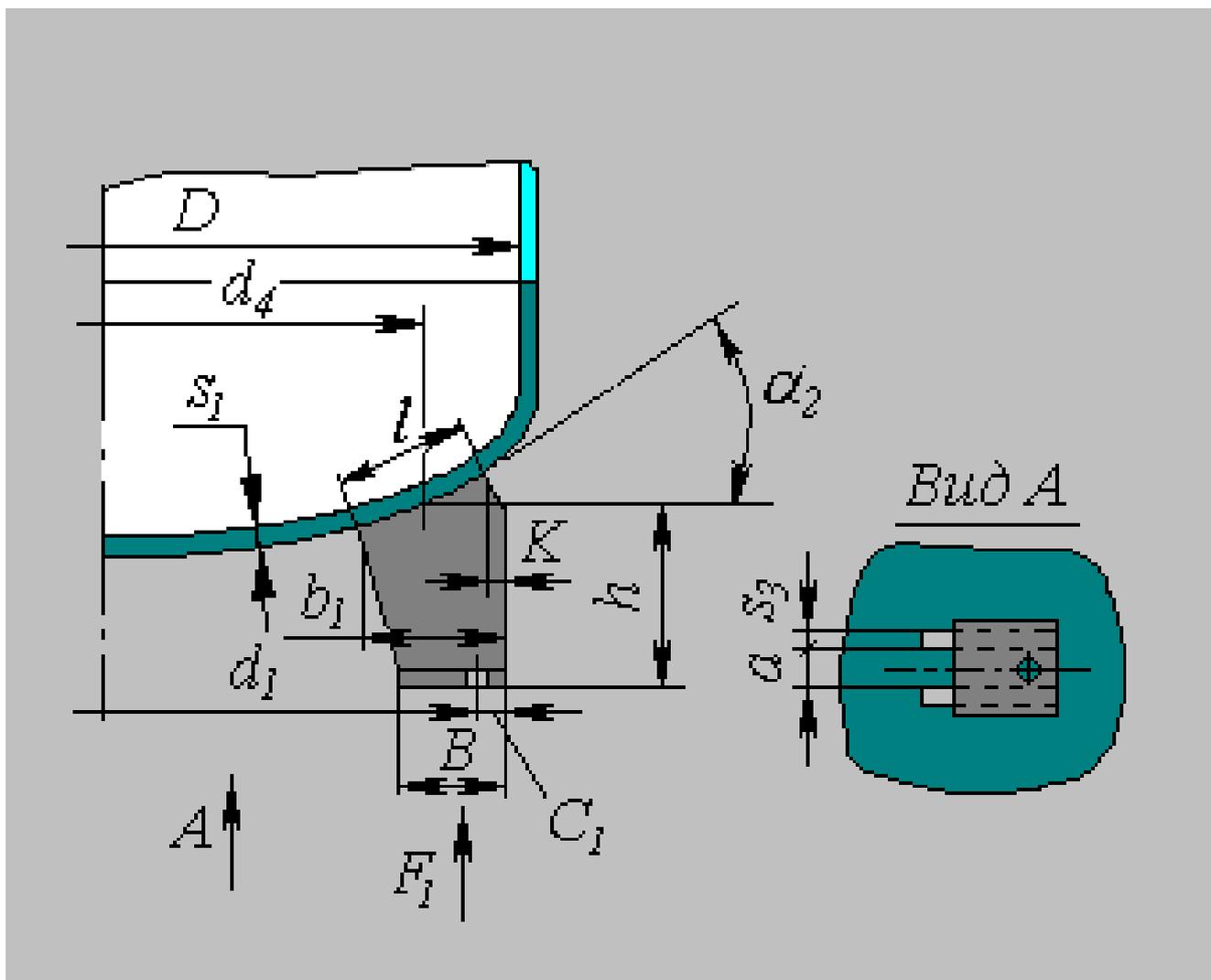


Рисунок 5.15 – Силы, действующие на опорные стойки

где F_1 – усилие, действующие на опорные стойки

Целью выполнения расчёта является проверка надёжности конструкции опор. Расчет выполнен в соответствии с [24,30].

Исходные данные:

Масса эллиптической крышки, кг _____	$m_{э.к.} := 28.3$
Масса днища рубашки, кг _____	$m_{д.р} := 32.9$
Длина развёртки цилиндрической обечайки, м _____	$l_{ц} := 1.884$
Высота цилиндрической обечайки, м _____	$H_{ц} := 0.3$
Толщина стенки цилиндрической обечайки, м _____	$S_{ц} := 0.008$
Объём аппарата, м.куб. _____	$V_{кор} := 0.16$
Плотность материала корпуса, кг/м.куб. _____	$\rho_{ст} := 7920$
Диаметр рубашки, мм _____	$D_p := 0.65$
Длина развёртки обечайки рубашки, м _____	$l_{цр} := 2.041$
Высота обечайки рубашки, м _____	$H_{цр} := 0.2$
Толщина стенки рубашки, м _____	$S_{цр} := 0.006$
Плотность материала рубашки, кг/м.куб. _____	$\rho_{ст.р} := 7830$
Расчетное внутреннее избыточное давление в рубашке, МПа _____	$P_p := 0.3$
Допускаемое напряжение стали 15ХМ, МПа _____	$\sigma_{д.руб} = 155$
Масса фланцевого соединения, кг _____	$m_{ф} := 26.6$
Масса привода, кг _____	$m_{п} := 20$
Масса мешалки, кг _____	$m_{м} := 1.4$
Сумма прибавок к толщине стенки днища, м _____	$c := 0.003$

Вес крышки и днища, Н:

$$G_{э} := 2g \cdot m_{э.к.} = 554.68$$

Объём материала цилиндрической обечайки, м³:

$$V_{ц} := l_{ц} \cdot H_{ц} \cdot S_{ц} = 4.522 \times 10^{-3}$$

Масса обечайки, кг:

$$m_{ц} := V_{ц} \cdot \rho_{ст} = 35.811$$

Вес обечайки, Н:

$$G_{ц} := m_{ц} \cdot g = 350.949$$

Объем обечайки рубашки, м³:

$$V_{\text{цр}} := l_{\text{цр}} \cdot H_{\text{цр}} \cdot S_{\text{цр}} = 2.449 \times 10^{-3}$$

Масса обечайки рубашки, кг:

$$m_{\text{цр}} := V_{\text{цр}} \cdot \rho_{\text{ст.р}} = 19.177$$

Вес обечайки рубашки, Н:

$$G_{\text{цр}} := m_{\text{цр}} \cdot g = 187.937$$

Вес днища рубашки, Н:

$$G_{\text{др}} := g \cdot m_{\text{д.р}} = 322.42$$

Вес фланцевого соединения, Н:

$$G_{\text{ф}} := m_{\text{ф}} \cdot g = 260.68$$

Вес привода мешалки, Н:

$$G_{\text{п}} := (m_{\text{п}} + 2m_{\text{м}}) \cdot g = 223.44$$

Вес штуцеров и других вспомогательных устройств принимаем равным 10% от веса аппарата без учета веса привода, Н:

$$G_{\text{пр}} := 0.1 \cdot (G_{\text{ф}} + G_{\text{др}} + G_{\text{цр}} + G_{\text{ц}} + G_{\text{э}}) = 167.667$$

Общий вес пустого аппарата, Н:

$$G_{\text{ап}} := G_{\text{пнн}} + G_{\text{ф}} + G_{\text{лн}} + G_{\text{пнн}} + G_{\text{п}} + G_{\text{э}} + G_{\text{пр}} = 2.069 \times 10^3$$

Объем воды в рубашке, м³:

Объем цилиндрической обечайки рубашки, м.куб. _____ $V_1 := 0.205$

Объем цилиндрической обечайки корпуса, м.куб. _____ $V_2 := 0.16$

Объем эллиптического днища рубашки, м.куб. _____ $V_3 := 0.041$

Объем эллиптического днища корпуса, м.куб. _____ $V_4 := 0.035$

Объем воды в рубашке, м³:

$$V_{\text{руб}} := (V_1 - V_2) + (V_3 - V_4) = 0.051$$

Объем воды в аппарате при гидравлическом испытании, м³:

$$V_{\text{воды}} := V_{\text{руб}} + V_{\text{кор}} = 0.211$$

Вес воды в аппарате, Н:

$$G_{\text{воды}} := g \cdot V_{\text{воды}} = 2.068$$

Вес аппарата при гидравлическом испытании, Н:

$$G_{\text{п.ап}} := G_{\text{ап}} + G_{\text{воды}} = 2.071 \times 10^3$$

Принимаем в качестве опорных устройств штампованные пластинчатые опорные стойки:

Диаметр болтовой окружности, м _____ $d_1 := 0.57$

Высота опоры, м _____ $h := 0.214$

Длина основания опоры, м _____ $B := 0.085$

Максимальная длина ребра, м _____ $b_{1\text{max}} := 0.120$

Расстояние от центра болтовых отверстий до края опоры, м _____ $C_1 := 0.022$

Скос ребра, м _____ $K := 0.005$

Диаметр сечения, проходящего через середину линии контакта опоры с днищем, мм:

$$d_4 := d_1 + 2 \cdot C_1 - K - b_{1\text{max}} = 0.489$$

Расчетные величины:

$$\sin\alpha_2 := \frac{d_4}{2 \cdot D_p \cdot \sqrt{1 - \frac{3}{4} \cdot \left(\frac{d_4}{D_p}\right)^2}} = 0.496$$

$$\alpha_2 := \text{asin}(\sin\alpha_2) \cdot \text{deg}$$

Длина линии контакта опоры с днищем, м:

$$l_k := \frac{(b_{1\text{max}} - K)}{\cos(\alpha_2)} = 0.115$$

Осуществим проверку применимости расчётных формул:

$$0.003 \leq \frac{S_{\text{цр}} - c}{D_p} = 0.008 \leq 0.02$$

$$\frac{d_4}{D_p} = 0.752 \geq 0.7$$

$$0.1 \leq \frac{l_k}{D_p} = 0.177 \leq 0.35$$

Таким образом, формулы стандарта применимы для расчёта.

Усилие, действующие на опорную стойку, Н:

$$F_1 := \frac{G_{\text{п.ап}}}{3} = 689.947$$

Допускаемое нормальное усилие для неподкрепленного эллиптического днища, Н:

$$K_{20} := 87$$

$$F_{1д} := 0.25 \cdot K_{20} \cdot \sigma_{\text{д.руб}} \cdot 10^6 \cdot (S_{\text{цр}} - c)^2 \cdot D_p \cdot \left(0.2 + \frac{d_4}{D_p}\right) = 1.878 \times 10^4$$

Меридиональный момент, передаваемый на днище опорной стойкой, Н*м:

$$M_1 := \frac{1}{2} \cdot F_1 \cdot (b_{1\text{max}} - B + K) = 13.799$$

Допускаемый меридиональный момент для неподкрепленного днища, Н*м:

$$K_{21} := 7$$

$$M_{1д} := 0.25 \cdot K_{21} \cdot \sigma_{\text{д.руб}} \cdot 10^6 \cdot (S_{\text{цр}} - c)^2 \cdot D_p \cdot \left(0.2 + \frac{d_4}{D_p}\right) = 1.511 \times 10^3$$

Несущая способность днища для опорных стоек определяется выполнением условия:

$$\frac{F_1 \cdot \cos(\alpha_2)}{F_{1д}} + \frac{M_1}{M_{1д}} + \frac{P_p}{P_{д.1р.и}} = 0.048 \leq 1$$

Условие прочности и устойчивости выполняется.

5.1.10 Расчёт вала для перемешивающего устройства реактора

Название элемента – жесткий консольный вал аппарата. Номер позиции на расчётной модели – 14.

Целью выполнения расчёта является проверка надёжности конструкции вала по критериям виброустойчивости, жёсткости и прочности. Расчёты выполнены в соответствии с [25,30,31].

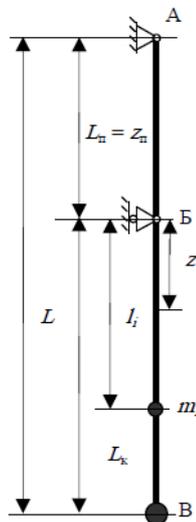


Рисунок 5.16 - Расчетная схема консольного вала

Исходные данные:

Тип вала _____	жесткий консольный
Длина вала, м _____	L2 := 1.1185
Длина консоли вала, м _____	L1 := 0.8125
Длина пролета вала, м _____	L := 0.275
Координата центра массы мешалки на консоли вала, м _____	h := 1.0875
Масса мешалки кг _____	m := 1.4
Координата опасного по жесткости сечения на консоли, м _____	z1 := 0.167
Координата опасного по прочности сечения в пролете, м _____	z := 0.275

Высота радиальных зазоров в опорах вала, м _____	$\Delta A := 15 \cdot 10^{-6}$
	$\Delta B := 15 \cdot 10^{-6}$
Начальная изогнутость вала в точке приведения, м _____	$\epsilon_B := 0.00004$
Тип уплотнения вала _____	сальниковое
Допускаемое смещение вала в опасном по жесткости сечении, м _____	$Az1_{\text{доп}} := 0.0001$
Коэффициент режима нагрузки (сильные толчки) _____	$\beta := 3$
Материал вала _____	сталь 12X18H10T
Плотность материала вала, кг./м. куб _____	$\rho_B := 7800$
Модуль продольной упругости материала, Па _____	$E := 2.0 \cdot 10^{11}$
Предел выносливости материала, Па _____	$\sigma_{-1} := 2.75 \cdot 10^8$
Допускаемый запас прочности материала _____	$n_{\text{доп}} := 2.4$
Отношение коэффициентов $K\sigma/Kd$ _____	$K\sigma Kd := 0.4$
Фазовое состояние перемешиваемой среды _____	жидкость-твердое
Мощность привода, Вт _____	$N := 750$
Коэффициент сопротивления отр. перегородок _____	$\zeta_{\text{от}} := 2$
Число отражающих перегородок _____	$Z_{\text{от}} := 3$
Высота отражающей перегородки, м _____	$h_{\text{от}} := 0.25$
Ширина отражающей перегородки, м _____	$b_{\text{от}} := 0.05$
Диаметр аппарата, м _____	$D := 0.6$
Плотность перемешиваемой среды, кг./м.куб. _____	$\rho_c := 1243.775$
Коэффициент сопротивления мешалки _____	$\zeta_M := 8.4$
Число Рейнольдса _____	$Re_{\text{ц}} := 12000$
Количество мешалок на валу _____	$n_M := 1$
Диаметр турбинной открытой мешалки, м _____	$d_M := 0.2$
Частота вращения вала, 1/сек _____	$n := 3$

Выбор диаметра вала

Относительная длина консоли:

$$L_{-1} := \frac{L_1}{L_2} = 0.726$$

Относительная координата центра массы мешалки:

$$l_{-1} := \frac{h}{L_1} = 1.338$$

Угловая скорость вала, рад/с: $\omega := 2 \cdot \pi \cdot n = 18.85$

Безразмерный динамический прогиб вала в центре массы мешалки:

$$Y_{-11} := (1 - L_{-1}) \cdot l_{-1} + \frac{3}{2} \cdot L_{-1} \cdot l_{-1}^2 - \frac{1}{2} \cdot L_{-1} \cdot l_{-1}^3 = 1.447$$

Приведенная масса мешалки, кг: $m_{пр1} := m \cdot Y_{-11}^2 = 2.933$

Приведенная безразмерная масса вала:

$$m_{в_пр} := \frac{8 \cdot (1 - L_{-1})^5 + 140 \cdot (1 - L_{-1})^2 \cdot L_{-1}^3 + 231 \cdot (1 - L_{-1}) \cdot L_{-1}^4 + 99 \cdot L_{-1}^5}{420 \cdot L_{-1}^2} = 0.188$$

Комплексы A1, м² и A2, м⁴:

$$A1 := m_{в_пр} \cdot \frac{16 \cdot \rho_{в} \cdot \omega^2 \cdot L_1^3 \cdot L_2}{3 \cdot E} = 8.332 \times 10^{-6}$$

$$A2 := \frac{128 \cdot m_{пр1} \cdot \omega^2 \cdot L_1^2 \cdot L_2}{3 \cdot E \cdot \pi} = 5.225 \times 10^{-8}$$

Расчетный диаметр вала, м:

$$d_p := \sqrt{A1 + \sqrt{A1^2 + A2}} = 0.015$$

Принятый диаметр вала, м:

$$d := 0.025$$

Проверка выполнения условия виброустойчивости вала

Линейная масса вала, кг:

$$m_B := \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot \rho_B = 3.829$$

Относительная масса мешалки:

$$m_{\text{пр}} := \frac{m_{\text{пр1}}}{m_B \cdot L2} = 2.936$$

Безразмерная критическая угловая скорость вала:

$$\omega_{-1} := \sqrt{\frac{1260}{8 \cdot (1-1)^5 + 140 \cdot (1-1)^2 \cdot l^3 + 231 \cdot (1-1) \cdot l^4 + 99 \cdot l^5 + 420 \cdot l^2 \cdot m_{\text{пр}}}}$$

$$\omega_{-1} = 2.552$$

Первая критическая угловая скорость вала, рад/с:

$$\omega_1 := \frac{\omega_{-1} \cdot d}{4 \cdot L2^2} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho_B}} = 64.567$$

Условие виброустойчивости:

$$\frac{\omega}{\omega_1} = 0.292 < 0.7 \quad \text{- выполняется}$$

Проверка выполнения условия жесткости вала.

Эксцентриситет массы мешалки, м:

$$e := \frac{0.001}{\sqrt{\omega}} = 2.303 \times 10^{-4}$$

Относительная координата опасного по жесткости сечения:

$$z_{-1} := \frac{z_1}{L1} = 0.206$$

Безразмерный динамический прогиб вала в опасном по жесткости сечении:

$$Y_{z1} := (1 - L_1) \cdot z_1 + \frac{3}{2} \cdot L_1 \cdot z_1^2 - \frac{1}{2} \cdot L_1 \cdot z_1^3 = 0.099$$

Приведенный эксцентриситет массы мешалки, м:

$$e_{pr1} := \frac{e}{Y_{11}} = 1.591 \times 10^{-4}$$

Приведенная масса вала, кг:

$$m_{впр} := m_{в_пр} \cdot m_{в} \cdot L2 = 0.805$$

Смещение оси вала от оси вращения за счет зазора в опорах в опасном по жесткости сечении, м:

$$\Delta z1 := \frac{(\Delta A + \Delta B) \cdot (z1 + L)}{L} - \Delta A = 3.322 \times 10^{-5}$$

Смещение оси вала от оси вращения за счет начальной изогнутости в опасном по жесткости сечении, м:

$$\epsilon z1 := \epsilon_{в} \cdot Y_{z1} = 3.964 \times 10^{-6}$$

Смещение оси вала от оси вращения в точке приведения за счет зазоров в опорах, м:

$$\Delta B := (\Delta A + \Delta B) \cdot \frac{L1}{L} + \Delta B = 1.036 \times 10^{-4}$$

Комплекс Б2, м:

$$B2 := \frac{m_{пр1} \cdot e_{пр1}}{m_{пр1} + m_{впр}} = 1.249 \times 10^{-4}$$

Динамический прогиб оси вала в точке приведения, м:

$$Y_{в} := \frac{B2 + \Delta B + \epsilon_{в}}{\left(\frac{\omega 1}{\omega}\right)^2 - 1} = 2.439 \times 10^{-5}$$

Смещение оси вала от оси вращения за счет динамического прогиба в опасном по жесткости сечении, м:

$$Y_{z1} := Y_B \cdot Y_{z1} = 2.418 \times 10^{-6}$$

Динамическое смещение вала в опасном по жесткости сечении, м:

$$A_{z1} := Y_{z1} + \Delta_{z1} + \varepsilon_{z1} = 3.96 \times 10^{-5}$$

Площадь проекции внутренних устройств:

$$f_{оп} := Z_{оп} \cdot h_{оп} \cdot b_{оп} = 0.038$$

Безразмерный комплекс, характеризующий гидродинамический режим потока в аппарате:

$$\Gamma_D := \frac{D}{d_M} = 3$$

$$\Phi := \frac{0.36 \cdot \Gamma_D}{\zeta_M \cdot n_M \cdot Re_{ц}^{0.25}} = 0.012$$

Гидродинамический параметр ψ_0 определяется по аппроксимирующей формуле при $x = \lg(\Phi)$:

$$x := \log(\Phi) = -1.911$$

$$\psi_0 := 1.913 + 0.440x - 0.456x^2 - 0.0971x^3 + 0.00125x^4 = 0.102$$

При площади лобового сопротивления F , равной 2,4 м², коэффициент лобового сопротивления:

$$c_F := \frac{2.5 \cdot f_{оп}}{D^2} = 0.26$$

Поправочный коэффициент α_F :

$$\alpha_F := 1.999 + 3.748 \cdot c_F - 6.191 \cdot c_F^2 + 5.219 \cdot c_F^3 - 1.777 \cdot c_F^4 = 2.639$$

Коэффициент увеличения мощности:

$$K_{НП} := 6.4 \quad K_N := 8.3$$

$$c_N := \alpha_F \cdot \left(\frac{K_{NП}}{K_N - 1} \right) + 1 = 3.314$$

Аппроксимирующие коэффициенты ближайшего c_N . Коэффициенты c_0 , c_1 и c_2 равны:

$$c_0 := 0.5272 \quad c_1 := 0.3984 \quad c_2 := 0.0925$$

Относительное смещение центра эпюры окружной скорости от оси мешалки:

$$S_V := c_0 + c_1 \cdot \psi_0 + c_2 \cdot \psi_0 = 0.577$$

Аппроксимирующие коэффициенты ближайшего S_V . Коэффициенты c_0 , c_1 и c_2 равны:

$$c_0 := 0.2732 \quad c_1 := -0.1334 \quad c_2 := -0.0077$$

Безразмерная поперечная гидродинамическая сила:

$$\psi_Q := c_0 + c_1 \cdot \psi_0 + c_2 \cdot \psi_0 = 0.259$$

Поперечная гидродинамическая сила, действующая на мешалку, Н:

$$Q_M := 0.015 \cdot k_Q \cdot \psi_Q \cdot \zeta_M \cdot \rho_c \cdot \omega^2 \cdot d_M^4 = 39.899$$

Суммарная приведенная гидродинамическая сила, Н:

$$Q_{пр} := Q_M \cdot Y_{11} = 57.746$$

Момент инерции поперечного сечения вала, m^4 :

$$I := \frac{\pi \cdot d^4}{64} = 1.917 \times 10^{-8}$$

Динамический прогиб вала в точке приведения от суммарной гидродинамической силы, м:

$$Y_{BQ} := \frac{Q_{пр} \cdot L_2 \cdot L_1^2}{3 \cdot E \cdot I} = 3.706 \times 10^{-3}$$

Динамическое смещение вала в опасном по жесткости сечении, м:

$$A_{Qz1} := Az1 + Y_{BQ} \cdot Y_{z1} = 8.311 \times 10^{-5}$$

$$A_{Qz1} = 0.000083 < Az1_{\text{доп}} = 0.0001 \quad - \text{выполняется}$$

Проверка выполнения условия прочности вала

Смещение оси вала от оси вращения за счет зазоров в опорах, м:

$$\Delta_{11} := \frac{(\Delta A + \Delta B) \cdot (h + L)}{L} - \Delta A = 1.336 \times 10^{-4}$$

Смещение оси вала от оси вращения за счет начальной изогнутости, м:

$$\epsilon_{11} := \epsilon_B \cdot Y_{11} = 5.789 \times 10^{-5}$$

Смещение оси вала от оси вращения за счет динамического прогиба, м:

$$Y_{11} := Y_B \cdot Y_{11} = 3.531 \times 10^{-5}$$

Динамическое смещение центра массы мешалок, м:

$$A_{11} := Y_{11} + \Delta_{11} + \epsilon_{11} + \epsilon_{pr1} = 3.86 \times 10^{-4}$$

Динамическое смещение вала в точке приведения, м:

$$A_B := Y_B + \Delta B + \epsilon_B = 1.68 \times 10^{-4}$$

Сосредоточенная центробежная сила, действующая на мешкали, Н:

$$F_1 := \beta \cdot m \cdot \omega^2 \cdot A_{11} = 0.576$$

Приведенная центробежная сила, действующая на вал в точке приведения, Н:

$$F_{впр} := \beta \cdot m_{впр} \cdot \omega^2 \cdot A_B = 0.144$$

Комплекс Вб, Н*м:

$$B_b := F_1 \cdot h + Q_M \cdot h = 44.016$$

Реакция опоры, Н:

$$R_{AQ} := \frac{1}{L} \cdot (B_b + F_{впр} \cdot L_1) = 160.485$$

Изгибающий момент в опасном по прочности сечении, Н*м:

$$M_{и} := RAQ \cdot z = 44.133$$

Крутящий момент в опасном по прочности сечении, Н*м:

$$M_{к} := \frac{N}{\omega} = 39.789$$

Момент сопротивления в опасном по прочности сечении:

$$w := \frac{\pi}{32} \cdot d^3 = 1.534 \times 10^{-6}$$

Эквивалентное напряжение в опасном по прочности сечении, Па:

$$\sigma_{\text{ЭКВ}} := \frac{\sqrt{(M_{и})^2 + (M_{к})^2}}{w} = 3.874 \times 10^7$$

Запас прочности для сечений, подверженных коррозионной усталости:

$$n := \frac{\sigma_{-1}}{(K_{\sigma} K_d + 2.333) \cdot (\sigma_{\text{ЭКВ}})} = 2.598$$

Условие прочности:

$$n = 2.598 > n_{\text{доп}} := 2.4$$

Условие прочности выполняется.

Выполним проверку расчета с помощью Inventor.

Материал:

Материал		Сталь
Модуль упругости	E	200000 МПа
Модуль жесткости	G	80000 МПа
Плотность	ρ	7860 кг/м ³

Свойства расчета:

Включить		
Да	Плотность	ρ 7860 кг/м ³
	Режим приведенного напряжения	НМН

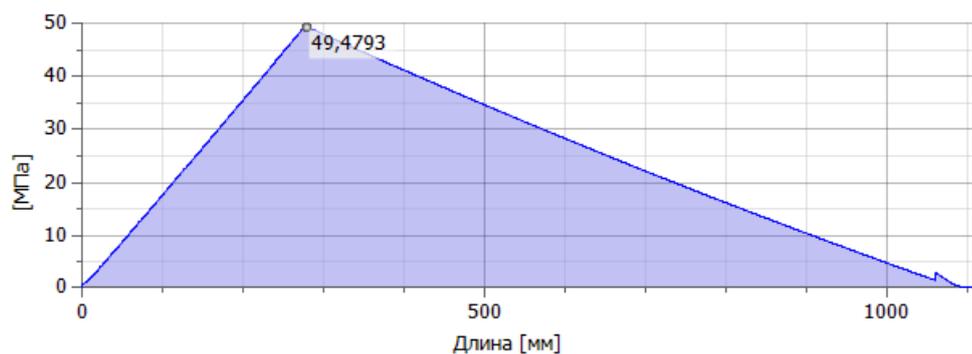
Реакции опор:

Индекс	Тип	Значение
1	Фиксированные	169,482 Н
2	Свободные	227,228 Н

Эпюра напряжения при изгибе:



Эпюра эквивалентного напряжения в опасном по прочности сечении:



Результаты:

Длина	L	1118,500 мм
Масса	Масса	4,235 кг
Максимальное напряжение при изгибе	σ_B	49,468 МПа
Максимальное напряжение при сдвиге	τ_S	0,567 МПа
Максимальное приведенное напряжение	σ_{red}	49,479 МПа

Таким образом:

- прочность вала по условию виброустойчивости – обеспечена;
- прочность вала по условию жёсткости – обеспечена;
- выполнение условия механической прочности вала – обеспечено

Следовательно, надёжность конструкции вала обеспечена по всем необходимым критериям.

5.1.11 Расчет сальникового уплотнения

Название элемента –сальниковое уплотнение. Номер позиции на расчётной модели – 10.

Цель расчета – определение мощности, теряемой на трение в сальнике. Расчет выполнен в соответствии с [32].

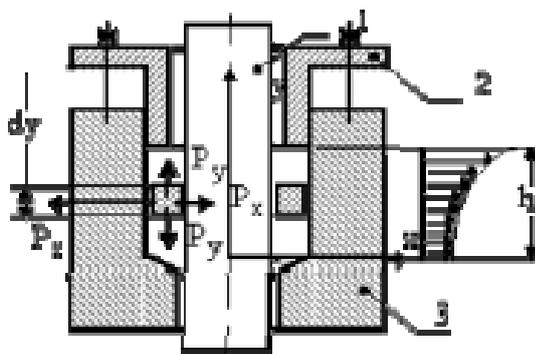


Рисунок 5.17 – Расчетная схема сальникового уплотнения

где 1 – вал, 2 – нажимная втулка, 3 – корпус.

Выбор сальниковой набивки «УС – из углеродных нитей, сухая» произведен по ГОСТ 5152-84 и обусловлен условиями протекания процесса. Сальниковое уплотнение выбрано по ОСТ 26-01-1247.

Исходные данные:

Диаметр вала, м _____ $d := 0.025$

Давление в аппарате, МПа _____ $P_p := 0.6$

Коэффициент трения набивки о вал и корпус сальника _____ $\mu_{тр} := 0.12$

Коэффициент, зависящий от материала набивки, давления и др. факторов _____ $m := 0.5$

Частота вращения вала, об/мин _____ $n := 180$

Ширина сальниковой набивки, мм:

$$S := 1.3 \cdot \sqrt{d \cdot 10^3} = 6.5$$

$$S := \text{Ceil}(S, 1) = 7$$

Высота набивки, мм:

$$h := 10 \cdot S = 70$$

Коэффициент трения при вращении вала:

$$f := \frac{\mu_{\text{тр}}}{m} = 0.24$$

Величина осевого усилия в верхней части сальника, Па:

$$P_y := P_p \cdot \exp\left(2 \cdot f \cdot \frac{h}{S}\right) = 72.906$$

Сила притяжения набивки к валу, Па:

$$P_x := \frac{1}{m} \cdot P_p \cdot \exp\left(2 \cdot f \cdot \frac{h}{S}\right) = 145.813$$

Сила трения в сальнике, Н:

$$F_{\text{тр}} := 0.5 \cdot \pi \cdot d \cdot P_p \cdot S \cdot \left(\exp\left(2 \cdot f \cdot \frac{h}{S}\right) - 1\right) = 19.876$$

Коэффициент, учитывающий отношение h/S:

$$K := 1.24$$

Мощность, теряемая на трение, кВт:

$$N_{\text{тр}} := 0.025 \cdot d^2 \cdot n \cdot P_p \cdot S \cdot K = 0.01465$$

Таким образом мощность, теряемая на трение равна 15 Вт при мощности электродвигателя 750 Вт.

5.1.12 Расчет укрепления отверстий

Названия элементов – отверстия для технологических штуцеров в аппарате для синтеза ВЭОС на основе РЗЭ.

Цель расчёта - проверка надёжности конструкции отверстий по критерию прочности и проверка взаимного влияния отверстий по этому же критерию. Расчеты выполнены в соответствии с [33].

Расчет штуцера А.

Тип штуцера – непроходящий без укрепления.

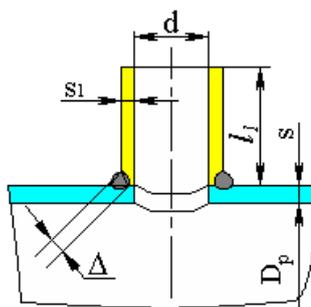


Рисунок 5.18 - Расчетная схема штуцера

Исходные данные:

Материал несущего элемента _____	12X18H10T
Толщина стенки несущего элемента, мм _____	$s := 8$
Сумма прибавок к стенке несущего элемента, мм _____	$c := 3$
Материал штуцера _____	12X18H10T
Внутренний диаметр штуцера, мм _____	$d := 38$
Толщина стенки штуцера, мм _____	$s_1 := 3.5$
Сумма прибавок к толщине стенки штуцера _____	$c_s := 0$
Длина штуцера, мм _____	$l_1 := 150$

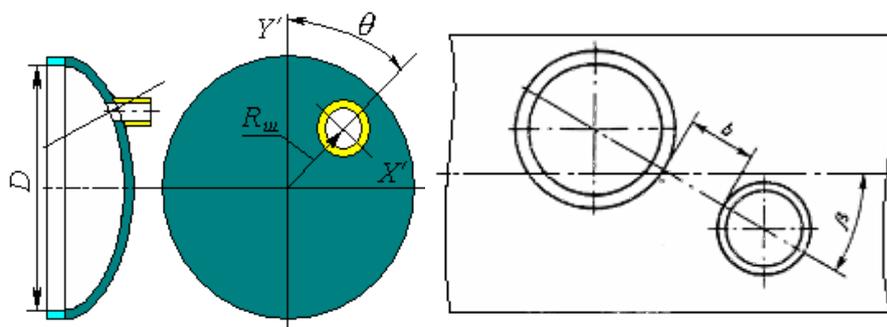


Рисунок 5.19 – Схема расположения штуцера

Смещение штуцера, мм _____	$R_{ш} := 200$
Расстояние до стенки ближайшего штуцера, мм _____	$b := 232.2$
Коэффициент прочности продольного сварного шва штуцера _____	$\phi_1 := 1$
Коэффициент прочности шва обечайки в зоне врезки штуцера _____	$\phi = 1$
Диаметр эллиптического днища, мм _____	$D = 600$
Высота эллиптического днища без отбортовки, мм _____	$h := 150$
Допускаемое напряжение для стали 12Х18Н10Т для рабочих условий, МПа _____	$\sigma_d := 171$
Допускаемое напряжение стали 12Х18Н10Т при гидравлических испытаниях, МПа _____	$\sigma_{д.20} = 218.182$
Внутреннее расчетное давление, МПа _____	$P_r := 0.6$
Внутреннее расчетное давление в условиях гидроиспытания, МПа _____	$P_{и} = 0.957$

Расчетный диаметр эллиптической крышки, мм:

$$D_p := \frac{D^2}{2 \cdot h} \cdot \sqrt{1 - 4 \cdot \frac{D^2 - 4 \cdot h^2}{D^4} \cdot R_{ш}^2} = 979.796$$

Расчет в рабочих условиях.

Расчётная толщина стенки штуцера, мм:

$$s_{1p} := \frac{P_r \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot \sigma_d \cdot \phi_1 - P_r} = 0.067$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера, МПа:

$$P_d := \frac{2 \cdot \sigma_d \cdot \phi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 28.843$$

Проверка условия прочности и устойчивости:

$$P_{..} = 28.843 > P_{..} = 0.6$$

Условие прочности и устойчивости выполнено.

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера, мм:

$$s_p := \frac{P_r \cdot D_p}{2 \cdot \phi \cdot \sigma_d - P_r} = 1.722$$

Расчётный диаметр отверстия (смещенный штуцер на эллиптическом днище), мм:

$$d_p := \frac{d + 2 \cdot c_s}{\sqrt{1 - \left(2 \cdot \frac{R_{III}}{D_p}\right)^2}} = 41.627$$

Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления, мм:

$$d_o := 2 \cdot \left[\left(\frac{s - c}{s_p} \right) - 0.8 \right] \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 294.483$$

Проверка условия прочности:

$$\text{Prov} := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполнено"} & \text{if } d_p < d_o \\ \text{"Условие прочности не выполнено"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Prov = "Условие прочности выполнено"

Расчётная длина внешней части штуцера, мм:

$$l_p := \min \left[l_1, 1.25 \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \right] = 14.416$$

Отношения допускаемых напряжений для внешней части штуцера:

$$\chi_1 := \min \left(1, \frac{\sigma_d}{\sigma_d} \right) = 1$$

Ширина зоны укрепления, мм:

$$l_p := \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 69.993$$

Расчётная ширина зоны укрепления, мм:

$$L_0 := l_n = 69.993$$

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления, мм:

$$d_{op} := 0.4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 27.997$$

Проверка необходимости укрепления отверстия:

$$\text{Prov1} := \begin{cases} \text{"Необходимо укрепление отверстия"} & \text{if } d_o < d \\ \text{"Укрепление не требуется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Prov1 = "Укрепление не требуется"

Отверстие считается одиночным, если ближайшее к нему отверстие не оказывает на него влияния, т.е. расстояние между наружными поверхностями соответствующих штуцеров удовлетворяет условию:

$$\text{Prov2} := \begin{cases} \text{"Отверстие одиночное"} & \text{if } b > \sqrt{D_p \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p \cdot (s - c)} \\ \text{"Требуется расчет взаимовлияющих отверстий"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Prov2 = "Отверстие одиночное"

Проверка условий применения формул для расчёта укрепления отверстий:

$$\text{Usl} := \begin{cases} \text{"отношение диаметров НЕ выполняется"} & \text{if } \frac{(d_p - 2 \cdot c)}{D} > 0.6 \\ \text{"отношение толщины к диаметру НЕ выполняется"} & \text{if } \frac{(S - c)}{D} > 0.1 \\ \text{"условия применения формул выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Usl = "условия применения формул выполняется"

Расчет в условиях гидроиспытания.

Расчётная толщина стенки штуцера, мм:

$$s_{1p} := \frac{P_{и} \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot \sigma_{д,20} \cdot \phi_1 - P_{и}} = 0.084$$

Допускаемое давление для патрубка штуцера, МПа:

$$P_d := \frac{2 \cdot \sigma_{d.20} \cdot \phi_1 \cdot (s_1 - c_s)}{d + s_1 + c_s} = 36.802$$

Проверка условия прочности и устойчивости:

$$P_d = 36.802 \geq P_{и} = 0.957$$

Условие прочности и устойчивости выполнено.

Расчётная толщина стенки несущего элемента в месте расположения штуцера, мм:

$$s_p := \frac{P_{и} \cdot D_p}{2 \cdot \phi \cdot \sigma_{d.20} - P_{и}} = 2.153$$

Расчётный диаметр отверстия (смещенный штуцер на эллиптической крышке), мм:

$$d_p := \frac{d + 2 \cdot c_s}{\sqrt{1 - \left(2 \cdot \frac{R_{ш}}{D_p}\right)^2}} = 41.627$$

Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления, мм:

$$d_o := 2 \cdot \left[\left(\frac{s - c}{s_p} \right) - 0.8 \right] \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 213.046$$

Проверка условия прочности:

$$\text{Prov} := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполнено"} & \text{if } d_p < d_o \\ \text{"Условие прочности не выполнено"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Prov = "Условие прочности выполнено"

Расчётная длина внешней части штуцера, мм:

$$l_{п} := \min \left[l_1, 1.25 \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \right] = 14.416$$

Отношения допускаемых напряжений для внешней части штуцера:

$$\chi_1 := \min\left(1, \frac{\sigma_{д.20}}{\sigma_{д.20}}\right) = 1$$

Ширина зоны укрепления, мм:

$$l_p := \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 69.993$$

Расчётная ширина зоны укрепления, мм:

Расчётный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления, мм:

$$d_{op} := 0.4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 27.997$$

Проверка необходимости укрепления отверстия:

$$\text{Prov1} := \begin{cases} \text{"Необходимо укрепление отверстия"} & \text{if } d_o < d \\ \text{"Укрепление не требуется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Prov1 = "Укрепление не требуется"

Отверстие считается одиночным, если ближайшее к нему отверстие не оказывает на него влияния, т.е. расстояние между наружными поверхностями соответствующих штуцеров удовлетворяет условию:

$$\text{Prov2} := \begin{cases} \text{"Отверстие одиночное"} & \text{if } b > \sqrt{D_p \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p \cdot (s - c)} \\ \text{"Требуется расчет взаимовлияющих отверстий"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Prov2 = "Отверстие одиночное"

Расчеты для остальных штуцеров приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 - Расчёт диаметров отверстий, не требующих дополнительного укрепления при наличии избыточной толщины стенки сосуда

Обозначение	Внутренний диаметр штуцера, d, мм	Расчётный диаметр отверстия, d_p , мм	Диаметр отв., не треб. укрепления, d_0 , мм	Условие прочности: $d_p < d_0$	Необходимость укрепления: $d_0 < d$
А	38	41.63	294,4	выполнено	нет
Б	38	41.63	294,4	выполнено	нет
Е	25	27,39	294,4	выполнено	нет
Ж	25	27,39	294,4	выполнено	нет

Таким образом, укрепление отверстий не требуется.

5.1.13 Расчет болтового соединения

Расчет болтового соединения во фланцах выполнен в программе Inventor. Результаты статистического расчета представлены ниже.

Тип расчета прочности – проверочный расчет.

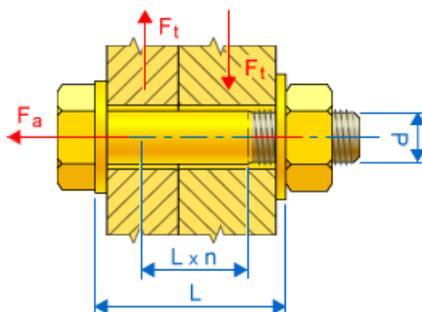


Рисунок 5.20 – Схема расчета болтового соединения

Исходные данные:

Номер болта	z	1 бр
Диаметр резьбы	d	22,000 мм
Шаг резьбы	p	2,500 мм
Средний диаметр болта	d_s	20,376 мм
Минимальный диаметр болта	d_{min}	18,933 мм
Материал		Сталь 20 ГОСТ 1050-88

Предел текучести	S_y	245 МПа
Коэффициент требуемого запаса прочности	k_s	3,00 бр
Допустимое давление в резьбе	p_a	40 МПа
Модуль упругости	E	212000 МПа
Коэффициент трения резьбы	f_1	0,20 бр
Коэффициент трения головки	f_2	0,25 бр

Результаты:

Предварительное напряжение	F_v	5142,872 Н
Рабочая сила	F_{max}	5250,000 Н
Требуемый момент затягивания	M_u	34,301 Н м
Напряжение при растяжении	σ_t	18,268 МПа
Напряжение при кручении	τ_k	25,741 МПа
Уменьшенное напряжение	σ_{red}	48,182 МПа
Напряжение максимальной силы	σ_{max}	18,648 МПа
Давление в резьбе	p_c	8,496 МПа

Проверка прочности

Положительная

5.2 Механический расчет нутч-фильтра

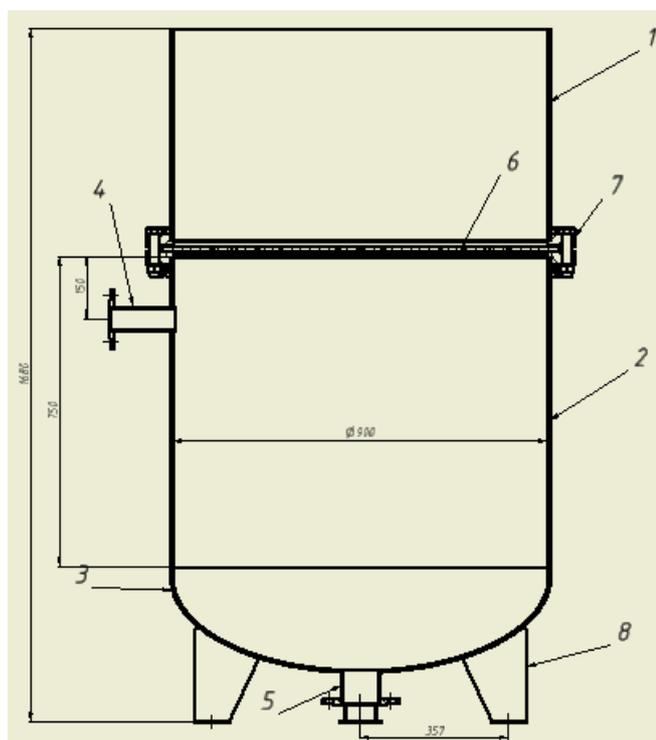


Рисунок 5.21 – Расчетная схема нутч-фильтра:

1 – верхняя цилиндрическая обечайка, 2 – нижняя цилиндрическая обечайка, 3 – эллиптическое днище, 4 – штуцер для подвода вакуума, 5 – штуцер для выгрузки фильтрата, 6 – фильтрующая перегородка, 7 – фланцевое соединение, 8 – опоры аппарата.

					ФЮРА ОСГ 000 000 ПЗ		
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			
Выполнил	Амеличкин И.В.				Лит.	Лист	Листов
Провер.	.Беляев В.М.						
Н. Контр.					Нутч-фильтр открытого типа		
Утверд.							

5.2.1 Расчет толщины стенки верхней цилиндрической обечайки нутч-фильтра

Название элемента – верхняя цилиндрическая обечайка. Номер позиции на расчётной модели – 1.

Целью выполнения расчёта является подбор толщины стенки цилиндрической обечайки, обеспечивающей прочность данной конструкции. Расчеты выполнены в соответствии с [24], а также, на основе методических указаний, данных в [25].

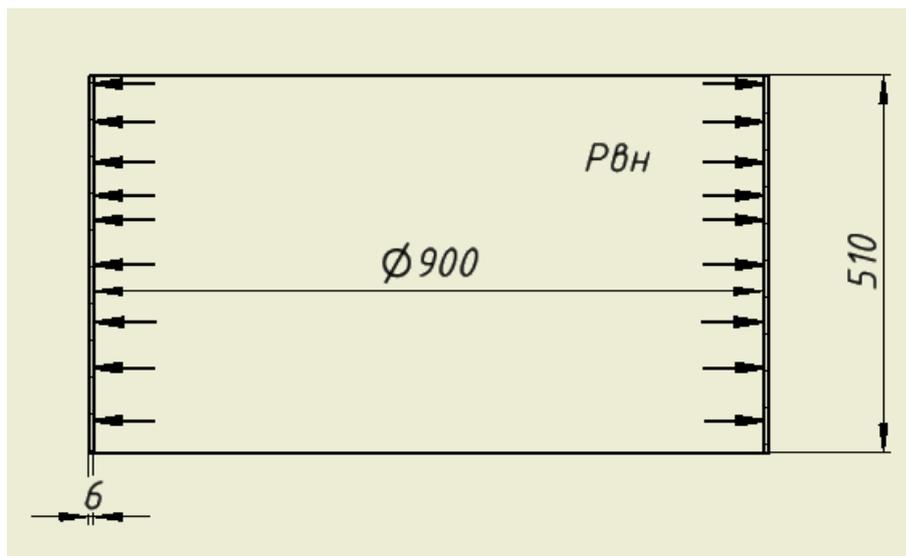


Рисунок 5.22 – Расчетная схема верхней цилиндрической обечайки

Исходные данные:

Внутренний диаметр обечайки, мм	_____	$D := 900$
Рабочее давление, МПа	_____	$P := 0.1$
Допускаемое напряжение стали 12X18Н10Т, МПа	_____	$\sigma_d := \sigma_{d20} = 184$
Допускаемое напряжение стали при гидравлических испытаниях, МПа	_____	$\sigma_n := 218$
Рабочая температура, °С	_____	$t_p := 20$
Плотность среды, кг/м ³	_____	$\rho_c := 1244$
Расчетная длина гладкой обечайки, мм	_____	$L_p := 510$
Скорость коррозии, мм/год	_____	$\Pi := 0.01$
Срок эксплуатации, лет	_____	$t_b := 20$

Прибавка к толщине стенки для компенсации коррозии, мм $c_1 := \Pi \cdot \tau_B = 0.2$

Для компенсации эрозии, мм _____ $c_2 := 1$

Технологическая прибавка, мм _____ $c_3 := 0$

Модуль продольной упругости, МПа _____ $E := 2 \cdot 10^5$

Коэффициент прочности продольных сварных швов $\phi_p := 1$

Расчетное осевое усилие, Н _____ $F := 10000$

Расчетное значение внутреннего избыточного давления, МПа:

$$P_p := P + \frac{\rho_c \cdot g \cdot L_p}{10^9} = 0.106$$

Пробное давление при гидравлическом испытании, МПа:

$$P_{и} := 1.25 \cdot P \cdot \frac{\sigma_{д20}}{\sigma_{д}} = 0.125$$

Прибавки к расчетной толщине стенки, мм:

$$c := c_1 + c_2 + c_3 = 1.2$$

Расчетная и исполнительные толщины стенок цилиндрической обечайки, мм:

Коэффициент В:

$$B := \max \left[\left[0.47 \cdot \left(\frac{P}{10^{-5} \cdot E} \right)^{0.067} \cdot \left(\frac{L_p}{D} \right)^{0.4} \right] \right] = 1$$

$$s_p := \max \left(\left(\frac{P_p \cdot D}{2 \cdot \sigma_d \cdot \phi_p - P_p} \right), \left(\frac{P_n \cdot D}{2 \cdot \sigma_n \cdot \phi_p - P_n} \right) \right) = 0.26$$

$$s := s_p + c = 1.46$$

$$s := \text{Ceil}(s, 1) = 2$$

$$s := 6$$

Принимаем толщину стенки $s = 6$ мм. исходя из конструкторских соображений.

Проверка условия применения формул для обечаек при $D > 200$ мм:

$$\text{Prov3} := \begin{cases} \text{"Условия применения формул выполняются"} & \text{if } \frac{s - c}{D} < 0.1 \\ \text{"Условия применения формул выполняются"} & \text{if } \frac{s - c}{D} > 0.1 \end{cases}$$

$$\text{Prov3} = \text{"Условия применения формул выполняются"}$$

Определение внутреннего допускаемого давления, МПа:

$$P_d := \frac{2 \cdot \sigma_d \cdot \phi_p \cdot (s - c)}{D + (s - c)} = 1.952$$

Условие прочности:

$$\text{Prov4} := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } P_d > P_p \\ \text{"Условие прочности НЕ выполняется"} & \text{if } P_d < P_p \end{cases}$$

$$\text{Prov4} = \text{"Условие прочности выполняется"}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие, Н:

$$F_c := \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot \sigma = 2.511 \times 10^6$$

Обечайка, работающая под совместным действием внутреннего давления и осевого сжимающего усилия. Проверка выполнения условия устойчивости обечайки:

$$Us1 := \begin{cases} \text{"Условие выполняется"} & \text{if } \frac{P_p}{P_d} + \frac{F}{F_c} \leq 1.0 \\ \text{"Условие НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

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

5.2.2 Расчет толщины стенки нижней цилиндрической обечайки нутч-фильтра

Название элемента – верхняя цилиндрическая обечайка. Номер позиции на расчётной модели – 2.

Целью выполнения расчёта является подбор толщины стенки цилиндрической обечайки, обеспечивающей прочность данной конструкции. Расчеты выполнены в соответствии с [24], а также, на основе методических указаний, данных в [25].

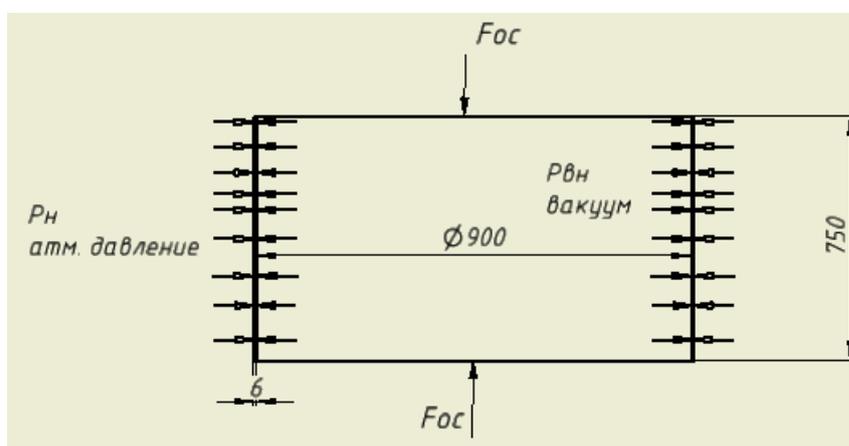


Рисунок 5.23 – Расчетная схема нижней цилиндрической обечайки

Исходные данные:

Внутренний диаметр обечайки, мм _____	$D := 900$
Рабочее давление, МПа _____	$P := -0.093$
Допускаемое напряжение стали 12X18H10T, МПа	$\sigma_d := \sigma_{d20} = 184$
Допускаемое напряжение стали при гидравлических испытаниях, МПа _____	$\sigma_{и} := 218$
Рабочая температура, °С _____	$t_p := 20$
Плотность среды, кг/м ³ _____	$\rho_c := 1244$
Расчетная длина гладкой обечайки, мм	$L_p := 750$
Скорость коррозии, мм/год _____	$\Pi := 0.01$
Срок эксплуатации, лет _____	$t_{в} := 20$
Прибавка к толщине стенки для компенсации коррозии, мм	$c_1 := \Pi \cdot t_{в} = 0.2$
Для компенсации эрозии, мм _____	$c_2 := 1$
Технологическая прибавка, мм _____	$c_3 := 0$
Модуль продольной упругости, МПа _____	$E := 2 \cdot 10^5$
Коэффициент прочности продольных сварных швов	$\phi_p := 1$
Расчетное осевое усилие, Н _____	$F := 0$
Коэффициент запаса устойчивости _____	$n_y := 2.4$
Расчетное значение внутреннего избыточного давления, МПа:	

$$P_p := \left| P + \frac{\rho_c \cdot g \cdot L_p}{10^9} \right| = 0.084$$

Пробное давление при гидравлическом испытании, МПа:

$$P_{и} := 1.25 \cdot P \cdot \frac{\sigma_{d20}}{\sigma_d} = -0.116$$

Прибавки к расчетной толщине стенки, мм:

Расчетная и исполнительные толщины стенок цилиндрической обечайки, мм:

Коэффициент В:

$$B := \max \left[\begin{array}{l} 1 \\ 0.47 \cdot \left(\frac{|P|}{10^{-5} \cdot E} \right)^{0.067} \cdot \left(\frac{L_p}{D} \right)^{0.4} \end{array} \right] = 1$$

$$s_p := \max \left[\begin{array}{l} 1.06 \cdot \frac{10^{-2} \cdot D}{B} \cdot \left(\frac{|P_p|}{10^{-5} \cdot E} \cdot \frac{L_p}{D} \right)^{0.4} \\ \frac{[1.2 \cdot (|P_p|) \cdot D]}{(2 \cdot \sigma_d - P_p)} \end{array} \right] = 2.494$$

$$Pr := \frac{\left(\rho_c \cdot g \cdot \frac{L_p}{1000} \right)}{1000000} = 9.143 \times 10^{-3}$$

$$P_p := P + Pr = -0.084$$

$$s := s_p + c = 3.694$$

$$s := \text{Ceil}(s, 1) = 4$$

$$s := 6$$

Принимаем толщину стенки $s = 6$ мм.

Проверка условия применения формул для обечаек при $D > 200$ мм:

$$\text{Prov3} := \begin{cases} \text{"Условия применения формул выполняются"} & \text{if } \frac{s - c}{D} < 0.1 \\ \text{"Условия применения формул выполняются"} & \text{if } \frac{s - c}{D} > 0.1 \end{cases}$$

Prov3 = "Условия применения формул выполняются"

Определение внутреннего допускаемого давления, МПа:

$$P_d := \frac{2 \cdot \sigma_d \cdot \phi_p \cdot (s - c)}{\dots} = 1.952$$

Условие прочности:

$$\text{Prov4} := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } P_d > P_p \\ \text{"Условие прочности НЕ выполняется"} & \text{if } P_d < P_p \end{cases}$$

$$\text{Prov4} = \text{"Условие прочности выполняется"}$$

Определение наружного давления.

Допускаемое давление из условия прочности, МПа:

$$P_{\Pi} := \frac{2 \cdot \sigma_d \cdot (s - c)}{D + (s - c)} = 1.952$$

Коэффициент B1:

$$B1 := \max \left[\left[9.45 \cdot \frac{D}{L_p} \cdot \sqrt{\frac{D}{100 \cdot (s - c)}} \right] \right] = 15.528$$

Допускаемое давление из условия устойчивости в пределах упругости,
МПа:

$$P_e := \left[\frac{100 \cdot (s - c)}{D} \right]^{2.5} \cdot \frac{2.08 \cdot 10^{-5} \cdot E \cdot D}{\nu_y \cdot B1 \cdot L_p} = 0.028$$

Допускаемое наружное давление, МПа:

$$P_H := \frac{P_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{P_{\Pi}}{P_e} \right)^2}} = 0.028$$

Условие прочности:

$$\text{Prov5} := \begin{cases} \text{"Условие прочности и устойчивости выполняется"} & \text{if } P_d > P_H \\ \text{"Условие прочности и устойчивости НЕ выполняется"} & \text{if } P_d < P_H \end{cases}$$

$$\text{Prov5} = \text{"Условие прочности и устойчивости выполняется"}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия прочности, МН:

$$F_{\Pi} := \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot \sigma_d = 2.511 \times 10^6$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие в пределах упругости из условия устойчивости.

Гибкость:

$$\lambda := \frac{2.83 \cdot L_p}{D + s - c} = 2.346$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие в пределах упругости из условия устойчивости, МН:

$$Fe1 := \frac{31.0 \cdot 10^{-5} \cdot E}{\sigma_y} \cdot D^2 \cdot \left[\frac{100 \cdot (s - c)}{D} \right] = 1.116 \times 10^7$$

$$Fe2 := \frac{[\pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c)] \cdot E}{\sigma_y} \cdot \left(\frac{\pi}{\lambda} \right)^2 = 2.039 \times 10^9$$

$$Fe := \begin{cases} Fe \leftarrow Fe1 & \text{if } \frac{L_p}{D} < 10 \\ Fe \leftarrow \min \left(\begin{pmatrix} Fe1 \\ Fe2 \end{pmatrix} \right) & \text{if } \frac{L_p}{D} > 10 \end{cases}$$

$$Fe = 1.116 \times 10^7$$

Допускаемое сжимающее усилие, МН:

$$Fc := \frac{F_{\Pi}}{\sqrt{1 + \frac{F_{\Pi}}{Fe}}} = 2.268 \times 10^6$$

Обечайка, работающая под совместным действием наружного давления и осевого сжимающего усилия. Проверка выполнения условия устойчивости обечайки:

$$Usl := \begin{cases} \text{"Условие выполняется"} & \text{if } \frac{P_p}{P_H} + \frac{F}{Fc} \leq 1.0 \\ \text{"Условие НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

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

5.2.3 Расчет толщины стенки эллиптического днища нутч-фильтра

Название элемента – эллиптическое днище. Номер позиции на расчётной модели – 3.

Целью выполнения расчёта является подбор толщины стенки эллиптического днища нутч-фильтра, обеспечивающей прочность данной конструкции. Расчеты выполнены в соответствии с [24], а также, на основе методических указаний, данных в [25].

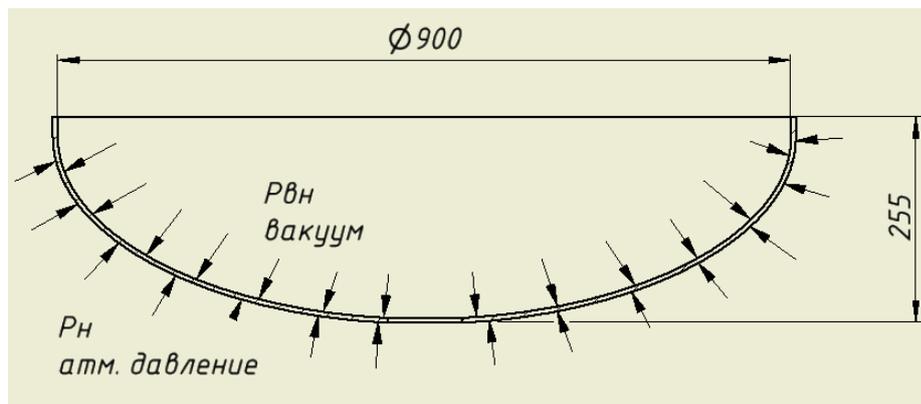


Рисунок 5.24 – Расчетная схема эллиптического днища нутч-фильтра

Исходные данные:

Внутренний диаметр днища, мм _____	$D := 900$
Внутренняя высота выпуклой части днища, мм _____	$H_2 := 225$
Высота отбортовки днища или крышки, мм _____	$h_0 := 25$
Внутреннее расчетное давление, МПа _____	$P_p := 0.093$
Пробное давление при гидравлических испытаниях, МПа _____	$P_n = 0.116$
Допускаемое напряжение стали 12X18H10T, МПа _____	$\sigma_d = 184$
Допускаемое напряжение стали 12X18H10T при гидравлических испытаниях, МПа _____	$\sigma_{d,20} = 218.182$
Радиус кривизны в вершине днища или крышки, м _____	$R := D$
Прибавка к расчетной толщине стенки, мм _____	$c = 1.2$
Расчетная толщина стенки с учетом прибавок, мм:	

$$S1_p := \max\left(\frac{P_p \cdot R}{2 \cdot \phi \cdot \sigma_n - 0.5 \cdot P_n}, \frac{P_n \cdot R}{2 \cdot \phi \cdot \sigma_{n,20} - 0.5 \cdot P_n}\right) = 0.24$$

$$S1 := S1_p + c = 1.44$$

$$S1 := \text{Ceil}(S1, 1) = 2$$

$$S1 := 6$$

Принимаем толщину стенки $s = 6$ мм.

Допускаемое давление для рабочих условий, МПа:

$$P_{д.1} := \frac{2 \cdot (S1 - c) \cdot \phi \cdot \sigma_d}{D + 0.5 \cdot (S1 - c)} = 1.957$$

Допускаемое давление для условий испытания, МПа:

$$P_{д.1.и} := \frac{2 \cdot (S1 - c) \cdot \phi \cdot \sigma_{д.20}}{D + 0.5 \cdot (S1 - c)} = 2.321$$

Проверим надёжность конструкции для рабочих условий:

$$P_p = 0.093 < P_{д.1} = 1.957$$

Проверим надёжность конструкции для условий гидравлического испытания:

$$P_n = 0.116 < P_{д.1.и} = 2.321$$

Проверка условия применимости расчетных формул стандарта:

$$0.002 < \frac{S1 - c}{D} = 0.005 < 0.1$$

$$0.2 < \frac{H2}{D} = 0.25 < 0.5$$

5.2.4 Расчет сопряжения цилиндрической обечайки и эллиптического днища

Названия элементов – нижняя цилиндрическая обечайка (2), эллиптическое днище (3). Целью выполнения расчёта является проверка надёжности конструкции сопряжения эллиптического днища с цилиндрической обечайкой.

P – внутреннее давление, действующее на обечайки со стороны среды в аппарате, Па;

P_n – наружное, атмосферное давление, действующее на обечайки, Па;

Q_0 – краевая сила, действующая на соединённые обечайки, Н/м;

M_0 – краевой момент, действующий на соединённые обечайки, Н*м;

U – радиальное усилие на краю обечаек, Н;

Δ – краевые радиальные деформации обечаек от действия краевых нагрузок, усилий и моментов, м;

θ – краевые угловые деформации обечаек от действия краевых нагрузок, усилий и моментов, °.

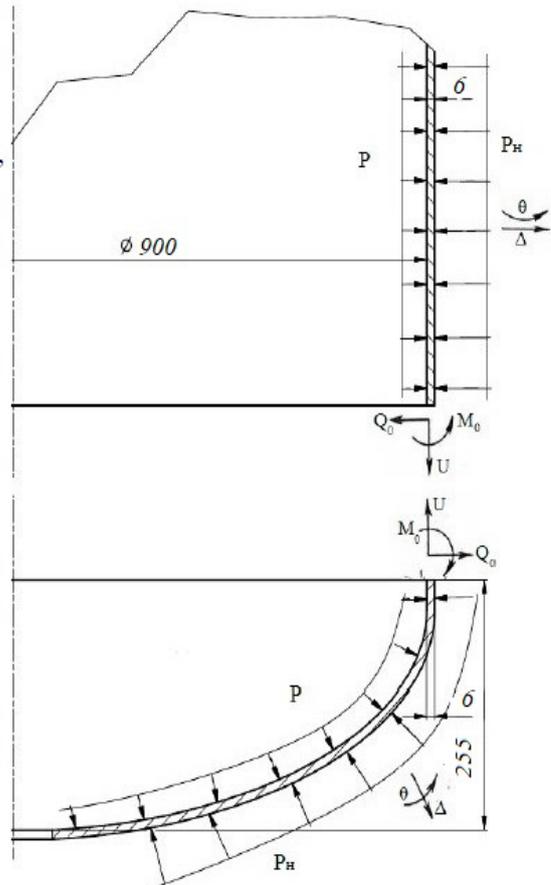


Рисунок 5.25 – Расчетная схема сопряжение цилиндрической обечайки и эллиптического днища

Расчеты выполнены в соответствии с [27].

Исходные данные:

Внутренний диаметр аппарата, м _____	$D := 0.9$
Высота обечайки аппарата, м _____	$H := 0.75$
Толщина стенки обечайки, м _____	$s := 6 \cdot 10^{-3}$
Толщина стенки днища, м _____	$s_d := 6 \cdot 10^{-3}$
Рабочее давление в корпусе, Па _____	$P := 0.093 \cdot 10^6$
Материал аппарата: сталь 12Х18Н10Т	
Допускаемое напряжение при температуре 20 °С, Па _____	$\sigma_d := 184 \cdot 10^6$
Рабочая температура среды, °С _____	$t_c := 20$
Коэффициент прочности сварных швов _____	$\phi := 1$
Сумма прибавок к расчетной толщине стенок, м _____	$c := 1.2 \cdot 10^{-3}$
Коэффициент запаса устойчивости для рабочих условий _____	$n_p := 2.4$
Коэффициент запаса устойчивости для условий испытания _____	$n_{и} := 1.8$
Модуль упругости материала аппарата при 20 °С, Па _____	$E := 200 \cdot 10^9$
Коэффициент Пуассона _____	$\mu := 0.3$

Расчет параметров эллиптического днища, м:

$$R := \frac{D}{2} = 0.45 \quad a := \frac{D}{2} = 0.45 \quad b := \frac{D}{4} = 0.225$$

Коэффициент затухания для цилиндрической обечайки, 1/м:

$$\beta := \sqrt[4]{\frac{3 \cdot (1 - \mu^2)}{[R \cdot (s - c)]^2}} = 27.658$$

Коэффициент затухания для эллиптической обечайки, 1/м:

$$\beta_3 := \frac{4 \sqrt[4]{3 \cdot (1 - \mu^2)}}{\sqrt{a \cdot (s_3 - c)}} = 27.658$$

Угловые и линейные деформации для цилиндрической обечайки:

$$\Delta_{цP} := \frac{(2 - \mu) \cdot R^2}{2 \cdot E(s - c)} \cdot P = 1.667 \times 10^{-5}$$

$$\Delta_{цQ0} := 2 \cdot \beta \cdot \frac{R^2}{(s - c) \cdot E} = 1.167 \times 10^{-8}$$

$$\Delta_{цM0} := 2 \cdot \beta^2 \cdot \frac{R^2}{(s - c) \cdot E} = 3.227 \times 10^{-7}$$

$$\theta_{цM0} := 4 \cdot \beta^3 \cdot \frac{R^2}{(s - c) \cdot E} = 1.785 \times 10^{-5}$$

..

Угловые и линейные деформации эллиптического днища:

$$\Delta_{эP} := P \cdot \frac{a^2}{[2 \cdot E \cdot (s_3 - c)]} \cdot \left(2 - \mu - \frac{a^2}{b^2} \right) = -2.256 \times 10^{-5}$$

$$\Delta_{эQ0} := 2 \cdot \beta_3 \cdot \frac{a^2}{(s_3 - c) \cdot E} = 1.167 \times 10^{-8}$$

$$\Delta_{эM0} := 2 \cdot \beta_3^2 \cdot \frac{a^2}{(s_3 - c) \cdot E} = 3.227 \times 10^{-7}$$

$$\theta_{эM0} := 4 \cdot \beta_3^3 \cdot \frac{a^2}{(s_3 - c) \cdot E} = 1.785 \times 10^{-5}$$

..

Подставляем значения угловых и линейных деформаций в систему уравнений:

$$Q_0 := 0 \quad M_0 := 0$$

Given

$$\Delta_{\text{цP}} - \Delta_{\text{цQ0}} \cdot Q_0 + \Delta_{\text{цM0}} \cdot M_0 = \Delta_{\text{эP}} + \Delta_{\text{эQ0}} \cdot Q_0 + \Delta_{\text{эM0}} \cdot M_0$$

$$\theta_{\text{цP}} - \theta_{\text{цQ0}} \cdot Q_0 + \theta_{\text{цM0}} \cdot M_0 = -\theta_{\text{эP}} - \theta_{\text{эQ0}} \cdot Q_0 - \theta_{\text{эM0}} \cdot M_0$$

$$V := \text{Find}(Q_0, M_0)$$

$$Q_0 := V_0 \quad \boxed{Q_0 = 1.681 \times 10^3} \quad \frac{\text{H}}{\text{M}}$$

$$M_0 := V_1 \quad \boxed{M_0 = 58.357} \quad \text{H} \cdot \frac{\text{M}}{\text{M}}$$

Вычисление напряжений на краю эллиптического днища и цилиндрической обечайки.

Суммарные напряжения на краю эллиптического днища, Па:

- меридиональное:

$$\sigma_{\text{мэ1}} := -P_p \cdot \frac{a}{[2 \cdot (s_3 - c)]} + P \cdot \frac{a}{[2 \cdot (s_3 - c)]} + 0 + 6 \cdot \frac{M_0}{(s_3 - c)^2}$$

$$\sigma_{\text{мэ2}} := -P_p \cdot \frac{a}{[2 \cdot (s_3 - c)]} + P \cdot \frac{a}{[2 \cdot (s_3 - c)]} + 0 - 6 \cdot \frac{M_0}{(s_3 - c)^2}$$

$$\sigma_{\text{мэ}} := \max(|\sigma_{\text{мэ1}}|, |\sigma_{\text{мэ2}}|) = 1.956 \times 10^7$$

- кольцевое:

$$\sigma_{\text{тэ1}} := -P_p \cdot a \cdot \frac{\left(2 - \frac{a^2}{b^2}\right)}{[2 \cdot (s_3 - c)]} + P \cdot a \cdot \frac{\left(2 - \frac{a^2}{b^2}\right)}{[2 \cdot (s_3 - c)]} + 2 \cdot Q_0 \cdot \beta_3 \cdot \frac{a}{(s_3 - c)} + 2 \cdot M_0 \cdot \beta_3^2 \cdot \frac{a}{(s_3 - c)} + 6 \cdot \mu \cdot \frac{M_0}{(s_3 - c)^2}$$

$$\sigma_{\text{тэ2}} := -P_p \cdot a \cdot \frac{\left(2 - \frac{a^2}{b^2}\right)}{[2 \cdot (s_3 - c)]} + P \cdot a \cdot \frac{\left(2 - \frac{a^2}{b^2}\right)}{[2 \cdot (s_3 - c)]} + 2 \cdot Q_0 \cdot \beta_3 \cdot \frac{a}{(s_3 - c)} + 2 \cdot M_0 \cdot \beta_3^2 \cdot \frac{a}{(s_3 - c)} - 6 \cdot \mu \cdot \frac{M_0}{(s_3 - c)^2}$$

$$\sigma_{\text{тэ}} := \max(|\sigma_{\text{тэ1}}|, |\sigma_{\text{тэ2}}|) = 1.293 \times 10^7$$

Суммарные напряжения на краю цилиндрической обечайки, Па:

- меридиональное:

$$\sigma_{mo1} := -P_p \cdot \frac{R}{[2 \cdot (s - c)]} + P \cdot \frac{R}{[2 \cdot (s - c)]} - 0 + 6 \cdot \frac{M_0}{(s - c)^2} = 1.94 \times 10^7$$

$$\sigma_{mo2} := -P_p \cdot \frac{R}{[2 \cdot (s - c)]} + P \cdot \frac{R}{[2 \cdot (s - c)]} - 0 - 6 \cdot \frac{M_0}{(s - c)^2} = -1.069 \times 10^7$$

$$\sigma_{mo} := \max(|\sigma_{mo1}|, |\sigma_{mo2}|) = 1.956 \times 10^7$$

- кольцевое:

$$\sigma_{to1} := -P_p \cdot \frac{R}{(s - c)} + P \cdot \frac{R}{(s - c)} - 2 \cdot Q_0 \cdot \beta \cdot \frac{R}{(s - c)} + 2 \cdot M_0 \cdot \beta^2 \cdot \frac{R}{(s - c)} + 6 \cdot \mu \cdot \frac{M_0}{(s - c)^2}$$

$$\sigma_{to2} := -P_p \cdot \frac{R}{(s - c)} + P \cdot \frac{R}{(s - c)} - 2 \cdot Q_0 \cdot \beta \cdot \frac{R}{(s - c)} + 2 \cdot M_0 \cdot \beta^2 \cdot \frac{R}{(s - c)} - 6 \cdot \mu \cdot \frac{M_0}{(s - c)^2}$$

$$\sigma_{to} := \max(|\sigma_{to1}|, |\sigma_{to2}|) = 1.293 \times 10^7$$

Проверка условия прочности для узла сопряжения обечайки и днища.

Допускаемое напряжение на краю элемента, Па:

$$\sigma_{кр.д} := 1.3 \cdot \sigma_d = 2.392 \times 10^8$$

Максимальное напряжение на краю:

- эллиптического днища:

$$\sigma_{maxэ} := \max(\sigma_{mэ}, \sigma_{tэ}) = 1.956 \times 10^7$$

$$\sigma_{maxэ} < \sigma_{кр.д}$$

- цилиндрической обечайки:

$$\sigma_{maxо} := \max(\sigma_{mo}, \sigma_{to}) = 1.956 \times 10^7$$

$$\sigma_{maxо} < \sigma_{кр.д}$$

Таким образом, условия прочности в местах сопряжения элементов выполняется

5.2.5 Расчет круглой перфорированной пластины

Название элемента – фильтрующая перегородка (6).

Целью выполнения расчёта является проверка надёжности фильтрующей перегородки, которая представляет собой круглую, перфорированную пластину (рис. 5.26). Расчет выполнен в соответствии с [34].

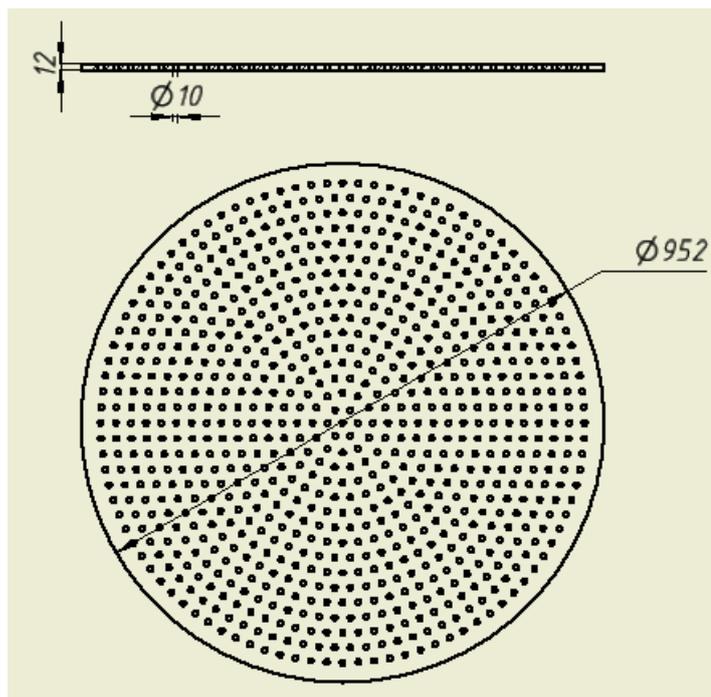


Рисунок 5.26 – Основные размеры пластины

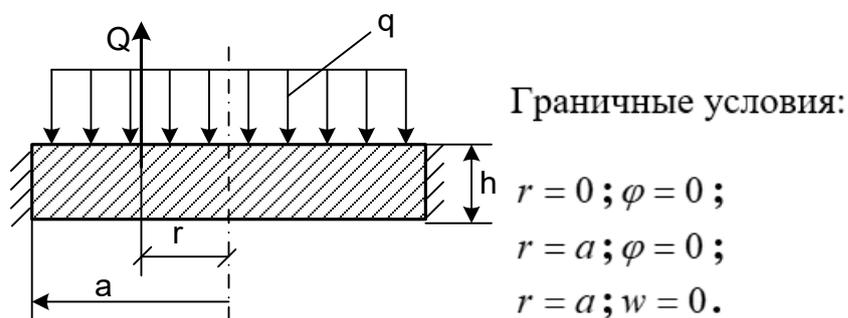


Рисунок 5.27 - Расчетная схема и граничные условия

Исходные данные:

Распределенная нагрузка, Н/мм _____	$q := 2500$
Толщина пластины, м _____	$h := 0.012$
Радиус пластины, м _____	$a := 0.476$
	$r1 := 0,0.05.. 0.476$
Количество отверстий, расположенных вблизи диаметра, шт _____	$n_{отв} := 6$
Радиус отверстий, расположенных вблизи диаметра, м _____	$r2 := 0.055$
Диаметр отверстий, м _____	$d_{отв} := 0.010$
Коэффициент Пуассона _____	$\mu := 0.3$
Модуль упругости, Па _____	$E := 198 \cdot 10^9$
Расчетное значение предела текучности, Н/м ² _____	$\sigma_d := 276 \cdot 10^6$
Допускаемый прогиб в пластине, м _____	$W_d := 0.001$

Проверка применимости расчетных формул:

$$Us11 := \begin{cases} \text{"Условия применимости формул выполняются"} & \text{if } 0.025 \leq \frac{h}{a} \leq 0.2 \\ \text{"Условия применимости формул не выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$Us11 = \text{"Условия применимости формул выполняются"}$

Расчет окружного момента, Нм/м:

$$M1(r1) := \frac{q \cdot [a^2 \cdot (1 + \mu) - r1^2(1 + 3\mu)]}{16}$$

$r1 =$	$M1(r1) =$
0	46.023
0.05	45.281
0.1	43.054
0.15	39.344
0.2	34.148
0.25	27.469
0.3	19.304
0.35	9.656
0.4	-1.477
0.45	-14.094

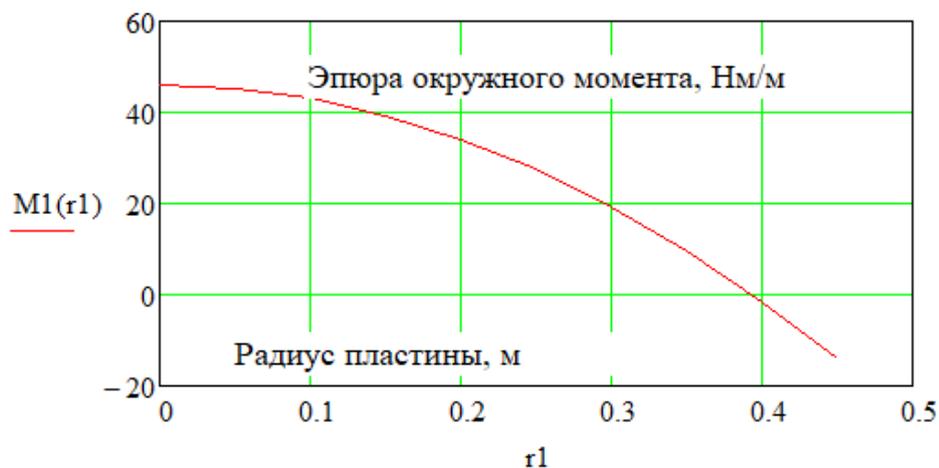


Рисунок 5.28 - Эпюра окружного момента

Расчет изгибающего тангенциального момента, Нм:

$$M2(r1) := \frac{q \cdot [a^2(1 + \mu) - r1^2(3 + \mu)]}{16}$$

$r1 =$	$M2(r1) =$
0	46.023
0.05	44.734
0.1	40.867
0.15	34.422
0.2	25.398
0.25	13.797
0.3	-0.383
0.35	-17.141
0.4	-36.477
0.45	-58.391

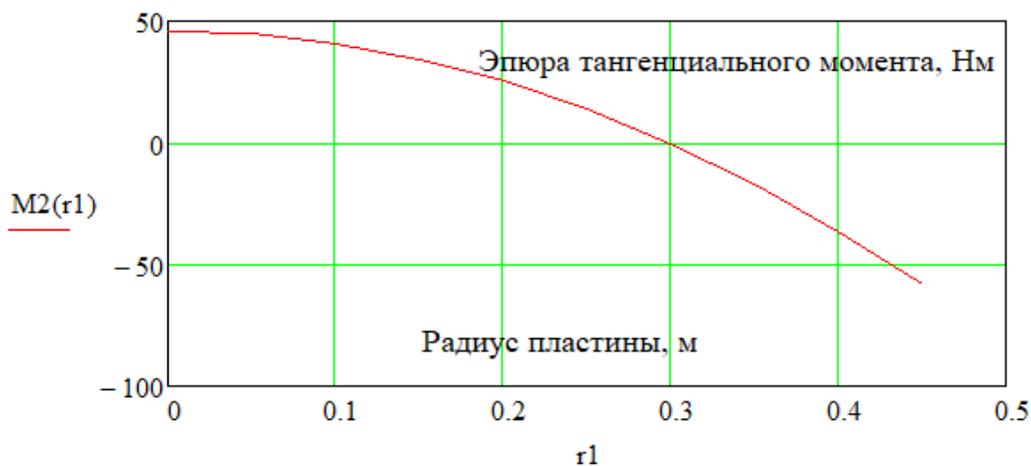


Рисунок 5.29 – Эпюра тангенциального момента

Расчет радиального напряжения, Н/м²:

$$\sigma_r(r1) := \frac{6 \cdot M1(r1)}{h^2}$$

r1 =

0
0.05
0.1
0.15
0.2
0.25
0.3
0.35
0.4
0.45

$\sigma_r(r1) =$

1.918·10 ⁶
1.887·10 ⁶
1.794·10 ⁶
1.639·10 ⁶
1.423·10 ⁶
1.145·10 ⁶
8.044·10 ⁵
4.023·10 ⁵
-6.153·10 ⁴
-5.872·10 ⁵

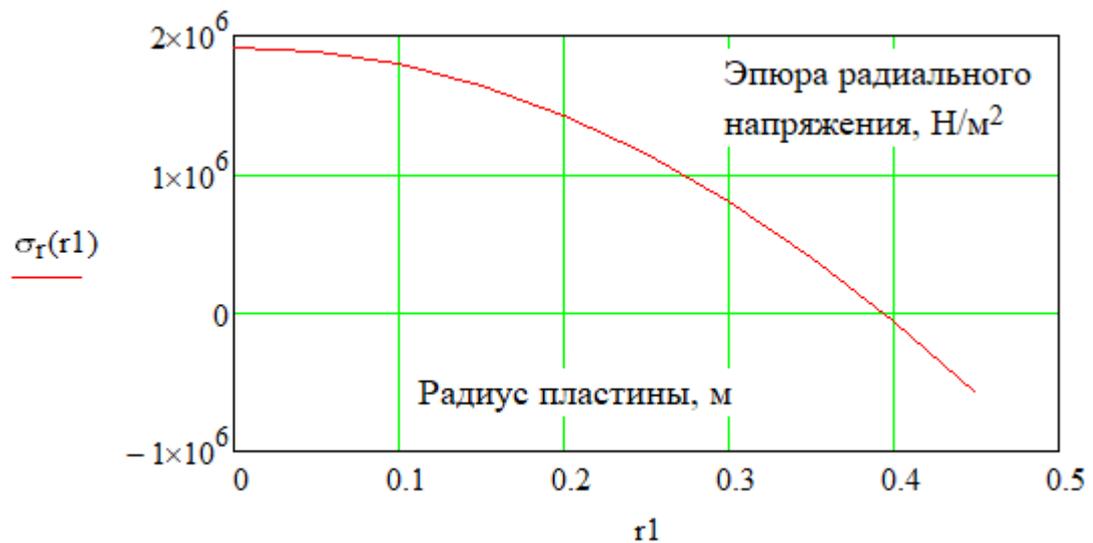


Рисунок 5.30 – Эпюра радиального напряжения

Расчет тангенциального напряжения, Н/м²:

$$\sigma_t(r1) := \frac{6 \cdot M2(r1)}{h^2}$$

r1 =

0
0.05
0.1
0.15
0.2
0.25
...

$\sigma_t(r1) =$

1.918·10 ⁶
1.864·10 ⁶
1.703·10 ⁶
1.434·10 ⁶
1.058·10 ⁶
5.749·10 ⁵
...

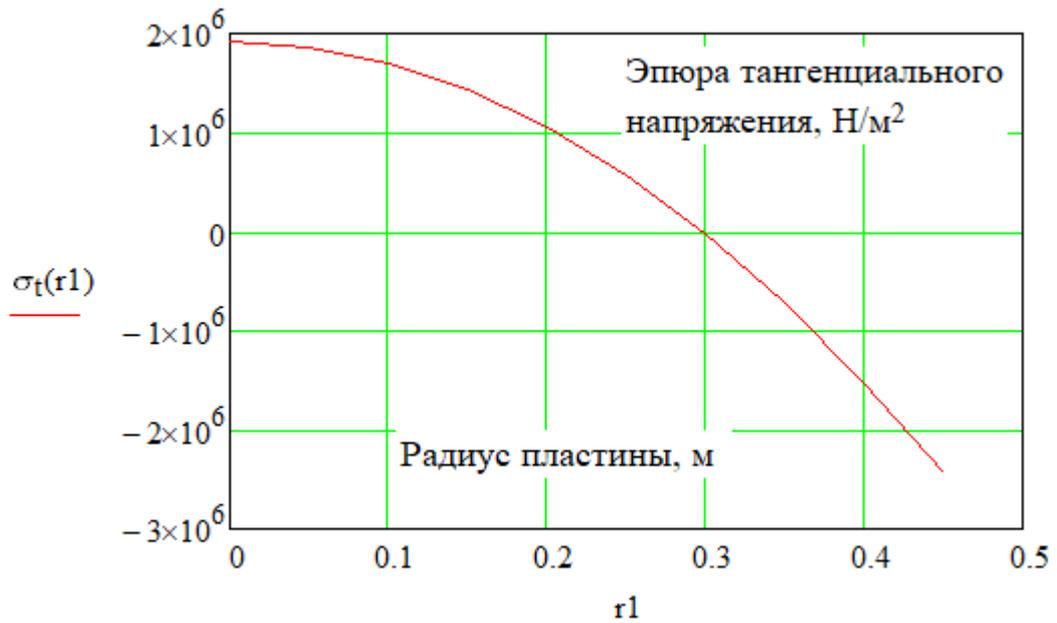


Рисунок 5.31 – Эпюра тангенциального напряжения

Цилиндрическая жесткость пластины:

$$D := \frac{E \cdot h^3}{12 \cdot (1 - \mu^2)} = 31331.8681$$

Коэффициент ослабления пластины:

$$\phi := \frac{1.18 \cdot 2(a - r2) - n_{\text{отв}} \cdot d_{\text{отв}}}{2 \cdot (a - r2)} = 1.109$$

Прогиб пластины, м:

$$w(r1) := \frac{q}{64 \cdot D \cdot \phi} (a^2 - r1^2) \cdot \left(\frac{5}{1 + \mu} \cdot a^2 - r1^2 \right)$$

r1 =	w(r1) =
0	2.22·10 ⁻⁴
0.05	2.189·10 ⁻⁴
0.1	2.098·10 ⁻⁴
0.15	1.948·10 ⁻⁴
0.2	1.744·10 ⁻⁴
...	...

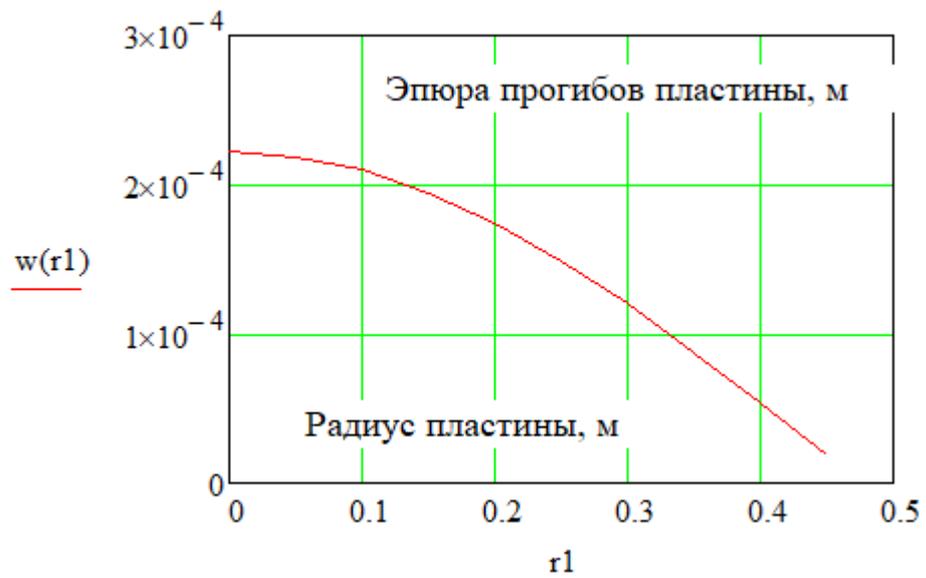


Рисунок 5.32 – Эпюра прогибов пластины

Максимальный прогиб в пластине, м:

$$W_{\max 1} := 2.095 \cdot 10^{-4}$$

Выполним расчет с помощью программы Inventor.

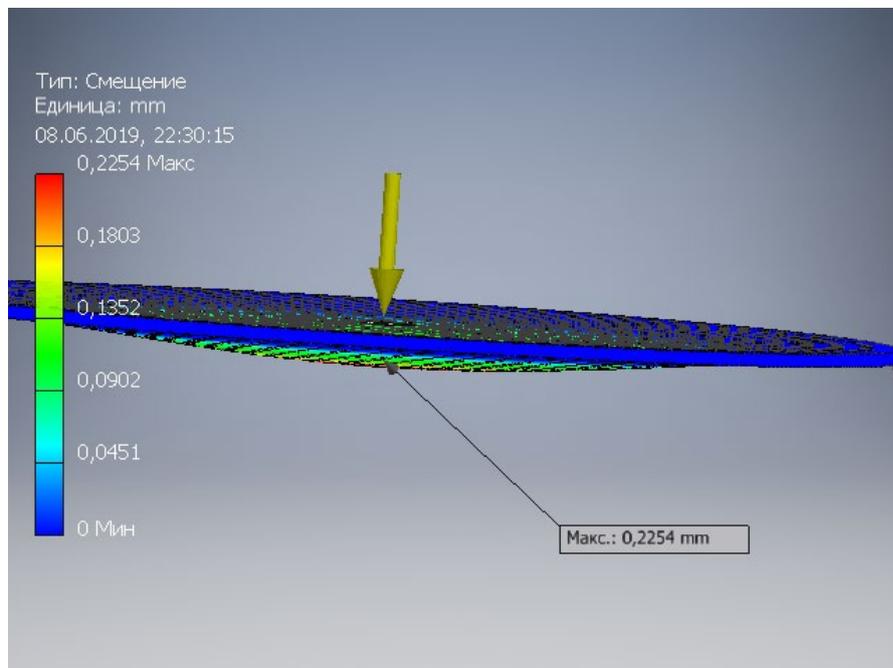


Рисунок 5.33 – Прогиб в пластине

Максимальный прогиб в круглой, перфорированной пластине по результатам расчета в Inventor, м:

$$W_{\max 2} := 2.254 \cdot 10^{-4}$$

Выберем максимальное значение из двух расчетов и сравним его с допуском, м:

$$W_{\max} := \max(W_{\max 1}, W_{\max 2}) = 0.000225 < W_{\text{д}} = 0.001 \text{ - выполняется}$$

Таким образом, надежность перфорированной пластины обеспечена.

5.2.6 Расчет фланцевого соединения

Целью выполнения расчёта является проверка надёжности конструкции фланцевого соединения. Показателями механической надёжности являются прочность болтов при затяжке и в рабочих условиях, прочность прокладки, статическая прочность соединения при затяжке и в рабочих условиях, а также соответствия угла поворота фланца допусковому значению. Расчеты выполнены в соответствии с [28,29].

Исходные данные:

Внутренний диаметр аппарата, мм _____	$D := 900$
Наружный диаметр фланца, мм _____	$D_{\text{н}} := 1030$
Диаметр болтовой окружности, мм _____	$D_{\text{б}} := 990$
Наружный диаметр прокладки, мм _____	$D_{\text{н.п}} := 951$
Ширина прокладки, мм _____	$b_{\text{п}} := 13$
Высота фланца, мм _____	$h := 30$
Высота прокладки, мм _____	$h_{\text{п}} := 2$
Толщина обечайки, мм _____	$S_0 := 6$
Диаметр болтов, мм _____	$d := 20$
Число болтов, шт _____	$n := 32$
Площадь поперечного сечения болта, мм.кв. _____	$f_{\text{б}} := 225$
Расстояние между опорными поверхностями гайки и головки болта, мм _____	$L_{\text{б0}} := 74$
Расчётное внутреннее давление, МПа _____	$P := 0.09$

Внешняя осевая сжимающая сила, Н _____ $F := 0$
 Внешний изгибающий момент, Н*мм _____ $M := 0$
 Прибавка к толщине стенки, мм _____ $c_o := 1.2$
 Температура среды в аппарате, °C _____ $t := 20$

Определение расчетной температуры неизолированных плоских фланцев, °C:

$$t_{\phi} := \dots$$

Расчетная температура болтов, °C:

$$t_{\phi} := 0.85 \cdot t = 17$$

Допускаемые напряжения для болтов из стали 20, МПа:

В рабочем состоянии:

$$t := \begin{pmatrix} 20 \\ 100 \end{pmatrix} \quad \sigma := \begin{pmatrix} 147 \\ 142 \end{pmatrix}$$

$$\sigma_{\text{д.б}} := \text{Floor}(\text{linterp}(t, \sigma, t_{\phi}), 0.5)$$

$$\sigma_{\text{д.б}} = 147$$

Модуль упругости для болтов при рабочей температуре, МПа:

5

Допускаемое напряжение для болтов при $t = 20$ °C, МПа:

$$\sigma_{20\phi} := 147$$

Модуль упругости

Модуль упругости для болтов при температуре испытания 20 °C, МПа:

$$E_{20\phi} := 1.99 \cdot 10^5$$

Коэффициент линейного расширения стали 20 при $t = 20-100$ °C, 1/°C:

$$\alpha_{\phi} := 11.6 \cdot 10^{-6}$$

Эффективная ширина плоской прокладки, мм:

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

$$b_0 = 13$$

Расчетный диаметр плоских прокладок, мм:

$$D_{\text{сп}} = D_{\text{н.п}} - 2 \cdot b_0$$

Характеристики прокладки по таблице 4.6:

$$m := 2.5$$

$$q_{\text{обж}} := 10 \text{ МПа}$$

$$q_d := 40 \text{ МПа}$$

$$K_{\text{обж}} := 1$$

$$E_{\Pi} := 2000 \text{ МПа}$$

Усилие, необходимое для смятия прокладки при затяжке, Н:

$$P_{\text{обж}} := 0.5\pi \cdot D_{\text{сп}} \cdot b_0 \cdot m \cdot q_{\text{обж}} = 4.789 \times 10^5$$

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

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

$$R_{\Pi} = 8.619 \times 10^3$$

Суммарная площадь сечения болтов по внутреннему диаметру резьбы или нагруженному сечению наименьшего диаметра, мм²:

$$A_{\text{б}} := n \cdot f_{\text{б}} = 7.2 \times 10^3$$

Равнодействующая нагрузка от давления, Н:

$$Q_{\Pi} := \frac{\pi}{4} \cdot (D_{\text{сп}})^2 \cdot P = 6.219 \times 10^4$$

Приведенная нагрузка, вызванная воздействием внешней силы и изгибающего момента, Н:

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

Податливость прокладки, мм/Н:

$$y_{п} := \frac{h_{п} \cdot K_{обж}}{E_{п} \cdot \pi \cdot D_{сп} \cdot b_{п}} = 2.61 \times 10^{-8}$$

Эффективная длина болта (шпильки) при определении податливости,

мм:

$$L_{б} := L_{б0} + 0.20 \cdot d = 17.0$$

Податливость болтов, мм/Н:

$$y_{б} := \frac{L_{б}}{E_{20б} \cdot A_{б}} = 5.556 \times 10^{-8}$$

Расчетные параметры фланцев:

- параметр длины обечайки, мм:

$$l_0 := \sqrt{D \cdot S_0} = 73.485$$

- отношение наружного диаметра тарелки фланца к внутреннему диаметру:

$$K := \frac{D_H}{D} = 1.144$$

- коэффициенты, зависящие от соотношения размеров тарелки фланца:

$$\beta_T := \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \log(K)) - 1}{(1.05 + 1.945 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} = 1.859$$

$$\beta_U := \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \log(K)) - 1}{1.36(K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = 15.874$$

$$\beta_Y := \frac{1}{(K - 1)} \cdot \left[0.69 + 5.72 \cdot \frac{K^2 \cdot \log(K)}{(K^2 - 1)} \right] = 14.588$$

$$\beta_Z := \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = 7.457$$

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

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

- коэффициент λ :

$$\lambda := \frac{\beta_F \cdot h + l_0}{\beta_T \cdot l_0} + \frac{\beta_V \cdot h^3}{\beta_U \cdot l_0 \cdot (S_0)^2} = 1.091$$

Угловая податливость фланцев:

Угловая податливость фланца при затяжке:

$$y_\phi := \frac{0.91 \cdot \beta_V}{E_{20} \cdot \lambda \cdot l_0 \cdot S_0^2} = 8.667 \times 10^{-10}$$

Угловая податливость фланца, нагруженного внешним изгибающим моментом:

$$y_{\phi H} := \left(\frac{\pi}{4} \right)^3 \cdot \frac{D_\phi}{E_{20} \cdot h^3 \cdot D_H} = 8.623 \times 10^{-11}$$

Коэффициент, учитывающий изгиб тарелки фланца между болтами:

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

Приведенный диаметр плоского фланца, мм:

$$D_{\text{пр}} := D = 900$$

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

$$v := 0.5 \cdot (D_\phi - D_{\text{сп}}) = 40$$

Плечо усилия от действия давления на фланец для всех типов фланцев:

$$e := 0.5 \cdot (D_{\text{сп}} - D - s_0) = 10$$

Эквивалентная толщина плоских фланцев, мм:

Коэффициент жесткости фланцевого соединения для приварных встык и плоских фланцев:

$$\gamma := \frac{1}{y_{\Pi} + y_{\delta} \cdot \frac{E_{20\delta}}{E_{\delta}} + 2 \cdot b^2 \cdot y_{\phi} \cdot \frac{E_{20}}{E}} = 7.978 \times 10^5$$

Коэффициент жесткости фланцевого соединения, нагруженного внутренним давлением или внешней осевой силой:

$$\alpha := 1 - \frac{y_{\Pi} - 2 \cdot e \cdot y_{\phi} \cdot b}{y_{\Pi} + y_{\delta} + 2 \cdot b^2 \cdot y_{\phi}} = 1.554$$

Коэффициент жесткости фланцевого соединения, нагруженного внешним изгибающим моментом:

$$\alpha_M := \frac{y_{\delta} + 2 \cdot y_{\phi\Pi} \cdot b \cdot \left(b + e - \frac{e^2}{D_{\text{сп}}} \right)}{y_{\delta} + y_{\Pi} \cdot \left(\frac{D_{\delta}}{D_{\text{сп}}} \right)^2 + 2 \cdot y_{\phi\Pi} \cdot b^2} = 1.206$$

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

$$Q_t := \gamma \cdot \left[2\alpha_{\phi} \cdot h \cdot (t_{\phi} - 20) - 2\alpha_{\delta} \cdot h \cdot (t_{\delta} - 20) \right] = 1.03 \times 10^3$$

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

$$P_{\text{б1}} := \max \left[\begin{array}{l} \alpha \cdot (Q_d + F) + R_{\Pi} + \frac{4 \cdot \alpha_M \cdot |M|}{D_{\text{сп}}} \\ \alpha \cdot (Q_d + F) + R_{\Pi} + \frac{4 \cdot \alpha_M \cdot |M|}{D_{\text{сп}}} - Q_t \end{array} \right] = 1.053 \times 10^5$$

Расчетная нагрузка на болты при затяжке, необходимая для обеспечения обжатия прокладки и минимального начального натяжения болтов, Н:

$$P_{\sigma 2} := \max(P_{\text{обж}}, 0.4 \cdot A_{\sigma} \cdot \sigma_{20\sigma}) = 4.789 \times 10^5$$

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

$$P_{\sigma M} := \max(P_{\sigma 1}, P_{\sigma 2}) = 4.789 \times 10^5$$

Расчетная нагрузка на болты фланцевых соединений в рабочих условиях, Н:

$$P_{\sigma p} := P_{\sigma M} + (1 - \alpha) \cdot (Q_d + F) + Q_t + \frac{4 \cdot (1 - \alpha_M) \cdot |M|}{D_{\text{сп}}} = 4.454 \times 10^5$$

Проверка прочности болтов и прокладки:

Расчетные напряжения в болтах, МПа:

- при затяжке:

$$\sigma_{\sigma 1} := \frac{P_{\sigma M}}{A_{\sigma}} = 66.508$$

- в рабочих условиях:

$$\sigma_{\sigma 2} := \frac{P_{\sigma p}}{A_{\sigma}} = 61.862$$

Проверка условий прочности болтов при затяжке и в рабочих условиях:

$$Usl_1 := \begin{cases} \text{"Условия прочности в при затяжке НЕ выполняются"} & \text{if } \sigma_{\sigma 1} > \sigma_{20\sigma} \\ \text{"Условия прочности в рабочих условиях НЕ выполняются"} & \text{if } \sigma_{\sigma 2} > \sigma_{\text{д.б}} \\ \text{"Условия прочности выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Usl 1 = "Условия прочности выполняются"

Удельное давление на прокладку, МПа:

$$q := \frac{\max(P_{\sigma M}, P_{\sigma p})}{\pi \cdot D_{\text{сп}} \cdot b_{\text{п}}} = 12.5$$

Условие прочности прокладки:

$$U_{sl_2} := \begin{cases} \text{"Условие прочности прокладки НЕ выполняется"} & \text{if } q > q_d \\ \text{"Условие прочности прокладки выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$U_{sl_2} = \text{"Условие прочности прокладки выполняется"}$

Расчет фланцев на статическую прочность

Расчетный изгибающий момент, действующий на плоский фланец при затяжке, Н*мм:

$$M_M := C_F \cdot P_{бМ} \cdot b = 1.245 \times 10^7$$

Расчетный изгибающий момент, действующий на фланец в рабочих условиях, Н*мм:

$$M_p := C_F \cdot \max[P_{бр} \cdot b + (Q_d + Q_{FM}) \cdot e, |Q_d + Q_{FM}| \cdot e] = 1.258 \times 10^7$$

Расчетные напряжения во фланце при затяжке, МПа:

- меридиональное изгибное напряжение в обечайке плоского фланца:

$$\sigma_{0M} := \frac{M_M}{\lambda \cdot (S_0 - c_o)^2 \cdot D_{пр}} = 550.111$$

- радиальное напряжение:

$$\sigma_{RM} := \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + l_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot l_0 \cdot D} \cdot M_M = 21.041$$

- окружное напряжение:

$$\sigma_{TM} := \frac{\beta_Y \cdot M_M}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_{RM} = 67.333$$

Расчетные напряжения во фланце в рабочих условиях:

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

$$\sigma_{0p} := \frac{M_p}{\lambda \cdot (S_0 - c_o)^2 \cdot D_{пр}} = 555.646$$

- максимальные меридиональные мембранные напряжения в обечайке плоского фланца, МПа:

$$\sigma_{0MP} := \max \left[\frac{Q_d + F + \frac{4|M|}{D_{сп}}}{\pi \cdot (D + S_0) \cdot (S_0 - c_0)}, \frac{Q_d + F - \frac{4|M|}{D_{сп}}}{\pi \cdot (D + S_0) \cdot (S_0 - c_0)} \right] = 4.552$$

Напряжения в тарелке плоского фланца в рабочих условиях, МПа:

- радиальное напряжение:

$$\sigma_{Rp} := \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + l_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot l_0 \cdot D} \cdot M_p = 21.208$$

- окружное напряжение:

$$\sigma_{Tp} := \frac{\beta_Y \cdot M_p}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_{Rp} = 68.01$$

Проверка условий статической прочности фланцев:

PR_1 := "Условия статической прочности при затяжке НЕ выполняются"

PR_2 := "Условия статической прочности в рабочих условиях НЕ выполняются"

PR_3 := "Условия статической прочности выполняются"

Допускаемые суммарные общие и местные условные упругие мембранные и изгибные напряжения:

$$Us1_3 := \begin{cases} PR_1 & \text{if } \max(|\sigma_{0M} + \sigma_{RM}|, |\sigma_{0M} + \sigma_{TM}|) > K_T 3 \sigma_{20} \\ PR_2 & \text{if } \max \left(\left(\begin{array}{l} |\sigma_{0p} - \sigma_{0MP} + \sigma_{Tp}| \\ |\sigma_{0p} - \sigma_{0MP} + \sigma_{Rp}| \\ |\sigma_{0p} + \sigma_{0MP}| \end{array} \right) \right) > K_T 3 \sigma_{д.ф} \\ PR_3 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Us1_3 = "Условия статической прочности выполняются"

Проверка углов поворота фланцев.

Угол поворота плоского фланца:

$$\Theta := M_p \cdot y_\phi \cdot \frac{E_{20}}{E} = 0.011$$

Допустимый угол поворота плоского фланца:

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

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

5.2.7 Расчет опор нутч-фильтра

По ГОСТ 34233.5 – 2017 (п. 9.2.1.) расчет опорных стоек не выполняется при действии наружного давления.

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

Студенту:

Группа	ФИО
4KM71	Амеличкину Ивану Вячеславовичу

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

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Использование информации, представленной в российских и иностранных научных публикациях, аналитических материалах и изданиях, нормативно-правовых документах.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала инженерных решений (ИР)	Проведение предпроектного анализа. Определение целевого рынка и проведение его сегментирования.
2. Формирование плана и графика разработки и внедрения ИР	Определение целей и ожиданий, требований проекта. Определение заинтересованных сторон и их ожиданий.
3. Составление бюджета инженерного проекта (ИП)	Определение технико-экономических показателей проекта и нахождение критического объема продаж.
4. Оценка ресурсной, финансовой, социальной, бюджетной эффективности ИР и потенциальных рисков	Проведение оценки экономической эффективности исследования.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)

1. Диаграмма Исикавы
2. Организационная структура проекта
3. График определения точки безубыточности производства

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

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

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4KM71	Амеличкин Иван Вячеславович		

6 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

На сегодняшний день перспективность научного исследования определяется не столько масштабом открытия, оценить который на первых этапах жизненного цикла высокотехнологического и ресурсоэффективного продукта бывает затруднительно, как коммерческой ценностью разработки. Оценивание коммерческого потенциала разработки является важным условием при поиске источников финансирования для проведения научного исследования и коммерциализации его результатов.

Коммерческая привлекательность научного исследования определяется не только превышением технических параметров над предшествующими разработками, но и насколько быстро разработчик сумеет найти ответы на такие вопросы – будет ли продукт востребован на рынке, какова будет его стоимость, чтобы удовлетворить потребителя, каков бюджет научного проекта, сколько времени потребуется для выхода на рынок и т.д.

Таким образом, целью раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является определение перспективности и успешности научно-исследовательского проекта, разработка механизма управления и сопровождения конкретных проектных решений на этапе реализации.

6.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Потенциальным потребителем готового продукта и результатов исследования является компания ООО «НОВОХИМ» г. Томск. Компания «НОВОХИМ» производит продукты малотоннажной химии для нефтегазодобывающей, теплогенерирующей, сельскохозяйственной, медицинской, деревообрабатывающей и многих других отраслей промышленности. В группу компаний входит «Инжиниринговый Химико-Технологический Центр», на базе которого производится разработка и масштабирование технологий малотоннажной химии. Разработка продуктов и технологий ведется в тесном сотрудничестве с ведущими научно-исследовательскими лабораториями Томских университетов. Наличие

уникальной научно- технической и производственной базы, команды технологов, инженеров и ученых – кандидатов и докторов наук, позволяет внедрять современные продукты и технологии в производство в реальные сроки.

В Томске было создано первое в России и пятое в мире после США, Германии, Китая и Японии производство глиоксаля. Это не было бы возможным без разработки уникальных катализаторов. Однако, даже сейчас, использование современных катализаторов не в полной мере обеспечивает должный выход продукта. Поэтому, по сей день продолжаются исследования в области получения наиболее эффективных катализаторов для синтеза глиоксаля. Одним из перспективных катализаторов является катализатор на основе высокоэнтропийных оксидных порошков редкоземельных элементов.

В следующем разделе будут описаны основные конкурентные преимущества разработанных катализаторов перед аналогами.

6.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Детальный анализ конкурирующих разработок, существующих на рынке, необходимо проводить систематически, поскольку рынки пребывают в постоянном движении.

Данный анализ проводился с помощью оценочной карты, таблица 4.1. В ней приведены баллы экспертной оценки полученного катализатора: катализатор на основе оксидов РЗЭ (Б1), а также конкурирующего продукта – катализатора на основе серебра (Б2). К1 и К2 конкурентоспособность соответствующих продуктов.

Таблица 4.1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок) и показателей

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		Конкурентоспособность	
		Б1	Б2	К1	К2
Критерии оценки эффективности					

1. Сложность получения	0,2	5	2	1	0,4
2. Выход целевого продукта при использовании катализатора	0,3	5	2	1,5	0,6
3. Уровень завершенности научного исследования	0,1	3	5	0,3	0,5
4. Стоимость катализатора	0,2	4	2	0,8	0,4
5. Время синтеза	0,1	4	3	0,4	0,3
6. Уровень проникновения на рынок	0,1	2	5	0,2	0,5
Итого:	1	23	19	4,2	2,7

Позиция разработок и конкурента оценивается по каждому показателю экспертным путем по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять 1. Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_i,$$

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

B_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – балл i -го показателя.

Уровень проникновения на рынок у катализаторов на основе РЗЭ 2 балла, у конкурентного продукта – максимум. В показателе завершенности научного исследования у конкурентного образца – 5 баллов. У полученных нами образцов этот показатель составил – 3, так как о полной завершенности научного исследования можно будет говорить только после создания успешного промышленного производства катализаторов.

Таким образом, общий балл конкурентоспособности по приведенным показателям для созданных нами катализаторов на основе РЗЭ – 4, для катализаторов на основе серебра – 2,7, что свидетельствуют о наличии явных преимуществ наших разработок, а, следовательно, их конкурентоспособности.

6.3 Диаграмма Исикавы

Диаграмма причины-следствия Исикавы (Cause-and-Effect-Diagram) — это графический метод анализа и формирования причинно-следственных связей, инструментальное средство для систематического определения причин проблемы и последующего графического представления.

Область применения диаграммы:

- Выявление причин возникновения проблемы;
- Анализ и структурирование процессов;
- Оценка причинно-следственных связей.

Построение диаграммы начинают с формулировки проблемной области/темы, которая является объектом анализа и наносится на центральную горизонтальную стрелку диаграммы.



Рисунок 4.1 – Общий вид диаграммы Исикавы

6.4 Оценка готовности проекта к коммерциализации

На данном этапе проводим предполагаемую оценку степени готовности проекта к коммерциализации с помощью таблицы 4.2.

Таблица 4.2 – Оценка степени готовности проекта к коммерциализации

№ п/п	Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
1	Определен имеющийся научно-технический задел	5	5
2	Определены перспективные направления коммерциализации научно-технического задела	5	5
3	Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке	5	5
4	Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок	3	3
5	Определены авторы и осуществлена охрана их прав	3	3
6	Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	3	3
7	Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	4	4
8	Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	4	4
9	Определены пути продвижения научной разработки на рынок	4	4
10	Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	4	4
11	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	4	2
12	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	3	3
13	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	5	5
14	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	5	5
15	Проработан механизм реализации научного проекта	5	5
	Итого:	62	60

При проведении анализа по таблице, приведенной выше, по каждому показателю ставится оценка по пятибалльной шкале. При этом система измерения по каждому направлению (степень проработанности научного проекта, уровень имеющихся знаний у разработчика) отличается. Так, при оценке степени проработанности научного проекта 1 балл означает не проработанность проекта, 2 балла – слабую проработанность, 3 балла – выполнено, но в качестве не уверен, 4 балла – выполнено качественно, 5 баллов – имеется положительное заключение независимого эксперта. Для оценки уровня имеющихся знаний у разработчика система баллов принимает следующий вид: 1 означает не знаком или мало знаю, 2 – в объеме теоретических знаний, 3 – знаю теорию и практические примеры применения, 4 – знаю теорию и самостоятельно выполняю, 5 – знаю теорию, выполняю и могу консультировать.

Оценка готовности научного проекта к коммерциализации (или уровень имеющихся знаний у разработчика) определяется по формуле:

$$B_{\text{сум}} = \sum B_i$$

где $B_{\text{сум}}$ – суммарное количество баллов по каждому направлению;

B_i – балл по i -му показателю.

Таким образом, перспективность разработки выше среднего. Проработаны пути продвижения научной разработки на рынок. Возможным потребителем технологии и готовой продукции является компания ООО «НОВОХИМ». Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки. Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, проект № 10.3031.2017/4.6.

Требуется исправить слабо проработанные вопросы, в частности, вопросы использования услуг инфраструктуры. Также требуется провести оценку интеллектуальной собственности.

6.5 Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования

Для данного продукта существуют два метода коммерциализации научной разработки: торговля патентными лицензиями либо реализация готового продукта, как коммерчески доступного катализатора.

Первый метод по продаже патента на технологию получения катализаторов на основе ВЭОС РЗЭ, является наименее рискованным с точки зрения капиталовложений.

Второй метод является более сложным, поскольку реализация конечного продукта влечет за собой собственно его производство, сертификацию, вывод на рынок, и т.п.

6.6 Инициация проекта

Группа процессов инициации состоит из процессов, которые выполняются для определения нового проекта или новой фазы существующего. В рамках процессов инициации определяются изначальные цели и содержание и фиксируются изначальные финансовые ресурсы. Определяются внутренние и внешние заинтересованные стороны проекта, которые будут взаимодействовать, и влиять на общий результат научного проекта. Данная информация закрепляется в Уставе проекта.

Устав проекта документирует бизнес-потребности, текущее понимание потребностей заказчика проекта, а также новый продукт, услугу или результат, который планируется создать.

Заинтересованные стороны проекта приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3– Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидание заинтересованных сторон проекта
Министерство науки и образования РФ	1. Оформление патентов; 2. Доклады на конференциях разного уровня; 3. Публикация статей в журналах с высоким Impact Factor.
ООО «НОВОХИМ»	1. Катализаторы с высокой каталитической активностью для синтеза глиоксаля.

В таблице 4.4 представлена информация об иерархии целей проекта и критериях достижения целей.

Таблица 4.4 – Цели и результат проекта

Цели проекта:	Получение катализаторов на основе ВЭОС РЗЭ в производстве глиоксаля.
Ожидаемые результаты проекта:	Технологическая установка для синтеза ВЭОС РЗЭ в полупромышленных масштабах, методика их получения в лабораторных условиях, готовый конечный продукт.
Критерии приемки результата проекта:	Чистота продукта, высокая каталитическая активность.
Требования к результату проекта:	Высокий выход продукта; Чистота продукта; Низкая трудозатратность синтеза.

Организационная структура проекта представлена в таблице 8, которая предоставляет информацию о научной группе проекта, роли каждого и функциях его в проекте. А также указаны трудозатраты каждого члена группы в проекте.

6.7 Рабочая группа проекта

На данном этапе работы необходимо описать: кто входит в рабочую группу данного проекта, определить роль каждого участника в данном проекте, а также прописать функции, выполняемые каждым из участников и их трудозатраты в проекте. Эту информацию представить в табличной форме (табл. 4.5).

В ходе реализации научного проекта, помимо магистранта, задействован ряд специалистов:

- Руководитель проекта – отвечает за реализацию проекта в пределах заданных ограничений по ресурсам, координирует деятельность участников проекта. В большинстве случаев эту роль выполняет руководитель магистерской диссертации.

- Заказчик проекта – участник проекта, формирующий цели проекта, ограничения проекта по срокам и затратам (бюджету). Он осуществляет укрупненный анализ проектов по показателям сроков, освоению затрат и финансированию. В магистерских научных проектах присутствует заказчик проекта в случае, если работа выполняется в рамках хоз. договора, по заказу предприятия, по гранту.

- Исполнитель по проекту – специалист, выполняющий отдельные работы по проекту. В случае, если магистерская работа является законченным научным исследованием – исполнителем проекта является магистрант. В случае, если магистерская работа является частью научного проекта, исполнителей может быть несколько.

Таблица 4.5 – Рабочая группа проекта

№ п/п	Роль в проекте	Функции	Трудозатраты, час.
1	Руководитель проекта	Координация действий участников проекта.	521
2	Исполнитель по проекту	Выполнение основной и экспериментальной части по проекту.	2513
3	Заказчик проекта	Формирует цели проекта	-
Итого:			3034

6.8 Планирование управления научно-техническим проектом

6.8.1 Организационная структура проекта

В практике используется несколько базовых вариантов организационных структур: функциональная, проектная, матричная.

Наиболее подходящей организационной структурой данной работы является проектная (рис. 4.2).

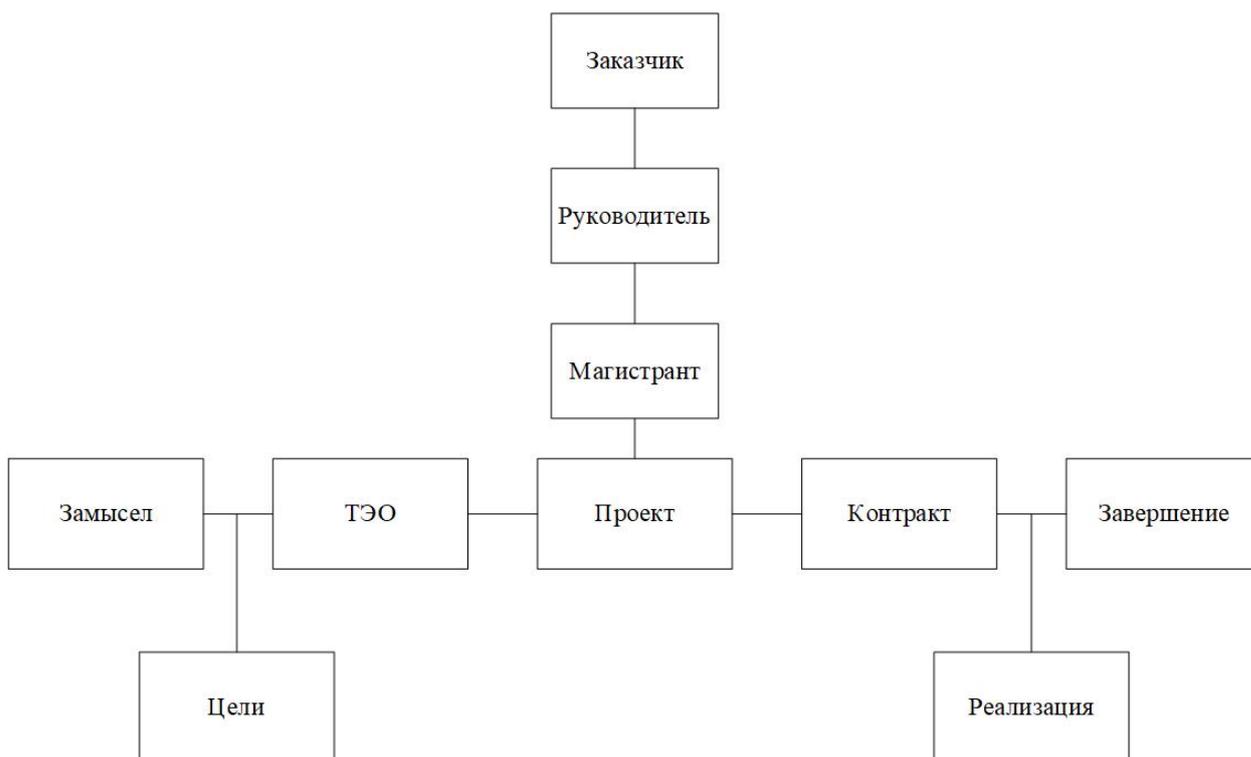


Рисунок 4.2 – Организационная структура проекта

6.8.2 Контрольные события проекта

В рамках данного раздела необходимо определить ключевые события проекта, определить их даты и результаты, которые должны быть получены по состоянию на эти даты. Эта информация представлена в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Контрольные события проекта

№	Контрольное событие	Дата	Результат (подтверждающий документ)
1	Обсуждение плана проекта	01.09.18	Утверждение участников исследования
2	Литературный анализ статей	11.10.18	Отчет по изученной литературе
3	Подготовка необходимых реактивов и оборудования	15.10.18	Товарные накладные, сертификаты качества на заказанные реактивы
4	Собеседование с руководителем обсуждения всей имеющей информации	16.10.18	Предварительные условия определения
5	Подбор рабочих условия для синтеза ВЭОС на основе РЗЭ	22.10.18-18.02.19	Отчет о проделанной работе
5.1	Подбор условий процесса	18.03.19	Анализы в виде таблиц и кривых
5.2	Определение структур новых соединений	29.03.19	Анализы в виде таблиц, РФА и ЭДС-спектров
6	Обработка и обсуждение полученных результатов, корректировка	1.04.19	Отчет
7	Оформление отчетов, представление результатов на конференциях	22.04.19	Отчет, сертификаты конференции
8	Расчет и проектирование основного оборудования для синтеза ВЭОС в полупромышленных масштабах	24.04.19-20.05.19	Пояснительная записка, технологическая схема, чертежи основного оборудования.
9	Защита магистерской диссертации	16.06.19	Диплом

6.8.3 План проекта

В рамках планирования научного проекта необходимо построить календарный график проекта (табл. 4.8).

Таблица 4.8 – Календарный план проекта

Основные этапы	№ раб.	Содержание работ	Должность исполнителя	Дата начала работ	Дата окончания работ
Проведение НИР					
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель	01.12.2018	02.12.2018
Выбор направления исследований	2	Поиск и изучение материалов по теме	Исполнитель	01.12.2018	20.12.2018
	3	Выбор направления исследований	Руководитель; Исполнитель	20.12.2018	30.12.2018
	4	Календарное планирование работ по теме	Исполнитель	20.12.2018	30.12.2018
	5	Собеседование с руководителем, обсуждение всей имеющейся информации	Руководитель; Исполнитель	01.01.2019	10.01.2019
Теоретические и экспериментальные исследования	6	Изучение методов синтеза ВЭОС	Исполнитель	10.01.2019	30.01.2019
	7	Определение целевых элементов в системе для получения катализаторов	Исполнитель	20.01.2019	10.02.2019
	8	Проведение теоретических расчетов и обоснований	Исполнитель	20.02.2019	01.03.2019
	9	Синтез ВЭОС в лабораторных условиях	Исполнитель	01.03.2019	1.04.2019
	10	Пробоподготовка	Исполнитель	01.04.2019	10.04.2019
	11	Анализ физико-химических свойств веществ	Исполнитель	10.04.2019	10.05.2019

Продолжение таблицы 4.8

Обобщение и оценка результатов	12	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель; Исполнитель	10.05.2019	20.05.2019
	13	Определение целесообразности проведения ОКР	Руководитель	10.05.2019	20.05.2019
Проведение ОКР					
Разработка технической документации	14	Подбор данных для выполнения экономической части работы	Исполнитель	20.05.2019	31.05.2019
	15	Оформление экономической части работы	Исполнитель; Консультант по вопросам менеджмента	20.05.2019	31.05.2019
Расчет и проектирование основного оборудования	16	Выбор основного оборудования	Руководитель; Исполнитель	20.05.2019	21.05.2019
	17	Технологический расчет	Исполнитель	21.05.2019	23.05.2019
	18	Механический расчет	Исполнитель	23.05.2019	25.05.2019
Оформление отчета по НИР (комплекта документации по ОКР)	19	Оформление раздела «социальная ответственность»	Исполнитель; Консультант по соц. ответственности	01.06.2019	10.06.2019
	20	Составление пояснительной записки	Исполнитель	01.06.2019	10.06.2019
	21	Процесс рецензирования работы	Рецензент	05.06.2019	12.06.2019
	22	Предзащита	Исполнитель	05.06.2019	10.06.2019
	23	Защита магистерской диссертации	Исполнитель	16.06.2019	16.06.2019

Таблица 4.9 – Календарный план-график проведения НИОКР

№ работы	Вид работы	Состав участников	Т, кал. дн.	Продолжительность выполнения работ																				
				декабрь			январь			февраль			март			апрель			май			июнь		
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3			
1	Составление и утверждение технического задания.	Руководитель	1	1																				
2	Поиск и изучение материалов по теме.	Исполнитель	20	1	2	3																		
3	Выбор направления исследований.	Руководитель	10			1																		
		Исполнитель				2																		
4	Календарное планирование работ по теме.	Исполнитель	10			1																		
5	Собеседование с руководителем, обсуждение всей имеющейся информации.	Руководитель	10			1																		
		Исполнитель				2																		
6	Изучение методов синтеза ВЭОС	Исполнитель	20				1	2	3															
7	Определение целевых элементов в системе для получения катализаторов.	Исполнитель	20					1	2	3														
8	Проведение теоретических расчетов и обоснований	Исполнитель	20							1	2	3												
9	Синтез ВЭОС в лабораторных условиях.	Исполнитель	30								1	2	3											
10	Пробоподготовка.	Исполнитель	10											1										
11	Анализ физико-химических свойств веществ. Аналитические исследования соединений методом РФА, ЭДС, СЭМ.	Руководитель	30												1	2	3							
		Исполнитель													2	3	4							
12	Определение целесообразности проведения ОКР.	Руководитель	10															1						
13	Подбор данных для выполнения экономической части работы.	Исполнитель	10																	1				
14	Оформление экономической части работы.	Исполнитель	2																		1	2		

Таким образом, календарный план проекта показывает сроки каждого этапа проекта. Для наглядного рассмотрения сроков и участия каждого члена научной группы в проекте рассмотрим календарный план-график.

Диаграмма Ганта – это тип столбчатых диаграмм (гистограмм), который используется для иллюстрации календарного плана проекта, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ (табл. 4.9).

6.9 Бюджет научного исследования

При планировании бюджета научного исследования должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов планируемых расходов, необходимых для его выполнения. В процессе формирования бюджета, затраты группируются по статьям, представленным в таблице 4.10.

6.9.1 Сырье и материалы

В эту статью включаются затраты на приобретение всех видов материалов, комплектующих изделий и полуфабрикатов, необходимых для выполнения работ по данной теме. Количество потребных материальных ценностей определяется по нормам расхода.

Таблица 4.10 – Сырье и материалы

Наименование	Марка, ТУ, ГОСТ	Кол-во, шт. Вес, кг.	Цена за ед., руб., с НДС	Сумма, руб.
Сырье и реагенты				
Нитрат скандия	13465-60-6	0,25	200000	50000
Нитрат празеодима	15878-77-0	0,25	24800	6200
Нитрат церия	10108-73-3	0,25	16000	4000
Нитрат гадолия	10168-81-7	0,25	30000	7500
Нитрат гольмия	10168-82-8	0,25	70000	17500
Натрия гидроксид	ГОСТ 4328-77	0,5	230	115
Посуда химическая				
Колба коническая со шлифом КН-1-500-29/32	ТУ 9464-019-29508133-2015	5	415	2 075

Колба коническая с цилиндрической горловиной КН-2-250-50	ТУ 9464-019-29508133-2015	5	80	400
Стакан В-1-250 высокий с делениями и носиком, тс	ТУ 9464-019-29508133-2015	5	80	400
Воронка Бюхнера фарфоровая №1, 65X100 мм	ГОСТ 9147-80	1	350	350
Колба Бунзена 1-250	ТУ 4320-012-29508133-2009.	1	260	260
Прочее				
Фильтры обеззоленные, синяя лента, D=55 мм	ГОСТ 12026-76	2	15	30
Средство моющее д/посуды	Пемолукс	1	50	50
Халат белый х/б	-	1	650	650
Перчатки нитриловые смотровые	-	1	400	400
Оформление документации				
Бумага для офисной техники	Svetocopy	1	130	130
Ручка шариковая	Pilot	2	30	60
Всего за материалы				90120
Транспортно-заготовительные расходы (3-5%)				2704
Итого по статье:				92824

6.9.2 Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ

В данную статью включают все затраты, связанные с приобретением специального оборудования (приборов, контрольно-измерительной аппаратуры, стенов, устройств и механизмов), необходимого для проведения работ по конкретной теме. Определение стоимости спецоборудования производится по действующим прейскурантам, а в ряде случаев по договорной цене.

Сумма амортизационных отчислений определяются по формуле:

$$E_{ам} = (\sum K_{обі} * H_{амі} * T_{обі}) / (365 * 100),$$

где $K_{обі}$ – стоимость единицы прибора или оборудования, руб.; $N_{амі}$ – норма амортизации прибора или оборудования, %; $T_{обі}$ – время использования оборудования, дни (табл. 4.11).

Также в данную статью (табл. 4.11) расходов включили затраты на электроэнергию, согласно действующему тарифу (3,42 руб. за 1 кВт/ч).

Расчет суммы затрат на электроэнергию определяется по формуле:

$$E_э = \sum N_i * T_э * Ц_э ,$$

где N_i - мощность электроприборов по паспорту, кВт; $T_э$ - время использования электрооборудования, час; $Ц_э$ - цена одного кВт*ч, руб. $Ц_э = 3,42$ руб/ кВт*ч.

Таблица 4.11 – Расчет затрат по статье «Спецоборудование для научных работ»

п/п	Наименование оборудования	$K_{обі}$, руб.	$T_{обі}$, дни	$N_{амі}$, %	N_i , кВт	$E_{ам}$, руб.	$E_э$, руб
1	Магнитное перемешивающее устройство «Heidolph MR Hei-Тес Package»	8000	30	10,4	0,6	68,383	1477,440
2	Плита лабораторная «Армед ДВ-2»	15600	18	13	1	61,545	1477,440
3	Лабораторный сушильный шкаф «СМ 50/350 – 60 ШС»	97000	14	10	2	372,055	2298,240
4	Муфельная электропечь «ЭКПС-5»	44000	16	15	1,8	289,315	2363,904
Итого:						791,298	7617,024
Итого по статье:						8408,322	

6.9.3 Расчет основной заработной платы

В работе над проектом принимало прямое участие 2 человека: студент-магистрант и руководитель проекта.

Величина расходов по заработной плате определяется, исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок в Томском политехническом университете.

Заработная плата:

$$C_{\text{зп}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}},$$

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

Основная заработная плата ($Z_{\text{осн}}$):

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_{\text{раб}},$$

где $T_{\text{р}}$ – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн. (таблица 4.14);

$Z_{\text{дн}}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}}$$

где $Z_{\text{м}}$ – месячный должностной оклад работника, руб.; M – количество месяцев работы без отпуска в течение года: при отпуске в 24 раб. дня $M = 11,2$ месяца, 5-дневная неделя; при отпуске в 48 раб. дней $M = 10,4$ месяца, 6 дневная неделя;

$F_{\text{д}}$ – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (таблица 4.12).

Таблица 4.12 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Исполнитель
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней:		
выходные дни	44	48
праздничные дни	14	14
Потери рабочего времени:		
отпуск	56	28
невыходы по болезни	0	0
Действительный годовой фонд рабочего времени	251	275

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_m = Z_b \cdot (1 + k_{пр} + k_d) \cdot k_p$$

где Z_b – базовый оклад, руб.; $k_{пр}$ – премиальный коэффициент, 30% от Z_b ; k_d – коэффициент доплат и надбавок, 20%; k_p – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска) (табл. 4.14).

Таблица 4.14 – Расчет основной заработной платы

Исполнители	Исполнитель и по категориям	Z_b , руб.	k_p	Z_m , руб.	$Z_{дн}$, руб.	T_p раб. дн.	$Z_{осн}$, руб.
Руководитель	Доцент, к.т.н.	33664	1,3	43763	1952,77	25	48819,25
Исполнитель (магистрант)	Магистрант	26300	1,3	34190	1392,46	188,3	262200,22
Итого:							311019,47

6.9.4 Дополнительная заработная плата научно-производственного персонала

В данную статью (табл. 4.15) включается сумма выплат, предусмотренных законодательством о труде (в среднем – 12 % от суммы основной заработной платы).

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн}$$

где $Z_{доп}$ – дополнительная заработная плата, руб.; $k_{доп}$ – коэффициент дополнительной зарплаты; $Z_{осн}$ – основная заработная плата, руб.

Таблица 4.15 – Дополнительная заработная плата НПП

Заработная плата	Руководитель	Исполнитель
Основная зарплата	48819,25	262200,22
Дополнительная зарплата	5858,31	31464,03
Всего	54677,56	293664,25
Итого:	348341,81	

6.9.5 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

В данной статье расходов (табл. 4.16) отражаются обязательные отчисления, установленные законодательством Российской Федерации.

$$З_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}})$$

где $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

На 2019 год для некоммерческих организаций на УСН, ведущих деятельность в сфере социального обслуживания граждан, научных исследований и разработок, образования, здравоохранения, культуры, искусства и массового спорта, кроме профессионального, установлен размер страховых взносов равный 27,1% (пп. 7 п. 1, пп. 3 п. 2 ст. 427 НК РФ).

Таблица 4.16 – Отчисления во внебюджетные фонды

Налогоплательщик	Основная заработная плата, руб.	Дополнительная заработная плата, руб.	Отчисления во внебюджетные фонды, руб.
Руководитель	48819,25	5858,31	14817,62
Исполнитель	262200,22	31464,03	79583,01
Всего:	311019,47	37322,34	94400,63
Итого:		442742,44	

Таблица 4.17 – Итоговые затраты на проект

Статьи	Сумма, руб.
Сырье и материалы	92824
Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	8408,322
Основная заработная плата	311019,47
Дополнительная заработная плата НПП	37322,34
Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)	94400,63
Накладные расходы	278673,44
Итого плановая себестоимость:	822648,2

6.10 Оценка ресурсоэффективности

Для оценки социальной эффективности научного проекта была оценена предположительная степень влияния реализации проекта на различные критерии социальной эффективности.

Также была проведена сравнительная оценка эффективности продуктов-разработок в сравнении с уже известными катализаторами для синтеза глиоксаля, изучаемыми ранее, (таблица 4.19) и выявлена потенциальная конкурентоспособность наших разработок на рынке в будущем.

Таблица 4.18 – Критерии социальной эффективности

До	После
Относительно высокая стоимость выпускаемых продуктов на основе глиоксаля и, как следствие, ограниченная доступность на рынке.	Популяризация продуктов на основе глиоксаля за счет снижения его рыночной стоимости.

6.10.1 Определение ресурсной, финансовой, бюджетной социальной и экономической эффективности исследования

Для оценки эффективности представленного проекта воспользуемся сравнительной оценкой характеристик текущего проекта с его аналогами (табл. 4.11). Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

Таблица 4.19– Сравнительная оценка характеристик проектов

Критерии \ ПО	Весовой коэффициент параметра	Катализаторы на основе РЗЭ	Серебряные катализаторы
1. Способствует росту производительности труда пользователя	0,25	5	5
2. Удобство в эксплуатации	0,15	4	4
3. Надежность	0,20	5	5

4. Воспроизводимость	0,25	4	4
5. Материалоемкость	0,15	5	4
Итого:	1	4,6	4,5

Таблица 4.20 – Плановая и максимальная себестоимость разработки катализатора на основе РЗЭ и аналога – серебряного катализатора

№	Катализатор	Плановая себестоимость, руб.	Максимальная себестоимость, руб.
1	Катализатор на основе РЗЭ	215 196,00	280 000,00
2	Серебряный катализатор	265 354,00	280 000,00

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\Phi}^p = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\max}}$$

где I_{Φ}^p - интегральный финансовый показатель разработки;

Φ_{pi} – стоимость i -го варианта исполнения;

Φ_{\max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

$$1 - I_{\Phi}^p = \frac{215\,196,00}{280\,000,00} = 0,77;$$

$$2 - I_{\Phi}^a = \frac{265\,354,00}{280\,000,00} = 0,95;$$

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение стоимости разработки.

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта рассчитывается следующим образом:

$$I_m^a = \sum_{i=1}^n a_i b_i^a, \quad I_m^p = \sum_{i=1}^n a_i b_i^p,$$

где I_m – интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов; a_i – весовой коэффициент i -го параметра;

b_i^a , b_i^p – бальная оценка i -го параметра для аналога и разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

n – число параметров сравнения.

Сравнение интегрального показателя эффективности текущего проекта и аналогов позволит определить сравнительную эффективность.

Интегральный показатель эффективности разработки и аналога определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{финр}^p = \frac{I_m^p}{I_\phi^p}$$

Катализатор на основе РЗЭ:

$$I_{финр}^p = \frac{4,6}{0,77} = 5,97;$$

Серебряный катализатор:

$$I_{финр}^a = \frac{4,5}{0,95} = 4,73.$$

Сравнение интегрального показателя эффективности текущего проекта и аналога позволит определить сравнительную эффективность проекта (табл. 4.21).

$$\mathcal{E}_{ср} = \frac{I_{финр}^p}{I_{финр}^a} = 1,26$$

где $\mathcal{E}_{ср}$ – сравнительная эффективность проекта;

Таблица 4.21 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Разработка	Аналог
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,77	0,95
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,6	4,5
3	Интегральный показатель эффективности	5,97	4,73
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,26	

Сравнение значений интегральных показателей эффективности позволяет судить о приемлемости существующего варианта решения

поставленной технической задачи с позиции финансовой и ресурсной эффективности.

Таким образом, на основании проведенной сравнительной оценки характеристик проекта можно сделать вывод, что данный проект является менее дорогостоящим и более перспективным по сравнению с предыдущими разработками. Но в отличие от аналога – серебряного катализатора, катализаторы на основе РЗЭ в настоящее время не используются в промышленном синтезе глиоксаля, т.к. необходима детальная проработка всех технологических и экономических аспектов их получения.

6.10.2 Организация труда на проектируемом объекте

Фонд оплаты труда зависит от численности ППП и от принятых тарифных условий оплаты труда, стимулирующих и компенсирующих надбавок. Численность рабочих зависит от количества рабочих в смену и режима работы цеха. Очередность работы бригад при непрерывном производстве устанавливается в соответствии с графиком сменности.

6.10.3 Построение графика сменности

Продолжительность смены - 8 ч. Количество смен в сутки – 3. Количество бригад – 4. Количество дней работы каждой бригады в сменобороте - 4 дня.

Период сменоборота:

$$T_{см} := 4 \cdot 4 = 16$$

Количество рабочих дней за сменоборот:

$$N_{рд} := 3 \cdot 4 = 12$$

Количество выходных дней за сменоборот:

$$N_{вд} := 16 - 12 = 4$$

На основании расчетов строим график сменности, который имеет следующий вид (табл. 4.22).

Таблица 4.22 - График сменности

№	Часы работы	Дни месяца															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	23–7	А	А	А	А	Б	Б	Б	Б	В	В	В	В	Г	Г	Г	Г
2	7–15	В	Г	Г	Г	Г	А	А	А	А	Б	Б	Б	Б	В	В	В
3	15-23	Б	Б	В	В	В	В	Г	Г	Г	Г	А	А	А	А	В	В
Отдых		Г	В	Б	Б	А	Г	В	В	Б	А	Г	Г	В	Б	А	А

6.10.4 Проектирование годового баланса рабочего времени

Нормативная продолжительность рабочего времени в текущем году – 1970 час (в соответствии с требованиями трудового кодекса РФ).

Число выходных дней в году по графику сменности, дн:

$$N_{\text{вых}} := 4 \cdot \frac{365}{16} = 91.25$$

Количество рабочих дней за год, дн:

$$N_{\text{раб}} := 365 - 91.25 = 273.75$$

Количество рабочих часов за год, час:

$$N_{\text{час}} := 273.75 \cdot 8 = 2190$$

Переработка за год составляет, час:

$$N_{\text{час}} - 1970 = 220$$

Переработка сверх нормы рабочего времени компенсируется дополнительными днями отдыха, дн:

$$P := \frac{220}{8} = 27.5$$

Общее количество выходных за год, дн:

$$N_{\text{вых}} + P = 91.25 + 27.5 = 118.75$$

На основании выбранного графика сменности и принятого режима работы составляется баланс рабочего времени одного рабочего в год (табл. 4.23).

Таблица 4.23 - Баланс рабочего времени одного работника в год

№	Показатели	Дни	Часы
1	Календарный фонд рабочего времени	365	8760
2	Выходные дни	118,75	2850
3	Номинальный фонд рабочего времени	246,25	5910
4	Планируемые невыходы, в том числе:	36	864
	очередные и дополнительные отпуска	24	576
	невыходы по болезни или декретные отпуска	7	168
	отпуск в связи с учебной без отрыва от производства	4	96
	выполнение гос. обязанностей	1	24
5	Эффективный фонд рабочего времени	210,25	5046

6.10.5 Определение профессионально-квалификационного состава и численности промышленно-производственного персонала проектируемого объекта

Расчет численности рабочих необходимо провести по каждой группе промышленно-производственного персонала предприятия, а именно: рабочие (основные, вспомогательные), руководители, специалисты и служащие. При расчете численности основных и вспомогательных рабочих необходимо определить их явочное, штатное и списочное число.

Явочная численность рабочих предусматривается для обеспечения нормального хода технологического процесса в течение суток и рассчитывается умножением количества человек в смену на количество рабочих смен в сутки.

Штатная численность учитывает подмену производственных рабочих для обеспечения нормального хода технологического процесса во время выходных дней. Подмена устанавливается в размере одной рабочей бригады. Определяется путем умножения количества человек в смену на количество бригад.

Списочная численность персонала является расчетной величиной и характеризует потребное его количество для обеспечения нормального хода технологического процесса в течение года. Определяется путем умножения штатного числа рабочих на коэффициент списочного состава.

Разность между списочной и штатной численностью представляет собой резерв производственных рабочих для бесперебойной работы производства на случай отпусков, болезни и других плановых потерь рабочего времени.

Для расчета состава и численности основных рабочих необходимо воспользоваться таблицей 4.24.

Таблица 4.24 - Состав и численность основных рабочих

Наименование профессии	Тарифный разряд	Количество человек в смену	Явочное число рабочих	Штатное число рабочих	Коэф. списочного состава	Списочное число рабочих
1. Аппаратчик	5	1	3	4	1,161	4,644
2. Оператор	6	1	3	4	1,161	4,644
Итого:		2	6	8	2	10

Состав и численность вспомогательных рабочих представляется в виде таблицы 4.25.

Таблица 4.25 – Состав и численность вспомогательных рабочих

Наименование профессии	Тарифный разряд	Количество человек в смену	Явочное число рабочих	Штатное число рабочих	Коэф. списочного состава	Списочное число рабочих
1. Слесарь-электромеханик	5	1	3	4	1,161	4,644
2. Слесарь - КИПиА	6	1	3	4	1,164	4,644
Итого:		2	6	8	2	10

Состав и численность руководителей представляется в виде таблицы 4.26.

Таблица 4.26 – Состав и численность руководителей

Категория работника и должность	Численность, чел.
Начальник лаборатории	1

6.10.6 Организация заработной платы на проектируемом объекте

Годовой фонд заработной платы рабочих представляет собой сумму основной и дополнительной заработной платы. Основная заработная плата включает в себя тарифный фонд заработной платы, доплаты за ночное время и праздничные дни, доплату по районным коэффициентам и надбавки за стаж работы в этих районах, а также доплаты бригадирам за руководство бригадой и обучение учеников.

Дополнительная заработная плата включает доплату подросткам за сокращённый рабочий день, оплату отпусков (основных, дополнительных и учебных), выплату за выслугу лет и выходные пособия.

Тарифный фонд заработной платы при повременной системе оплаты труда равен:

$$T_{\phi} := T_{C_{\text{ч}}} \cdot T_{\text{эф}} \cdot P_{\text{сп}}$$

$T_{C_{\text{ч}}}$ - часовая тарифная ставка повременщика, руб.;

$T_{\text{эф}}$ - годовой эффективный фонд рабочего времени, ч;

$P_{\text{сп}}$ - списочная численность рабочих, чел.

Расчет годового фонда оплаты труда представлены в виде таблицы 4.27.

Таблица 4.27 – Годовой фонд заработной платы

Профессия рабочего	Форма оплаты	Тарифн ый разряд	Тариф ная ставка, руб.	Списоч ное число рабочи х	Полезн ый фонд рабоче го времен и, ч	Основная зарплата, руб.					Итого	Дополнительная зарплата, тыс. руб.		Итого	Всего, руб.	
						Тарифн ый фонд	Прем ия	Прочие доплаты				Итого	Оплата времен и основн ого и доп. отпуска			Оплата времен и учебно го отпуск а
								в ночн ое	в вечер нее	в празднич ные						
Основные рабочие																
Аппаратчи к	Повреме нная	5	60	5	5046	151380 0	45414 0	2018 40	10092 0	302760	25734 60	293374, 44	51211, 854	344972, 313	2918432, 313	
Оператор	Повреме нная	6	70	5	5046	176610 0	52983 0	2354 80	11774 0	353220	30023 70	342720, 535	59747, 163	402467, 698	3404837, 698	
Итого:						32799 00	9839 70	4373 20	2186 60	655980	55758 30	636094	11095 9	747440	632327 0	
Вспомогательные рабочие																
Слесарь- электромех аник	Повреме нная	5	50	5	5046	126150 0	37845 00	1682 00	84100	252300	21445 50	244800, 382	42676, 545	287476, 927	2432026, 927	
Слесарь - КИПиА	Повреме нная	6	40	5	5046	100920 0	30276 0	1345 60	67280	201840	17156 40	195840, 306	34141, 236	229981, 542	1945621, 542	
Итого:						227070 0	40872 60	3027 60	15138 0	454140	38601 90	440640	76817	517458	4377648, 5	

Доплата за работу в ночное время при трехсменной работе, когда треть годового эффективного фонда времени будет ночным, можно рассчитать так: (тарифный фонд / 3) x 0,4.

Доплата за работу в вечернюю смену рассчитывается аналогично доплате за работу в ночную смену при нормативе доплаты 0,2 (20 %).

Доплата за работу в праздничные дни в непрерывном производстве составляет примерно 2,2 % тарифного фонда.

Оплата времени очередного, дополнительного и учебного отпусков рассчитывается по формуле:

$$\% = D \cdot \frac{100}{T_{\text{пол}}},$$

где D – число дней основного и дополнительного отпуска или учебного отпуска;

$T_{\text{пол}}$ - полезный фонд рабочего времени, дн.

Расчет годового фонда оплаты труда руководителей представлен в виде таблицы 4.28.

Таблица 4.28 – Годовой фонд оплаты труда руководителей

Должность	Численность	Месячный должностной оклад, руб.	Премия, руб.	Доплата за работу в ночное, вечернее и праздничное время	Годовой ФОТ, руб.
Начальник лаборатории	1	90000	18018	4000	1344216

6.11 Расчёт производственной мощности и эффективного фонда времени оборудования

Под производственной мощностью химического предприятия (производства, цеха) понимается максимально возможный годовой выпуск готовой продукции в номенклатуре и ассортименте, предусмотренных на плановый период при наилучшем

использовании производственного оборудования, площадей в результате внедрения инноваций или проведения организационно-технических мероприятий.

Рассчитаем производственную мощность оборудования, необходимого для синтеза ВЭОС на основе РЗЭ в полупромышленных масштабах.

Исходные данные:

Часовая производительность оборудования в натуральных единицах _____ $P_{\text{час}} := 0.2163$

Эффективный фонд времени работы оборудования, час _____ $T_{\text{эф}} := 8400$

Количество однотипного оборудования, установленного в цехе, шт. _____ $K_{\text{об}} := 1$

Производственная мощность оборудования, кг/год:

$$M := P_{\text{час}} \cdot T_{\text{эф}} \cdot K_{\text{об}} = 1816.92$$

Рассчитаем эффективный фонд времени оборудования:

Исходные данные:

Время простоя в ремонтах за расчетный период _____ $T_{\text{ППР}} := 15$

Время технологических остановок _____ $T_{\text{О}} := 20$

Количество праздничных дней в году _____ $T_{\text{пр}} := 0$

Календарный фонд времени _____ $T_{\text{кал}} := 365$

Количество выходных дней в году _____ $T_{\text{вых}} := 0$

Производительность единицы оборудования в единицу времени _____ $Q_{\text{пп}} := 333.3$

Максимальная производительность в единицу времени _____ $Q_{\text{max}} := 350.375$

$$T_{\text{ном}} := T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}} = 365$$

Эффективный фонд времени оборудования:

$$T_{\text{эфф}} := T_{\text{ном}} - T_{\text{ППР}} - T_{\text{О}} = 330$$

Коэффициент экстенсивного использования оборудования:

$$K_{\text{экс}} := \frac{T_{\text{эфф}}}{T_{\text{кал}}} = 0.904$$

Коэффициент интенсивного использования оборудования:

$$K_{\text{инт}} := \frac{Q_{\text{пп}}}{Q_{\text{мах}}} = 0.951$$

Интегральный коэффициент использования мощности:

$$K_{\text{им}} := K_{\text{экс}} \cdot K_{\text{инт}} = 0.86$$

Для определения фактического выпуска продукции рассчитывается производственная программа, кг:

$$N_{\text{год}} := K_{\text{им}} \cdot M = 1562.641$$

Таблица 4.29 – Баланс рабочего времени оборудования

Показатели	Количество дней (часов)
Календарный фонд времени	365 (8760)
Режимные потери рабочего времени (выходные и праздники)	0
Номинальный фонд рабочего времени	365 (8760)
Простой оборудования в ремонтах	15 (360)
Эффективное время работы оборудования за год	350 (8400)

6.12 Расчет затрат на производство продукции

6.12.1 Расчет годовой потребности в сырье и материалах

Затрат на сырье и материалы приведены в таблице 4.30.

Таблица 4.30 – Затраты на сырье и материалы

Наименование	Марка, ТУ, ГОСТ	Кол-во, шт. Вес, кг.	Цена за 1 кг., руб., с НДС	Сумма, руб.
Сырье и реагенты				
Нитрат скандия	13465-60-6	1000	200000	200000000
Нитрат празеодима	15878-77-0	1000	24800	24800000
Нитрат церия	10108-73-3	1000	16000	16000000
Нитрат гадолия	10168-81-7	1000	30000	30000000
Нитрат гольмия	10168-82-8	1000	70000	70000000
Натрия гидроокись	ГОСТ 4328-77	1320	112,2	148104
Итого:		6320	340912,2	340948104

6.12.2 Расчет амортизационных отчислений и калькуляция себестоимости на производство и реализацию продукции

Для расчета амортизационных отчислений необходимо учесть:

- полную стоимость зданий;
- полную стоимость оборудования;
- нормы амортизационных отчислений.

Расчет амортизационных отчислений приведен в таблице 4.31.

Таблица 4.31 - Расчет амортизационных отчислений

Наименование основных средств	Норма амортизаци и, %	1 год	
		Соф, тыс.руб.	АО, тыс.руб.
1. Здание	3	200	6
2. Оборудование	15	1500	225
Итого:		1700	231

Калькуляция себестоимости на производство и реализацию продукции при заданном объеме производства ($Q = 1563$ кг).

Таблица 4.32 - Калькуляция себестоимости продукции

Статьи затрат	Затраты на 1 кг готовой продукции, тыс. руб.	Затраты на весь объем тыс. руб.
1. Сырье	218,13	340948,104
2. Электроэнергия на технологические нужды, кВт *ч.	0,23	359,49
3. Заработная плата основных рабочих	4,04	6323,27
4. Отчисления на социальные нужды 30%	1,21	1896,981
Итого переменных издержек:	223,61	349502,43
5. РСЭО		
5.1 Амортизация оборудования	0,144	225
5.2 Ремонт оборудования	0,756	1181,63
5.3 Заработная плата ремонтного персонала:	2,8	4377,65
5.4 Отчисления на социальные нужды 30%	0,84	1313,295
6. Цеховые расходы:		
6.1 Амортизация задний	0,004	6
6.2 ЗП ИТР + служащие + МОП	0,86	1344,21
6.3 Охрана труда и ТБ (15% от всех ЗП)	1,15	1797,45
6.4 Ремонт и содержание здания	0,043	67,209
7. Общепроизводственные расходы	3,977	6216,051
8. Коммерческие расходы	2,31	3610,53
Итого постоянных издержек	8,907	13921,641
Полная себестоимость	232,517	363424,071

6.12.3 Определение цены готовой продукции

Цену продукта определяем по формуле, тыс. руб.:

$$Ц := С \cdot \left(1 + \frac{Р}{100} \right)$$

где С – полная себестоимость единицы готовой продукции; Р – рентабельность продукции (24,5%).

$$Ц := 232.517 \cdot \left(1 + \frac{24.5}{100} \right) = 289.484$$

6.13 Анализ безубыточности по производству

Цель анализа – определение точки безубыточности, т.е. минимального объема продаж, начиная с которого предприятие не несет убытков.

Определение точки безубыточности аналитическим способом, кг:

$$Q_{кр} := \frac{I_{пост}}{Ц - I_{пер}} = 0.135$$

Определение точки безубыточности графическим способом:

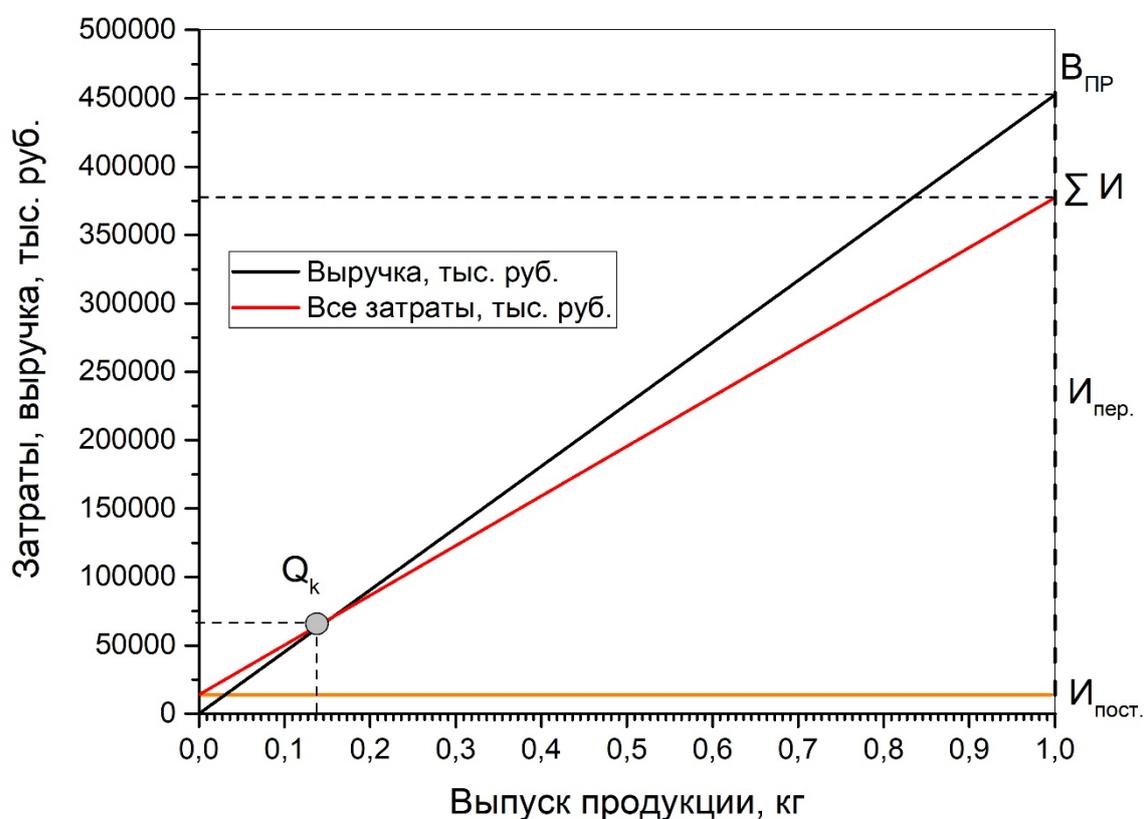


Рисунок 4.3 - Графическое определение точки безубыточности

Полученное значение графическим способом: $Q_{кр} = 0,140$ кг.

6.14 Расчет ТЭП

Таблица 4.33 – Техничко-экономические показатели проектируемого объекта

Наименования показателя	Единицы измерения	Значения показателей
1.Объем производства	кг	1563
2.Объем продаж	кг	1563
3.Цена за 1 кг	тыс. руб.	289,5
4.Выручка от продажи (2*3)	тыс. руб.	452488,50
5.Суммарные издержки	тыс. руб.	363424,07
5.1. Издержки переменные	тыс. руб.	349502,43
5.2. Издержки постоянные	тыс. руб.	13921,64
6.Прибыль операционная (4-5)	тыс. руб.	89064,43
7.Налог на прибыль (6*20%)	тыс. руб.	17812,89
8.Прибыль чистая (6-7)	тыс. руб.	71251,54
9.Себестоимость за 1 кг	тыс. руб.	232,52
10.Стоимость основных средств	тыс. руб.	1700
11.Численность основных рабочих	чел.	10
12.Фондовооруженность (10/11)	тыс. руб./чел.	170
13.Фондоотдача (4/10)	руб./руб.	266,17
14.Фондоемкость (10/4)	руб./руб.	0,004
15.Производительность труда (4/11)	тыс. руб./чел.	45248,85
16.Рентабельность производства (8*100%/5)	%	19,6
17.Рентабельность продаж (8*100%/4)	%	15,7
18.Критический объем продаж	кг	0,140
19.Критический объем продаж	тыс. руб.	68000

Выводы:

В ходе проделанной работы были найдены основные сегменты рынка потребления продукции. Также определена перспективность проекта, выявлены недостающие компетенции разработчиков. Выбран метод коммерциализации научно-технического исследования. Определена организационная структура проекта, найдены функции и обязанности каждого участника проекта. А также определены технико-экономические показатели и проведен анализ безубыточности по действующему производству.

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
4KM71	Амеличкину Ивану Вячеславовичу

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

Разработка и проектирование основных аппаратов для получения глиоксаля.	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения.	<i>Объектом исследования являются высокоэнтропийные оксидные системы на основе РЗЭ как основной компонент катализаторов процесса синтеза глиоксаля на предприятии ООО «НОВОХИМ».</i>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: 1.1 Специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства. 1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.	1.1 Федеральный закон № 426-ФЗ от 28 декабря 2013 года «О специальной оценке условий труда» 1.2 Федеральный закон №184-ФЗ «о техническом регулировании от 27 декабря 2002 года.
2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов. 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия.	2.1 Вредные и опасные факторы: – Отклонение показателей микроклимата в помещении; – Превышение уровня шума; – Отсутствие или недостаток естественного света; – Недостаточная освещенность рабочей зоны; – Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека.
3. Экологическая безопасность: 3.1. Анализ воздействия на окружающую среду 3.2. Рекомендации по минимизации влияния на окружающую среду	3.1 Никаких вредных выбросов в атмосферу, литосферу и гидросферу во время работы не обнаружено. 3.2 Производство ВЭОС на основе РЗЭ является полностью безотходным.
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях: 4.1. Перечень возможных ЧС в лаборатории	4.1 Подтопление и затопление в весеннее половодье, ливневые дожди с градом, штормовые ветры, засухи, природные пожары, искусственные пожары землетрясения (6-7 баллов). Наиболее типичным для Томска являются пожары
Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	20.03.2019

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Романова С.В.			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4KM71	Амеличкин И.В.		

7 Социальная ответственность

7.1 Введение

Научно-исследовательская работа проводилась в инновационно технологическом центре при СФТИ ТГУ. Растворы нитратов РЗЭ смешивали в равном мольном соотношении на магнитной мешалке в течение часа. Полученную смесь осаждали 0,05 молярным раствором NaOH. Далее промывали дистиллированной водой в объеме 500 мл. Полученный осадок отфильтровывали на вакуумной воронке Бюхнера. Затем высушивали в сушильных шкафах при температуре 70 °С в течение 12 часов и отжигали в печах при температуре 800 °С в течение 1 часа.

Размещение полупромышленной установки, включающей в себя аппарат с перемешивающим устройством, емкости для смешения нитратов РЗЭ, нутч-фильтр и муфельную печь, планируется в лаборатории данного центра.

Магистерская диссертация связана с получением высокоэнтропийных оксидных систем (ВЭОС) на основе редкоземельных элементов (РЗЭ) для производства катализаторов в процессе синтеза глиоксаля на предприятии ООО «НОВОХИМ» г. Томск.

Целью данной части магистерской диссертации является обеспечение социальной ответственности и создание безопасных, благоприятных и комфортных условий при выполнении экспериментальной части научно-исследовательской работы, а также, в дальнейшем при использовании полупромышленной установки синтеза ВЭОС на основе РЗЭ.

В ходе работ с веществами используются слабые растворы кислот и щелочей. Тем не менее, необходимо предусмотреть постоянное контроле условий труда и осуществление комплекса мероприятий по идентификации вредных и опасных факторов трудового процесса.

В разделе рассматриваются вопросы охраны труда и техники безопасности, связанные с работой в лаборатории, а также разрабатываются мероприятия по предотвращению воздействия на здоровье работников лаборатории опасных и вредных факторов.

7.2 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

В рамках данного подраздела рассматриваются специальные нормы трудового законодательства для процесса синтеза ВЭОС на основе РЗЭ, а также организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.

7.2.1 Специальные нормы трудового законодательства

Производство ВЭОС на основе РЗЭ не может быть классифицировано как оказывающее вредное воздействие на здоровье человека. Однако, ввиду возможной халатности работников, существует ряд характерных заболеваний таких как: хронические и аллергические заболевания органов дыхания и кожи. Для профилактики заболеваний подобного рода необходимо проходить профилактические осмотры не реже 1 раз в год. Ответственность за состояние условий и охраны труда в лаборатории возлагается на руководителя. В его обязанности входит обеспечение безопасности оборудования, технологических процессов и применяемых сырья и материалов.

Все работники лаборатории обязаны пройти инструктаж по технике безопасности: знать меры при возникновении аварийных ситуаций, расположение первичных средств пожаротушения, план эвакуации и нахождение кнопок оповещения [35].

От каждого работника лаборатории требуется соблюдение следующих правил:

- к работе не допускаются лица, не прошедшие инструктаж (периодичность для студентов – 2 раза в год);
- работа с химическими веществами запрещена беременным женщинам и несовершеннолетним ТК 253 и 265 [36];
- продолжительность работы в лаборатории составляет не более 8 часов в день (перерывы через каждые 45-50 минут);
- при работе с химическими веществами следует предотвратить любую возможность проникновения в организм человека: через легкие, кожу или через рот;
- не использовать высокоопасные растворители для технических целей (мытья посуды);

- любые работы с газообразными, летучими или пылящими жидкими и твердыми веществами проводить только в вытяжном шкафу при включенной вентиляции, летучие твердые и жидкие вещества держать плотно укупоренными, а наиболее летучие — на специальных полках в вытяжном шкафу, взвешивать летучие твердые и жидкие вещества только в плотно закрывающихся сосудах;
- проникновение ядов в организм через кожу можно предотвратить или уменьшить путем соблюдения личной гигиены и применения спецодежды.

7.2.2 Компоновка оборудования

Спецификой производства ВЭОС является наличие слабоконцентрированных растворов азотной кислоты и щелочи. Поэтому нет необходимости выносить аппаратуру за пределы лаборатории (закрытый вариант компоновки).

Все сушильные шкафы и печи находятся под вытяжкой. Реактор с механическим перемешивающим устройством и емкости с мешалкой планируется разместить в отдельных боксах.

7.3 Производственная безопасность. Анализ вредных и опасных факторов проектируемой производственной среды

Производственная безопасность определяется как комплекс мероприятий по обеспечению безопасности в случае возникновения опасных факторов и включает в себя электробезопасность, безопасную эксплуатацию оборудования, безопасное протекание технологических процессов. Согласно [37] приведена классификация возможных вредных и опасных факторов, выявленные в ходе выполнения работ. Результаты представлены в виде таблицы 9.1.

Таблица 9.1 - Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разработка	Изготовление	Эксплуатация	
1. Отклонение показателей микроклимата.	+	+	+	Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений СанПиН 2.2.4.548-96 [38]
2. Превышение уровня шума.		+	+	ГОСТ 12.1.003-2014 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Шум. Общие требования безопасности [39].
3. Отсутствие или недостаток естественного света.	+	+	+	Санитарные правила и нормы СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 [40].
4. Недостаточная освещенность рабочей зоны.		+	+	СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95* [41].
5. Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека.	+	+	+	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов [42].

7.3.1 Отклонения показателей микроклимата

В лабораторных помещениях для соблюдения специальных норм микроклимата предусмотрены, в соответствии с СанПиНом 2.2.4.548-96 [43] и ГОСТ 12.1.005 – 88 (2000) [44] («Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны») следующие меры: помещения оснащены устройством для отопления; используется теплоизоляционные материалы (асбест).

Согласно нормативным документам [45] описанная работа относится к категории Ia. - работы с интенсивностью энерготрат до 120 ккал/ч (до 139 Вт). Поэтому в лабораторных помещениях создаются оптимальные микроклиматические условия для нормального функционального состояния человека (табл.).

Таблица 9.2 – Допустимые нормы микроклимата в рабочей зоне производственных помещений (категория работ Ia) [45]

Сезон года	Категория работ по уровню энергозатрата, ккаль/ч	Температура воздуха, °С		Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/сек	
		Диапазон ниже оптимальных	Диапазон выше оптимальных		Если $t^0 < t^{0\text{оптим}}$	Если $t^0 < t^{0\text{оптим}}$
Теплый	1а (до 139)	21,0-22,9	25,1-28,0	15-75	0,1	0,2
Холодный		20,0-21,9	24,1-25,0		0,1	0,1

Для обеспечения нормальных условий труда санитарные нормы СанПиН 2.2.1/2.1.1.1031-01 устанавливают, что на одного рабочего должно приходиться 4,5 м² площади помещения и 20 м³ объема воздуха.

Площадь данного помещения составляет 70 м², объем 300 м³. В данном помещении работают 2 человека, соответственно на одного человека приходится 35 м² и 150 м³ воздуха. Это соответствует санитарным нормам.

Фактическая температура воздуха в теплый период составляла 22-23 °С, в холодный период 21-22 °С что соответствует требуемым нормам.

7.3.2 Повышенный уровень шума

В результате гигиенических исследований установлено, что шум ухудшает условия труда, оказывая вредное воздействие на организм человека. При длительном воздействии шума на организм человека происходят нежелательные изменения: снижается острота зрения и слуха, повышается кровяное давление, притупляется внимание. Сильный продолжительный шум может быть причиной функциональных изменений сердечно-сосудистой и нервной системы. В настоящее время источником шума в химической лаборатории служит муфельная печь.

Так как в лаборатории планируется разместить полупромышленную установку для синтеза ВЭОС, которая включает в себя аппарат с перемешивающим устройством, источником шума также может стать реактор. Однако, ввиду специфики аппарата, его геометрических размеров и предыдущего опыта эксплуатации подобного оборудования, уровень шума при работе реактора, не должен превышать

85 дБА. Характеристика постоянного шума [39] на рабочих местах - это уровни звукового давления в дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами 31,5; 63; 125; 250; 500; 1000; 2000; 4000; 8000 Гц.

В химической лаборатории установлены предельно допустимые уровни звукового давления и звука [43], указанные в таблице 9.3.

Таблица 9.3 – Значение предельно допустимого уровня звукового давления

Показатель	Значения								
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Частота, Гц	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Уровень звукового давления в октавных полосах, дБ	103	91	83	77	73	70	68	66	64
Эквивалентный уровень звука, дБА	80								

Согласно [43] предельно допустимый уровень звукового давления составляет $L_{max} = 80$ дБ. Работы в условиях воздействия эквивалентного уровня шума выше 85 дБА не допускаются.

7.3.3 Отсутствие или недостаток естественного света.

В данной лаборатории используют искусственное и естественное освещение, поскольку работа в основном зрительная, то естественного освещения недостаточно, особенно в темное время суток.

Правильно спроектированное и выполненное освещение обеспечивает высокий уровень работоспособности, оказывает положительное психологическое действие на человека и способствует повышению производительности труда. При выборе типа светильников следует учитывать светотехнические требования, экономические показатели, условия среды.

В лабораторном помещении в качестве источников искусственного освещения установлены люминесцентные лампы типа ОД. Лампы ОД (открытые двухламповые) предназначены для помещений с хорошим отражением потолка и стен.

По нормам освещения и отраслевым нормам освещения в помещении рекомендуется 300 - 500 лк при общем освещении. Фактическое значение, согласно

данным прибора «Люксметр Ю-116» составляет 450 лк, что соответствует нормативным значениям.

7.3.4 Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека

По действующим правилам устройства электроустановок лабораторные помещения с точными приборами относятся ко 2 категории по степени опасности поражения электрическим током.

Оснащение химической лаборатории электрооборудованием высоко. Обеспечение электробезопасности в лаборатории следуют в соответствии по ГОСТу 12.1.013-98 [46]. Источниками электроопасности могут быть: сушильный шкаф, электрические плитки, печь, реактор для синтеза ВЭОС, насосы, магнитные мешалки, измерительные приборы. Используемое электрооборудование должно отвечать технике безопасности и условиям его эксплуатации. Работу с электрооборудованием и электрическими приборами, находящимися под напряжением, нужно выполнять с применением электрозащитных средств (диэлектрических резиновых перчаток, галош, ковров, изолирующих подставок). При напряжении в 42В и более, электроприборы надежно заземлены и при аварийной ситуации происходит защитное выключение. Все розетки должны быть промаркированы для определения ее напряжения. Строго запрещается работать на неисправных электрических приборах и установках. Руководитель химической лаборатории и сотрудник, отвечающий за технику безопасности, регулярно должны проводить инструктажи, проверять состояние оборудования и приборов, не допускать использование неисправных устройств.

При чрезвычайных происшествиях нужно оказать первую медицинскую помощь, которая состоит из двух этапов это освобождение пострадавшего от действия тока и оказания ему доврачебной медицинской помощи. Нужно избавить, как можно быстрее пострадавшего от действия тока, и сразу же оказать медицинской помощь, так как исход поражения зависит от длительности прохождения тока через человека.

7.4 Экологическая безопасность

Производство продукции основного органического и неорганического синтеза, как составная часть химической промышленности, также является причиной загрязнения окружающей среды. Продукты основного органического и неорганического синтеза наносят окружающей среде существенный ущерб.

В настоящее время, когда вопрос встает проблема рационального использования природных ресурсов, охраны окружающей среды, уделяется большое внимание организации разумного воздействия на природу. Необходимо совершенствовать технологические процессы с целью сохранения окружающей среды от вредных выбросов. Комплексное использование сырья прогрессивно с позиции экологии. Разработаны безотходные технологии, позволяющие вернуть отходы вновь в производство. Несмотря на успехи в области комплексного использования сырья в промышленности имеются значительные неиспользованные возможности.

При выполнении научно-исследовательской работы используются слабоконцентрированные, водные растворы нитратов РЗЭ и водной раствор щелочи, обеспечивающие минимальное воздействие на окружающую среду. В процессе проведения экспериментов вещества проходят механическую и тепловую обработку.

Никаких вредных выбросов в атмосферу, литосферу и гидросферу во время работы не обнаружено.

Производство ВЭОС на основе РЗЭ является полностью безотходным.

7.5 Защита в чрезвычайных ситуациях

Помещение лаборатории находится на цокольном этаже корпуса ИТЦ СФТИ ТГУ. Здание корпуса находится в черте города Томска. Стены здания сложены из керамического кирпича и обладают большой прочностью. Здание устойчиво к воздействию природных опасностей – ураганов, наводнений и способно обеспечить защиту находящихся в нем людей от природных опасностей. Во избежание затопления подвальных помещений талыми водами своевременно производится очистка прилегающей территории от снега. Для оперативной эвакуации сотрудников

и студентов в случае возникновения пожаров, возгорания в здании предусмотрено несколько аварийных выходов.

Каждый работник при обнаружении пожара или признаков горения (задымление, запах гари, повышение температуры и т.д.) обязан:

- убрать из помещения все огне- и взрывоопасные вещества, обесточить электроустановки;
- тушение пожара осуществлять всеми имеющимися в лаборатории противопожарными средствами (кошмой, песком, огнетушителем, водой);
- в соответствии с инструкцией о мерах ПБ запрещается тушить водой горящий бензин, а пенным огнетушителем перекись водорода и электропроводку;
- немедленно отключить питание и принять меры к тушению очага возгорания при помощи углекислотного или порошкового огнетушителя;
- немедленно сообщить об этом по телефону в пожарную охрану (при этом необходимо назвать адрес объекта, место возникновения пожара, а также сообщить свою фамилию);
- принять по возможности меры по эвакуации людей, тушению пожара и сохранности материальных ценностей.

Руководитель лаборатории (другое должностное лицо), прибывший к месту пожара, обязан:

- продублировать сообщение о возникновении пожара в пожарную охрану и поставить в известность вышестоящее руководство;
- в случае угрозы жизни людей немедленно организовать их спасение, используя для этого имеющиеся силы и средства;
- проверить включение в работу автоматических систем противопожарной защиты (оповещение людей о пожаре, пожаротушения, противодымной защиты);
- при необходимости отключить электроэнергию (за исключением систем противопожарной защиты), остановить работу устройств, агрегатов, выполнить другие мероприятия, способствующие предотвращению пожара и задымлению помещений;

- прекратить все работы в здании, кроме работ, связанных с мероприятиями по ликвидации пожара;
- удалить за пределы опасной зоны всех работников;
- организовать встречу подразделений пожарной охраны и оказать помощь в выборе кратчайшего пути для подъезда к очагу пожара.

По прибытию пожарного подразделения руководитель лаборатории (или лицо его, и замещающее) обязан проинформировать руководителя тушения пожара о конструктивных и технологических особенностях объекта, прилегающих строений и сооружений, количестве и пожароопасных свойствах хранимых и применяемых веществ, материалов, изделий и других сведениях, необходимых для успешной ликвидации пожара, а также организовать привлечение сил и средств объекта к осуществлению необходимых мероприятий, связанных с предупреждением развития пожара[8].

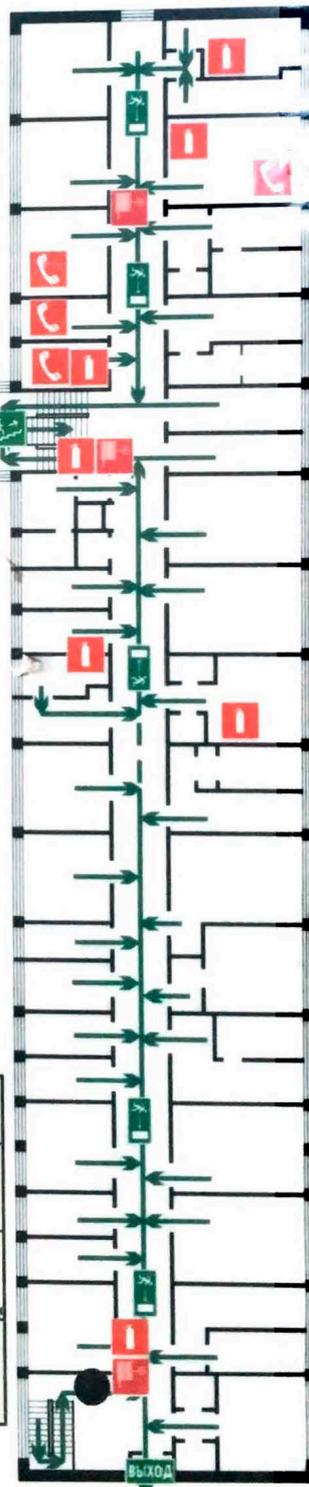
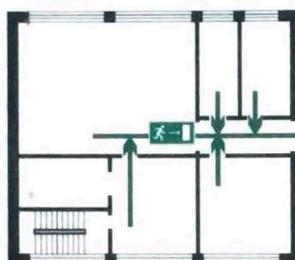
В случае возникновения пожара эвакуация людей проводится согласно плану эвакуации (рис. 9.1).

ПЛАН ЭВАКУАЦИИ ПРИ ПОЖАРЕ И ДРУГИХ ЧС

из помещений учебного корпуса № 11, ул. Ф. Лыткина, 28 - цокольный этаж

Согласовано
Начальник ОД УНД ГУ МЧС
России по Томской области
И. А. Макаркин

Утверждаю
Главный инженер ТГУ
П. В. Колесов



УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- огнетушитель эвакуационный выход
- телефон направление движения
- пожарный кран Вы находитесь здесь
- путь к основному эвакуационному выходу
- путь к запасному эвакуационному выходу

Задействовать систему оповещения о пожаре

Действия при пожаре Сохранять спокойствие!		Действия при аварии Сохранять спокойствие!	
1	Сообщить по телефону: - адрес объекта - место возникновения пожара - свою фамилию 01, сот 010	1	Сообщить по телефону: - адрес объекта - что случилось - имеются ли пострадавшие - свою фамилию
2	Эвакуировать людей - ориентироваться по знакам направления движения - взять с собой пострадавших	2	Локализовать аварию - предотвратить развитие аварии - использовать средства защиты - обозначить место аварии
3	По возможности принять меры по тушению пожара использовать средства противопожарной защиты - при необходимости обесточить помещения	3	Эвакуировать людей - оказать помощь пострадавшим - ориентироваться по знакам взять с собой пострадавших

Иллюстрация по плану ТГУ Т. П. 12.2.140-2009
140 209 и 210 "Охрана Т" с. Томск, ул. Молодеж. 28, тел. 44-09-01

Рисунок 9.1 – План эвакуации при пожаре

Выводы по разделу:

Практическая значимость данного раздела заключается в обеспечении безопасности персонала при выполнении задач, связанных с работой в лаборатории ИТЦ, внедренные меры безопасности соответствуют нормам, принятым законодательством РФ и не мешают технологическому процессу.

Заключение

В рамках данного диссертационного исследования был проведен обзор основных литературных источников по теме. Проведены теоретические и экспериментальные исследования: осуществлен выбор методики получения ВЭОС на основе РЗЭ, как основного продукта для создания катализаторов синтеза глиоксаля; определен фазовый состав, структура и морфология поверхности полученных в результате лабораторных синтезов оксидных порошков методами РФА, СЭМ и ЭДС, исследованы магнитные свойства. Произведен расчет количества реагентов для синтеза ВЭОС на основе РЗЭ в полупромышленных масштабах. Представлен выбор аппаратов для полупромышленного синтеза оксидных порошков.

Произведен технологический и конструктивно-механический расчет оборудования: аппарата с перемешивающим устройством и гладкой рубашкой, предназначенного для синтеза ВЭОС на основе РЗЭ; нутч-фильтра открытого типа, предназначенного для фильтрации и промывки гидроксидов ВЭОС РЗЭ. В результате произведённых расчетов были определены основные геометрические параметры аппаратов, рассчитаны штуцера, фланцевые соединения, опоры, подобран привод для перемешивающего устройства, выбрана мешалка, рассчитана фильтрующая перегородка нутч-фильтра. По результатам механических расчетов, можно сделать заключение, что все подобранные элементы конструкции удовлетворяют условиям прочности и устойчивости, вал перемешивающего устройства так же удовлетворяет условиям жесткости и виброустойчивости. В связи с чем, результаты данной работы могут быть применены для построения полупромышленной установки получения ВЭОС на основе РЗЭ.

Определены потенциальные потребители как результатов исследования, так и готовых продуктов. Проведен анализ конкурентных технических решений (анализ конкурирующих разработок) с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения. Проведена оценка готовности проекта к коммерциализации. Рассчитан бюджет научного исследования. Произведен расчет производственной мощности и эффективного фонда времени оборудования. Рассчитаны затраты на производство оксидных порошков в полупромышленных масштабах. Проведен анализ

безубыточности по планируемому производству. Рассчитаны технико-экономические показатели проектируемого объекта.

Рассмотрены вопросы опасных и вредных воздействий, возникающих при работе с проектируемым оборудованием, предложены способы борьбы с ними. Рассмотрены вопросы экологической безопасности, а также правила при возникновении аварийных и чрезвычайных ситуаций.

СПИСОК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

Амеличкина Ивана

№	Наименование научного труда	Рукописн. или печ.	Издательство, журнал (номер, год)	Номер стр.	Кол-во стр.	Фамилии соавторов
1	Prospects of photocatalysis in diesel fraction purification	печ.	JPCS. 2019. Vol. 1145. P. 1-10.	1 - 9	9	O S Andrienko, N S Kobotaeva, E I Marakina, V I Sachkov, T S Skorokhodova
2	Получение гранулированных композиций из техногенного сырья	печ.	Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов российских вузов: сборник докладов VIII Всероссийской научно-практической конференции, Томск, 16-18 мая 2018 г. — Томск: Изд-во ТПУ, 2018.	52-56	4	И.В. Фролова, Е.А. Фролова
3	Desulfurization of diesel fuels by metal-containing ionic liquids	печ.	Перспективы развития фундаментальных наук: сборник трудов XV Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (Томск, 24–27 апреля 2018 г.): в 7 т. Т. 2: Химия. Томск: Издательский Дом ТГУ, 2018. P.	18-20	2	Andrienko O.S., Kobotaeva N.S.
4	Получение безобжигового гравия на основе золы Северской ТЭЦ и технической серы	печ.	Проблемы геологии и освоения недр: труды XXII Международного симпозиума имени академика М. А. Усова, Томск, 2-7 апреля 2018 г.: в 2 т. — Томск: Изд-во ТПУ, 2018. — Т. 2.	481-482	1	Фролова Е. А.
5	Выделение титана из	печ.	Перспективы развития фундаментальных	234-236	2	Орлов В.В., Медведев Р.О.

	титаномагнетитовой руды		наук: сборник трудов XV Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (Томск, 24–27 апреля 2018 г.): в 7 т. Т. 2: Химия. Томск: Издательский Дом ТГУ, 2018.			
6	Эффективность использования сероцебня на основе золы-уноса в производстве бетона	печ.	Высокие технологии в современной науке и технике (ВТСНТ-2017): сборник научных трудов VI Международной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, г. Томск, 27–29 ноября 2017 г. — Томск: Изд-во ТПУ, 2017.	229-230	1	Анненков, А. И., Доржиева, А. Б., Бедрицкая, У. В.
7	Получение заполнителя для бетонов на основе золы ТЭЦ и технической серы	печ.	Проблемы геологии и освоения недр : труды XX Международного симпозиума имени академика М. А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 120-летию со дня основания Томского политехнического университета, Томск, 4-8 апреля 2016 г. : в 2 т. — Томск : Изд-во ТПУ, 2016. — Т. 2.	599-601	2	Полторанина, А. П., Яковенко, В. А., Фролова И.В.
8	The role of computer technologies in the common cultural competence development of students from non-linguistic universities in the process of foreign language teaching	печ.	Коммуникативные аспекты языка и культуры: сборник материалов XV Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых: в 3 т., Томск, 19-21 Мая 2015. - Томск: ТПУ, 2015	9-12	3	Skirdin K. V.

9	Raditional and innovative approaches to the study of foreign languages	печ.	Коммуникативные аспекты языка и культуры: сборник материалов XIV Международной научно-практической конференции студентов и молодых учёных: в 3 т, Томск, 21-23 Мая 2014. - Томск: ТПУ, 2014 - Т. 1	191-193	3	Skirdin K. V.
10	Инновационные методы переработки твердых бытовых отходов	печ.	Неразрушающий контроль: сборник трудов V Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность". В 2 т, Томск, 26-30 Мая 2014. - Томск: ТПУ, 2014 - Т. 2	222-224	2	Скирдин К.В.

Список используемых источников

1. Ali M.E. et al. Heterogeneous Metal Catalysts for Oxidation Reactions // J. Nanomater. Hindawi, 2014. Vol. 2014. P. 1–23.
2. J.F.Bohmafalk, R.W.McNamee, R.P.Barry, Commercial development of glyoxal // Industrial and Engineering Chemistry, V. 43/4 (apr.1951), pp. 786-94.
3. Vodyankina O. V., Kurina L.N., Izatulina G.A. Surface interaction of ethylene glycol with silver // React. Kinet. Catal. Lett. Kluwer Academic Publishers, 1998. Vol. 64, № 1. P. 103–107.
4. Vodyankina O. V., Kurina L.N., Izatulina G.A. Volume stages in the process of the ethylene glycol catalytic oxidation to glyoxal on silver // React. Kinet. Catal. Lett. Kluwer Academic Publishers, 1998. Vol. 65, № 2. P. 337–342.
5. Л.А.Аркатова, Зауглероживание и регенерация Си- и Ag-катализаторов..., ДИСС....К.Х.Н. //Томск: изд-во ТУСУР, 1999,180 с.
6. Дробот Д.В., Буслаева Т.М. Дробот, Д.В. Редкие и платиновые металлы в XX-XXI вв. [Текст] / Д. В. Дробот, Т. М. Буслаева // Рос.хим.ж.. – 2001. – Т. XLII. – № 2. – С.46 – 55.
7. Пат. 2364638 Российская Федерация, МПК С 01 С 22В 11/00. Способ и устройство для переработки измельченного скрапа отработанных автомобильных катализаторов [Текст] / Шипачев В.А., Горнева Г.А.; заявитель и патентообладатель Учреждение Российской академии н. 2006. № 19. P. 2–7.
8. Пат. 2165203 Российская Федерация, МПК 7 В 01 J 29/40. Катализатор для превращения алифатических углеводородов C2-C12 и/или алифатических кислородосодержащих соединений C1-C12, способ его получения и способ получения высокооктанового бензина или ароматиче [Electronic resource]. URL: <http://www.freepatent.ru/patents/2235590> (accessed: 19.05.2019).
9. Пат. 2362796 Российская Федерация, МПК 7 С10 G 11/05. Способ получения моторных топлив [Текст] / Смирнов В. К., Ирисова К. Н., Барсуков О. В., Кузнецов А.С.; заявитель и патентообладатель ООО “Компания КАТАХИМ”. – № 2008121446/04; заявл. 29.05.2008; опубл.
10. Пат. 2486231 Российская Федерация, МПК С 10 L. Способ повышения антидетонационных величин моторных топлив для карбюраторных и инжекторных двигателей из прямогонного бензина [Текст] / Грачев В.И., Филатов И.Ю.; заявитель и патентообладатель Закрытое акцион.
11. Fujimura, Satoshi Риформинг гептана с CO₂ в присутствии оксида лантана содержащего рутения. CO₂ reforming of heptane using ruthenium – loaded lanthanum oxide catalyst [Текст] / Fujimura Satoshi, Nakagawa Kiyoharu, Ukenada Naoki, Suzuki Toshimitsu // Sekiy [Electronic resource]. URL: <http://lib.knigi-x.ru/23tehnicheskie/732737-1-zhidkofaznoe-gidrirovanie-aromaticeskikh-nitrosoedineniy-kataliticheskikh-sistemah-soderzhaschih-pdpt-okside-redkozemeln.php> (accessed:

19.05.2019).

12. Chen, Min. Свойства поверхности и каталитическая активность катализаторов PdO/TiO₂ и PdO/Al₂O₃ [Текст] / Chen Min, LuoMens-Fei. // IndianI.Chem.A. – 1999. – Т.38, № 7. – С. 646 – 650. – Англ.

13. Dyakonov A.J. et al. Modification of transition metal catalysts with rare-earth elements // Appl. Catal. A Gen. 2000. Vol. 192, № 2. P. 235–246.

14. Vishnyakov A. V. et al. Catalytic activity of rare earth oxides in flameless methane combustion // Kinet. Catal. 2010. Vol. 51, № 2. P. 273–278.

15. Ivanova A.S. Physicochemical and catalytic properties of systems based on CeO₂ // Kinet. Catal. 2009. Vol. 50, № 6. P. 797–815.

16. Ахмеров, О. И. Состав и активность сложных железоксидных катализаторов очистки газов от оксида углерода (II) [Текст] / О. И. Ахмеров // Вестник Казанского технологического университета. – 2010. - № 8. – С. 393-394.

17. Ахмеров, О. И. Закономерности получения железocerийоксидных систем [Текст] / О. И. Ахмеров // Вестник Казанского технологического университета. – 2011. - № 17. – С. 262-264.

18. Fechete, I. Алкилирование толуола метанолом под каталитическим действием цеолита EMT, содержащего редкоземельные элементы. Alkylation toluene-methanol catalyseepar la zeolithe EMT aux terresrares Actes du 3 Colloquefranco-roumain de chimieappliquee (COFrR.

19. Tse P.-K. China's Rare-Earth Industry // U.S. Geol. Surv. Fact Sheet 2011–1042. 2011. P. 15.

20. Пат. 2452558 Российская Федерация, МПК В01D53/94. Безванадиевый катализатор для селективного каталитического восстановления и способ его приготовления [Текст] /Адельманн Катя (DE), Зёгер Никола (DE), МуссманнЛотар (DE); заявитель и патентообладатель УМИКО.

21. Nakatani T., Okamoto H., Ota R. Preparation of CeO₂-ZrO₂ Mixed Oxide Powders by the Coprecipitation Method for the Purification Catalysts of Automotive Emission // J. Sol-Gel Sci. Technol. Kluwer Academic Publishers, 2003. Vol. 26, № 1/3. P. 859–863.

22. Пат. 2026738 Российская Федерация, С1МПК 6 В01J23/10, В01J23/42, В01J37/03. Способ приготовления алюмоплатинового катализатора для обезвреживания выбросных газов от органических веществ, монооксида углерода и оксидов азота [Текст] / Дроздов В. А., Цырульн.

23. Химия и технология редких и рассеянных элементов, ч. II. Под ред. К. А. Большакова. Учеб. пособие для вузов. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: “Высшая школа”, 1976. С. 108.

24. ГОСТ Р 34233.1-2017 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на

прочность. Общие требования. — Изд. офиц. Москва: Стандартинформ, 2008. — 43 с. — Государственные стандарты.

25. Беляев, Василий Михайлович. Конструирование и расчет элементов оборудования отрасли учебное пособие: Ч. 1: Тонкостенные сосуды и аппараты химических производств / В. М. Беляев, В. М. Миронов; Томский политехнический университет (ТПУ), Институт дистанционн.

26. Корнеева Наталья Николаевна, Особенности вибрационного перемешивания многокомпонентных сред // Вестник АГТУ. 2006. №2.

27. ГОСТ 34233.8-2017 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Сосуды и аппараты с рубашками. — Изд. офиц. Москва: Стандартинформ, 2008. — 134 с. — Государственные стандарты.

28. ГОСТ 34233.2-2017 Фланцы сосудов и аппаратов стальные плоские приварные. Конструкция и размеры. — Изд. офиц. Москва: Стандартинформ, 2005. — 49 с. — Государственные стандарты.

29. ГОСТ 34233.4-2017 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет на прочность и герметичность фланцевых соединений. — Изд. офиц. Москва: Стандартинформ, 2008. — 121 с. — Государственные стандарты.

30. Лацинский, А. А.. Основы конструирования и расчета химической аппаратуры: справочник / А. А. Лацинский, А. Р. Толчинский. — Москва; Ленинград: Машгиз, 1963. — 464 с.: ил.. — Библиогр.: с. 465-468.

31. Карпушкин Сергей Викторович, Краснянский Михаил Николаевич, Стрижков Александр Владимирович Расчет механических перемешивающих устройств с применением системы конечно-элементного анализа // Вестник ТГТУ. 2014. №4.

32. Продан, В. Д. Сальниковые уплотнения с мягкой набивкой: учебное пособие / В. Д. Продан, Г. В. Божко. — Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2016. — 124 с. 2016.

33. ГОСТ 34233.3-2007 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Укрепление отверстий в обечайках и днищах при внутреннем и внешнем давлениях. Расчет на прочность обечаек и днищ при внешних статических нагрузках на штуцер. — Изд. офиц. Москва:

34. ПНАЭ Г-7-002-86 Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (Разделы 1-5, Приложения 1-3).

35. В.А. Карелин ИНСТРУКЦИЯ по охране труда для студентов при выполнении работ в химических лабораториях. 2012.

36. Трудовой кодекс Российской Федерации Часть первая Раздел I . Общие положения. 2014.

37. ГОСТ 12.0.003-2015 ССБТ. Опасные и вредные производственные

факторы. Классификация.

38. СанПиН 2.2.4.548-96 “Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений” (утв. постановлением Госкомсанэпиднадзора РФ от 1 октября 1996 г. N 21).

39. ГОСТ 12.1.003-2014 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Шум. Общие требования безопасности.

40. Санитарные правила и нормы СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03. 2003.

41. СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95*.

42. ГОСТ 12.1.038-82 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов (с Изменением N 1).

43. СанПиН 2.2.4.3359-16. Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах.

44. ГОСТ 12.1.005-88 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны (с Изменением N 1).

45. ГН 2.1.5.689-98G предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования - М: Минздрав России, 1998.

46. ГОСТ 12.1.013-98. Электробезопасность.

Приложение А

Раздел 1 Литературный обзор

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4КМ71	Амеличкин Иван Вячеславович		

Консультант кафедры НОЦ Н.М. Кижнера ИШНПТ:

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

Консультант – лингвист отделения иностранных языков ШБИП:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Ажель Юлия Петровна	-		

1 Review of literature

Within this section of the master's thesis, an analysis of the available literature data on the synthesis and reactivity of glyoxal was conducted. A review of the main methods for creating and improving catalysts containing REE oxides was given.

1.1 Glyoxal and its derivatives

Chemically pure glyoxal ($C_2H_2O_2$) exists in trans or cis form. It is a slightly coloured yellowish liquid soluble in water, alcohol, and others. The chemical name for glyoxal is ethandiol. The melting point is 15 °C. Glyoxal is widely used due to the low toxicity. Glyoxal is readily oxidizable substance in the light and air in the absence of antioxidants. Also, glyoxal is stable in bisulfite form. On the world market, a commercial glyoxal is available in the form of purified 40% aqueous solution (TS 2633-003-67017122-2011).

Methods for catalytic oxidation according to [1] are as follows:

- enzymatic oxidation of an organic substrate;
- free-radical auto-oxidation initiated by transition of metal cations;
- oxygen transfer to the organic substrate within the metal-metallic oxide complex;
- oxidative dehydrogenation on the metal surface.

The latter method is the most promising for the production of glyoxal since it is the least dangerous for the environment.

In 1951, the first information about the industrial plant for the synthesis of glyoxal from ethylene glycol was published [2].

In [3, 4], the authors studied the nature of chemical interaction on a metal surface. The features of the process of oxidative dehydrogenation of ethylene glycol to glyoxal were identified.

Dehydration scheme is as follows:

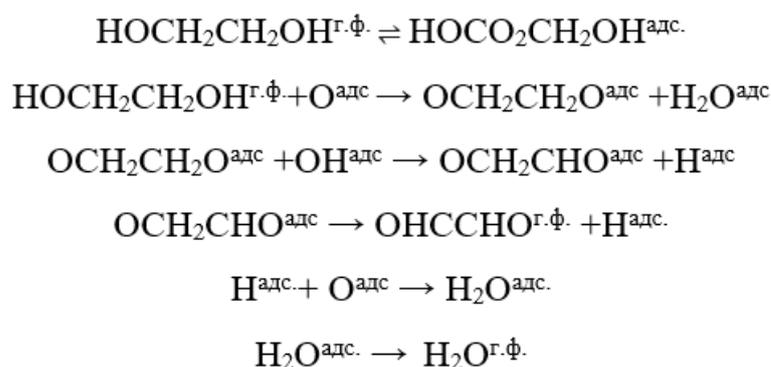


Figure 1.1 – Scheme of the dehydrogenation process of ethylene glycol to glyoxal.

The authors of [5] described the basic principles of ethylene glycol oxidation in the gas phase on various heterogeneous and massive metal catalysts. Table 1.1 presents the patent research in the field of glyoxal synthesis.

Table 1.1 - Patent research in the field of glyoxal synthesis

№	Patent number	Author of discovery	Description
1	GB 140.478	Edward Charles, Robert Marks (GB)	Glyoxal is produced by the oxidation of acetylene with air in the presence of diluents (air, H ₂ , CO ₂) and water vapor.
2	GB 516.740	William W Groves (GB)	Glyoxal is prepared by glyoxal tetraacetate. The glyoxal tetraacetate is converted into the tetracetal which is saponified, the acetic acid formed being esterified with the alcohol; the ester and excess alcohol (if any) are then removed by distillation (the product yield was 96% of theoretical).
3	GB 836.828	Farbwerke Hoechst AG	Irrigation of oxide with circulating water in two absorption chambers on Raschig rings.
4	GB 1.041.376	Rolf P., Werner F.	Glyoxal is obtained by oxidizing ethylene nitric acid (2-20% of the reaction mass). An aqueous solution of glyoxal containing intermediates, purified on ion exchange resins.
5	US 3.948.997	Brian K., Francis R.	In the vapor phase e.g. reacts with glyoxal in equimolar amounts. The result is 2,3-hydroxydioxane. The fraction containing nitrogen is mixed with pure e.g. at 300 °C. Spraying through the nozzles 2,3-hydroxydioxane dissociates into a gas. and glyoxal. Formaldehyde is being stripped by abgas at 100 °C.

1.2 The use of the catalysts based on REE

REE oxide catalysts are increasingly used as the carriers in organic and inorganic synthesis processes.

The work of Drobot D.V. [11] describes the possibility of using rare metals in the creation of automotive catalysts containing platinumids and REE oxides, mainly CeO_2 [12].

In [13–15], the use of catalysts based on REE in the process of oil refining is described. In the patent [13], a method for converting aliphatic hydrocarbons into a high-octane gasoline component in the presence of a catalyst containing REE oxides was proposed. The authors of the patent [14] described a method for producing motor fuels by cracking petroleum fractions in the presence of a pellet aluminosilicate platinum zeolite-containing catalyst that was activated using REE nitrates.

There is an application of $\text{Ru/La}_2\text{O}_3$ as a catalyst for the reforming process of heptane using carbon dioxide. This catalyst quickly becomes unsuitable for work [16]. In [17], it was proposed to use CeO_2 as a carrier for a palladium catalyst in the oxidation of carbon dioxide and methane. In addition to previous studies, it was found that the presence of catalysts based on iron and cobalt supported on alumina with REE additives in the same reaction reduces the value of the pre-exponential factor in the basic equation of Arrhenius's concept of activation energy due to a decrease in the reaction energy barrier. This factor should allow reducing the temperature of the process, according to the authors of [18].

In [19], the activity of the catalysts based on REE oxides obtained by precipitation of hydroxides from the solution of nitrates was investigated in the reactions of methane complete oxidation. The high activity of catalysts contributes to the reaction behavior by the mechanism of methane oxidative condensation with rapid oxidation of the resulting intermediate products.

The effects of various synthesis conditions and component ratios on the structure, composition, and catalytic properties of oxide systems based on REE are described in [20]. The presence of REE in the system at a certain concentration contributes to the expansion of the spectrum of compositions, in which the fluorite structure is preserved. With increasing the temperature synthesis of catalysts, the specific surface of the samples decreases. The

presence of REE either increases the specific surface of the system, or makes it more resistant to heat treatment.

In [21, 22], the influence of the composition of iron oxide systems containing REE on the catalytic activity in the oxidation of carbon dioxide was studied. The production patterns, the composition of iron-cerium oxide systems and catalytic activity in the reaction of styrene synthesis were studied.

In [23], the authors proposed a method for producing catalysts by depositing REE ions on the aluminosilicate zeolite samples. The resulting catalysts showed high catalytic activity in the alkylation of toluene with methanol. The increased selectivity in alkylation reactions is explained by the presence of REE ions, which form new acid sites. The use of catalysts based on rare earth elements contribute to solving environmental problems connected with oxidation of automobile exhaust gases. The influence of the presence of cerium dioxide, on the temperature setting of the carbon dioxide (CO₂) oxidation reaction to carbon monoxide (CO) was investigated.

The possibility of developing the production of catalysts for exhaust gas purification in China was investigated in [24]. A detailed description of the REE-based catalysts preparation, which meets the modern requirements for explosion engine, was given.

In [25], it was proposed to use gadolinium oxide to obtain a catalyst for the selective catalytic reduction of nitrogen oxides, as an alternative to vanadium. The catalytically active coating consists in whole or in part of the mixed cerium oxide and zirconium oxide. The mixture of cerium and zirconium oxide is “doped” with a rare earth oxide selected from the group including scandium, yttrium, lanthanum, praseodymium, neodymium, samarium, europium and gadolinium or mixtures of their oxides.

The system of mixed oxide powders CeO₂-ZrO₂-MeO_x (Me — rare-earth metals) was obtained in the work [26] using the co-deposition method. The dependence of the introduction of REE oxides on the value of the specific surface was studied. It was found that at 1000 °C REE oxides practically do not reduce the specific surface of the catalysts.

The research in this area is not limited to the creation of new catalysts. For example, the authors of the patent [27] propose a new approach for the preparation of catalysts based on the REE oxides as carriers using water in subcritical and supercritical states.

1.3 Conclusion on the literature review

Thus, as a result of reviewing the available data in the literature, the main methods for the production of glyoxal and its derivatives were shown, the high catalytic activity of rare earth oxides which contributes to the creation of new catalytic systems with their participation for the glyoxal synthesis process was demonstrated.

According to our opinion a process for preparing catalysts based on rare earth hydroxide by precipitation from the solution of nitrates is optimal. Rationale for choosing this method is set out in the following subsection.

1.4 Theoretical and experimental studies

In the research part of the master's thesis, the methodology for obtaining high-entropy oxide systems based on REE in laboratory conditions is presented. The properties of the obtained powders are studied. The data on the calculation of the main products for the synthesis of HEOS based on REE on a semi-industrial scale have been systematized. The selection of the equipment is presented.

1.4.1 Theoretical aspects and the choice of methods for obtaining HEOS based on REE

High entropy oxide systems (HEOS) are the systems that contain more than three components with a uniform distribution of ions in a crystal lattice. Such systems are characterized by increased entropy of mixing. The main idea of obtaining HEOS comes from the field of high-entropy alloys (HEA). HEAs have a number of important mechanical (strength, hardness, plasticity, wear resistance), physical (magnetic, conductivity) and chemical (corrosion resistance) properties compared to conventional alloys with one or two basic elements. In such metal systems, high mixing entropy thermodynamically stabilizes a single-phase solid solution by reducing the Gibbs free energy. The kinetics of phase transformations in HEAs is slower than that in the ordinary steels. This behavior is due to slow diffusion. The process of diffusion in HEAs proceeds slowly due to the complex interactions between the alloying elements and the high activation energy. The

interconnection between configurational entropy and mixing enthalpy is a key factor for determining phase transformations. By analogy with HEAs, it can be expected a similar entropy mixing effect in the oxide systems. One of the important areas of modern research in the field of HEOS synthesis and materials based on them is the development and improvement of specific methods for their preparation. The choice of methods for the synthesis of such materials influences the composition, structure, particle size and determines the technological effectiveness of the process for their preparation. The methods of ‘soft chemistry’ or solution methods, for example, the sol-gel method, are prospective compared with high-temperature methods of solid-phase synthesis. In the latter case it is possible to obtain the various forms of simple and complex composition based on the rare earth oxides, including oxides in the form of nanosized powders. Also, this method is able to simulate the properties of HEOS by changing the number of REEs included in the system and their concentrations. Together, all these features have become fundamental for the choice of methods for obtaining oxide powders in the production of catalysts for the process of glyoxal synthesis.

It is worth noting that cerium oxide (CeO_2) is one of the most often used rare-earth oxides due to its wide bandgap and non-stoichiometry.

It should be noted that among many of the rare earth oxides, cerium oxide (CeO_2) is most often used because of its wide bandgap and non-stoichiometry. The observed non-stoichiometry arises from the presence of oxygen vacancies making ceria an excellent material for UV light blockers, gas sensors, oxygen storage capacitors and catalysts.

The selection of REEs in the system of high-entropic oxides was carried out empirically. Pr and Ce were chosen as the main elements in the system. The rationale and methodology for selecting the remaining elements, as well as the rest of REE will not be described in this dissertation research due to the uniqueness of the development.

1.4.2 Synthesis of HEOS in laboratory setting

Synthesis of HEOS based on REE can be divided into five stages (figure 1.2). As starting materials: $\text{Sc}(\text{NO}_3)_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, $\text{Pr}(\text{NO}_3)_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, $\text{Gd}(\text{NO}_3)_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, $\text{Ho}(\text{NO}_3)_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, NaOH were used.

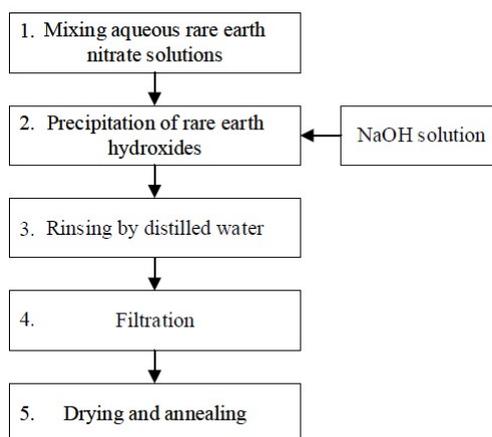


Figure 1.2 - General flowchart of synthesis steps

HEOS synthesis ($\text{Sc}_{0.2}\text{Ce}_{0.2}\text{Pr}_{0.2}\text{Gd}_{0.2}\text{Ho}_{0.2}$) $_2\text{O}_{3\pm\delta}$ with a theoretical yield of the product in an amount of 1.6 g

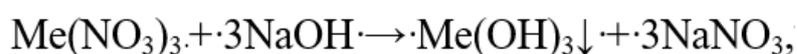
The first stage is the mixing of aqueous solutions of REE nitrates. One of the conditions for obtaining HEOS is equal to mole ratio of each component in the system. The aliquot volume (V_a) was calculated based on the concentrations of REE nitrates and the number of moles (0.002). The concentrations of initial solutions and the volumes of aliquot (V_a) are listed in Table 1.2.

Table 1.2 - The concentrations of the initial solutions and the volumes of the aliquot (V_a)

REE nitrates	Concentration (mmol/ml)	V_a (ml)
$\text{Sc}(\text{NO}_3)_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	0.330	6.060
$\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.229	8.700
$\text{Pr}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.230	8.680
$\text{Gd}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0.230	8.660
$\text{Ho}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0.226	8.820

The solutions were mixed in a 250 ml beaker on a magnetic stirrer for one hour at the room temperature.

The second stage is the precipitation of hydroxides from a mixture of nitric acid solutions of REE. The precipitation process may be described by the following chemical reaction:



where Me = Sc, Ce, Pr, Gd, Ho.

The precipitation was carried out with a solution of NaOH, which was intensively mixed with a magnetic stirrer. The volume of NaOH solution taken with 10% excess for the complete precipitation of REE hydroxides mixture of this system was calculated based on maximum pH of precipitation of hydroxides from the REE nitrates solution in the system [1].

Table 1.3 - Conditions of precipitation of hydroxides from nitrate solutions

Element	pH of hydroxide precipitation from nitrate solution	IP Ln(OH) ₃ (25 °C)	Solubility, mol/L
La	7,82	$1,0 \cdot 10^{-19}$	$8,8 \cdot 10^{-6}$
Ce	7,60	$1,5 \cdot 10^{-20}$	
Pr	7,35	$2,7 \cdot 10^{-20}$	
Nd	7,31	$1,9 \cdot 10^{-21}$	
Sm	6,92	$6,8 \cdot 10^{-22}$	
Eu	6,82	$3,4 \cdot 10^{-22}$	
Gd	6,83	$2,1 \cdot 10^{-22}$	
Er	6,75	$1,3 \cdot 10^{-23}$	
Tu	6,40	$3,3 \cdot 10^{-24}$	
Yb	6,30	$2,5 \cdot 10^{-24}$	
Lu	6,30	$1,0 \cdot 10^{-25}$	$0,5 \cdot 10^{-6}$

The excess solution of NaOH was calculated by multiplying the stoichiometric weight amount by the accepted amount of its excess. To reduce the reaction time, it is necessary to pour a mixture of nitric acid solutions of REE into the NaOH solution with vigorous stirring. This method is conventionally called the "reverse" method of synthesis. The solution resulting from mixing with the precipitate of REE hydroxides was incubate for two hours at room temperature.

The third stage is rinsing the solution with distilled water to pH = 8. The pH measurement was performed with the help of a potentiometric method using a pH-150MI device. The solution became turbid with stirring. The resulting suspension was left to settle for precipitation to the bottom. After settling, the upper transparent layer was decanted, distilled water was added and stirred. After the precipitation, the upper layer was decanted again and rinsed. The necessity of such rinses due to the presence of nitrate ions in the precipitate. The volume of distilled rinsing water was more than 500 ml. The presence of nitrate ions was determined by qualitative reaction with diphenylamine (Figure 1.3).

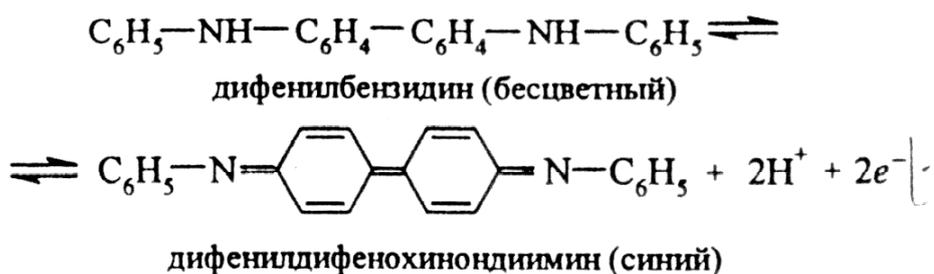


Figure 1.3 - Qualitative reaction with diphenylamine

This reaction is based on the oxidation of diphenylamine. In this case, initially, colorless diphenylbenzidine is formed, which upon further oxidation turns into a quinone derivative of diphenylbenzidine having a blue color.

The fourth stage - filtering solution. The filtration process was performed using a Buchner funnel and a Bunsen flask on a blue-ribbon filter. The total rinsing and filtration time was 8 hours.

The fifth stage is drying and annealing a gel-like mixture of REE oxides. Drying was carried out in drying cupboards at the temperature of 70 °C for 12 hours. Annealing was carried out in muffle furnaces at a temperature of 800 °C for one hour. The practical yield of oxides was 97–99% of the theoretical one. The method for "direct" synthesis included similar stages as the method of "reverse" synthesis, but in the second stage, on the contrary, the NaOH solution was poured into a mixture of nitric acid REE solution. The latter method was the least effective in terms of the final product purity

To study the phase composition, the X-ray diffraction analysis (XRD) 'DRON-3M diffractometer' and scanning electron microscopy (SEM) 'QUANTA 200 3D FEI' with X-ray energy dispersive microanalysis system were used.

Results. An important requirement for powders is their single phase. The structural properties of $(\text{Sc}_{0.2}\text{Ce}_{0.2}\text{Pr}_{0.2}\text{Gd}_{0.2}\text{Ho}_{0.2})_2\text{O}_{3+\delta}$ were investigated using XRD over 2θ range from 15° to 95° using a small step size (0.2°) and Cu-K α radiation with a wavelength of 0.154 nm (Figure 1.4).

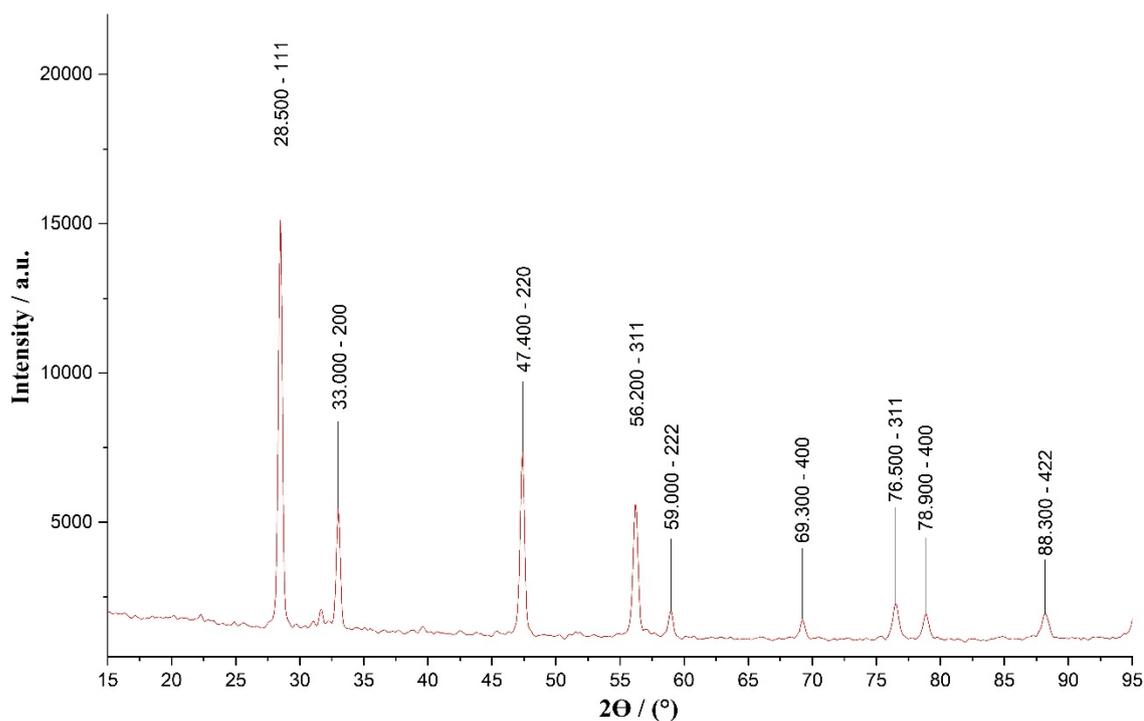


Figure 1.4 - XRD pattern of HEOS $(\text{Sc}_{0.2}\text{Ce}_{0.2}\text{Pr}_{0.2}\text{Gd}_{0.2}\text{Ho}_{0.2})_2\text{O}_{3\pm\delta}$

The XRD graph showed strong peaks at 28.5, 33.0, 47.4, 56.2, 59.0, 69.3, 76.5, 78.9, 88.3 degrees of 2θ . All the synthesized oxide nanoparticles diffraction peaks corresponded to (111), (200), (220), (311), (222), (400), (311), (400) and (422) crystal planes (table 1.4). The average crystallite sizes of $(\text{Sc}_{0.2}\text{Ce}_{0.2}\text{Pr}_{0.2}\text{Gd}_{0.2}\text{Ho}_{0.2})_2\text{O}_{3\pm\delta}$ were determined based on the width of dominant peaks using the Scherrer equation, and they were in the range of 13.4 – 15.7 nm. The obtained XRD patterns of the $(\text{Sc}_{0.2}\text{Ce}_{0.2}\text{Pr}_{0.2}\text{Gd}_{0.2}\text{Ho}_{0.2})_2\text{O}_{3\pm\delta}$ were compared with the standard data for CeO_2 (JCPDS file No. 34-0394). The characteristic peaks were very close to the face-centred cubic lattice of CeO_2 indicating that all the samples can be identified to ceria with the cubic fluorite structure. The lattice parameters of the prepared $(\text{Sc}_{0.2}\text{Ce}_{0.2}\text{Pr}_{0.2}\text{Gd}_{0.2}\text{Ho}_{0.2})_2\text{O}_{3\pm\delta}$ sample were determined to be 0.54181 nm. This lattice parameters are almost the same with the standard of CeO_2 (0.54111 nm) (figure 1.5).

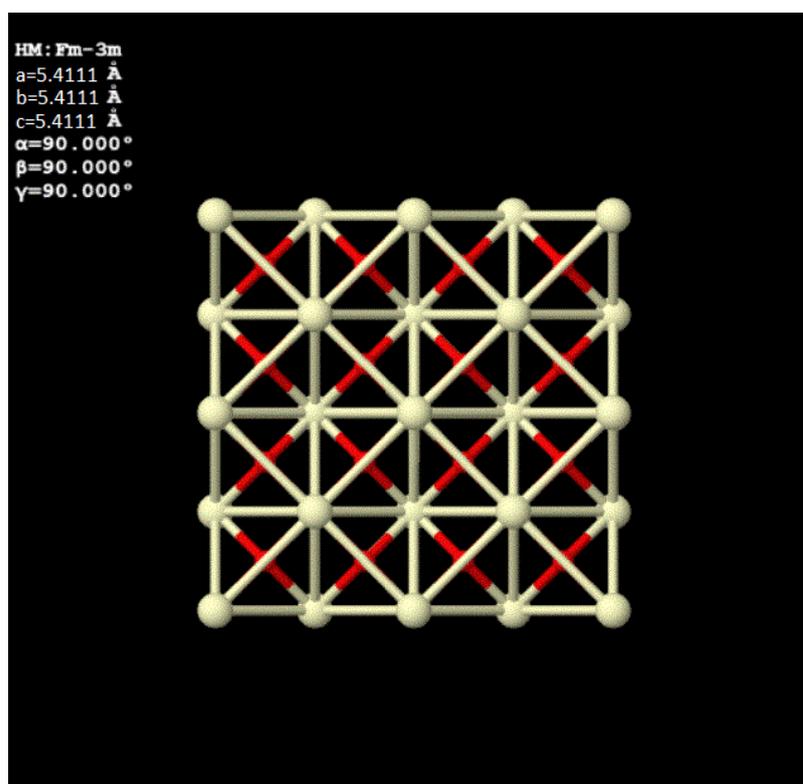


Figure 1.5 - CeO₂ crystal lattice

Table 1.4 - The results of X-ray diffraction

2θ	d, Å	FWHM, °	Area ^A	Area ^R	CeO ₂ Кубическая a=5.41 Å;
28.500	3,1291	0.2150	2988.83	1.000	111
33.000	2,7120	0.2150	976.65	0.327	200
47.400	1,9163	0.2150	1446.39	0.484	220
56.200	1,6353	0.2150	1108.70	0.371	311
59.000	1,5642	0.2150	247.03	0.083	222
69.300	1,3547	0.2150	171.72	0.057	400
76.500	1,2442	0.2150	353.02	0.118	311
78.900	1,2122	0.2150	228.51	0.076	400
88.300	1,1058	0.2150	211.06	0.071	422

The chemical composition of the prepared oxide powders (Sc_{0.2}Ce_{0.2}Pr_{0.2}Gd_{0.2}Ho_{0.2})₂O_{3±δ} was determined using energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS); the results are shown in Figure 1.6. The EDS spectra clearly indicate that all of the rare earth ions are present in the sample in the 3⁺ oxidation state, except for Ce and Pr, which are present in (4⁺) and in the mixed (3⁺/4⁺) oxidation state, respectively. The presence of Ce⁴⁺ contributes substantially to the observed stability of the single-phase

structure. These new oxide systems have narrow direct band gaps and indirect band gaps enabling light absorption over the entire visible spectral range. Furthermore, the oxygen vacancies concentration rapidly increases and, then saturates with the number of rare earth elements incorporated in HEOS - REE. The lowering of the band gap is found to be closely related to the presence of multivalent Pr. Considering the high level of oxygen vacancies presence and the observed low band gap values, these new material systems can be of great importance in cases, when the presence of oxygen vacancies is essential or in the applications with desirable narrow band gap.

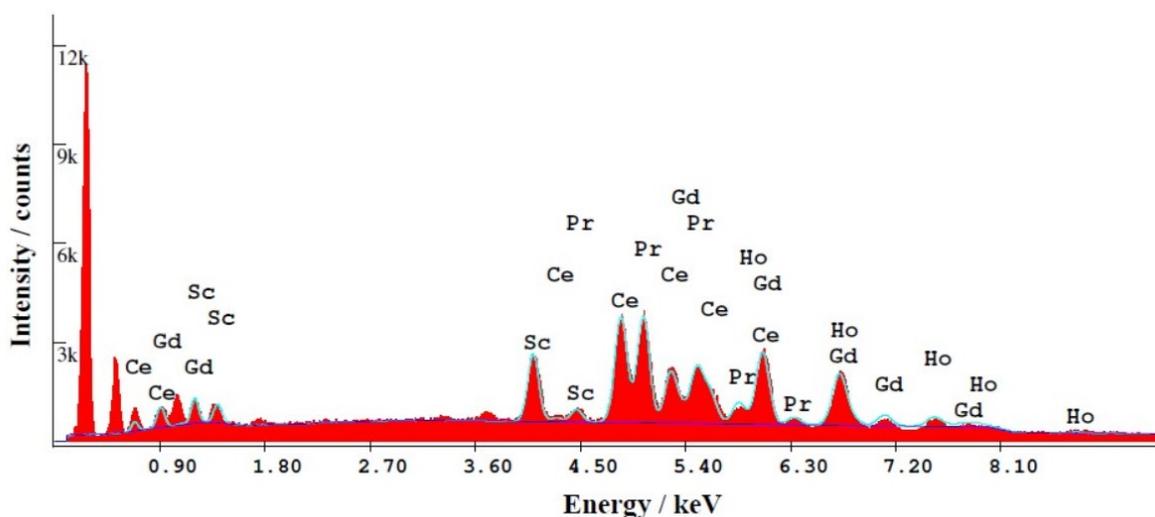


Figure 1.6 - EDS spectra of HEOS $(\text{Sc}_{0.2}\text{Ce}_{0.2}\text{Pr}_{0.2}\text{Gd}_{0.2}\text{Ho}_{0.2})_2\text{O}_{3\pm\delta}$

According to the data of SEM, the sample under the study is a loose powder with a developed surface morphology, which is represented by structural units in the form of spherical and oval particles, irregular polyhedrons and scales. Their average diameter is 13-25 nm, 21-38 nm. All REE elements in the system are equally distributed over the sample surface (Figure 1.7). Larger nanoparticles sizes, observed by the SEM in the samples, were due to the agglomeration of smaller nanoparticles.

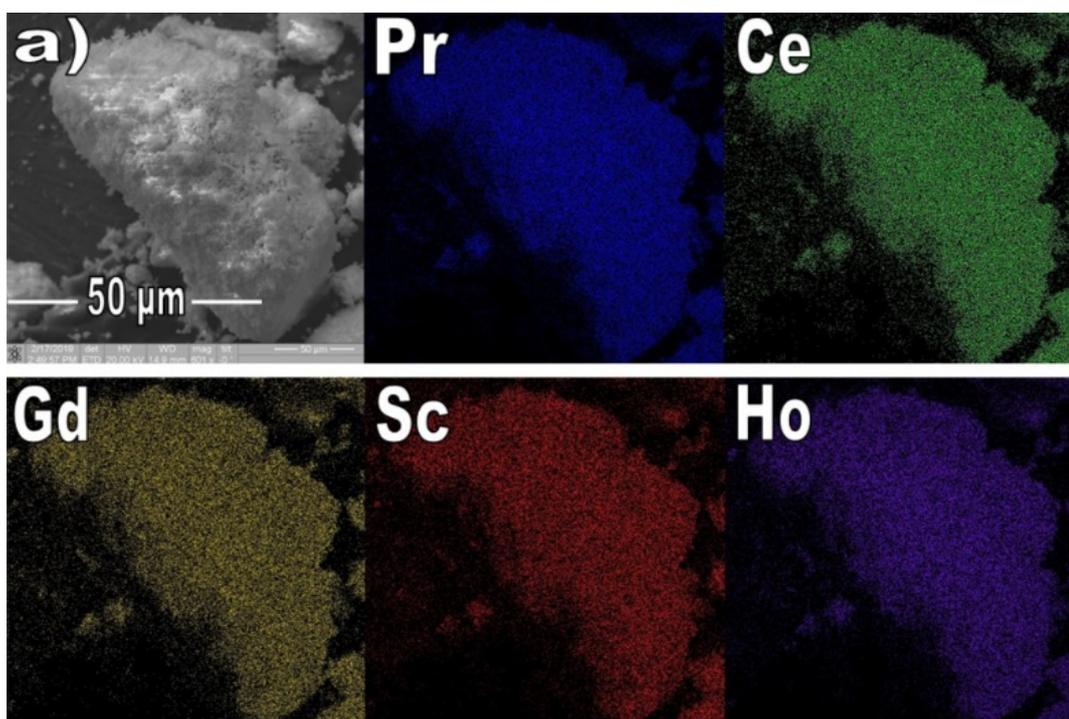


Figure 1.7 - SEM image of morphology (a) and the distribution of elements on the sample surface

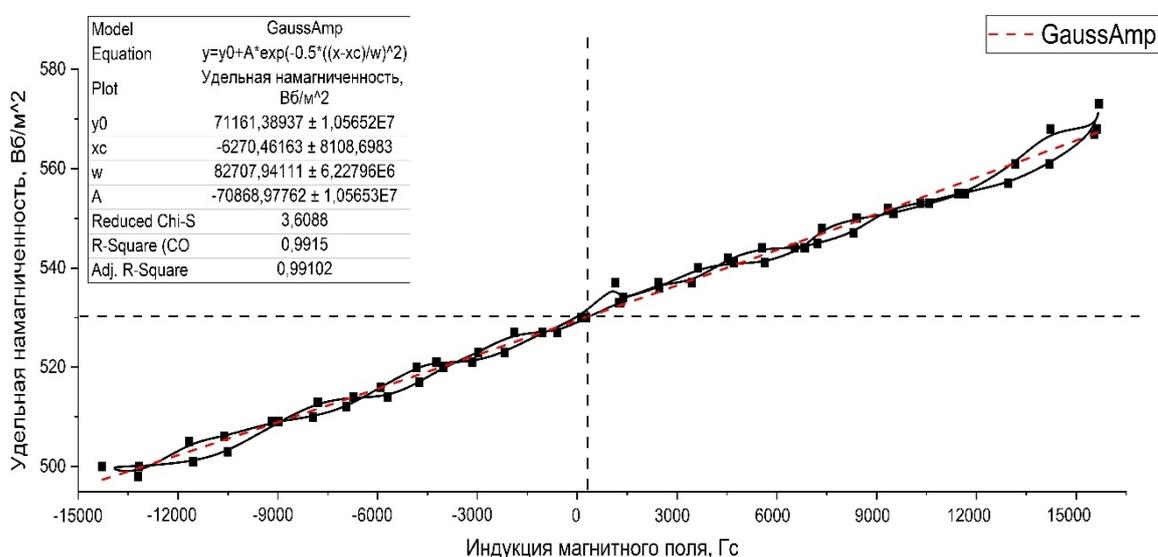


Figure 1.8 - Magnetization curve of HEOS ($Sc_{0.2}Ce_{0.2}Pr_{0.2}Gd_{0.2}Ho_{0.2}$) $2O_{3\pm\delta}$

Figure 1.8 shows that the obtained sample of HEOS ($Sc_{0.2}Ce_{0.2}Pr_{0.2}Gd_{0.2}Ho_{0.2}$) $2O_{3\pm\delta}$ has paramagnetic properties.

The calculated data of the main parameters required for the preparation of the REE nitrate solutions and theoretical mass of oxide powders obtained after annealing in laboratory and semi-industrial conditions are given in the Table 1.5.

Table 1.5 - Calculated data for laboratory and semi-industrial conditions

Laboratory conditions			
REE nitrates	m, g	V, ml	V _a , ml
Sc(NO ₃) ₃ *4H ₂ O	1,00	10,00	6,06
Ce(NO ₃) ₃ *6H ₂ O	1,00	10,00	8,70
Pr(NO ₃) ₃ *6H ₂ O	1,00	10,00	8,68
Gd(NO ₃) ₃ *5H ₂ O	1,00	10,00	8,66
Ho(NO ₃) ₃ *5H ₂ O	1,00	10,00	8,82
Total amount:	5,00	50,00	41,00
Semi-industrial conditions			
Sc(NO ₃) ₃ *4H ₂ O	2 500,00	25 000,00	15 150,00
Ce(NO ₃) ₃ *6H ₂ O	2 500,00	25 000,00	21 750,00
Pr(NO ₃) ₃ *6H ₂ O	2 500,00	25 000,00	21 700,00
Gd(NO ₃) ₃ *5H ₂ O	2 500,00	25 000,00	21 650,00
Ho(NO ₃) ₃ *5H ₂ O	2 500,00	25 000,00	22 050,00
Total amount:	12 500	125 000,00	102 300,00
Mass of oxide powders of (Sc _{0.2} Ce _{0.2} Pr _{0.2} Gd _{0.2} Ho _{0.2}) ₂ O _{3±δ} after annealing			
Laboratory conditions		Semi-industrial conditions	
1,56		3907,08	

1.5 Selection of the apparatus for semi-industrial synthesis of HEOS based on REE

The method for hydroxides precipitation from a solution of REE nitrates (according to the section 1.2) is the most effective for implementation and the simplest for calculation. To implement this method on a semi-industrial scale, the following equipment was selected:

- For mixing aqueous nitrate solutions of the REE, a container equipped with a stirrer is needed. The most ergonomic tank is vertical.
- To precipitate the rare earth nitrate solution the jacketed reactor with stirrer is required. The suitability of the jacket is determined by the ability to influence the process of obtaining rare earth metal hydroxides by changing the temperature.
- It is necessary to thoroughly rinse and filter the obtained REE hydroxides after precipitation of the nitrate solutions. A suitable equipment for rinsing and filtering hydroxides is an open type nutsche-filter.
- The drying process is carried out in drying cupboards at the temperature of 70 °C for 12 hours.

- Annealing is carried out in muffle furnaces at a temperature of 800 °C for one hour.

Conclusions of the section 1

High-entropy oxide system based on the rare-earth elements was successfully synthesized by precipitating aqueous nitrate solutions of REE. It was found that the combination of Ce and Pr in the system provides greater flexibility in modeling the number of defects (oxygen vacancies) and allows predicting the properties of the system (by adding the necessary REE cations) without compromising for the phase purity. The phase composition, structure, and surface morphology of the obtained powders were established by XDA, SEM and EDS methods. The magnetic properties of the system were studied. The main parameters for the preparation of a mixture of REE nitrate solutions in laboratory and semi-industrial conditions were calculated.

The main apparatuses for the semi-industrial synthesis of HEOS were selected. For designing and calculating the main apparatuses chemical batch reactor with stirrer and nutsche-filter were chosen. In the next section of this master's thesis, the technological scheme of the HEOS synthesis process based on REE will be considered.