

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
<b>Разработка печи сублимации технологии фтор-аммонийной переработки титаномагнетитового концентрата</b>

УДК 669.187.5:66.049.6.001.63

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
<b>4КМ71</b>	<b>Балло Евгения Александровна</b>		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Тихонов В. М.	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.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший 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		

## 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»
P8	Проводить все стадии проектирования	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ, <i>CDIO Syllabus</i> . Критерии АИОР, согласованные с требованиями

Код	Результат обучения	Требования ФГОС ВО, СУОС, критериев АИОР, и/или заинтересованных сторон
	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	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»

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
4KM71	Балло Евгении Александровне

Тема работы:

<b>Разработка печи сублимации технологии фтор-аммонийной переработки титаномагнетитового концентрата</b>	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<p><b>Исходные данные к работе</b>  <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>Установка сублимации гексафторсиликата аммония на ГК «Росатом» г. Северск.          Проектная мощность 100 000 т/год.          Режим работы – непрерывный.          Вид сырья – титаномагнетитовый концентрат.          Технологические параметры:          – температура рабочей среды 320°C.</p>
---	---

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b> <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<p>Реферат Введение 1. Литературный обзор 2. Описание технологической схемы 3. Конструкция установки 4. Технологический расчет 5. Выбор конструкционных материалов 6. Механический расчет оборудования 7. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение 8. Социальная ответственность Заключение Список использованных источников</p>
<p><b>Перечень графического материала</b> <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>Лист 1. Технологическая схема. (А1) Лист 2. Барабанная печь. Чертеж общего вида. (А1) Лист 3. Барабанная печь. Выносные элементы (А1) Лист 4. Шнековый питатель. Чертеж общего вида (А1) Лист 5. Экономические показатели (А1)</p>

**Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы**  
*(с указанием разделов)*

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	к.т.н., доцент Криницына З. В.
Социальная ответственность	Старший преподаватель Романова С. В.
Иностранный язык	Старший преподаватель Ажель Ю. П.

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

Литературный обзор
Описание технологической схемы
Конструкция установки
Выбор конструкционных материалов

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 Виктор Владимирович	К. Т. Н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4КМ71	Балло Евгения Александровна		

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

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
4KM71	Балло Евгении Александровне

Тема ВКР:

**«Разработка печи сублимации технологии фтор-аммонийной переработки титаномагнетитового концентрата»**

<b>Институт</b>	<i>ИШНПТ</i>	<b>Кафедра</b>	<i>ОХХТ</i>
<b>Уровень образования</b>	<i>Магистр</i>	<b>Направление/специальность</b>	<i>Машины и аппараты химических производств</i>

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

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

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

<i>1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала проекта</i>	<i>Проведение предпроектного анализа. Определение целевого рынка и проведение его сегментирования. Выполнение SWOT-анализа проекта</i>
<i>2. Разработка устава научно-технического проекта</i>	<i>Определение целей и ожиданий, требований проекта. Определение потенциальных покупателей и клиентов.</i>
<i>3. Планирование процесса управления проектом: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	<i>Определение производственной мощности. Расчет сырья, материалов, оборудования, фонда оплаты труда. Расчет себестоимости готового продукта. Расчет точки безубыточности.</i>

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

- 1. Расчет точки безубыточности графическим и математическим методами.*
- 2. Расчет технико-экономических показателей*

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

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент ОСГН ШБИП	Креницына Зоя Васильевна	к. т. н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
4KM71	Балло Евгения Александровна		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
4КМ71	Балло Евгении Александровне

<b>Школа</b>	<i>ИШНПТ</i>	<b>Отделение (НОЦ)</b>	<i>НОЦ Н. М. Кижнера</i>
<b>Уровень образования</b>	<i>Магистр</i>	<b>Направление/специальность</b>	<i>Машины и аппараты химических производств</i>

Тема ВКР:

**«Разработка печи сублимации технологии фтор-аммонийной переработки титаномагнетитового концентрата»**

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

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области применения	<p>Объект исследования: барабанная печь и ее составляющие для сублимации фтор-аммонийной руды; расположение на открытом пространстве и в цеху.</p> <p>Область применения: различные виды производства, где сублимация полупродукта технологии может быть нужна.</p>
--	---

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

<p><b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>- организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul>	<p>Федеральный закон № 426-ФЗ от 28 декабря 2013 года «О специальной оценке условий труда» Федеральный закон №184-ФЗ «О техническом регулировании от 27 декабря 2002 года. Федеральный закон № 123-ФЗ от 22.07.2008 г (ред. от 10.07 2012г) «Технический регламент о требованиях к пожарной безопасности»</p>
<p><b>2. Производственная безопасность:</b></p> <p>2.1 Анализ выявленных вредных и опасных факторов</p> <p>2.2 Обоснование мероприятий по снижению воздействия</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Опасность высоких температур</li> <li>2. Опасность взрыва и пожара</li> <li>3. Опасность химических раздражений и ожогов</li> <li>4. Наличие шума в рабочих помещениях</li> </ol>
<p><b>3. Экологическая безопасность:</b></p>	<p>Область воздействия – выбросы в атмосферу аммиака.</p>
<p><b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b></p>	<p>Типичная ЧС - возможность накопления в них взрывоопасных примесей, содержащихся в перерабатываемом воздухе, пожар.</p>

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

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Романова Светлана Владимировна			

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4КМ71	Балло Евгения Александровна		

## РЕФЕРАТ

*Отчет 143 с., 25 рис. (20 граф., 5 черт.), 23 табл., 85 источников, 2 прил.*

### ***БАРАБАННАЯ ПЕЧЬ, ИНДУКЦИОННЫЙ НАГРЕВ, СУБЛИМАЦИЯ, ГЕКСАФТОРОСИЛИКАТ АММОНИЯ, ФТОРИДНАЯ ОБРАБОТКА, ТИТАНОМАГНЕТИТОВЫЙ КОНЦЕНТРАТ, ГРАНУЛЯЦИЯ.***

Объектом исследования является барабанная вращающаяся печь для сублимации гексафторосиликата аммония, одна из стадий фторидной обработки титаномагнетитового концентрата.

Целью работы является разработка конструкции печного оборудования: барабана, индукционного нагрева корпуса и шнекового узла с гранулированием.

В процессе работы были составлены материальный и тепловой балансы, произведен полный механический расчет шнекового питателя с гранулированием и барабанной печи, изучена ресурсоэффективность работы и социальная безопасность.

В результате был разработан косвенный нагрев корпуса печи, что является новшеством для использования в таком типе крупнотоннажного производства. Также придуман шнековый узел для подачи материала в виде гранул.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: производительность печи = 11,5т/ч, диаметр барабана = 3м, длина барабана = 45м.

Данная разработка может быть введена в эксплуатацию и использоваться не только во фторидной обработке руды, но и в любом крупнотоннажном производстве с температурой процесса до 350°C.



## Определения

Сублимация – переход вещества из твердого состояния в газообразное, не касаясь жидкой фазы.

Рабочая среда – это вещество или смесь веществ. На основе параметров рабочей среды осуществляется подбор оборудования с учетом специфики продукта и технологических процессов.

Рабочее давление – под рабочим давлением для сосуда и аппарата следует понимать максимальное внутреннее избыточное или наружное давление, возникающее при нормальном протекании рабочего процесса, без учета гидростатического давления среды и допустимого кратковременного повышения давления во время действия предохранительного клапана или других предохранительных устройств.

Теплопроводность – способность материальных тел проводить энергию (теплоту) от более нагретых частей тела к менее нагретым частям тела, осуществляемому хаотически движущимися частицами тела.

Теплопередача – физический процесс передачи тепловой энергии от более горячего тела к менее горячему, либо непосредственно (при контакте), или через разделяющую перегородку из какого-либо материала.

Температуростойкость – способность материала сохранять механические свойства при повышении или понижении температуры.

## **Обозначения и сокращения**

ИН – Индукционный нагрев

ГФСА – Гексафторосиликат аммония

ГФТА – Гексафторотитанат аммония

ГОСТ – Государственный стандарт

СИЗ – Средства индивидуальной защиты

СНиП – Строительные нормы и правила

СТО – Стандарт организации

ТУ – Технические условия

ПДК – Предельно допустимая концентрация

ССБТ – Система стандартов безопасности труда

## Оглавление

<b>Введение.....</b>	<b>13</b>
<b>1. Обзор литературы.....</b>	<b>14</b>
<b>2. Описание технологической схемы.....</b>	<b>20</b>
<b>3. Конструкция установки .....</b>	<b>23</b>
<b>4. Технологический расчет .....</b>	<b>26</b>
4.1 Тепловой баланс процесса.....	26
4.2 Материальный баланс процесса.....	27
<b>5. Выбор конструкционных материалов.....</b>	<b>28</b>
<b>6. Механический расчет оборудования.....</b>	<b>29</b>
6.1 Расчет питателя.....	30
6.1.1 Механический расчет шнека.....	30
6.1.2 Прочностной расчет шнека.....	33
6.1.3 Определение мощности шнекового питателя.....	36
6.1.4 Расчет и выбор подшипников.....	38
6.1.5 Механический расчет вала-гранулятора.....	41
6.1.6 Расчет теплоизоляции .....	46
6.2 Расчет барабанной печи.....	48
6.2.1 Механический расчет барабанной печи.....	48
6.2.2 Прочностной расчет барабана.....	50
6.2.3 Расчет барабана на жесткость.....	53
6.2.4 Расчет фланцевых соединений.....	54
6.2.5 Расчет бандажей и опорных роликов.....	63
6.3 Расчет индукционного обогрева.....	79
6.3.1 Определение геометрических параметров индуктора.....	79
6.3.2 Определение мощностей печи.....	80
6.3.3 Выбор частоты и параметров преобразователя.....	82
6.3.4 Электрический расчет печи .....	84
6.3.5 Расчет охлаждения индуктора.....	92

Результаты проведенной разработки.....	97
<b>7. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережения .....</b>	<b>98</b>
7.1 Потенциальные потребители результатов исследования.....	98
7.2 SWOT-анализ.....	99
7.3 Расчет себестоимости готовой продукции по действующему производству.....	100
7.4 Расчет затрат на производство продукции.....	104
7.5 Определение технико-экономических показателей.....	109
<b>8. Социальная ответственность.....</b>	<b>110</b>
Введение.....	110
8.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.....	111
8.2 Производственная безопасность.....	113
8.2.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов.....	115
8.3 Экологическая безопасность.....	117
8.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	119
<b>Заключение.....</b>	<b>121</b>
<b>Список использованных источников.....</b>	<b>122</b>
<b>Приложение А. Раздел ВКР, выполненный на иностранном языке.....</b>	<b>130</b>
<b>Приложение Б. Значения коэффициентов.....</b>	<b>142</b>

## Введение

В настоящий период нашего планетного существования мы пришли к осознанию, что осталось мало чистых ресурсов в земле, и мы срочно нуждаемся в пересмотре работы нашей промышленности и поиске методов обработки хвостов. Не обошлась в этом плане стороной и рудная промышленность.

Существуют и постоянно находится в разработке множество способов обработки концентратов с целью максимального извлечения полезных ресурсов. Один из них фтор-аммонийная (фторидная) обработка, по итогу которой до 16 полезных ресурсов, в том числе и главный – ванадий. В технологической цепи данного процесса находятся масштабные (т. к. это крупнотоннажное производство) устройства. Одно из них стало основой данной диссертационной работы.

Один из этапов фторидной обработки – сублимация (улетучивание) гексафторосиликата аммония, происходящая во вращающейся барабанной печи. Была поставлена задача не только просчитать конструкционные и рабочие параметры печи, а также представить чертежи, но и придумать и решить сверхзадачу – абсолютно новый для данной сферы способ нагрева обрабатываемого материала, учитывая проблему летучести и взрывоопасности компонентов.

## 1. Обзор литературы

Месторождения нашей планеты содержат в себе два типа руд: сплошные и вкраплённые. Конечно, сплошные не распространены настолько, насколько бы хотелось, к тому же со временем они значительно убавляются в количестве. И тогда основную ценность месторождения обретают вкраплённые руды. Первичным минералом обоих типов руд можно назвать титаномагнетит, составляющий от 90 до 95 % объёма рудной части, а также первично обособленный ильменит (титанистый железняк  $\text{FeO} \cdot \text{TiO}_2$ ). Сам титаномагнетит – это тонкое срастание ильменита в магнетите, которое образовалось в результате распада твердого раствора. Это образование представляет собой зёрна неправильной формы, служащие некими промежуточными, размерами от 0,1 до 2 мм [1].

Большой вопрос возникает об извлечении нужных вкраплений из хвостов. По ориентировочным расчетам из добытых 100% используется примерно 20% полезных компонентов. Поэтому увеличение степени извлечения – важная, одна из первостепенных задач в добывающей отрасли. Постепенное решение данной проблемы не только повышает комплексное использование добытых руд, но и имеет огромное геолого-экономическое значение для всех нас.

Разумеется, титаномагнетитовые руды и так нашли себе широкое применение в промышленности, например, в качестве сырья для получения чугунов, стали и солей ванадия. Но для повышения процентного использования сырья непрерывно разрабатываются и совершенствуются методы переработки исходной руды и, конечно, конструкции технологической цепи. Улучшается устройство печных агрегатов, дорабатываются особенности подготовки сырья и самого плавления, и всё это напрямую связано с желанием повышения степени извлечения того же ванадия, которая пока остается недостаточно высокой. Также возникают такие пункты как загрязнение окружающей среды, отторжение земель для

складирования хвостов обогащения, создание мест для хранения шламов и прочее, а так как переработка титаномагнетитов – крупнотоннажное производство, то эти пункты достаточно большие. Именно поэтому неизменно продолжается поиск новых путей решения по переработке титаномагнетитовых руд и концентратов с целью наиболее рационального производства.

Речь в данной работе пойдет о технологическом процессе, в основе которого лежит фторидный способ переработки концентратов. Эта тема очень актуальная на сегодняшний день, так как является наиболее прогрессивной и перспективной в технологическом плане. В основе фторидной технологии лежит обработка титаномагнетитового концентрата фтористым соединением при воздействии высоких температур для выделения фторида ванадия, с последующими температурными и техническими обработками для такого же получения других составляющих концентрата [3].

Какой же порядок лежит в основе технологической схемы: фторирование сырья → сублимация гексафторсиликат аммония (ГФСА) → сублимация гексафтортитанат аммония (ГФТА) → пиролиз → восстановление Fe.

Процессы фторирования и сублимации проводятся во вращающихся печах барабанного типа, и это и есть новизна в данной тематике. Данная магистерская диссертация построена на работе барабанной установки для сублимации титаномагнетитового концентрата как раз после первого этапа – фторирования.

Для начала стоит сказать, что процесс сублимации может быть выполнен на оборудовании двух видов: периодического действия и непрерывного. Установки периодического действия используется в основном в атомной отрасли и только на малых объемах производства. Так как в данной работе идет разработка переработки концентрата в крупнотоннажном количестве, упомянутое выше оборудование не

подходит. Из непрерывного оборудования вспоминаются вращающиеся печи барабанного типа, которые, к тому же могут достигать до 5 м в диаметре и 200 м длиной, а значит, можно подобрать и просчитать установку для практически любого крупного производства.

Вращающаяся печь – это техническое оборудование непрерывного действия с цилиндрическим рабочим пространством, в котором, вследствие небольшого наклона барабана и вращения, перерабатываемый материал перемещается вдоль печи, нагреваясь посредством какого-то выбрано способа. Вращающиеся печи известны и распространены во всех странах. Данное оборудование широко используется на самых различных предприятиях самых различных областей промышленности. Например, в цветной металлургии вращающиеся печи применяются для спекания пульп, прокаливания гидрата окиси алюминия, обжигов, выщелачивания спека и многих других целей. В других отраслях промышленности (черной металлургии, химии, строительной и др.) такие печи являются одним из видов печного оборудования в крупнотоннажных производствах для термической обработки различных материалов (в основном кусковых, реже сыпучих) [7].

За что ценятся именно барабанные печи?

- 1) Полная механизация установки;
- 2) Низкая чувствительность к размерам частиц обрабатываемого сырья;
- 3) Возможность выбора способа нагрева сырья и типа теплоносителя;
- 4) Равномерность нагрева сырья за счет перекачивания в объеме печи.

Конструктивно данное оборудование варьируется лишь размерами корпуса и устройствами подачи и выгрузки материала, когда как технологически существуют различные вариации работы. Как правило во вращающихся печах используется внутренний обогрев, т. е.



непосредственный, с применением различных видов топлива [8]. В зависимости от вида перерабатываемого сырья для отопления могут быть использованы: мазут, природный газ, собственные реакционные газы и отработанные газы из печи с непосредственным нагревом, твердое топливо в виде коксовой мелочи или угольной пыли. Для его сжигания чаще всего используют горелки типа «труба-в-трубе», форсунки или специальные пылеугольные горелки [7].

Но при работе с титаномагнититовым концентратом, при сублимации ГФСА создается атмосфера, наполненная аммонийными и фтористыми соединениями, которые не могут контактировать с прямым нагревом ни в коем случае. Поэтому тут применение находит второй способ нагрева сырья в барабанных агрегатах – косвенный нагрев.

При росте требований к защите окружающей среды, печи с обогревом через стенку (косвенным обогревом) позволяют значительно упростить систему очистки газовых выбросов, снизить потери обрабатываемого материала [7].

Актуальность настоящей работы заключается также в разработке принципиально нового оборудования для сублимации, исключая использование какого-либо топлива. И речь пойдет об индукционном нагреве (ИН).

В основе ИН лежит индуцирование переменным магнитным полем электрических токов, посредством которых и происходит этот процесс. Эти токи высокой частоты позволяют бесконтактно нагревать электропроводящие материалы.

К сожалению, в существующей научной литературе мало сведений об ИН барабанных печей или же они отражены недостаточно. Поэтому прообразом разработанного индукционного устройства являются индукционные тигельные печи, которые занимают значительную роль в промышленности, широко известны и часто описаны в научных источниках.

В сравнении с другими методами нагрева индукционная передача энергии детали производится без участия конвективного или лучистого теплообмена и также без применения каких-либо контактных устройств. Помимо этого, индукционный метод обеспечивает нагрев на больших удельных мощностях, и, следовательно, высокую скорость нагрева, которую сложно получить при других методах кроме контактного [9]. Однако внешний нагрев имеет очевидный недостаток – повышенная температура на открытом воздухе. И для безопасности работников цеха и обслуживающего персонала данного оборудования наилучшим решением служим обкладка футеровки снаружи барабана, лишь той средней части, где установлена ИН.

Но если говорить о барабанной печи с ИН, то вот ее ключевые преимущества:

- 1) возможность использования для протекания процессов с огне- и взрывоопасными компонентами;
- 2) отсутствие загрязнений в течении процесса (из-за отсутствия продуктов горения);
- 3) выравнивание температуры по всему объему аппарата;
- 4) экологическая безопасность для работников и окружающей среды (электромагнитные волны не распространяются за пределы корпуса установки).

Для лучшего протекания процесса внутри агрегата нужна грамотная подача сырья. Титаномагнетитовый концентрат имеет рыхлую структуру, а после первого этапа процесса – фторирования – он будет склонен к комкованию и прилипанию, что может осложнить питание печи обычным шнековым питателем. Попытка решить эту проблему – гранулирование сырья за счет некоего связующего материала, который можно простым способом добавлять в бункер питания непосредственно с концентратом уже после фторидной обработки. Гранулирование – это широко известный и часто применяемый в промышленности процесс. Шарики за счет своей

сферической формы двигаются лучше, и процесс может стать намного эффективнее за счет лучшей теплопередачи материала. В качестве связующего выбрана известь, дешевый и доступный способ для качественного упрочнения материала, а простой питающий шнек преобразуется в шнековый узел, состоящий из вала с «червяком» и вала-гранулятора со штырями для гранулирования.

Целью данной диссертации является технологический и, главное, механический расчет вращающейся индукционной печи барабанного типа для сублимации ГФСА и ее шнекового узла для гранулирования и подачи материала в рабочую полость.

## 2. Описание технологической схемы

В основе данной магистерской диссертации лежит фторидная обработка титаномагнетитового концентрата.

Порядок процессов технологической схемы: фторирование руды → сублимация ГФСА → сублимация ГФТА → пирогидроллиз → восстановление Fe.

Исходный состав титаномагнетитового концентрата представлен в таблице 1.

Табл. 1 – Исходный состав руды

Соединение	Масса, т/год
FeO	21700,0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	46000,0
FeTiO <sub>3</sub>	26000,0
MgO	1700,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1600,0
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	200,0
SiO <sub>2</sub>	2800,0
<b>Итого</b>	<b>100000,0</b>

Годовая производительность равна 100000 т/год. В двойном шнековом питателе титаномагнетитовый концентрат перемешивается с NH<sub>4</sub>F в пропорции 1:1,7. Смесь поступает в барабанную вращающуюся печь, где происходит процесс фторирования при температуре 150°C. После данного этапа в качестве продуктов мы имеем VF<sub>5</sub>, а также побочные H<sub>2</sub>O и NH<sub>3</sub>.

Состав обрабатываемой смеси после фторирования упомянут в таблице 2. Данная масса вместе с известью в качестве связующего материала подается в барабанную вращающуюся печь шнековым питателем и гранулятором в виде шариков. Далее происходит сублимация ГФСА, из

которой потом продуктами выходят  $\text{SiO}_2$  и  $\text{NH}_4\text{F}$ . Процесс происходит при температуре  $320^\circ\text{C}$ .

Табл. 2 – Состав смеси #2

Соединение	Масса, т/год
$\text{FeF}_2$	44426,3
$\text{FeF}_3$	65010,6
$(\text{NH}_4)_2\text{TiF}_6$	33908,1
$\text{MgF}_2$	2628,0
$\text{AlF}_3$	2636,7
$(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6$	8306,7
$\text{NH}_4\text{F}$	15439,2
<b>Итого</b>	<b>172355,6</b>

Третьим этапом является сублимация ГФТА, которая проходит так же в барабанной вращающейся печи. Температура данного процесса равна  $600^\circ\text{C}$ . Состав поступающей шнековым питателем смеси виден из таблицы 3. По итогу данного этапа продуктом является  $\text{Ti}$ .

Табл. 3 – Состав смеси #3

Соединение	Масса, т/год
$\text{FeF}_2$	44426,3
$\text{FeF}_3$	65010,6
$(\text{NH}_4)_2\text{TiF}_6$	33908,1
$\text{MgF}_2$	2628,0
$\text{AlF}_3$	2636,7
<b>Итого</b>	<b>148609,7</b>

Остаточная часть титаномагнетитового концентрата (табл. 4) поступает на пиролиз – процесс разложения фторидов водой.

Температура этого этапа равна 600°C. Продуктом является нерастворимый осадочный  $MgF_2$ , а также побочные: улетевший  $HF$  и  $H_2O$ .

Табл.4 – Состав смеси #4

<b>Соединение</b>	<b>Масса, т/год</b>
$FeF_2$	44426,3
$FeF_3$	65010,6
$MgF_2$	2628,0
$AlF_3$	2636,7
<b>Итого</b>	<b>114701,7</b>

Последний технологический процесс схемы – восстановление  $Fe$  углеродом. Состав поступающей смеси представлен в таблице 5. Температура процесса восстановления равна 2000°C. Продуктами являются  $CO_2$ ,  $Fe$  и  $Al$ .

Табл.5 – Состав смеси #5,

<b>Соединение</b>	<b>Масса, т/год</b>
$FeO$	34012,0
$Fe_2O_3$	46000,0
$Al_2O_3$	1600,0
<b>Итого</b>	<b>81612,0</b>

### 3. Конструкция установки

Барабанная вращающаяся печь состоит из барабана, наклоненного к горизонту под углом  $2^{\circ}$ . Барабан приводится во вращение электродвигателем через редуктор и открытую зубчатую передачу. Зубчатый венец, связанный с приводной станцией через шестерню, служит для приведения во вращение барабана аппарата.

Работа барабана непрерывна, в результате такого перемешивания движущихся деталей обеспечивается высокое и стабильное качество нагрева. Заявленная производительность печи – 100 000 т/год, при атмосферном давлении и температуре  $320^{\circ}\text{C}$ .

Для передачи давления от масс всех вращающихся частей аппарата, барабан снабжен двумя цеолитными бандажами, которые опираются на ролики опорных станций. Бандажи надеты на корпус свободно, с небольшим зазором, учитывая последующее тепловое расширение барабана. Первый бандаж, находящийся у зубчатой передачи в начале барабана, имеет опорные ролики, тогда как второй установлен на опорно-упорную станцию для предотвращения перемещения барабана в горизонтальной плоскости (ролики расположены горизонтально, в которые сбоку впирается бандаж).

В начале барабана установлен бункер загрузки рудной смеси вместе со связующим материалом – известью. Смесь поступает, проходя шнек со сплошными лопастями, а затем через вал-гранулятор, имеющий особое строение со штырями. Масса гранулируется и в виде шариков поступает в корпус барабана. Движение материала внутри печи происходит за счет ее вращения и наклона к горизонту. После уплотнения расположен неподвижный бункер, куда происходит выгрузка обработанного материала.

Индукционный нагрев – это нагревание материала электрическими токами, которые индуцируются переменным магнитным полем. Электропроводящая часть (в данном случае, корпус барабана) должна быть

помещена в индуктор, которым является определенное количество витков медного провода. С помощью специального генератора в индукторе наводится ток определенной частоты, в результате чего вокруг установки возникает электромагнитное поле (рис. 1). Оно в свою очередь наводит в барабане вихревые токи. И они разогревают корпус под действием тепла (по закону Джоуля-Ленца).

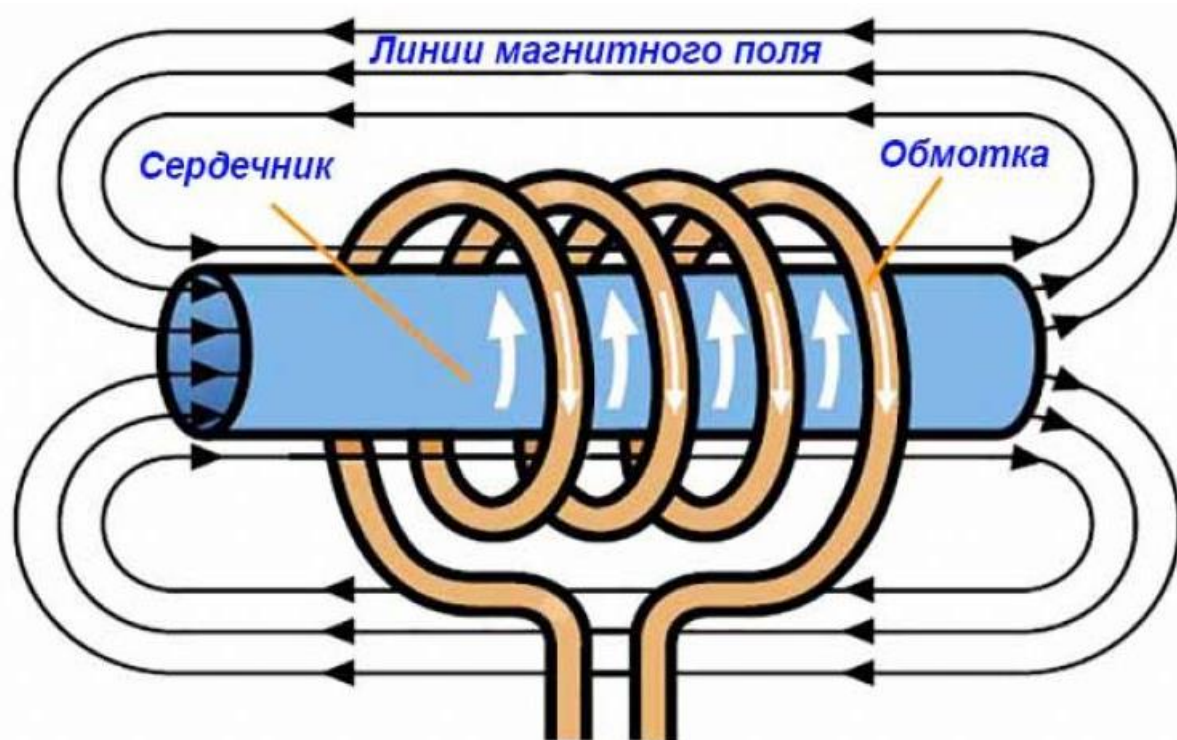


Рисунок 1 – Принцип работы индукционного обогревателя

Каждая индукционная печь имеет свои параметры работы. Температура нагрева агрегата определяется частотой тока индуктора. Установка нуждается в системе охлаждения. Бывают такие ситуации, когда индуктор наводит токи сам на себя, и если его не охлаждать, то он расплавится. Температура охлаждающей воды чуть больше окружающей среды (в данной установке 40°C). ГФСА не удаляется полностью при температуре 300 °С, поэтому необходима выдержка на более высокой температуре. Данные по ИК-спектроскопии и рентгенофазового анализа указывают на то, что реакция протекает полностью уже при 320°C [6]. Именно эта температура принята за минимальную рабочую. Все параметры



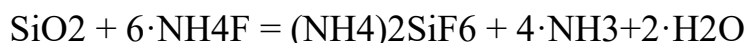
обогрева и охлаждения строго просчитаны и подобраны в разделе 4.3 «Расчет индукционного обогрева».

Для обеспечения стабильной работы печных агрегатов с внутренним обогревом сырья используют профессиональную отделку или футеровку с целью возможных нежелательных повреждений химическими, термическими механическими или физическими воздействиями. И, вследствие изменений температурного режима, данная конструкторская реализация нуждается в постоянном контроле стойкости. В проектируемом агрегате обогрев сырья происходит именно через стенку барабана, а значит футеровка внутри создаст ненужное препятствие и полностью потеряет свой смысл. Но отсутствие футеровки – один из отличительных пунктов данной работы. Проектируемая барабанная печь – сама по себе нагруженный в механическом смысле элемент, специально работающая за счет ИН снаружи. Лишь исходя из опасности внешнего обогрева для рабочего персонала разработано футеровочное покрытие снаружи барабанной печи, и лишь по середине всей длины, где ИН имеет место быть.

## 4. Технологический расчет

### 4.1 Тепловой баланс процесса

В печи происходит процесс сублимация гексафторсиликата аммония  $(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6$ .



$$\Delta H_p = 326,588 \text{ кДж/моль.}$$

$$T \text{ начала сублимации} = 20^\circ\text{C.}$$

$$T \text{ сублимации} = 320^\circ\text{C.}$$

Данные прихода и расхода тепла, электронагрева и тепловых потерь подсчитаны и представлены в таблице 1.

Табл. 6 – Тепловой баланс процесса сублимации ГФСА

№	вещество	Q, МДж/год	Q, МДж/час	%	№	вещество	Q, МДж/год	Q, МДж/час	%
<b>приход</b>					<b>расход</b>				
<b>вносимое тепло</b>					<b>уносимое тепло</b>				
1	FeF <sub>2</sub>	9447476,05	1312,15	1,5	1	FeF <sub>2</sub>	19120659,71	2655,65	3,0
2	FeF <sub>3</sub>	12152986,85	1687,92	1,9	2	FeF <sub>3</sub>	24596318,1	3416,16	3,9
3	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> TiF <sub>6</sub>	11447334,08	1589,91	1,8	3	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> TiF <sub>6</sub>	23168153,96	3217,8	3,6
4	MgF <sub>2</sub>	761215,45	105,72	0,1	4	MgF <sub>2</sub>	1540616,94	213,97	0,2
5	AlF <sub>3</sub>	691298,21	96,01	0,1	5	AlF <sub>3</sub>	1399112,07	194,32	0,2
6	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SiF <sub>6</sub>	3119037,74	433,2	0,5	6	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SiF <sub>6</sub>	6312591,74	876,75	1,0
7	NH <sub>4</sub> F	7980000,14	1108,33	1,3	7	NH <sub>4</sub> F	16150648,75	2243,15	2,5
<b>электронагрев</b>					<b>тепловые потери</b>				
8	Q <sub>эл</sub>	51357628,02	7133,01	8,1	8	Q <sub>п</sub>	4668875,28	648,45	0,7
	∑	96956976,54	13466,25	15,2		∑	96956976,54	13466,25	15,2
	N, ГВт	14,27							

## 4.2 Материальный баланс процесса

На рисунке 2 представлена проектируемая печь для сублимации и потоки, связанные с ней. Т.к. данное устройство является вторым в цепочке обработки концентрата, то в него поступает не сырое сырье, а руда после основной фторидной обработки. Также представлен поток с гексафторосиликатом аммония, из которого затем извлекается оксид кремния и фторид аммония. После сублимации поток материала идет далее на сублимацию гексафтортитаната аммония. Все объемы веществ в составах потоков указаны в т/год.

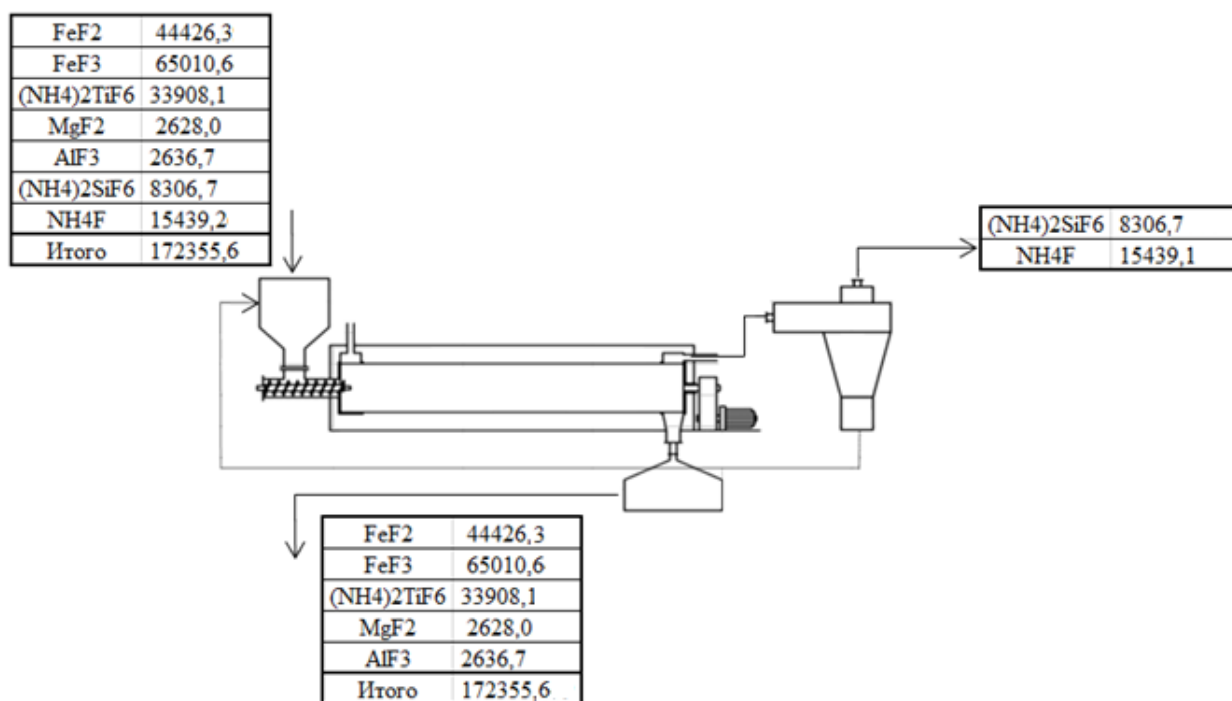


Рисунок 2 – Движение потоков и их состав

## 5. Выбор конструкционных материалов

Как говорилось выше, рабочими условиями для барабанной печи являются: температура 320°C, атмосферное давление, фтористо-аммиачная среда. С учетом данных условий, выбор основного материала корпуса барабана сделан в пользу 12Х18Н10Т. Эта сталь жаропрочна и способна работать при температуре до  $\approx 600^\circ\text{C}$ , сравнительно мало охрупчивается в результате длительного воздействия высокой температуры.

Скорость коррозии для 12Х18Н10Т в данной рабочей среде будет  $< 0,001$  мм/год, без видимых изменений [табл. 12.1, 81]. Срок службы данного оборудования принимается равным 10 годам [82].

Сублимация в полости барабана происходит за счет нагрева корпуса снаружи индукционным способом. Индукционная навивка выполнена из труб, изготовленных из меди марки М2 [74]. И для такой медной навивки принимается срок службы 6 лет [83].

Материалом штуцеров патрубков загрузки и выгрузки конструктивно принята так же сталь 12Х18Н10Т. Прокладочным материалом штуцерных соединений был выбран перфторкаучук марки Kalrez. Этот тип прокладки имеет высокую пластичность, высокую устойчивость к агрессивным средам и стабильную работу при температуре 300°C [24] [78].

Материалом бандажей и роликов станций принята сталь Ст45. Это нелегированная специальная сталь обладает повышенной прочностью и специально применяется для изготовления шестерен, валов, бандажей и других деталей, к которым предъявляются повышенные требования [84]. Срок службы принимается равным 10 годам [82].

Перерабатываемый титаномагнетитовый концентрат переходит из этапа фторирования (температура процесса 150°C) в печь для сублимации через шнековый питатель. Для исключения ЧП, и чтобы сырье не теряло свое тепло, шнековый питатель должен иметь тепловую изоляцию.

Изоляционным материалом был выбран Supersil (Суперсил) от изготовителя ЗАО «РЛБ Силика», изготовленный из чистого кремнеземного волокна. Он разработан специально для многократного применения при температуре до 1200 °С, снижает вероятность возникновения пожара и исключает распространение пламени [30].

## 6. Механический расчет оборудования

### 6.1 Расчет питателя

#### 6.1.1 Конструктивный расчет шнека

Производительность конвейера задана:  $Q = 11,5$  т/ч. Поступает рудная смесь с известью в качестве связующего вещества. Насыпная плотность  $\rho_H = 1,2$  т/м<sup>3</sup>.

Главной целью проектного расчета шнека является выбор основных геометрических и кинематических параметров (рис. 3).

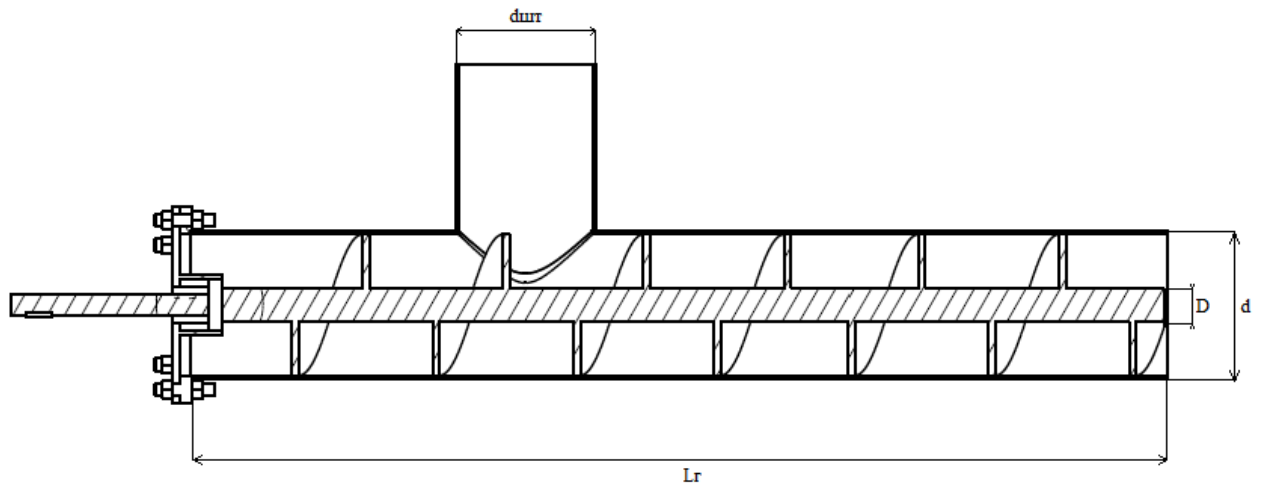


Рисунок 3 – Расчетная модель шнекового питателя

Определяем необходимый диаметр винта по формуле [61]:

$$d = 0,275 \frac{Q}{E * n * \varphi * \rho_H * R_{\beta}} \quad (1)$$

где  $d$  – диаметр винта, м;

$Q$  – расчетная производительность конвейера, т/ч;

$E$  – отношение шага винта к диаметру винта (для абразивных материалов  $E = 0,8$ ; для неабразивных  $E = 1,0$ );

$n$  – частота вращения винта, об/мин;

$\rho_H$  – насыпная плотность груза, т/м<sup>3</sup>;

$R\beta$  – коэффициент уменьшения производительности в зависимости от наклона конвейера [прил. Б, табл. 18];

$\varphi$  – коэффициент заполнения желоба [прил. Б, табл. 20].

Примерно соответствующий требуемой производительности принимаем диаметр:

$$d = 0,15 \text{ (м)}$$

Для изготовления корпуса шнекового дозатора примем трубу общего назначения по ГОСТ 8732-78: труба 159 x 4,5.

При обычном расчёте шнека, как дозирующего, так и транспортного исполнения, шаг винта рекомендуется:

$$S = (0,8 \div 1)d$$

В случае транспортирования тяжёлых абразивных материалов, или при пуске шнека «из-под завала», рекомендуется шаг рассчитывать по формуле:

$$S = (0,5 \div 0,6)d = (0,5 \div 0,6) \cdot 0,15 = (0,075 \div 0,09) \text{ (м)} \quad (2)$$

Принимаем:  $S = 0,08 \text{ (м)}$

Определение числа оборотов шнека

В соответствии с рекомендациями, воспользуемся эмпирической формулой для расчёта числа оборотов шнека:

$$n = \frac{30}{\sqrt{D}} \div \frac{60}{\sqrt{D}} = \frac{30}{\sqrt{0,15}} \div \frac{60}{\sqrt{0,15}} = (77,5 \div 155) \left( \frac{\text{об}}{\text{мин}} \right) \quad (3)$$

Наименьшая частота вращения – для тяжёлых абразивных материалов, наибольшая – для лёгких неабразивных.

Так как пыль уноса тяжёлая и абразивная, и из-за особенностей материала и необходимости пуска «из-под завала», примем частоту вращения шнека ближе к нижнему из рассчитанного интервала, соразмерив

её с частотами вращения производимых мотор-редукторов. Принимаем частоту вращения  $n=56$  (об/мин).

Принимаем к дальнейшему расчёту шнек с параметрами:

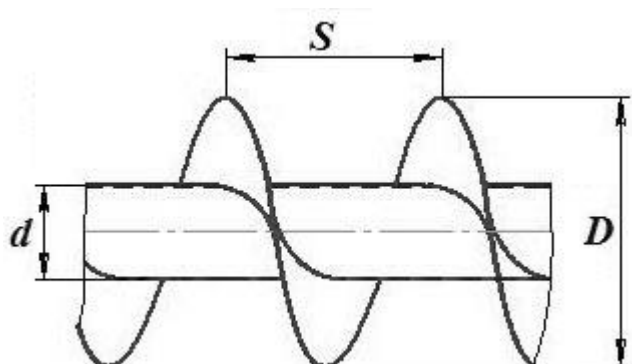


Рисунок 4 - Эскиз шнека

диаметр шнека, м	$D$	0,15
шаг винта, м	$S$	0,08
частота вращения шнека, $c^{-1}$ (об/мин)	$n$	0,93 (56)

Рассчитаем скорость транспортирования материала по формуле:

$$V = \frac{S \cdot n}{60} = \frac{0,08 \cdot 56}{60} = 0,075 \left( \frac{м}{с} \right) \quad (4)$$

Диаметр вала шнека рассчитывается по упрощенной формуле:

$$d \approx 0,035 + 0,1D \approx 0,035 + 0,1 \cdot 0,15 \approx 0,05 \text{ (м)} \quad (5)$$

Следует отметить, что рассчитанный по данной формуле диаметр вала принимается для полых валов, изготовленных из стальных труб.

Вал шнека подвержен действию крутящего момента, изгибающего момента. Для шнеков, установленных в трубе, с разнесенными опорами, если длина вала шнекового дозатора менее 1 м., и диаметр менее 300 мм, то вал проверяется только на кручение, без учёта изгибающего момента. Так как момент со стороны материала заведомо кратно меньше момента со стороны привода, а диаметр вала рассчитывался в первом приближении исходя из момента со стороны привода, то такой вал проверке на прочность не подлежит.



## 6.1.2 Прочностной расчет шнека

В результате действия всех нагрузок шнек испытывает деформации сжатия, кручения и продольно-поперечного изгиба.

На основании анализа продольно-поперечного изгиба установлено, что для шнеков с расстоянием между опорами до  $(6 \cdot H)$  обычно напряжения сжатия в вале [62]:

$$\sigma_{сж} = S/F, \quad (6)$$

где  $F$  – площадь сечения шнека (для не полых валов  $F = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$ ).

Тогда

$$\sigma_{сж} = 195 \text{ кПа}$$

Напряжение от крутящего момента в вале:

$$\tau = M_{кр}/W_p, \quad (7)$$

где  $W_p$  – полярный момент сопротивления шнека (для неполых валов  $W_p = 0,2 \cdot D^3$ )

Тогда  $\tau = 200$  кПа.

Эквивалентные напряжения: [71]

$$\sigma_{экр} = \sqrt{\sigma_{сж}^2 + 4 \cdot \tau^2} \leq [\sigma] \quad (8)$$

На прочность следует рассчитать также последний виток шнека, находящийся в условиях максимального давления прессования. С небольшим допущением можно представить этот виток как кольцевую пластину, защемленную по внутреннему радиусу (рис. 5).

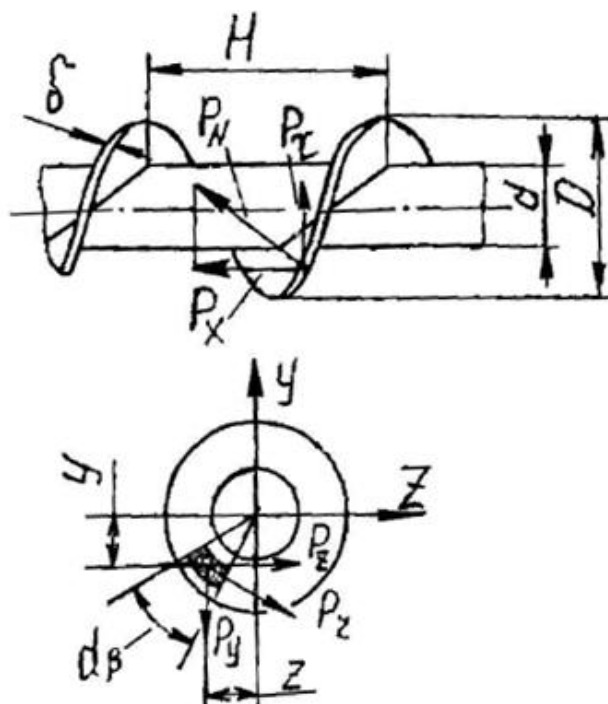


Рисунок 5 – Схема к расчету шнека на прочность

Наибольший изгибающий момент на витке:

$$M_{и} = \frac{P_{max} * D^2}{32} * \frac{1,9 - 0,7 * a^{-4} - 1,2 * a^{-2} - 5,2 * \ln a}{1,3 + 0,7 * a^{-2}}, \text{ (Н*м)} \quad (9)$$

где  $a = d/D$ ,

$P_{max}$  – максимальное давление на последнем витке, определяют или принимают по опытным данным (350 кПа).

Тогда  $M_{и} = 1 \text{ кН*м}$ .

Наибольшее напряжение на витке:

$$\sigma_{и} = M_{и}/W = 6 * M_{и}/\delta^2 \leq [\sigma]_{и}, \quad (10)$$

где  $W$  – момент сопротивления сечения изгибу;

$\delta$  – толщина витка, м;

$[\sigma]_{и}$  – допускаемое напряжение материала спирали на изгиб, Па.

Предварительный выбор марки стали – Ст3. Тогда  $[\sigma]_{и} = 85$  МПа (для знакопеременной нагрузки) [72].

$$\delta = \sqrt{\frac{6 \cdot M_{и}}{[\sigma]_{и}}} = 0,01 \text{ м} \quad (11)$$

С данной толщиной витка условие выполняется.

Исходя из технологических и конструктивных соображений были приняты такие диаметры штуцеров [стр. 213, 11]:

$$d_{м1} = 200 \text{ мм и } d_{м2} = 400 \text{ мм,}$$

где  $d_{м1}$  – штуцер загрузки;

$d_{м2}$  – штуцер выгрузки.

### 6.1.3 Определение мощности шнекового питателя

Для выбора двигателя нужно рассчитать мощность на валу винта, мощность привода для двигателя.

Определяется мощность на валу винта [61]: (12)

$$N_0 = \frac{Q}{367} (L_{\Gamma} \cdot \omega \pm h) + 0,02 \cdot R \cdot g_K \cdot L_{\Gamma} \cdot \omega_B,$$

где  $N_0$  – мощность на валу винта, кВт;

$L_{\Gamma}$  – горизонтальная проекция длины конвейера, м;

$\omega$  – коэффициент сопротивления перемещению груза;  $\omega = 1,6$  [прил. Б, табл. 20];

$h$  – высота подъема (+) или опускания (-) груза, м;

$R = 0,2$  – коэффициент, учитывающий характер перемещения винта;

$g_K$  – погонная масса вращающихся частей конвейера, кг/м;

$\omega_B$  – коэффициент сопротивления движению вращающихся частей конвейера; Выбираем подшипники качения, для которых  $\omega_B = 0,01$ .

Погонная масса вращающихся частей конвейера, кг/м, определяется по формуле:

$$g_K = 80 \cdot d = 80 \cdot 0,2 = 16 \text{ кг/м} \quad (13)$$

После подстановки всех значений получаем:

$$N_0 = \frac{10}{367} (0,5 \cdot 1,6 + 0) + 0,02 \cdot 0,2 \cdot 16 \cdot 0,5 \cdot 0,01$$

$$N_0 = 2,2 \text{ кВт}$$

Мощность двигателя для привода шнекового конвейера при коэффициенте запаса  $K = 1,25$  определяется по следующей формуле:

$$N = \frac{K * N_0}{\eta}; \quad (14)$$

Возьмем за КПД 80%. Тогда мощность двигателя будет равна:

$$N = \frac{1,25 * 2,2}{0,8} = 3,44 \text{ кВт}$$

### 6.1.4 Расчет и выбор подшипников

Действующая на вал шнека осевая сила рассчитывается по формуле:

$$P_o = \frac{M_{кр}}{r_o \cdot \tan(\alpha + \beta)} \quad (15)$$

Где:

$P_o$  – осевая сила, (Н)

$M_{кр}$  – крутящий момент, (Н·м)

$r_o$  – радиус, на который приложена осевая сила, (м)

$\alpha$  – угол подъёма винтовой линии, (град)

$\beta$  – приведённый угол трения перемещаемого материала, (град)

$$r_o = (0,7 \div 0,8) \frac{D}{2} \approx 0,75 \cdot \frac{0,15}{2} = 0,0563 \text{ (м)} \quad (16)$$

$$\tan \alpha = \frac{S}{2\pi r_o} = \frac{0,08}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,0563} = 0,226 \Rightarrow \alpha = 12,85^\circ \quad (17)$$

Приведенный угол трения перемещаемого материала зависит как от угла подъема винтовой линии, так и от коэффициентов трения материала о стенки трубы и лопасти винта. Коэффициенты определяются экспериментально. Из-за отсутствия таких данных, примем значение приведённого угла как для цемента:

$$\beta = 33^\circ$$

Осевая сила составит:

$$P_o = \frac{M_{кр}}{r_o \cdot \tan(\alpha + \beta)} = \frac{360}{0,0563 \cdot \tan(12,85 + 33)} = 6207,4 \text{ (Н)} \quad (18)$$

Поперечная сила, действующая на вал, рассчитывается по формуле:

$$R = P_o \cdot \tan(\alpha + \beta) \frac{l}{L} \quad (19)$$

где:  $l$  – расстояние между опорами, (м)

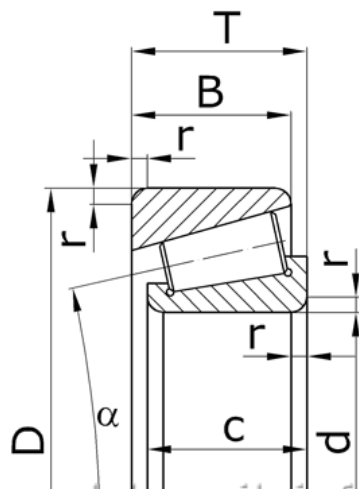
$L$  – общая длина вала между крайними опорами, (м)

Так как проектируемый шнековый дозатор – двух опорный, то:

$$R = P_o \cdot \tan(\alpha + \beta) \frac{l}{L} = 6207,4 \cdot \tan(12,85 + 33) \cdot 1 = 6394,4 \text{ (Н)}$$

Причем сила  $R$  не сосредоточена в одном сечении, а распределена между всеми витками в пролете.

Исходя из принятой практики, выбираем в качестве опор, конические роликовые подшипники 7207 по ГОСТ 333:

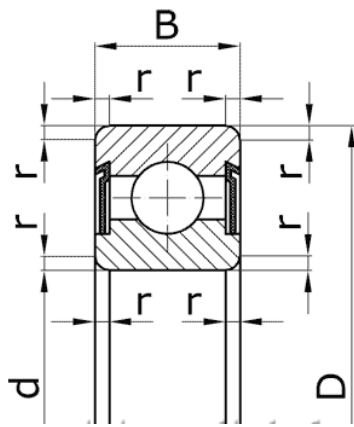


Внутренний диаметр подшипника	$d$	35	мм
Наружный диаметр подшипника	$D$	72	мм
Высота подшипника	$T$	18,25	мм
Ширина наружного кольца подшипника	$B$	15	мм
Ширина внутреннего кольца подшипника	$C$	17	мм
Радиус монтажной фаски подшипника	$r$	2,0	мм
Статическая грузоподъемность	$C_0$	26000	Н
Динамическая грузоподъемность	$C$	38500	Н
Масса подшипника	$m$	0,33	кг

Рисунок 6 – Эскиз шарикоподшипника 7207 и его параметры

Так как подшипник способен воспринимать осевую нагрузку только в одном направлении, а при работе шнекового дозатора возможно кратковременное реверсирование (значит и обратно направленное приложение нагрузки), а также исходя из того, что монтаж конических подшипников требует обеспечение предварительного осевого натяга в подшипнике, опорный узел будет спроектирован из двух подшипников 7207.

Вторая опора – плавающая, в связи с этим, воспринимает только радиальную нагрузку. Для этой опоры принимаем шариковый подшипник с двухсторонним уплотнением 180207 по ГОСТ 8882-75



Внутренний диаметр подшипника	d	35	мм
Наружный диаметр подшипника	D	72	мм
Ширина подшипника	B	17	мм
Радиус монтажной фаски подшипника	r	2,0	мм
Статическая грузоподъемность	$C_0$	13700	Н
Динамическая грузоподъемность	C	25500	Н
Масса подшипника	m	0,290	кг

Рисунок 7 – Эскиз шарикоподшипника 180207 и его параметры



### 6.1.5 Механический расчет вала-гранулятора

Для расчёта диаметра штырей гранулятора примем за расчётную схему: чистый изгиб консольной балки. В качестве максимально возможной на стержень нагрузки примем, что стержень осуществляет сдвиг мокрой уплотнённой глины. Сопротивление сдвигу составляет 0,024-0,032 МПа. Диаметр штыря не известен. Примем в первом приближении диаметр 20 мм и толщину слоя глины сдвиг в которой осуществляется штырём – 20 мм.

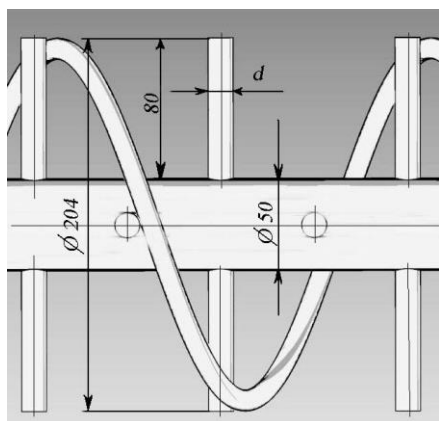


Рисунок 8 – Схема вала-гранулятора

Сосредоточенная сила считаем приложенной к концу стержня, т.е. на расстоянии 0,102 м. от оси вращения вала гранулятора.

Таким образом, сосредоточенная сила на конец стержня будет:

$$F = \frac{\sigma_{\text{сл}}}{d \cdot \delta} = \frac{0,032}{0,02 \cdot 0,02} = 80 \text{ (Н)} \quad (20)$$

Рассмотрим балку длиной  $l$  заземленную одним концом и находящуюся под действием сосредоточенной силы  $F = 80$  (Н),  $l = 0,08$  (м).

Определяем внутренние силовые факторы, возникающие в балке методом сечений. Балка рассекается поперечным сечением в произвольном месте. Правая часть отбрасывается.

Заменим ее действие внутренними усилиями  $N$  - вдоль оси  $z$ ,  $Q_y$  - вдоль оси  $y$  и моментом  $M_x$  - в плоскости осей  $yz$  вокруг оси  $x$ . На рисунке 9 в соответствии с принятым правилом знаков показаны положительные направления внутренних силовых факторов.

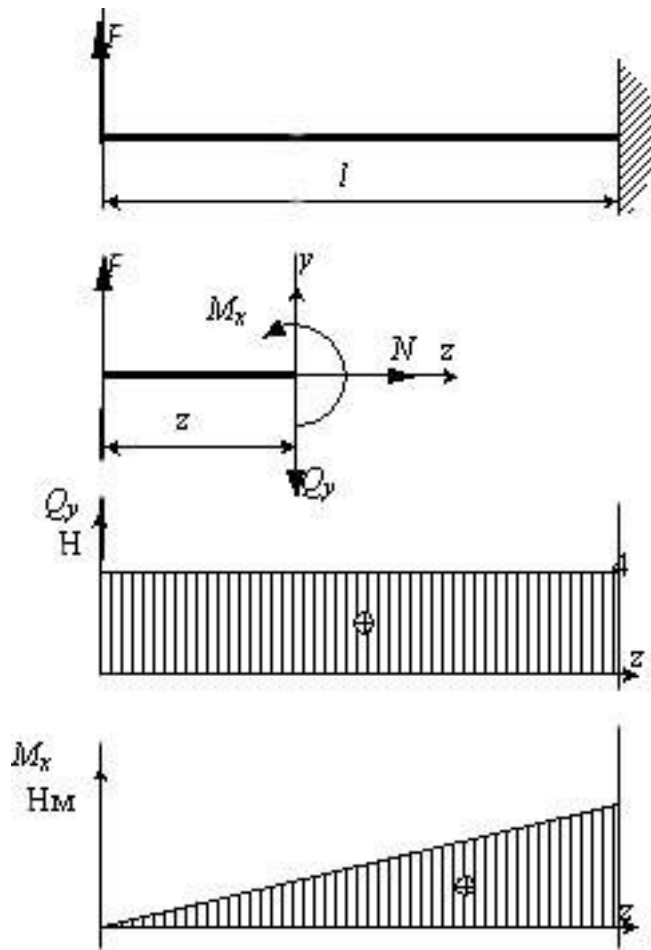


Рисунок 9 – Эпюры к расчёту штырей гранулятора

Уравновесим отсеченную часть. Запишем уравнения статического равновесия, получим

$$\sum z = 0, \quad N = 0$$

$$\sum y = 0, \quad F - Q_y = 0, \quad Q_y = F$$

$$\sum m_x = 0, \quad M_x - Fz = 0, \quad M_x = Fz$$

Из первого уравнения видно, что нормальная сила  $N$  при изгибе равна нулю.

Построим эпюры поперечной силы  $Q_y$  и изгибающего момента  $M_x$  вдоль длины балки. Поперечная сила постоянна по всей длине балки и равна  $Q_y = F = 80$  Н. Отложим на графике линию параллельную оси  $z$ .

Изгибающий момент  $M_x$  изменяется в зависимости от расстояния  $z$ . Вычислим его значение в двух точках: в начале  $z = 0$  и в конце балки  $z = l = 0,08$  м.

$$z = 0 (M_x = 0);$$

$$z = 0,08 \text{ м} (M_x = 6,4 \text{ Н}\cdot\text{м}).$$

Построим по точкам график  $M_x$ .

По эпюрам  $Q_y$  и  $M_x$  определяется опасное сечение, т.е. сечение в котором может произойти разрушение.

Опасным сечением называется сечение, в котором изгибающий момент достигает наибольшего по модулю значения.  $M_{x\max} = \max |M_x|$ .

В некоторых случаях опасным сечением может быть также сечение, где наибольшего значения достигает поперечная сила  $Q_{y\max} = \max |Q_y|$ . В данном случае опасным является место закрепления балки.

Определяем требуемый диаметр поперечного сечения стержня. Условие прочности по нормальным напряжениям имеет вид:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_x}{W_x} \leq [\sigma] \quad (21)$$

где  $W_x$  – момент сопротивления балки при изгибе. Для балки круглого поперечного сечения он равен:

$$W_x = \frac{\pi d^3}{32} \approx 0,1d^3 \quad (22)$$

Тогда требуемый диаметр штыря определяется по формуле

$$d \geq \sqrt[3]{\frac{|M_x|}{0,1[\sigma]}} = \sqrt[3]{\frac{6,4}{0,1 \cdot 143,5}} = 0,76 \text{ (см)} = 7,6 \text{ (мм)} \quad (23)$$

Принимаем по конструктивным соображениям минимальный диаметр стержня (штыря) 14 мм.

Конструктивные элементы (штыри) имеют одинаковую массу, симметричны относительно оси вала и расположены равномерно по длине

вала, то в качестве расчётной схемы примем расчётную схему «стержень на двух шарнирных опорах с равномерно распределённой массой»:

$$m_{л} = \frac{(m_{\text{вала}} + n \cdot m_{\text{штыря}} + m_{\text{спирали}})}{L} \quad (24)$$

Где:

$m_{л}$ - удельная масса вала, кг/м;

$m_{\text{вала}}$  - масса вала, кг.;

$m_{\text{штыря}}$  - масса одного штыря, кг;

$m_{\text{спирали}}$  - масса спирали, кг;

$n$  - количество штырей, шт;

$L$  - длина вала, м.

$$d_{\text{вала}} = \frac{\pi d_{\text{в}}^2 L}{4} \rho = \frac{3,14 \cdot 0,05^2 \cdot 1,35}{4} \cdot 7800 = 20,7 \text{ (кг)} \quad (25)$$

$$m_{\text{штыря}} = \frac{\pi d_{\text{ш}}^2 l_{\text{ш}}}{4} \rho = \frac{3,14 \cdot 0,014^2 \cdot 0,155}{4} \cdot 7800 = 0,19 \text{ (кг)} \quad (26)$$

$$m_{\text{спирали}} = \frac{\pi d_{\text{сп}}^2 l_{\text{сп}}}{4} \rho = \frac{3,14 \cdot 0,012^2 \cdot 4}{4} \cdot 7800 = 3,5 \text{ (кг)} \quad (27)$$

Где:

$l_{\text{ш}}, l_{\text{сп}}$  - длина штыря и спирали, м;

$d_{\text{в}}, d_{\text{ш}}, d_{\text{сп}}$  - диаметр вала, штыря и спирали, м;

$\rho$  - плотность стали, кг/м<sup>3</sup>.

$$m_{л} = \frac{(20,7 + 26 \cdot 0,19 + 3,5)}{1,35} = 21,6 \left( \frac{\text{кг}}{\text{м}} \right)$$

Угловая критическая скорость вала рассчитывается по формуле:

$$\omega_{\text{кр}} = \left( \frac{\alpha_1}{L} \right)^2 \sqrt{\frac{EI}{m_{л}}} \quad (28)$$

Где  $\alpha_1$  - корень частотного уравнения определяемый по рисунку 10.

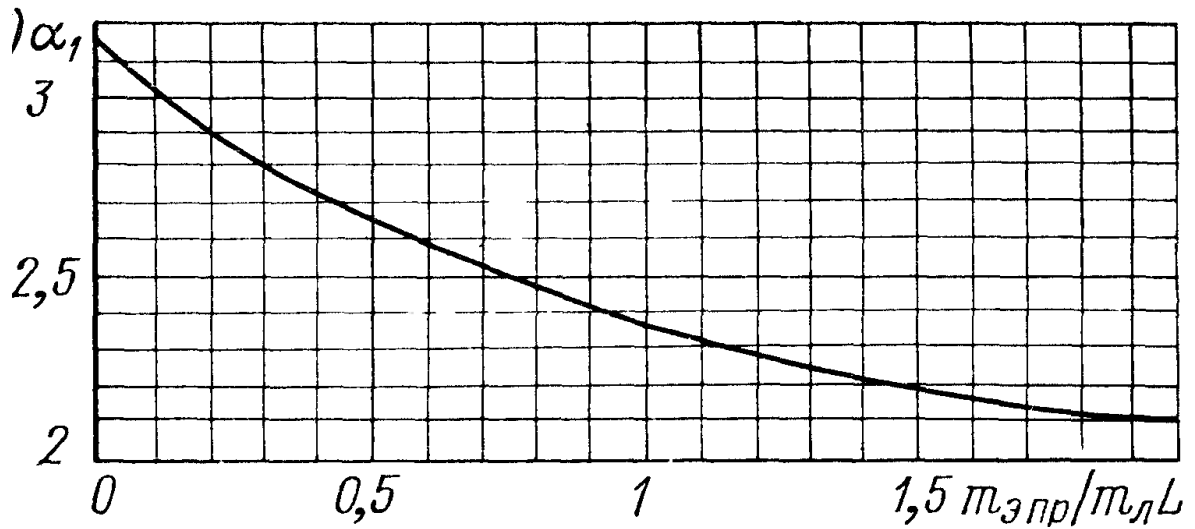


Рисунок 10 – Корень частотного уравнения.

$m_{э.пр}$  - приведенная к середине вала масса закреплённых на валу элементов, кг;

$I$  - момент инерции вала,  $m^4$ ;

$E$  - модуль упругости материала вала, Па.

$$m_{э.пр} = n \cdot m_{штыря} + m_{спирали} = 26 \cdot 0,19 + 3,5 = 8,44 \text{ (кг)}$$

$$\frac{m_{э.пр}}{m_{лL}} = \frac{8,44}{29,14} = 0,29 \quad (29)$$

$$I = \frac{\pi d^4}{64} = \frac{3,14 \cdot 0,05^4}{64} = 30,66 \cdot 10^{-8} \text{ (м}^{-4}\text{)} \quad (30)$$

$$\omega_{кр} = \left( \frac{2,79}{1,35} \right)^2 \sqrt{\frac{1,99 \cdot 10^{11} \cdot 30,66 \cdot 10^{-8}}{21,6}} = 227,8 \left( \frac{\text{рад}}{\text{с}} \right)$$

$$\frac{\omega}{\omega_{кр}} = \frac{74,3}{227,8} = 0,326 < 0,7$$

Следовательно, условие виброустойчивости вала-гранулятора выполняется.

### 6.1.6 Расчет тепловой изоляции

Шнековый питатель доставляет сырье в сублимационную печь после фторирования, а значит температура материала уже высокая ( $\approx 300^\circ\text{C}$ ). Поэтому шнековая конструкция должна быть теплоизолированной для предотвращения ЧП ситуаций, а также чтобы перерабатываемый материал не терял зря свое тепло. Выбранная тепловая изоляция должна соответствовать данным характеристикам:

- выдерживать температуру  $400^\circ\text{C}$  минимум;
- доступность на рынке;
- экономическая выгодность.

Был выбран изоляционный материал из чистого кремнеземного волокна Supersil (Суперсил) от изготовителя ЗАО «РЛБ Силика» [30]. Он разработан специально для многократного применения при температуре до  $1200^\circ\text{C}$ , изолирует источник высокой температуры, снижает вероятность возникновения пожара, исключает распространение пламени. Среди прочих плюсов – низкая теплопроводность (коэффициент теплопроводности  $=0,034\text{Вт/м}\cdot\text{K}$  при  $t = 25^\circ\text{C}$ ).

Толщина теплоизоляционного слоя определяется по соотношению:

$$\delta_{\text{из}} = \frac{\lambda_{\text{из}}*(t_{\text{ст}} - t_{\text{из}})}{\alpha_{\text{н}}*(t_{\text{из}} - t_{\text{окр.с.}})}; \quad (31)$$

$$\alpha_{\text{н}} = 9,74 + 0,07 * V_t; \quad (32)$$

$$V_t = t_{\text{из}} - t_{\text{окр.с.}}; \quad (33)$$

$t_{\text{ст}} = 350^\circ\text{C}$ ,  $t_{\text{из}} = 45^\circ\text{C}$ ;  $t_{\text{окр.с.}} = 20^\circ\text{C}$  – температуры стенки, изоляции и окружающей среды соответственно.

Тогда по (32) и (33) коэффициент теплопередачи равен:

$$\alpha_n = 9,74 + 0,07 * (45 - 20) = 11,49 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 * \text{К}}$$

В качестве изоляционного материала взят теплозащитный материал Supersil (Суперсил) с коэффициентом теплопроводности при 25 °С =  $0,034 \frac{\text{Вт}}{\text{м} * \text{К}}$ . Тогда по (31) получаем:

$$\delta_{\text{из}} = \frac{0,034 * (350 - 45)}{11,49 * (45 - 20)} = 0,036 \text{ м} = 36 \text{ мм.}$$

Исходя из расчета толщины изоляционного слоя Supersil, конструктивно принимаем ее равной 40 мм.

## 6.2 Расчет барабанной печи

### 6.2.1 Механический расчет барабанной печи

Заданная суточная производительность печи  $G_T = 274$  т/сутки.

Расчетная модель барабанной печи представлена на рисунке 11. Расчету и выбору подлежат все геометрические параметры с нуля: диаметр печи, длина печи, мощность. Также приводятся все проверки, на прочность и жесткость корпуса с учетом всех нагрузок и действующих сил.

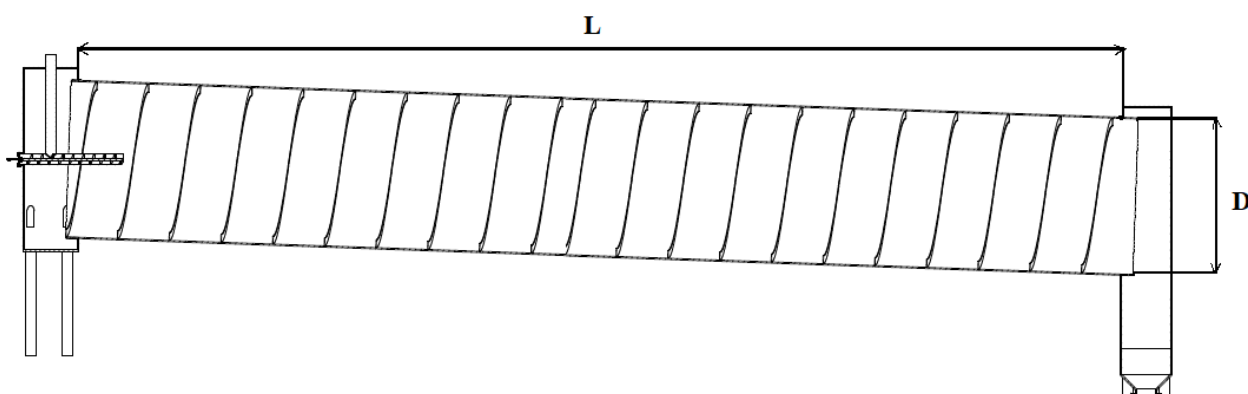


Рисунок 11 – Расчетная модель барабанной печи

1) Определение геометрических размеров при помощи эмпирических формул

Суточная производительность:

Диаметр барабана:

$$D = 0,4542 * G_T^{0,34} = 0,4542 * 274^{0,34} = 3,06 \text{ м} \quad (34)$$

Длина барабана:

$$L = 2,59 * G_T^{0,447} = 2,59 * 274^{0,447} = 31,84 \text{ м} \quad (35)$$

Принимаем  $D = 3$  м и  $L = 45$  м [77].

Печь вращающаяся 3 × 45.



Коэффициент заполнения барабана  $\varphi$  :

$$\varphi = \frac{4 * G_m * \tau}{\pi * (D_{вн})^2 * L * \rho_M}, \quad (36)$$

где  $G_m$  – кг/ч, заданная производительность;

$\tau$  - ч, необходимое время пребывания материала = 2;

$\rho_M$  – кг/м<sup>3</sup>, плотность материала = 1200;

$D_{вн}$  – м, внутренний диаметр барабана (см. далее расчет на прочность)

= 2,95.

Тогда

$$\varphi = \frac{4 * 11500 * 2}{3,14 * (2,95)^2 * 45 * 1200} = 0,10688.$$

Принимаем  $\varphi = 0,1$ .

2) Определение мощности

Определим число оборотов барабана:

$$n = \frac{0,06 \div 0,13}{\sqrt{D}}; \quad (37)$$

$$n = \frac{0,06 \div 0,13}{\sqrt{3}} = 0,035 \div 0,075 \text{ об/с}$$

Принимаем номинальную угловую скорость  $n = 2,02$  об/мин.

Действительная угловая скорость не должна отличаться от номинальной более чем на  $\pm 10\%$  [77].

Мощность для вращения барабана:

$$N = 0,0013 \cdot D^3 \cdot L \cdot \rho_{ср} \cdot n \cdot \varphi; \quad (38)$$

$$N = 0,0013 \cdot 3^3 \cdot 45 \cdot 4250 \cdot 2,02/60 \cdot 0,1 = 22,6 \text{ кВт.}$$

## 6.2.2 Прочностной расчет барабана

Для корпуса барабанной печи были рассчитаны все силы, действующие на барабан, построены эпюры этих сил, произведена проверка на прочность барабана.

Толщина стенки барабана [стр. 245, 10]:

$$s_6 = 0,007 * D \div 0,01 * D, \text{ мм} \quad (39)$$

$$s_6 = 0,007 * 3000 \div 0,01 * 3000 = 21 \div 30 \text{ мм}$$

Принимаем  $s_6 = 25 \text{ мм}$  [77].

Внутренний диаметр барабана:

$$D_B = D_H - 2 * s_6 = 3 - 2 * 0,025 = 2,95 \text{ м}. \quad (40)$$

Масса материала, находящегося в печи определяется по формуле:

$$m_M = \varphi * \rho_m * L * \pi * (D_B)^2 / 4, \quad (41)$$

$$m_M = 0,1 * 1200 * 45 * 3,14 * 2,95^2 / 4 = 21\,519,11 \text{ кг}.$$

Масса корпуса барабана определяется по формуле:

$$m_K = \frac{\pi * L}{4} * (D_H^2 - D_B^2) * \rho_{\text{стали}}, \quad (42)$$

$$m_K = (3,14 * 45 / 4) * (3^2 - 2,95^2) * 7800 = 81\,971,663 \text{ кг}.$$

Суммарная масса барабана и материала:

$$m = m_K + m_M = 103\,490,773 \text{ кг}. \quad (43)$$

Поперечная сила, действующая на барабан в месте крепления венцовой шестерни:

$$Q_B = (m_{\text{ш}} + m_{\text{кр}}) * g, \quad (44)$$

где  $m_{\text{ш}}$  – кг, масса венцовой шестерни;

$m_{кр}$  – кг, масса элементов крепления венцовой шестерни;

$g$  – м/с<sup>2</sup>, ускорение свободного падения.

Тогда

$$Q_B = (17800 + 5000) \cdot 9,8 = 223\,440 \text{ Н}$$

Линейная нагрузка, действующая на барабан, определяется по формуле:

$$q = m \cdot g / L, \quad (45)$$

$$q = 103\,490,773 \cdot 9,81 / 45 = 22\,560,99 \text{ Н/м.}$$

Реакции опор от действия  $q$  и  $Q_B$  представлены на рисунке 9.

Условие прочности для барабана печи:

$$\sigma = \frac{M_{\max}}{W} \leq [\sigma], \quad (46)$$

где  $\sigma$  – напряжение в барабане, МПа;

$[\sigma] = 25 \dots 30$  МПа – допускаемое напряжение для аппарата из стали марки 12Х18Н10Т при рабочей температуре  $t < 700^\circ\text{C}$  [25];

$W$  – м<sup>3</sup>, момент сопротивления сечения барабана;

$M_{\max}$  – Нм, максимальный изгибающий момент, действующий на барабан.

$$W = \frac{S_{\sigma} \cdot \pi \cdot D_{CP}^2}{4}, \quad (47)$$

где  $D_{CP}$  – м, средний диаметр барабана.

$$W = 0,025 \cdot 3,14 \cdot 2,975^2 / 4 = 0,174 \text{ м}^3.$$

Максимальный изгибающий момент, действующий на барабан  $M_{\max} = 2435,47$  кН.

Тогда  $\sigma \approx 14 \text{ МПа} \leq [\sigma]$ . Условие выполняется.

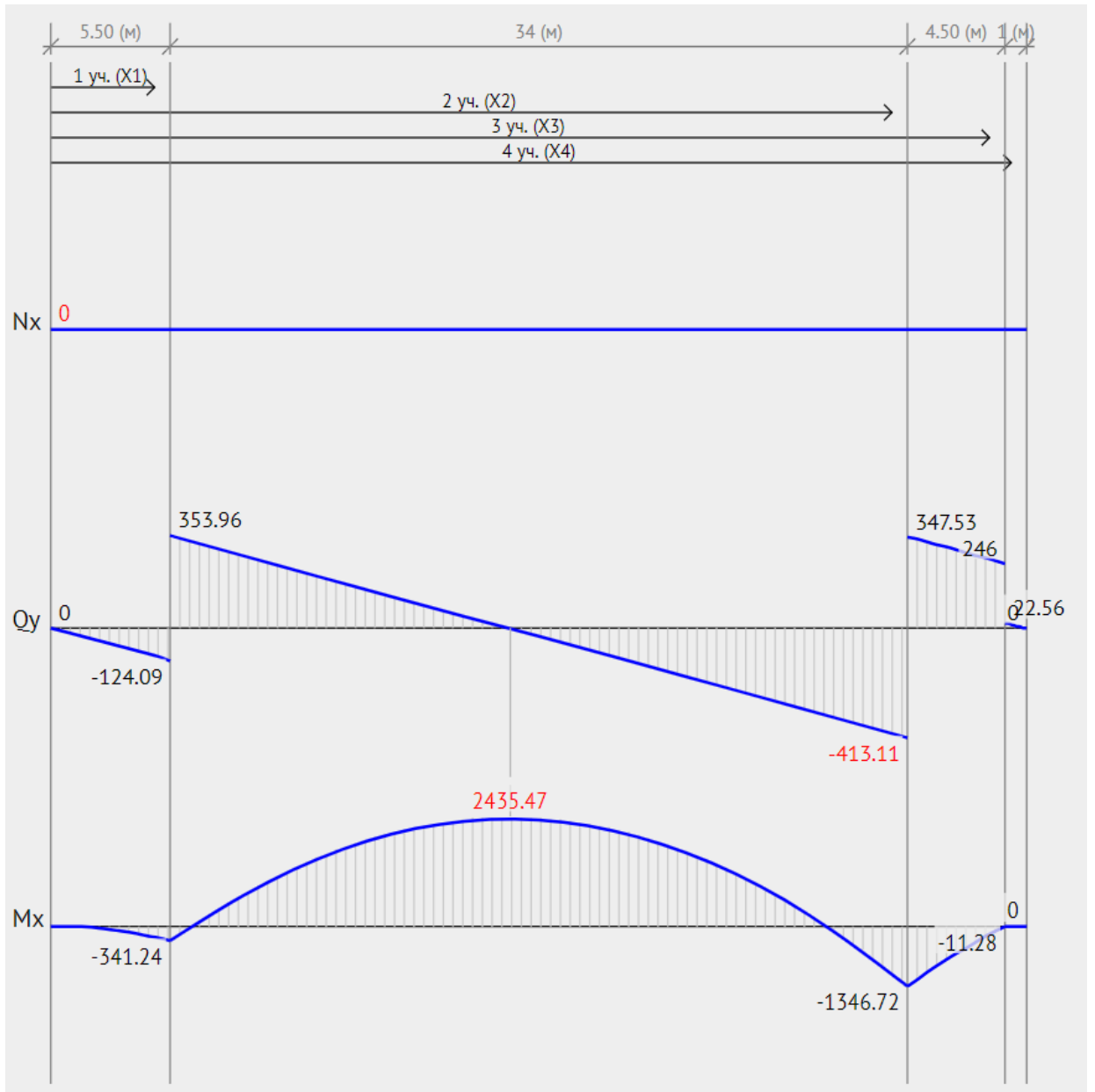
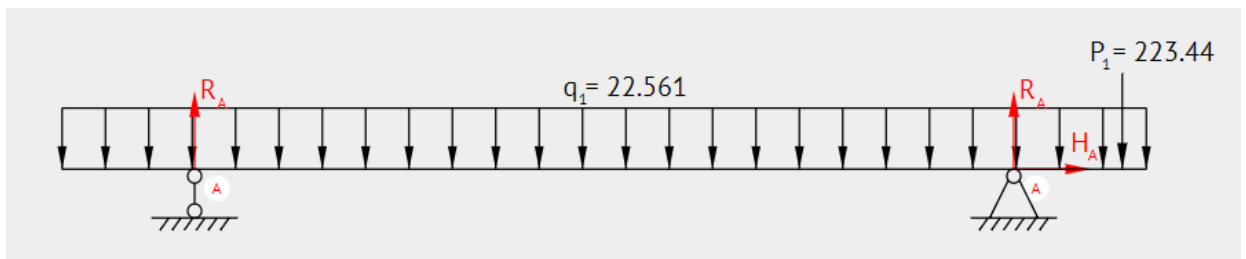


Рисунок 12 – Статический расчет барабана

### 6.2.3 Расчет барабана на жесткость

По жесткости материала и действующим напряжениям была просчитана нагрузка на корпус аппарата и произведена проверка на жесткость. Условие жесткости для барабана [стр. 246, 10]:

$$\varepsilon = y_{\max} / D_{\text{ср}} \leq [\varepsilon], \quad (48)$$

где  $y_{\max}$  – м, суммарный максимальный прогиб от действующих нагрузок;

$\varepsilon$  – относительный прогиб;

$[\varepsilon] = 1/200$  – допускаемый относительный прогиб (для барабана без футеровки);

Суммарный максимальный прогиб от действующих нагрузок:

$$y_{\max} = \frac{D_{\text{ср}}^3}{8E \cdot I_x} \cdot (0,04 \cdot q_1 + 0,002 \cdot q_2), \quad (49)$$

где  $q_1$  – Н/м, линейная нагрузка от массы обрабатываемого материала;  $q_2$  – Н/м, линейная нагрузка от массы барабана;

$E = 1,36 \cdot 10^5$  МПа – модуль упругости материала корпуса при рабочей температуре ( $t \leq 700^\circ\text{C}$ );

$I_x = 1 \cdot s_\sigma^3 / 12$  – м<sup>3</sup>, момент инерции единичного кольцевого участка барабана.

$$q_1 = g \cdot m_M / L = 9,81 \cdot 64\,557,32 / 45 = 14\,073,5 \text{ Н/м}, \quad (50)$$

$$q_2 = g \cdot m_K / L = 9,81 \cdot 81\,971,663 / 45 = 17\,869,82 \text{ Н/м}, \quad (51)$$

$$I_x = 0,025^3 / 12 = 1,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3, \quad (52)$$

$$y_{\max} = \frac{2,975^3}{8 \cdot 1,36 \cdot 10^{11} \cdot 1,3 \cdot 10^{-6}} \cdot (0,04 \cdot 14\,073,5 + 0,002 \cdot 17\,869,82) = 0,0112 \text{ м}.$$

Подставив полученные значения в условие жесткости (48) получим:

$$\varepsilon = y_{\max} / D_{\text{ср}} = 0,0112 / 2,975 = 3,75 \cdot 10^{-3}.$$

Условие жесткости выполняется:  $\varepsilon \leq [\varepsilon]$ , ( $3,75 \cdot 10^{-3} < 5 \cdot 10^{-3}$ ). [76]

## 6.2.4 Расчет фланцевых соединений

Целью данного подраздела является расчет фланцев, выбор материалов для них, болтов, выбор материала прокладки, а также проверка их на прочность.

Исходные данные:

Материал обечаек и фланцев 12X18Н10Т.

Материал болтов 35Х.

Материал прокладки - перфторкаучук марки Kalrez (т.к. он отлично служит для агрессивных сред до 300°C).

Фланцы плоские, неизолированные, с гладкой уплотнительной поверхностью.

Пусть  $b_s=1$  если расчет ведем для болтов, и  $b_s=2$  если для шпилек.

$t := 400$  °C

$\sigma_d := 137$  - МПа, допускаемое напряжение для стали 12X18Н10Т при 400°C [25]

$E_{20} := 2.0 \cdot 10^5$  - МПа, модуль упругости для стали 12X18Н10Т при 20°C

$E := 2.0 \cdot 10^5$  - МПа, модуль упругости для стали 12X18Н10Т при 100°C [25]

$P := 0.4$  - МПа, давление в аппарате

$D := 400$  - мм, внутренний диаметр

$b_s := 1$

$D_{сп} := 444$  мм

$n := 16$  - количество болтов, М20

Расчет фланцевого соединения цилиндрической обечайки и эллиптической крышки

Определение расчетных параметров

Расчетные температуры:

Расчетная температура неизолированных плоских фланцев

$$t_{\phi} := 0.96t = 384 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Расчетная температура болтов:

$$t_{\text{б}} := 0.96t = 384 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$\sigma_{\text{д.б}} := 176.7$  - МПа, модуль упругости для болтов при рабочей температуре [24]

$E_{\text{б}} := 2.1 \cdot 10^7$  - МПа, допускаемое напряжение для болтов при  $t = 20^{\circ}\text{C}$

$\sigma_{20.б} := 183.3$  - МПа, модуль упругости для болтов при температуре испытания [24]

$E_{20\text{б}} := 2.1 \cdot 10^7$  - МПа, коэффициент линейного расширения стали 35Х при  $t = 20 - 400^{\circ}\text{C}$

$$\alpha_{\text{б}} := 11.5 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{K}}$$

Поскольку фланцы изготавливаются из того же материала, что и обечайка, то расчетные значения примем такими же.

Допускаемые напряжения для фланцев и обечаек стали 12Х18Н10Т: [25]

$\sigma_{\text{д}} = 137$  - МПа, допускаемое напряжение для стали 12Х18Н10Т

$\sigma_{\text{д}20} := 184$  - МПа, допускаемое напряжение для стали 12Х18Н10Т при  $20^{\circ}\text{C}$

$E_{20} = 2 \times 10^5$  - МПа, модуль упругости для стали 12Х18Н10Т при  $20^{\circ}\text{C}$

$E = 2 \times 10^5$  - МПа, модуль упругости для стали 12Х18Н10Т при рабочей температуре

$\alpha_{\phi} := 18 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{К}}$  - коэффициент линейного расширения для стали 12Х18Н10Т при  $t = 20 - 400^{\circ}\text{C}$

Эффективная ширина плоской прокладки ( $b_0$ ):

$$b_{\pi} := 3_{\text{мм}} [24]$$

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

$$b_0 = 3$$

Характеристики прокладки [табл. 4.6, 24]:

$m := 2.5$  - прокладочный коэффициент

$q_{\text{обж}} := 20$  - МПа, удельное давление обжатия прокладки

$q_d := 130$  - МПа, допускаемое удельное давление

$K_{\text{обж}} := 0.9$  - коэффициент обжатия

$E_{\pi} := 0.2 \cdot 10^5$  - МПа, условный модуль сжатия прокладки

Усилие, необходимое для смятия прокладки при затяжке:

$$P_{\text{обж}} := 0.5 \cdot \pi \cdot D_{\text{сп}} \cdot b_0 \cdot m \cdot |P|$$

$$P_{\text{обж}} = 2.092 \times 10^3 \text{ Н}$$

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

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

$$R_{\pi} = 4.185 \times 10^3 \text{ Н}$$



Площадь поперечного сечения болтов (шпилек) [табл. 4.3, 24]:

$$f_b := 302.75 \text{ мм}^2 \text{ (без проточки)}$$

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

$$A_b := n \cdot f_b$$

$$A_b = 4.844 \times 10^3 \text{ мм}^2$$

Равнодействующая нагрузка от давления:

$$Q_d := D_{сп}^2 \cdot P \cdot \frac{\pi}{4}$$

$$Q_d = 6.193 \times 10^4 \text{ Н}$$

Приведенная нагрузка, вызванная воздействием внешней силы и изгибающего момента:

$$M := 0$$

т.к. у нас нет момента, создаваемого редуктором.

$Q_{FM}$  - приведенная нагрузка

$$Q_{FM} := 0$$

т. к. ни внешней силы, ни изгибающего момента нет.

Податливость прокладки:

$h_{п} := 0$  - толщина трубной решетки или закладной детали между прокладками

$$u_{п} := \frac{h_{п} \cdot K_{обж}}{E_{п} \cdot \pi \cdot D_{сп} \cdot b_{п}}$$

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

$$L_{60} := 62 \text{ мм}$$

Эффективная длина болта (шпильки) при определении податливости:

$d := 20$  - мм, внешний диаметр болта.

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

$$L_6 = 67.6 \text{ мм}$$

Податливость болтов:

$$y_6 := \frac{L_6}{E_{206} \cdot A_6}$$

$$y_6 = 6.645 \times 10^{-10} \frac{\text{мм}}{\text{Н}}$$

Расчетные параметры фланцев:

$$S_0 := s_{ц0}$$

$$S_0 := 6 \text{ - мм, толщина обечайки}$$

$$l_0 := \sqrt{D \cdot S_0} = 48.99 \text{ мм}$$

Отношение наружного диаметра тарелки фланца к внутреннему диаметру [29]:

$$D_H := 520 \text{ мм}$$

$$K := \frac{D_H}{D} = 1.3$$

Коэффициенты, зависящие от соотношения размеров тарелки фланца:

$$\beta_T := \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \log(K)) - 1}{(1.05 + 1.945 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} = 1.796$$

$$\beta_U := \frac{[K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \log(K)) - 1]}{1.36 \cdot (K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = 8.299$$

$$\beta_Y := \left[ 0.69 + 5.72 \cdot \frac{K^2 \cdot \log(K)}{(K^2 - 1)} \right] \cdot \frac{1}{(K - 1)} = 7.621$$

$$\beta_Z := \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = 3.899$$

Коэффициенты для фланцевых соединений с приварными стык фланцами с прямой втулкой, плоскими фланцами и свободными фланцами:

$$\beta_F := 0.91$$

$$\beta_V := 0.55$$

$$f := 1$$

коэффициент  $\lambda$ :

$h := 25$  - мм, толщина тарелки фланца

$$\lambda := \frac{\beta_V \cdot h^3}{\beta_U \cdot l_0 \cdot (S_0)^2} + \frac{\beta_F \cdot h + l_0}{\beta_T \cdot l_0} = 1.403$$

Угловая податливость фланцев:

Угловая податливость фланца при затяжке:

$$y_\Phi := \frac{0.91 \cdot \beta_V}{E_{20} \cdot \lambda \cdot l_0 \cdot (S_0)^2} = 1.012 \times 10^{-9} \frac{\text{мм}}{\text{Н}}$$

Угловая податливость фланца, нагруженного внешним изгибающим моментами:

$D_\Phi := 480$  - мм, диаметр, на котором расположены болты [табл. 1, 29]

$$y_{\Phi H} := \left(\frac{\pi}{4}\right)^3 \cdot \frac{D_\Phi}{E_{20} \cdot h^3 \cdot D_H} = 1.431 \times 10^{-10} \frac{\text{мм}}{\text{Н}}$$

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

$$C_F := \max \left[ 1, \sqrt{\frac{\pi \cdot D_\Phi}{n \cdot \left( 2 \cdot d + \frac{6 \cdot h}{m + 0.5} \right)}} \right] = 1.023$$

Приведенный диаметр плоского фланца

$$D_{\text{пр}} := D$$

Плечо действия усилий в болтах (шпильках) при приварных встык и плоских фланцах:

$$b := 0.5 \cdot (D_{\text{б}} - D_{\text{сп}}) = 18 \text{ мм}$$

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

$$e := 0.5 \cdot (D_{\text{сп}} - D - S_0) = 19 \text{ мм}$$

Эквивалентная толщина плоских фланцев

$$S_3 := S_0$$

Коэффициент жесткости фланцевого соединения для приварных встык плоских фланцев:

$$\gamma := \frac{1}{y_{\text{п}} + 2 \cdot b^2 \cdot y_{\text{ф}} \cdot \frac{E_{20}}{E} + y_{\text{б}} \cdot \frac{E_{206}}{E_{\text{б}}}} = 1.524 \times 10^6 \frac{\text{Н}}{\text{мм}}$$

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

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

Коэффициент жесткости фланцевого соединения, нагруженного внешним изгибающим моментом:

$$\alpha_{\text{М}} := \frac{y_{\text{б}} + 2 \cdot y_{\text{фн}} \cdot b \cdot \left( b + e - \frac{e^2}{D_{\text{сп}}} \right)}{y_{\text{б}} + y_{\text{п}} \cdot \left( \frac{D_{\text{б}}}{D_{\text{сп}}} \right)^2 + 2 \cdot y_{\text{фн}} \cdot b^2} = 2.003$$

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

$$Q_t := \gamma \cdot [2 \cdot \alpha_\phi \cdot h \cdot (t_\phi - 20) - 2 \cdot \alpha_b \cdot h \cdot (t_b - 20)] = 1.803 \times 10^5 \text{ Н}$$

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

$$M := 0$$

F - внешняя осевая сила

$$F := 0, \text{ т. к. на фланце нет рубашки}$$

$$P_{b1} := \max \left[ \alpha \cdot (Q_d + F) + R_{п} + \frac{4 \cdot \alpha_M \cdot M}{D_{сп}}, \alpha \cdot (Q_d + F) + R_{п} + \frac{4 \cdot \alpha_M \cdot M}{D_{сп}} - Q_t \right]$$

$$P_{b1} = 6.612 \times 10^4 \text{ Н}$$

$$P_{b2} := \max(P_{обж}, 0.4 \cdot A_b \cdot \sigma_{20.6})$$

$$P_{b2} = 3.552 \times 10^5 \text{ Н}$$

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

$$P_{бм} := \max(P_{b2}, P_{b1})$$

$$P_{бм} = 3.552 \times 10^5 \text{ МПа}$$

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

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

$$P_{бр} = 5.354 \times 10^5 \text{ Н}$$

Проверка прочности болтов(шпилек) и прокладки

Расчетные значения в болтах(шпильках)

При затяжке:

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

$$\sigma_{61} = 73.32 \text{ МПа}$$

В рабочих условиях:

$$\sigma_{62} := \frac{P_{6P}}{A_6}$$

$$\sigma_{62} = 110.537 \text{ МПа}$$

$$\text{Usl\_bolti} := \begin{cases} \text{"Условия прочности при затяжке НЕ выполняются"} & \text{if } \sigma_{61} > \sigma_{20.6} \\ \text{"Условия прочности в рабочих условиях НЕ выполняются"} & \text{if } \sigma_{62} > \sigma_{д.6} \\ \text{"Условия прочности выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Usl\_bolti} = \text{"Условия прочности выполняются"}$$

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

$$q = 127.955 \text{ МПа}$$

$$\text{Usl\_prokl} := \begin{cases} \text{"Условия прочности прокладки НЕ выполняются"} & \text{if } q > q_d \\ \text{"Условия прочности прокладки выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Usl\_prokl} = \text{"Условия прочности прокладки выполняются"}$$

## 6.2.5 Расчет бандажей и опорных роликов

Целью данного подраздела является расчет бандажей барабанной печи и опорных роликов и проверка их на прочность.

Исходные данные:

$D_{\text{б}} := 3.3$  - м, диаметр бандажа

$D_{\text{п}} := 3$  - м, диаметр печи

$Q := 180 \cdot 10^3$  - Н, нагрузка на бандаж

$R := 1.65$  - м, радиус бандажа

$\psi := 60 \cdot \text{deg} = 1.047$  - угол между роликами

$\beta := \pi - \psi = 2.094$

$n := 16$  - число башмаков

$Q_{\text{б}} := 1.282$  - МН, вес бандажа,

Материал: Ст45.

Примечание: Свободно надетый бандаж.

Определение реакций роликов и их размеров

Определение реакций опорных роликов и их размеров

Определение реакции роликов определяется из уравнения равновесия сил.

$$Q = -2T \cdot \cos(\psi),$$

где  $T$  - реакция ролика, Н

т. к:

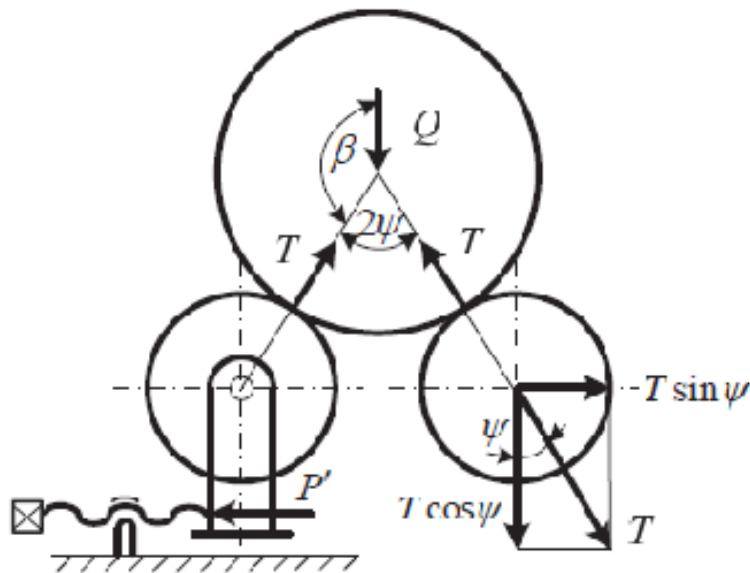
$$\cos(\psi) = \cos(\pi - \beta) = -\cos(\beta), \text{ то}$$

$$T := \frac{Q}{2 \cdot (-\cos(\beta))} = 1.8 \times 10^5 \text{ Н}$$

Расчетная ширина роликов  $b_R$  определяется по формуле:

$$b_R = \frac{T}{P}$$

Схема действия сил на бандаж, опорные ролики и упорный винт показаны на рисунке 13.



1 – винт упорный; 2 – бандаж; 3 – ролик опорный

Рисунок 13 – Схема действия сил на бандаж, ролики и упорный винт

Принимаем:

Допускаемую удельную нагрузку на единицу длины касания

$$(P) \leq 2.4 \cdot 10^6 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$$

Для медленно вращающихся машин ( $n$  менее 4 об/мин).

$$P := 1.6 \frac{\text{МН}}{\text{м}}$$

$$b_R := \frac{|T| \cdot 1000}{|P \cdot 10^6|} = 112.5 \text{ мм}$$



Исполнительная ширина ролика  $b$  берется с учетом возможного теплового удлинения машины и аппарата  $\Delta b$  и прибавки 30-40 мм для облегчения монтажа.

$$\Delta b = \alpha \cdot (t_m - t_0) \cdot l_{\text{мм}} - \text{возможное тепловое удлинение аппарата.}$$

$\alpha := 11.5 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$  - коэффициент линейного расширения материала аппарата.

$$t_0 := 20$$

$$t_m := 200 \text{ К}$$

$$l := 900 \text{ мм}$$

$$\Delta b := \alpha \cdot (t_m - t_0) \cdot l = 1.863 \text{ мм}$$

Исполнительная толщина ролика:

$$b := b_R + \Delta b + 40 = 154.363 \text{ мм}$$

Диаметр стальных опорных роликов:

$$d_p := \frac{P}{35} = 0.046 \text{ м}$$

Тогда

$$r := \frac{d_p}{2} = 0.023 \text{ м}$$

Диаметры опорных роликов уточняется по следующим формулам:

$$h_b := 0.177 \text{ м} \text{ принят (см. раздел 3.2) - высота сечения бандажа.}$$

$$D_{\text{ср.б}} := (1.20) \cdot D_b = 3.96 \text{ м} - \text{средний диаметр бандажа.}$$

$$D_{\text{б.р}} := D_{\text{ср.б}} + h_b = 4.137 \text{ м} - \text{наружный диаметр бандажа.}$$

Для тяжелых машин и аппаратов

$$D_{\text{б.р}} \cdot 0.25 \leq d_p \leq D_{\text{б.р}} \cdot 0.33$$

$$D_{\text{б.р}} \cdot 0.25 = 1.034$$

$$d_p = 0.046$$

$$D_{\text{б.р}} \cdot 0.33 = 1.365$$

Условие применимости формул не выполняется.

Тогда диаметр опорных роликов:

$$d_p := \frac{P}{30} = 0.053 \text{ м}$$

$$h := 0.177$$

Уточнённый диаметр опорных роликов:

$$d_{p, \text{уточ}} := 0.25(D_{\text{ср.б}} + h) = 1.034$$

Тогда условие применимости формул выполняется.

Радиус опорного ролика:

$$r := \frac{d_{p, \text{уточ}}}{2} = 0.517 \text{ м}$$

В процессе регулировки на каждый из двух упорных винтов приходится усилие  $P$ , которое определяется как половина суммы горизонтальной составляющей реакции в опоре и силы трения в основании опоры.

$f := 0.2$  - коэффициент трения между рамой и плитами, для стали

$$P := 0.5 \cdot (T \cdot \sin(\psi) + f \cdot T \cdot \cos(\psi)) = 8.694 \times 10^4 \text{ Н}$$

После подстановки значения реакции опоры ( $Q$ ):

$$P := 0.25 \cdot Q \cdot (\tan(\psi) + f) = 8.694 \times 10^4 \text{ Н}$$

При  $\psi=30$  для стали:

$$P := 0.2Q = 3.6 \times 10^4 \text{ Н}$$

Определение реакции упорных роликов

Для осуществления качения упорного ролика по скошенной боковой поверхности бандажа без проскальзывания, вершина конической поверхности ролика должна находиться на оси барабана (рис. 14).

Если упорный ролик удерживает барабан от сползания с опорных роликов, то нагрузка  $A$ , действующая на него, является осевой составляющей силы тяжести  $G$  наклонно расположенного барабана.

$\gamma := 17 \cdot \text{deg}$  - угол при вершине конуса.

$\alpha := 5 \cdot \text{deg}$  - угол наклона барабана к горизонтали

$G := Q$

$A := G \cdot \sin(\alpha) = 1.569 \times 10^4 \text{ Н}$

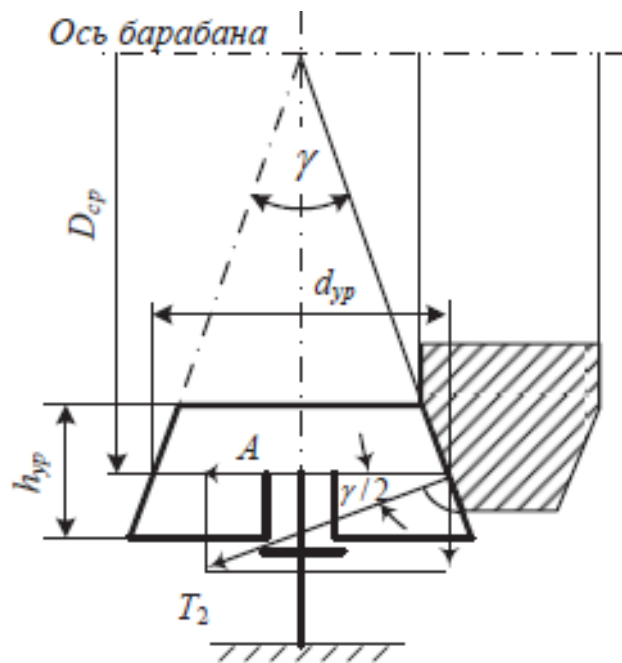


Рисунок 14 – Схема действия сил на упорный валик

Силу  $T_2$ , нормальную к боковой поверхности ролика, определяют по формуле:

$$T_2 := \frac{A}{\cos\left(\frac{\gamma}{2}\right)} = 1.586 \times 10^4 \text{ Н}$$

Из рисунка 15 видно, что:

$$\frac{\gamma}{2} = 0.148$$

$$\frac{\gamma}{2} = \text{atan}\left(\frac{d_{\text{уп}}}{D_{\text{ср}}}\right)$$

$d_{\text{уп}}$  - м, средний диаметр упорного ролика;

$D_{\text{ср}}$  - м, диаметр бандажа в месте его касания середины ширины упорного ролика.

Допускается принимать равным среднему диаметру бандажа.

$$D_{\text{ср}} := D_{\text{б}}$$

$$d_{\text{уп}} := \tan\left(\frac{\gamma}{2}\right) \cdot D_{\text{ср}} = 0.493 \text{ м}$$

Расчет бандажей и роликов на контактную прочность

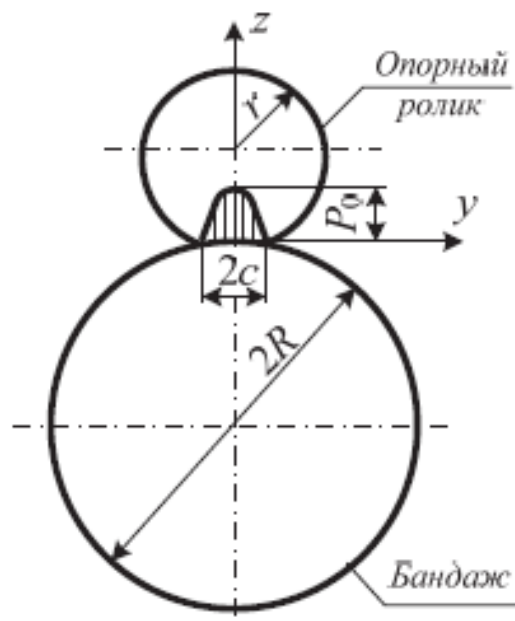


Рисунок 15 - Схема распределения контактного давления в опорном ролике.

Бандаж и ролик рассматриваются как два цилиндра длиной  $b_1$ , сжатой силой  $T$ , которая действует в плоскости осей цилиндров. При этом считают, что материал цилиндров изотропный, а деформации упругие.

Установлено, что в этих условиях цилиндры сминаются по линии первоначального контакта с образованием полоски шириной  $2 \cdot c$ , причем:

$$c = 2 \cdot \sqrt{T \cdot \frac{1 - \mu^2}{\pi \cdot b_1} \cdot \frac{E_1 + E_2}{E_1 \cdot E_2} \cdot \frac{r \cdot R}{r + R}}$$

где:

$E_1$  и  $E_2$  – МПа, модули упругости материалов, соответственно, бандажа и опорного ролика.

$$E_1 := 1.95 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Так как упорные и опорные ролики выбраны из одной стали, то:

$$E_2 := E_1$$

$$E_3 := E_1$$

$\mu$  - коэффициент Пуассона, для стали ( $\mu := 0.3$ );

$r, R$  - радиусы соответственно опорного ролика и бандажа, м;

$b_1$  - ширина бандажа, м.

Ширина бандажа равна расчетной ширине роликов:

$$b_1 := b_R \text{ м}$$

$$r_1 = 0.517$$

$$c := 2 \cdot \sqrt{T \cdot 10^{-6} \cdot \frac{1 - \mu^2}{\pi \cdot \frac{b_1}{1000}} \cdot \frac{E_1 + E_2}{E_1 \cdot E_2} \cdot \frac{r_1 \cdot R}{r_1 + R}} = 2.736 \times 10^{-3} \text{ м}$$

Давление  $P$ , МПа, на площади контакта распределяется по ширине плоскости по эллиптическому закону:

$$\frac{P^2}{P_0^2} + \frac{y^2}{c^2} = 1$$

Где  $P_0$  - максимальное давление при  $y=0$ , МПа

$$P_0 := \sqrt{\frac{T \cdot 10^{-6}}{\pi \cdot (1 - \mu^2) \cdot \frac{b_1}{1000}} \cdot \frac{E_1 \cdot E_2}{E_1 + E_2} \cdot \frac{r_1 + R}{r_1 \cdot R}} = 372.279 \text{ МПа}$$

Максимальное эквивалентное напряжение в зоне контакта:

$$\sigma_{\text{к}} := 0.6 \cdot P_0 = 223.368 \text{ МПа}$$

Поэтому условие прочности при расчете бандажей и роликов на контактную прочность имеет вид:

допускаемое контактное напряжение для материала бандажа, МПа

$$0.6 \cdot P_0 = \sigma_{\text{к}} \leq \sigma_{\text{б}}^{\text{к}}$$

Условие контактной прочности для бандажа и опорного ролика определяется по формуле [75]:

$$\sigma_{\text{к}} := 0.42 \cdot \sqrt{\frac{Q \cdot 10^{-6}}{\pi \cdot \frac{b_1}{1000} \cdot (1 - \mu^2) \cdot \cos(\psi)} \cdot \frac{E_1 \cdot E_2}{E_1 + E_2} \cdot \frac{D_{\text{б}} + d_{\text{р.уточ}}}{D_{\text{б}} \cdot d_{\text{р.уточ}}}} = 156.357$$

МПа

$\sigma_{\text{д.к}} := 600$  - МПа, допускаемое контактное напряжение

$$\text{Usl}_1 := \begin{cases} \text{"Условие контактной прочности выполняется"} & \text{if } \sigma_{\text{к}} \leq \sigma_{\text{д.к}} \\ \text{"Условие контактной прочности не выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$\text{Usl}_1 = \text{"Условие контактной прочности выполняется"}$

Для бандажа и опорного ролика, изготовленных из материалов с одинаковым модулем упругости, зависимость немного упрощается:

$$\sigma_{\text{к}} := 0.31 \sqrt{\frac{Q \cdot 10^{-6}}{\pi \cdot \frac{b_1}{1000} \cdot \cos(\psi)} \cdot \frac{E_1 \cdot (D_{\text{б}} + d_{\text{р.уточ}})}{D_{\text{б}} \cdot d_{\text{р.уточ}}}} = 155.692 \text{ МПа}$$

$$\text{Usl}_1 := \begin{cases} \text{"Условие контактной прочности выполняется"} & \text{if } \sigma_{\text{к}} \leq \sigma_{\text{д.к}} \\ \text{"Условие контактной прочности не выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$\text{Usl}_1 = \text{"Условие контактной прочности выполняется"}$

Для бандажей и роликов из марок сталей 25, 35, 45, рекомендуют  $\sigma_{\text{б}}^{\text{к}}$  : 400, 500 и 600 МПа, соответственно.

Принимаем для стали 45:

$$\sigma_{\text{б.к}} := 600 \cdot 10^6 \text{ Па}$$

Для упорного ролика условие контактной прочности:

$h_{\text{ур}}$  - высота упорного ролика, принимаем ее равной среднему диаметру упорного ролика.

$$h_{\text{ур}} := (d_{\text{ур}}) = 0.493 \text{ м}$$

$$\sigma_{\text{к.у}} := 0.418 \sqrt{\frac{T_2 \cdot E_1 \cdot 10^{-6}}{h_{\text{ур}} \cdot \left(\frac{D_{\text{ср}}}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{\gamma}{2}\right)}} = 48.306 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{\text{д.к.у}} := 600 \text{ МПа}$$

$$\text{Usl}_2 := \begin{cases} \text{"Условие контактной прочности выполняется"} & \text{if } \sigma_{\text{к.у}} \leq \sigma_{\text{д.к.у}} \\ \text{"Условие контактной прочности не выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Usl}_2 = \text{"Условие контактной прочности выполняется"}$$

Расчет веса бандажа:

Примем плотность стали 35:

$$\rho := 7800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Объем кольца бандажа:

$$V := \frac{1}{4} \cdot \left[ D_6^2 - (D_6 - 2h)^2 \right] \cdot b_1$$

где  $b_1$  - высота сечения бандажа, м;

$$V = 62.187 \text{ м}^3$$

Масса бандажа, кг:

$$m := \rho \cdot V$$

$$m = 4.851 \times 10^5 \text{ кг}$$

Вес бандажа, МН:

$$g := 9.8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$$

$$G_{\text{бандажа}} := (m \cdot g) = 4.754 \times 10^6 \text{ Н}$$

Максимальная ширина упорного ролика  $b_{\text{max.yp}}$ :

$$Q_i := 2 \cdot Q \cdot 10^{-6} + 2 \cdot Q_6 = 2.924 \text{ М}$$

$$b_{\text{max.yp}} := 0.59^2 \cdot \frac{E_1 \cdot E_3 \cdot Q_i \cdot \sin(\alpha) \cdot 10}{(E_1 + E_3) \cdot (\sigma_{\text{д.к.у}})^2 \cdot 0.5 \cdot D_6 \cdot \sin\left(\frac{\gamma}{2}\right)} = 0.512 \text{ М}$$

Минимальная ширина упорного ролика:

$$b_{\text{min.yp}} := (D_6 - h_{\text{yp}}) \cdot \tan\left(\frac{\gamma}{2}\right) = 0.833$$

Расчет бандажа на прочность от действия изгибающих моментов

Свободно надетый бандаж при соприкосновении с корпусом в конечном числе точек:

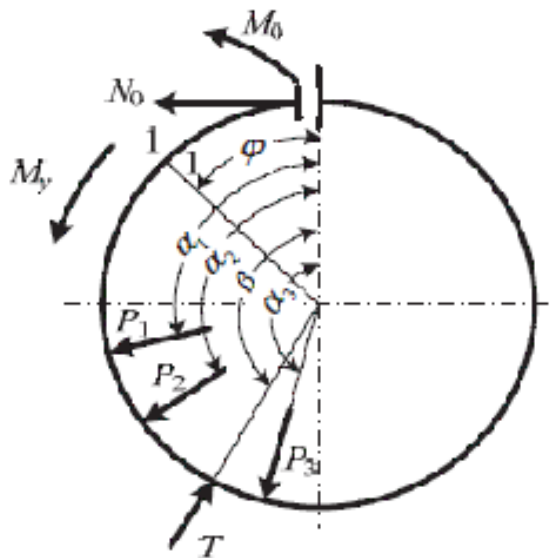


Рисунок 16 – Расчетная схема действующих сил и моментов

В данном случае число башмаков кратно четырем, следовательно, башмаки будут располагаться симметрично относительно вертикального диаметра, тогда:

$$\delta := \frac{(2 \cdot \pi)}{n} = 0.393$$

- угол между соседними башмаками



$$m := \frac{n}{4} = 4 \quad \text{- число башмаков, лежащих в одном квадрате}$$

$j := 1..m$  - номер башмака в нижнем квадрате

$$\theta_1 := \delta$$

$$P_1 := \frac{(4 \cdot Q)}{n} \cdot \cos\left(\theta_1 - \frac{\delta}{2}\right) = 4.414 \times 10^4$$

$$\theta_2 := 2 \cdot \delta$$

$$P_2 := \frac{(4 \cdot Q)}{n} \cdot \cos\left(\theta_2 - \frac{\delta}{2}\right) = 3.742 \times 10^4$$

$$\theta_3 := 3 \cdot \delta$$

$$P_3 := \frac{(4 \cdot Q)}{n} \cdot \cos\left(\theta_3 - \frac{\delta}{2}\right) = 2.5 \times 10^4$$

$$N_0 := \frac{-Q}{2 \cdot \pi \cdot n} \cdot [n \cdot \cot(\delta) + n \cdot (\pi - \beta) \cdot \tan(\beta)] = -1.72 \times 10^4 \quad \text{кН}$$

$$M_0 := \frac{-4Q \cdot R}{n \cdot \pi} \left[ 0.5 \cdot \cot\left(\frac{\delta}{2}\right) + \frac{n}{8 \cos(\beta)} - \frac{\pi}{8} \cdot \cot(\delta) - \frac{\pi}{8} \cdot (\pi - \beta) \cdot \tan(\beta) \right]$$

$$M_0 = 4.07 \times 10^4$$

Расчёт изгибающих моментов проводят по точкам, задаваясь значениями угла  $\phi$  от 00 до 1800 через определённый интервал  $\Delta\phi$ , например, через 100.

$$i := 0..18$$

$$\phi_i := 10 \cdot i \cdot \frac{\pi}{180}$$

Обозначим:

$$M_i := M_0 + N_0 \cdot R \cdot (1 - \cos(\phi_i)) + P_1 \cdot R \cdot \sin(\phi_i - \theta_1) + P_2 \cdot R \cdot \sin(\phi_i - \theta_2)$$

$$M_{\phi_i} := \begin{cases} M_i - P_1 \cdot R \cdot \sin(\phi_i - \theta_1) - P_2 \cdot R \cdot \sin(\phi_i - \theta_2) & \text{if } 0 \leq \phi_i \leq \theta_1 \\ M_i & \text{if } \theta_1 \leq \phi_i \leq \beta \\ M_i - T \cdot R \cdot \sin(\phi_i - \beta) + P_3 \cdot R \cdot \sin(\phi_i - \theta_3) & \text{if } \beta \leq \phi_i \leq \pi \end{cases}$$

$$\phi_i := \phi_i \cdot \frac{180}{\pi}$$

$$M_{\phi_i} =$$

3.286·10 <sup>4</sup>		0
3.391·10 <sup>4</sup>	0	0
3.43·10 <sup>4</sup>	1	10
2.756·10 <sup>4</sup>	2	20
4.961·10 <sup>4</sup>	3	30
7.054·10 <sup>4</sup>	4	40
8.969·10 <sup>4</sup>	5	50
1.065·10 <sup>5</sup>	6	60
1.204·10 <sup>5</sup>	7	70
1.311·10 <sup>5</sup>	8	80
1.381·10 <sup>5</sup>	9	90
1.414·10 <sup>5</sup>	10	100
1.407·10 <sup>5</sup>	11	110
1.211·10 <sup>5</sup>	12	120
6.548·10 <sup>4</sup>	13	130
...	14	140
	15	...

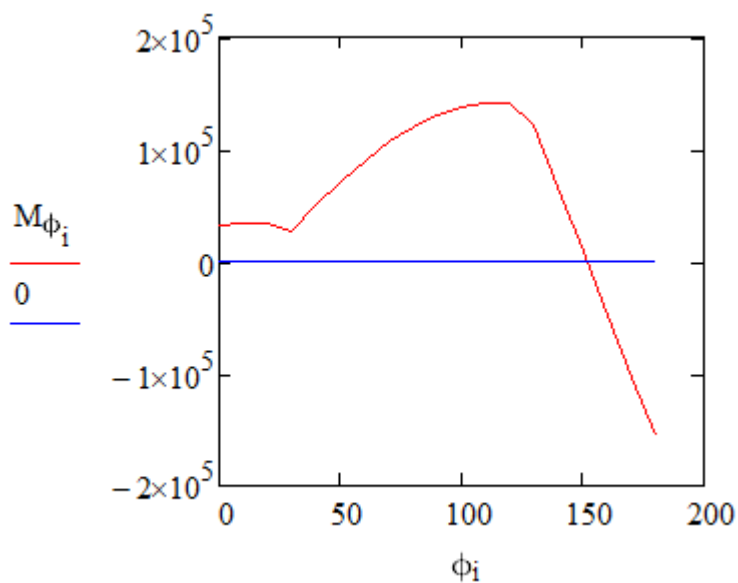


График 1. Эпюра изгибающих моментов

$$M_{\max} := \max(M_{\phi}) = 1.414 \times 10^5 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Определение эквивалентных напряжений в бандаже:

$$M_{\max} := 0.0857 \cdot Q \cdot R = 2.545 \times 10^4 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Расчет высоты бандажа:

При расчете бандажа на изгиб определяют высоту его сечения по формуле:

$$\sigma_u = \frac{M_{\max}}{W} \leq (\sigma)_u$$

Где  $\sigma_u$  и  $(\sigma)_u$  - действующее и допускаемое напряжения изгиба, МПа;

$M_{\max}$  - максимальный изгибающий момент в бандаже, МНм;

$W$  - момент сопротивления сечения бандажа, м<sup>3</sup>;

$b_1$  - ширина бандажа, м.

Высота сечения бандажа:

$$b_1 = 112.5$$

$\sigma_{\text{из.доп}} := 240 \cdot 10^6$  - Па, допускаемый изгибающий момент

$$h := \sqrt{\frac{6 \cdot M_{\max}}{b_1 \cdot 10^{-3} \cdot \sigma_{\text{из.доп}}}} = 0.177 \text{ м}$$

Для прямоугольного сечения бандажа:

$$W := \frac{b_1 \cdot 10^{-3} \cdot h^2}{6} = 5.89 \times 10^{-4} \text{ м}$$

$$\sigma_u := \frac{M_{\max}}{W} = 2.4 \times 10^8 \text{ Па}$$

В процессе регулировки ролика на каждый из двух упорных винтов приходится усилие  $P_{\text{штр.}}$ , которое определяется:

$f := 0.2$  - коэффициент трения между плитами и рамой

$$P_{\text{штр.}} := 0.25 \cdot (Q) \cdot (\tan(\psi) + f) = 8.694 \times 10^4 \text{ Н}$$

Определение эквивалентных напряжений в бандаже:

$$\sigma_{\text{экр}} = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$$

Максимальные и минимальные напряжения выбирают из трех, полученных при расчетах по следующим формулам:

$$\sigma_x := -2 \cdot \mu \cdot \sigma_{.к} \cdot e^{-\gamma}$$

$$\sigma_1 := \sigma_x$$

$$\sigma_y := -\sigma_{.к} \cdot e^{-\gamma} \cdot (1 - \tan(\gamma)) - \sigma_u$$

$$\sigma_2 := \sigma_y$$

$$\sigma_z := -\sigma_{.к} \cdot e^{-\gamma} \cdot (1 + \tan(\gamma))$$

$$\sigma_3 := \sigma_z, \text{ где } \sigma_{.к} - \text{ контактное напряжение;}$$

$\sigma_u$  - максимальные изгибные напряжения, определяемые при расчете бандажей на изгиб;

$\gamma$  - эллиптическая координата, изменяемая от 0 до 1.

Определение главных напряжений в общем виде очень сложно, поэтому его обычно ведут по точкам, задавая эллиптической координате  $\gamma$  ряд значений от 0 до 1, например, через 0,1. Затем рассчитывают эквивалентные напряжения для каждой точки. Наибольшее из эквивалентных напряжений считается расчётным.

$$i := 0..10$$

$$\gamma_i := 0.1 \cdot i$$

$$\sigma_u = 2.4 \times 10^8 \text{ Па}$$

$$\sigma_{.к} = 156.357 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{1i} := -2 \cdot \mu \cdot \sigma_{.к} \cdot e^{-\gamma_i}$$

$$\sigma_{2i} := -\left(\sigma_{.к} \cdot e^{-\gamma_i}\right) \cdot (1 - \tan(\gamma_i)) - \sigma_u \cdot 10^{-6}$$

$$\sigma_{3i} := -\left(\sigma_{.к} \cdot e^{-\gamma_i}\right) \cdot (1 + \tan(\gamma_i))$$

	0
0	0
1	0.1
2	0.2
3	0.3
4	0.4
5	0.5
6	0.6
7	0.7
8	0.8
9	0.9
10	1

 $\gamma =$ 

	0
0	-93.814
1	-84.887
2	-76.809
3	-69.499
4	-62.886
5	-56.901
6	-51.486
7	-46.587
8	-42.154
9	-38.142
10	-34.512

 $\sigma_1 =$ 

	0
0	-396.357
1	-367.283
2	-342.065
3	-320.001
4	-300.497
5	-283.027
6	-267.104
7	-252.245
8	-237.918
9	-223.462
10	-207.938

 $\sigma_2 =$ 

	0
0	-156.357
1	-155.673
2	-153.964
3	-151.663
4	-149.122
5	-146.644
6	-144.517
7	-143.044
8	-142.594
9	-143.679
10	-147.104

 $\sigma_3 =$ 

$$\sigma_{\max_i} := \max\left(\left|\sigma_{1_i}\right|, \left|\sigma_{2_i}\right|, \left|\sigma_{3_i}\right|\right)$$

$$\sigma_{\min_i} := \min\left(\left|\sigma_{1_i}\right|, \left|\sigma_{2_i}\right|, \left|\sigma_{3_i}\right|\right)$$

	0
0	396.357
1	367.283
2	342.065
3	320.001
4	300.497
5	283.027
6	267.104
7	252.245
8	237.918
9	223.462
10	207.938

 $\sigma_{\max} =$ 

	0
0	93.814
1	84.887
2	76.809
3	69.499
4	62.886
5	56.901
6	51.486
7	46.587
8	42.154
9	38.142
10	34.512

 $\sigma_{\min} =$ 

$$\sigma_{\text{эKB}_i} := \sigma_{\max_i} - \sigma_{\min_i}$$

	0
0	302.543
1	282.396
2	265.256
3	250.502
4	237.611
5	226.125
6	215.618
7	205.659
8	195.764
9	185.32
10	173.425

$$\sigma_{\max.\text{экв}} := \max(\sigma_{\text{экв}}) = 302.543$$

$$\sigma_{\text{доп}} := 600 \text{ МПа}$$

Условие прочности:

$$Usl_3 := \begin{cases} \text{"Условие контактной прочности выполняется"} & \text{if } \sigma_{\max.\text{экв}} \leq \sigma_{\text{доп}} \\ \text{"Условие контактной прочности не выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_3 = \text{"Условие контактной прочности выполняется"}$$

## 6.3 Расчет индукционного обогрева

### 6.3.1 Определение геометрических параметров индуктора

Были рассчитаны основные геометрические параметры индуктора, диаметр и длина.

Внутренний диаметр индуктора определяется как [стр. 34, 19]:

$$D_{и} = D_{вн} + 2 * (\Delta_{т} + \Delta_{обм}) \quad (53)$$

где  $D_{вн}$  – внутренний диаметр печи;

$\Delta_{т}$  – толщина стенки печи;

$\Delta_{обм}$  – обмазка печи, изолирующая индуктор от печи (0,004 ÷ 0,010м).

Тогда

$$D_{и} = 2,95 + 2 * (0,025 + 0,007) = 3,014 \text{ м.}$$

Внутренний диаметр магнитопровода (ориентировочно):

$$D_{м} = 1,1 * D_{и} = 3,3154 \text{ м} \quad (54)$$

Для обеспечения достаточного нагрева у концов индуктора при симметричном расположении относительно печи его длину находят по эмпирической формуле:

$$l_{и} = (1,1 \div 1,3) * L, \quad (55)$$

где  $L$  – длина печи.

Тогда

$$l_{и} = 1,2 * 45 = 54 \text{ м.}$$

### 6.3.2 Определение мощностей печи

Активная мощность печи – это общая часть мощности, подводимой и выделяющейся непосредственно в садке. Она зависит от требуемой производительности, времени нагрева, и также от теплосодержания материала. При задании производительности по суточной производительности [стр. 36, 19]:

$$P_{c1} = \frac{N_{\text{сут}} * c_i * 10^3}{860 * 24 * \eta} * \frac{\tau_1 * \tau_2}{\tau_1}, \quad (56)$$

где  $N_{\text{сут}}$  – суточная производительность, т;

$\eta$  – тепловой КПД печи. Для индукционной печи принимается от 0,75 до 0,85;

860 – переводной коэффициент.

Принимаем  $\eta = 0,8$ .

Тогда

$$P_{c1} = \frac{274 * 0,016 * 10^3}{860 * 24 * 0,8} * \frac{2 * 0,5}{2} = 133 \text{ кВт}$$

Производительность по величине осадка:

$$P_{c2} = \frac{G_T * c_i * 10^3}{860 * \tau_1 * \eta}, \quad (57)$$

где  $G_T$  – емкость садки, т.

Объем барабана печи:

$$V_6 = \pi * (D_{\text{вн}})^2 / 4 * L = 3,14 * 2,95^2 / 4 * 45 = 307,416 \text{ м}^3 \quad (58)$$



Объем садки:

$$V_{\text{садки}} = V_6 * \varphi = 307,416 * 0,1 = 30,742 \text{ м}^3 \quad (59)$$

Емкость садки:

$$G_T = \rho_M / V_{\text{садки}} = 1200 / 30,742 = 22,77 \text{ кг} = 0,0228 \text{ т} \quad (60)$$

Тогда

$$P_{c2} = \frac{0,0228 * 0,016 * 10^3}{860 * 2 * 0,8} = 125 \text{ кВт}$$

Принимаем  $P_c = 150$  кВт.

### 6.3.3 Выбор частоты и параметров преобразователя

При расчетах используются такие обозначения как  $\rho_{20}$ ,  $\rho_c$ ,  $\rho_{пл}$  – удельное сопротивление при температурах 20 °С, точки Кюри и температуры плавления соответственно.

Предварительный выбор частоты питающего тока осуществляется для случая, когда расплавившаяся шихта представляет собой сплошной цилиндр с диаметром равным диаметру печи  $D_{вн}$  и с параметрами: удельное сопротивление расплавленного металла  $\rho_{пл}$  и магнитной проницаемостью  $\mu = 1,0$ . Для выбранных условий частота тока в индукторе ориентировочно равна:

$$f = 25 * 10^6 * \frac{\rho_{пл}}{\mu * D_{вн}^2}, \quad (61)$$

где  $\rho_{пл}$  - удельное сопротивление расплавленного металла, Ом·м.

$$f = 25 * 10^6 * \frac{40 * 10^{-8}}{1 * 2,95^2} = 1,15 \text{ Гц}$$

Ближайшая частота машинных преобразователей частоты равна 50Гц.

Проверим величину аргумента  $\frac{r \sqrt{2}}{\Delta_{\vartheta}}$  для этой частоты для наиболее невыгодных параметров. При плавке немагнитной шихты – для момента начала плавки. В этом случае  $\rho = \rho_{20}$ ,  $\mu = 1,0$  и  $d_o = d_{ш}$ .

Глубина проникновения тока:

$$\Delta_{\vartheta} = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu \cdot f}} \quad (62)$$

$$\Delta_{\vartheta} = 503 \sqrt{\frac{6,8 \cdot 10^{-8}}{1 \cdot 50}} = 18,55 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$\frac{r \sqrt{2}}{\Delta_{\vartheta}} = \frac{0,025 \sqrt{2}}{18,55 \cdot 10^{-3}} = 1,9 \leq 3$$

Исходя из данного условия, частота 50 Гц не обеспечивает прогрев шихты. Минимальная частота тока ИТП определяется по формуле

$$\text{при } \frac{r_{ш}\sqrt{2}}{\Delta_{\vartheta}} \geq 3 \quad f_{\min} \geq 4,54 \cdot 10^6 \frac{\rho_{ш}}{\mu \cdot d_{ш}^2}, \text{ Гц}$$

где  $\rho_{ш}$  - удельное сопротивление шихты при худших условиях ( $\rho_{ш} = \rho_{20} = 6,8 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ );

$\mu$  – относительная магнитная проницаемость шихты,  $\mu = 1$ ;

$d_{ш}, r_{ш}$  – средний диаметр и радиус шихты, м.

$$f_{\min} \geq 4,54 \cdot 10^6 \frac{6,8 \cdot 10^{-8}}{1 \cdot 0,05^2} = 123,5 \text{ Гц}$$

Принимаем  $f = 500 \text{ Гц}$  [табл.2, 19].

В качестве источника питания выбраны:

1) преобразователь ВГО-1500-500 с генератором с частотой тока 500 Гц, мощностью 1500 кВт, напряжением 1600/800 В, КПД  $\eta_{\text{ген}} = 0,86$ .

2) электродвигатель мощностью 350 кВт, напряжением 6000/3000 В, 2900 об/мин, КПД  $\eta_{\text{дв}} = 0,927$ .

### 6.3.4 Электрический расчет печи

Был проведен расчет электрических характеристик печной индукционной установки, глубина и настил тока, мощность индуктора, рассчитаны число витков и характеристика трубок и другие.

Глубина проникновения тока в материал загрузки в горячем режиме работы печи ( $\rho = 40 \cdot 10^{-8}$  Ом\*м) [стр. 40, 19]:

$$\Delta = 503 \sqrt{\rho / f}, \quad (63)$$

$$\Delta = 503 \sqrt{40 \cdot 10^{-8} / 500} = 14,23 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

В соответствии с данными рисунка 17 поправочные коэффициенты  $k_{MP}$  и  $k_{MQ} = 1$  и  $P_C = Q_C$ .

Полный коэффициент магнитного рассеивания:

$$k_{MP} = k'_{MP} + \Delta k_{MP} \quad (64)$$

$$\Delta k_{MP} = \frac{3}{4} \cdot \frac{1}{\frac{d_0}{\Delta} - 1}, \quad (65)$$

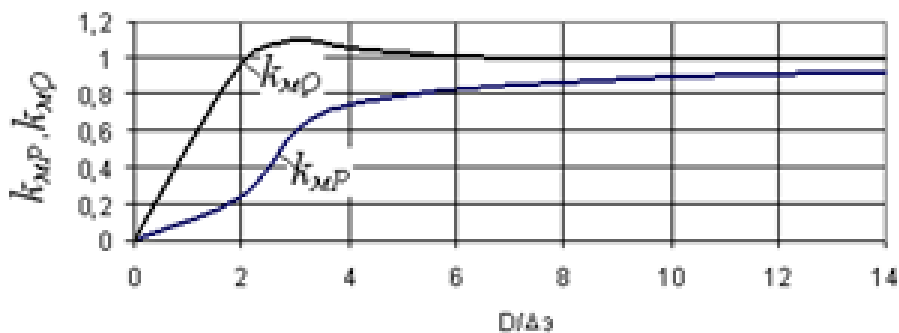


Рисунок 17 – Кривые для определения поправочных коэффициентов при расчете потоков активной  $k_{MP}$  и реактивной  $k_{MQ}$  мощностей, проходящих через наружную поверхность садки нагреваемого материала D

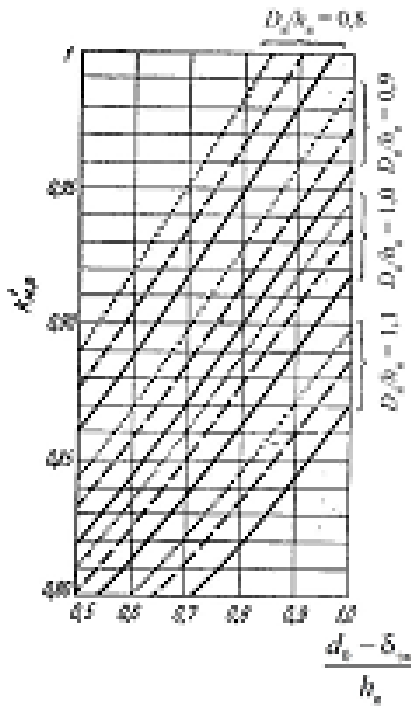


Рисунок 18 – Номограмма для определения коэффициента магнитного рассеивания

Геометрические отношения данного расчета:

$$\frac{h_{и}}{h} = \frac{54}{45} = 1,2 \quad (66)$$

$$\frac{D_{и}}{h_{и}} = \frac{3,014}{54} = 0,056 \quad (67)$$

$$\frac{d_0 - \Delta}{h_{и}} = \frac{2,95 - 0,01423}{54} = 0,054 \quad (68)$$

Из данных рисунка 18 получаем коэффициент магнитного рассеивания  $k_{MP} = 0,875$ .

Тогда

$$\Delta k_{MP} = \frac{3}{4} * \frac{1}{207,3 - 1} = 0,004$$

$$k_{MP} = 0,875 + 0,004 = 0,879$$

Настил тока:

$$I\omega = \frac{400}{k_{MP}} \sqrt{\frac{P_M}{d_0 \cdot h \sqrt{\rho_M \mu_M f \cdot k_{MP}}}}, \quad (69)$$

где  $P_M$  – мощность, выделяемая в металле, кВт; ( $P_M = P_C = 150$  кВт);  
 $f$  – частота питающего тока, Гц ( $f = 500$  Гц).

$$I\omega = \frac{400}{0,879} * \sqrt{\frac{150}{2,95 * 45 * \sqrt{40 * 10^{-8} * 500 * 1}}} = 4,07 * 10^3 \text{ А*В/м}^2$$

Реактивная мощность в материале численно равна активной мощности в нем, т.е.

$$Q_C = P_C = 150 \text{ кВА.}$$

Реактивная мощность в зазоре:

$$Q_3 = 6,2 * 10^{-9} * (I\omega)^2 * f * (d_0)^2 * h * \left[ \left( \frac{D_{и}}{d_0} \right)^2 - 1 \right] \quad (70)$$

$$Q_3 = 6,2 * 10^{-9} * (4,07 * 10^3)^2 * 500 * (2,95)^2 * 45 * \left[ \left( \frac{3,014}{2,95} \right)^2 - 1 \right] =$$

$$882 \text{ кВА}$$

Для определения активной и реактивной мощности в индукторе по данным рисунка 19 находятся величины  $k_{иP}$  и  $k_{иQ}$ .

$$k_{иP} = k_{иQ} = 1 \text{ и } P_{и} = Q_{и}.$$

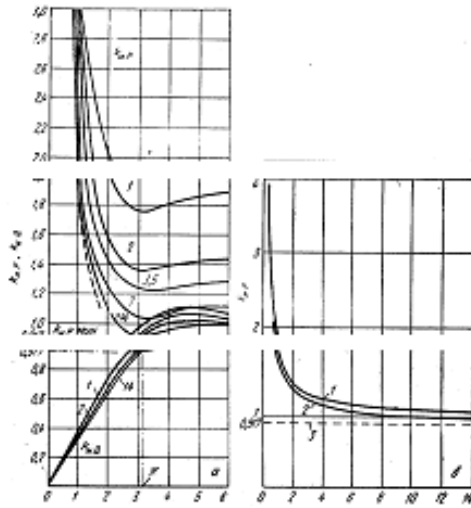


Рисунок 19 – Кривые для определения поправочных коэффициентов  $k_{IP}$  и  $k_{IQ}$

Активная мощность в индукторе:

$$P_{II} = 6,2 \cdot 10^{-6} (I\varpi)^2 D_{II} h_{II} \sqrt{\rho_{II} \cdot f} \cdot k_{IP} \cdot \frac{1}{k_3}, \quad (71)$$

где  $k_{IP}$  - поправочный коэффициент активной мощности, учитывающий кривизну индуктора;

$k_3$  – коэффициент заполнения индуктора,  $k_3 = 0,7 \dots 0,9$ . Принимаем  $k_3 = 0,9$ ;

$\rho_{II}$  - удельное сопротивление материала индуктора (для меди  $\rho_{II} = 2,0 \cdot 10^{-8}$  Ом·м).

Тогда

$$P_{II} = 6,2 * 10^{-6} * (4,07 * 10^3)^2 * 3,014 * 54 * \sqrt{2,0 * 10^{-8} * 500} * 1 * (1/0,9) = 58,73 \text{ кВА}$$

Реактивная мощность в индукторе:

$$Q_{II} = P_{II} = 58,73 \text{ кВА}$$

Общая активная мощность системы «индуктор-металл»:

$$P = P_M + P_{II} = 150 + 58,73 = 208,73 \text{ кВА} \quad (72)$$

Общая реактивная мощность системы «индуктор-металл»:

$$Q = Q_c + Q_z + Q_{и} = 150 + 882 + 58,73 = 1090,73 \text{ кВА} \quad (73)$$

Полная мощность системы «индуктор-металл»:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = 1110,52 \text{ кВА} \quad (74)$$

Ток в индукторе:

$$I = \frac{P_s \cdot 10^3}{U_{и}}, \quad (75)$$

Напряжение выбранного преобразователя 1600/800 В. Чтобы напряжение на индукторе не превосходило номинального напряжения конденсаторов, выберем напряжение преобразователя 1600 В, конденсаторы 500 или 1000 В с соволовой изоляцией, соединенные попарно последовательно. Напряжение на индукторе в таком случае  $U_{и} = 2000$  В. Преобразователь частоты в первый период присоединяется к крайним виткам индуктора, а после расплава – к такому числу витков  $\omega_{ПР}$ , при котором напряжение на полюсах индуктора не превысит 2000 В. Поэтому напряжение на индукторе в первый период  $U_{и} = U_{ПР} = 1600$  В, а ток в индукторе  $I_1$ , во второй период  $U_{и} = 2000$  В, а ток в индукторе  $I_2$ .

$$I_1 = (1110,52 \cdot 10^3) / 1600 = 694,075 \text{ А}$$

$$I_2 = (1110,52 \cdot 10^3) / 2000 = 555,26 \text{ А}$$

Для такого подключения удельное число витков индуктора:

$$\varpi_{1,0} = \frac{(I\varpi)}{I}, = \frac{4,07 \cdot 10^3}{555,26} = 8 \text{ витков/м} \quad (76)$$

Полное число витков индуктора:

$$\omega_{и} = \omega_{1,0} \cdot h_{и} = 8 \cdot 54 = 432 \quad (77)$$



Тогда число витков, присоединяемых к источнику питания во второй период плавки:

$$\varpi_{PP} = \varpi \frac{U_{PP}}{U_{II}}, = 432 * (1600/2000) = 345 \quad (78)$$

Шаг витка:

$$t_B = h_{II} / \omega_{II} = 54 / 432 = 0,125 \text{ м} \quad (79)$$

Изоляционный промежуток между витками:

$$\Delta_{ИЗ} = \frac{U_{II}}{(10...40)\varpi}, = \frac{2000}{25 * 432} = 0,2 \text{ мм} \quad (80)$$

Примем  $\Delta_{ИЗ} = 1$  мм. Тогда высота витка:

$$h_B = t_B - \Delta_{ИЗ} = 125 - 1 = 124 \text{ мм} \quad (81)$$

А коэффициент заполнения индуктора (предварительно принят  $k_3 = 0,9$ ):

$$k_3 = h_B / t_B = 124 / 125 = 0,99 \quad (82)$$

Толщина стенки трубки индуктора определяется из условия минимальных электрических потерь в нем:

$$\Delta_{TP} \geq 1,3 \cdot \Delta_{ИЗ}, \quad (83)$$

$$\Delta_{TP} \geq 1,3 * 1 = 1,3 \text{ мм}$$

Выбираем медную трубку круглого сечения диаметром 100 мм с толщиной стенки 1,5 мм. [74]

Средняя по сечению трубки плотность тока:

$$\delta_{CP} = \frac{I}{\frac{\pi}{4} (d_{TP.H}^2 - d_{TP.B}^2)}, \quad (84)$$

$$\delta_{CP} = \frac{694,075}{\frac{\pi}{4} \cdot (100^2 - 97^2)} = 1,5 \text{ A/мм}^2$$

Электрический КПД системы «индуктор-металл»:

$$\eta_{эл} = \frac{1}{1 + \frac{P_{II}}{P_M}} = 0,72 \quad (85)$$

Для сравнения определяется величина предельного электрического КПД:

$$\eta_{ПР} = \frac{1}{1 + \frac{D_{II} \cdot h_{II}}{d_0 \cdot h \cdot k_s^2 \cdot k_3} \sqrt{\frac{\rho_{II}}{\rho \cdot \mu}}}, \quad (86)$$

$$\eta_{ПР} = \frac{1}{1 + \frac{3,014 \cdot 54}{2,95 \cdot 45 \cdot 0,879^2 \cdot 0,99} \sqrt{\frac{2 \cdot 10^{-8}}{40 \cdot 10^{-8} \cdot 1}}} = 0,7362$$

Естественный коэффициент мощности  $\cos \varphi$  определяется по отношению активной мощности системы к полной мощности системы «индуктор-металл»:

$$\cos \varphi = P / S = 208,73 / 1110,52 = 0,188 \quad (87)$$

Емкость конденсаторной батареи, необходимую для полной компенсации реактивной мощности:

$$C = \frac{Q \cdot 10^9}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot U_K^2}, \quad (88)$$

где  $Q$  – реактивная мощность системы «индуктор-металл», кВА;

$U_K$  – напряжение на конденсаторах, В.

Тогда

$$C = \frac{1090,73 \cdot 10^9}{2 \cdot 3,14 \cdot 500 \cdot 1000^2} = 347,37 \text{ мкФ}$$

Реактивная мощность каждого конденсатора составляет 220 кВА. Каждая из четырех секций конденсатора имеет емкость 14 мкф и рассчитана на 500 В.

При 1000 В секции соединяются попарно последовательно и их мощность составит  $C_1 = (2 \cdot 14) \frac{1}{2} = 14 \text{ мкф}$ .

Потребное количество конденсаторных элементов:

$$n_K = C / C_1 = 347,37 / 14 \approx 25 \text{ шт.} \quad (89)$$

С учетом запаса (2 шт), принимаем  $n_K = 27$  шт с емкостью батареи  $27 \cdot 14 = 378 \text{ мкф}$ .

### 6.3.5 Расчет охлаждения индуктора

Потери теплоты, удаляемые охлаждающей водой, которая циркулирует в индукторе, состоят из активных потерь  $P_{и}$  и теплоты вследствие теплопроводности от горячей садки к индуктору.

Принимаем нейтральную футеровку, для которой коэффициент теплопроводности находится в пределах  $0,75 \div 0,85$  Вт/(м<sup>2</sup>·град). Для средней температуры принимаем  $\lambda = 0,8$  Вт/(м<sup>2</sup>·град). Перепад температур по сечению стенки тигля составляет 350 °С.

Тепловые потери:

$$P_{ТП} = 7,3 \cdot 10^{-3} \cdot \pi \cdot \lambda \cdot h \frac{T_{ВН} - T_{НАР}}{\ln \frac{D_{И}}{d_0}}, \quad (90)$$

где  $D_{И}$  – наружный диаметр индуктора, м;

$T_{ВН} - T_{НАР}$  – перепад температур в стенке печи, °С;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности печи, Вт/(м<sup>2</sup> \* град).

$$P_{ТП} = 7,3 \cdot 10^{-3} * 3,14 * 0,8 * 45 * \frac{350}{\ln \frac{3,014}{2,95}} = 13,46 \text{ кВт}$$

Электрические потери в индукторе равны  $P_{и} = 58,73$  кВт.

Тогда полные тепловые потери на охлаждение:

$$P_{п.охл} = P_{и} + P_{ТП} = 58,73 + 13,46 = 72,19 \text{ кВт} \quad (91)$$

Необходимое количество охлаждающей воды:

$$G_{ОХЛ} = \frac{P_{п.ОХЛ} \cdot 10^{-3} \cdot 3600}{(T_{ВЫХ} - T_{ВХ}) \cdot 4,19}, \quad (92)$$

где  $T_{ВЫХ}$  – температура охлаждающей воды, выходящей из индуктора, °С.

$$G_{\text{охл}} = \frac{72,19 \cdot 10^{-3} \cdot 3600}{(40-15) \cdot 4,19} = 2,5 \text{ м}^3/\text{ч}$$

Проверяется, какое количество тепла может отвести охлаждающая вода. Для определения режима движения рассчитается критерий Рейнольдса:

$$Re = \frac{V_B \cdot d_{\text{ТР.Э}}}{\nu_B}, \quad (93)$$

где  $V_B$  – скорость движения охлаждающей воды в секции, м/с;

$d_{\text{ТР.Э}}$  - эквивалентный внутренний диаметр трубки индуктора, м;

$\nu_B$  – коэффициент кинематической вязкости воды, м<sup>2</sup>/с.

Скорость воды  $V_B$  в индукторе:

$$V_B = \frac{G_{\text{охл}} \cdot 10^{-3}}{3,6 \cdot S_{\text{ТР.В}} \cdot n_{\text{СЕК}}}, \quad (94)$$

где  $S_{\text{ТР.В}}$  – площадь поперечного сечения отверстия трубки индуктора, м<sup>2</sup>;

$n_{\text{СЕК}}$  – количество секций охлаждения.

Практические данные показывают, что скорость движения воды должна составлять не менее 1,5 м/с.

Предварительно количество секций:

$$n_{\text{СЕК}} \geq \frac{V_B}{1,5}, \quad (95)$$

Действительная скорость воды в индукторе при одной секции охлаждения в индукторе и сечении:

$$S_{\text{ТР.В}} = (\pi \cdot (d_{\text{ТР.В}})^2) / 4 = (3,14 \cdot 97^2) / 4 = 7386,065 \text{ мм}^2 = 0,0074 \text{ м}^2 \quad (96)$$

$$S_{\text{ТР.В}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{ТР.В}}^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 84^2}{4} = 201 \text{ мм}^2 = 201 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2;$$

$$V_{B1} = \frac{2,5 * 10^{-3}}{3,6 * 0,0074 * 1} = 0,094 \text{ м/с}$$

Ориентировочно число секций охлаждения индуктора:

$$n_{сек} = 0,094 / 1,5 = 0,06 \quad (97)$$

Принимаем  $n_{сек} = 1$ .

Тогда скорость воды в каждой секции:

$$V_B = V_{B1} / n_{сек} = 0,094 / 1 = 0,094$$

$$T_{CP} = \frac{T_{BX} + T_{БЫХ}}{2} = \frac{40 + 15}{2} = 27,5^{\circ}C \quad (98)$$

$$v_B = 0,85375 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Эквивалентный внутренний диаметр трубки круглого сечения равен действительному внутреннему диаметру  $d_{тр.э} = d_{тр.в} = 97 \text{ мм} = 0,097 \text{ м}$ .

В соответствии с полученными данными:

$$Re = \frac{0,094 * 0,097}{0,85375 * 10^{-6}} = 10\ 680 > 10\ 000,$$

что соответствует турбулентному режиму движению.

Коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha_{T.T} = 0,023 \left( 1 + 3,54 \frac{d_{тр.э}}{D_{II} + d_{тр.э}} \right) \cdot \frac{\lambda_B}{d_{nh}} \left( \frac{3600 \cdot v_B}{a_B} \right)^{0,43} \left( \frac{V_B \cdot d_{тр.э}}{v_B} \right)^{0,8}, \quad (95)$$

Значения коэффициентов теплопроводности  $\lambda_B$  и температуропроводности  $a_B$  выбираются [прил. Б, табл. 23] при температуре  $27,5^{\circ}C$  ( $\lambda_B = 2,21 \text{ кДж/м}^* \text{ч} * \text{град}$ ;  $a_B = 5,26 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{ч}$ ).

$$\alpha_{T.T} = 0,023 * \left( 1 + 3,54 * \frac{0,097}{3,014 + 0,097} \right) * \frac{2,21}{0,097} * \left( \frac{3600 * 0,85375 * 10^{-6}}{5,26 * 10^{-4}} \right)^{0,43} * \left( \frac{0,094 * 0,097}{0,85375 * 10^{-6}} \right)^{0,8} = 2076,5 \text{ кДж}/(\text{м}^2 * \text{ч} * \text{град})$$

Количество теплоты, которое может быть отведено от индуктора охлаждающей водой:

$$P_{OTB} = \alpha_{T.T} \cdot F_{OXЛ} (T_{И} - T_{B}), \quad (99)$$

где  $\alpha_{T.T}$  – коэффициент теплоотдачи, кВт/(м<sup>2</sup> \* К);

$F_{OXЛ}$  – поверхность теплоотдачи индуктора, м<sup>2</sup>;

$T_{И}$  – температура трубки индуктора, °С. Обычно принимают  $T_{И} = 500^{\circ}\text{C}$ .

$T_{B}$  – средняя температура охлаждающей воды, °С.

Поверхность теплоотдачи  $F_{OXЛ}$ :

$$F_{OXЛ} = (0,40...0,45)\pi \cdot d_{TP.Э} \cdot D_{И} \cdot \varpi, \quad (100)$$

где  $\varpi$  – количество витков индуктора.

$$F_{OXЛ} = 0,425 * 3,14 * 0,097 * 3,014 * 432 = 168,5 \text{ м}^2$$

Тогда

$$P_{OTB} = 2076,5 * 168,5 * (500 - 25,5) = 166\,372 \text{ кДж/ч} = 46,21 \text{ кВт}$$

Это значение не превышает действительные потери теплоты  $P_{П.OXЛ} = 72,19 \text{ кВт}$ . Имеем  $P_{OTB} < P_{П.OXЛ}$ .

При этом изменение давления воды в индукторе:

$$\Delta P_{И} = \left( \xi \cdot k_{Ш} \frac{\pi \cdot D_{И}}{d_{TP.Э}} + \xi_{ПОВ} \right) \varpi \frac{V_B^2}{2 \cdot g}, \quad (101)$$

где  $\xi$  – коэффициент трения, зависящий от критерия Рейнольдса;

$k_{Ш}$  – коэффициент увеличения сопротивления, вызванный шероховатостью внутренней поверхности трубки;

$\xi_{ПОВ}$  – коэффициент местного сопротивления;

$g$  – ускорение силы тяжести,  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ .

Для коэффициента трения  $\xi$  при турбулентном движении используют формулу Никурадзе:

$$\xi = 0,032 + \frac{0,221}{\text{Re}^{0,237}}, = 0,032 + \frac{0,221}{10680^{0,237}} = 0,0565 \quad (102)$$

Коэффициент  $k_{\text{ш}}$  учитывает изменение шероховатости внутренней поверхности трубок в процессе эксплуатации. Обычно  $k_{\text{ш}} = 1,8 \dots 2,5$ . Принимаем равным 2,5.

Коэффициент сопротивления повороту струи  $\xi_{\text{пов}} = 0,1132$  (для критерия Рейнольдса  $\text{Re} = 10680$  и отношения  $D_{\text{и}}/d_{\text{тр.э}} = 3,014/0,097$  рассчитываем, интерполируя из [прил. Б, табл. 22]).

Тогда

$$\Delta P_{\text{и}} = (0,0565 * 2,5 * \frac{3,14 * 3,014}{0,097} + 0,1132) * 432 * \frac{0,094^2}{2 * 9,81} = 2,7 \text{ мм вод. ст.}$$

По практическим данным величина перепада давления не должна превышать 20 мм вод. ст. Т.е. количество секций охлаждения:

$$m_{\text{сек}} \geq n_{\text{сек}} \sqrt[3]{\frac{\Delta P_{\text{ин}}}{20}}, \quad (103)$$

$$m_{\text{сек}} \geq 1 * \sqrt[3]{\frac{2,7}{20}} = 0,51 \approx 1 \text{ шт.}$$



## **Результаты проведенной разработки**

С учетом использования аппарата в крупнотоннажном производстве, для сублимации титаномагнетитового концентрата была выбрана барабанная печь. В разделе «Механический расчет оборудования» были рассчитаны основные конструкционные параметры печи, а также шнекового узла с валом-гранулятором, подающего обрабатываемую смесь в барабан.

В качестве способа обогрева был выбран косвенный нагрев материал через стенки барабанной печи с внешней стороны. Эта новая разработка позволяет с меньшими экономическими затратами эффективно использовать исходное сырье для получения требуемых продуктов с максимальным коэффициентом выхода.

## **7. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

### **7.1 Потенциальные потребители результатов исследования**

Предметом исследования в данной работе является установка для сублимации гексафторсиликат аммония  $(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6$ . Но по итогу всего технологического процесса имеется 12 разных продуктов. Продуктом на выходе из исследуемой барабанной печи является  $\text{MgF}_2$ , который составляет 0,96% от всего производства.

*Продукт:*  $\text{MgF}_2$ .

*Целевой рынок:* различные виды производства флюсов, стекол, керамики, эмалей, катализаторов, смесей для получения искусственной слюны и асбеста, где  $\text{MgF}_2$  является компонентом; для изготовления линз и призм в специальных оптических системах.

## 7.2 SWOT-анализ

Качественный подход к описанию рисков заключается в детальном и последовательном рассмотрении содержательных факторов, несущих неопределенность, и завершается формированием причин основных рисков и мер по их снижению. Одной из методик анализа сильных и слабых сторон предприятия, его внешних благоприятных возможностей и угроз является SWOT-анализ (табл. 7) [стр. 17, 59].

Табл. 7 – SWOT-анализ

	<b>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</b> С1. Заявленная экономичность и энергоэффективность технологии С3. Более низкая стоимость производства по сравнению с другими технологиями.	<b>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</b> Сл1. Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров по работе с оборудованием
<b>Возможности:</b> В1. Создание новых технологий получения целевого продукта В2. Развивающаяся конкуренция В3. Сокращение безработицы		1. Повышение квалификации кадров
<b>Угрозы:</b> У1. Отсутствие спроса на новые технологии производства У2. Развитая конкуренция технологий производства	1. Продвижение новой технологии с целью появления спроса 2. Применение технологии в других областях	1. Повышение квалификации кадров 2. Привлечение новых заказчиков 3. Дефицит молодых специалистов 4. Выход из строя производственного оборудования

### 7.3 Расчет себестоимости готовой продукции по действующему производству

#### Расчет годового фонда заработной платы цехового персонала

1. Расчет численности персонала (табл. 8) [стр.5, 60]:

- основных рабочих;
- вспомогательных рабочих;
- ИТР;
- служащих;
- МОП.

Табл. 8 – Расчет численности персонала

Наименование должности	Категория	Тарифный разряд	Число штатных единиц	Кол-во смен в сутках
Главный технолог	ИТР	Высшее	1	1
Механик установки	ИТР	Высшее	1	1
Энергетик установки	ИТР	Высшее	1	1
Инженер КИП и АСУ	ИТР	Высшее	1	1
<b>Итого:</b>			<b>4</b>	
Старший оператор	Производственный рабочий	6 разр.	4	2
Оператор установки	Производственный рабочий	5 разр.	9	2

Помощник оператора	Вспомогательный рабочий	4 разр.	4	2
<b>Итого:</b>			<b>17</b>	
Дежурный слесарь по ремонту оборудования	Ремонтный персонал	4 разр.	4	2
Дежурный слесарь-электрик	Ремонтный персонал	4 разр.	4	2
Дежурный слесарь КИП	Ремонтный персонал	4 разр.	4	2
<b>Итого:</b>			<b>12</b>	
<b>Итого:</b>			<b>33</b>	

2. Расчет баланса эффективного годового времени одного среднесписочного работника (табл. 9).

Табл. 9 – Примерный баланс рабочего времени одного среднесписочного рабочего

Наименование затрат рабочего времени	Дни	Часы
Календарное время	365	
Номинальный фонд рабочего времени	365	
Планируемые невыходы:		
• очередные и дополнительные отпуска	36	
• невыходы по болезни	3	
• декретные отпуска	-	
• отпуск в связи с учебой без отрыва от производства	-	
• выполнение гос. обязанности	3	
<b>Эффективный фонд рабочего времени</b>	<b>323</b>	<b>7752</b>

3. Количество выходных дней в году, ночных смен определяется из графика сменности (табл. 10)

Табл. 10 – График сменности

Номер смены	Часы работы	Дни месяца															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	0 - 12	А	А	А	А	Б	Б	Б	Б	В	В	В	В	Г	Г	Г	Г
2	12 – 24	В	В	В	Г	Г	Г	Г	А	А	А	А	Б	Б	Б	Б	Б
Отдых		БГ	БГ	БГ	БВ	АВ	АВ	АВ	ВГ	БГ	БГ	БГ	АГ	АВ	АВ	АВ	АВ

Расчет годового фонда зарплаты ИТР, служащих и МОП производится на основании их окладов согласно штатному расписанию.

4. Общий фонд заработной платы рабочих за год:

$$З_{\text{год}} = З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}},$$

где  $З_{\text{осн}}$  – основной фонд заработной платы рабочих, тыс. руб.;

$З_{\text{доп}}$  – дополнительный фонд заработной платы рабочих, тыс. руб.

Основной фонд заработной платы для рабочих повременников:

$$З_{\text{осн}} = З_{\text{тар}} + \text{Пр} + Д_{\text{н.вр}} + Д_{\text{пр.дни}} + Д_{\text{бриг}},$$

где  $З_{\text{тар}}$  – тарифный фонд заработной платы, тыс. руб.;

Пр – оплата премий, тыс. руб.;

$Д_{\text{н.вр}}$  – доплата за работу в ночное время, тыс. руб.;

$Д_{\text{пр.дни}}$  – доплата за работу в праздничные дни, тыс. руб.;

$Д_{\text{бриг}}$  – доплата не освобожденным бригадирам, тыс. руб.

Тарифный фонд заработной платы:

$$З_{\text{тар}} = \sum Ч_{\text{сп}} * Т_{\text{ст}} * Т_{\text{эф.раб}},$$

где  $Ч_{\text{сп}}$  – списочная численность рабочих данного разряда, человек;

$Т_{\text{сп}}$  – дневная тарифная ставка данного разряда, руб.

Размер премий принимаем равным 10% от тарифного фонда заработной платы.

Дополнительная заработная плата:

$$З_{\text{доп}} = (D_{\text{н}} * Z_{\text{осн}}) / T_{\text{эфф}} \cdot$$

Фонд дополнительной заработной платы принимаем равным 10% от фонда основной заработной платы. Здесь также учитывается доплата по районному коэффициенту  $K = 1,3$ .

По отношению к тарифному фонду заработной платы доплата за ночные составит 40%.

## 7.4 Расчет затрат на производство продукции

Технологией в данной работе является фторидная переработка титаномагнититового концентрата. Данная руда является уже готовым сырьем и не входит в графу расходов.

### Расчет годовой потребности в сырье и материалах

Определение затрат на сырье и материалы производим исходя из принятого объема производства, удельных норм расхода сырья и материалов и планово-заготовительных цен.

Табл. 11 – Расчет годовой потребности в сырье и материалах

Наименование сырья	Ед. изм.	Цена, тыс. руб.	Расход, т		Сумма затрат, тыс. руб.	
			На единицу готовой продукции	На весь объем производства	На единицу готовой продукции	На весь объем производства
NH <sub>4</sub> F	т	48	64,62	169 830,65	3101,93	8 151 871,2
H <sub>2</sub> O	т	0,038	14,23	37 384,7086	0,54	1420,62
C	т	5	3,16	8307,713	15,81	41 538,565

### Расчет затрат на электроэнергию

$$Z_{\text{эн.}} = T_3 \cdot E_{\text{об.}}$$

где  $T_3$  – стоимость 1 кВт·ч электроэнергии, руб.;

$E$  – энергоемкость процесса (суммарная в год), кВт.

$$Z_{\text{эн.}} = 0,974 \cdot 281\,310\,000 = 273\,995\,940 \text{ руб.}$$



## Расчет амортизационных отчислений

Для расчета амортизационных отчислений необходимо учесть:

- полную стоимость зданий;
- полную стоимость оборудования;
- нормы амортизационных отчислений.

Табл. 12 – Расчет амортизационных отчислений

Наименование основных средств	Кол-во, шт.	Стоимость, тыс. руб.	Норма амортизации, %	Годовые амортизационные отчисления, тыс. руб.
1. Здания				
1.1.Цех по производству	1	5000	5	250
1.2.Операторная	1	6000	5	300
<b>Итого:</b>				<b>550</b>
2. Оборудование				
2.1. Шнековый питатель	3	100	10	30
2.2. Барабанная печь	3	250	10	75
2.3. Пиролизная установка	1	50	10	5
2.4. Циклон	3	10	10	3
2.5. Аппарат для восстановления	1	50	10	5
<b>Итого:</b>				<b>118</b>
<b>Итого общее:</b>				<b>668</b>

По полученным расчетам производим калькуляцию себестоимости и реализации продукции при заданном объеме всех продуктов (274 223,34т/год). Результаты представлены в таблице 13.

Табл. 13 – Калькуляция себестоимости на производство и реализацию продукции

Наименование статьи расходов	Ед. измерения	Затраты тыс. руб.	
		На 1 т.	На N год
1. Сырье	тыс. руб.	29,88	8 194 830,38
2. Энергия на технологические нужды	тыс. руб.	0,99	273 995,94
3. ЗП основных производственных рабочих	тыс. руб.	0,06	16 532,00
4. Отчисления на СН (30%)	тыс. руб.	0,02	4959,6
<b>Итого условно-переменных издержек</b>	<b>тыс. руб.</b>	<b>30,95</b>	<b>8 491 317,92</b>
5. Общепроизводственные накладные расходы	тыс. руб.		
5.1. РСЭО:	тыс. руб.		
- Амортизация оборудования	тыс. руб.	0,0024	668,00
- Ремонт оборудования	тыс. руб.	0,043	11680,00
- ЗП ремонтного персонала	тыс. руб.	0,056	15250,00
- Отчисление на соц. нужды ремонтного персонала (30%)	тыс. руб.	0,017	4575,00
5.2. ЗП ИТР	тыс. руб.	0,046	12640,00
- Отчисление на соц. нужды ИТР (30%)	тыс. руб.	0,014	3792,00

5.3.3П вспомогательного персонала	тыс. руб.	0,018	4878,00
- Отчисление на соц. нужды вспомогательного персонала (30%)	тыс. руб.	0,0053	1463,40
5.4 Прочие накладные расходы	тыс. руб.	0,91	250 000,00
<b>Итого условно-постоянных издержек</b>	<b>тыс. руб.</b>	<b>1,11</b>	<b>434 708,4</b>
<b>Цеховая (производственная) себестоимость (1+2+3+4+5)</b>	<b>тыс. руб.</b>	<b>32,06</b>	<b>8 491 317,92</b>
6. Управленческие расходы (5% от цеховой себестоимости)	тыс. руб.	1,6	424 565,896
<b>Заводская себестоимость (цеховая себестоимость + стр.6)</b>	<b>тыс. руб.</b>	<b>33,66</b>	<b>8 915 883,82</b>
7. Коммерческие расходы (1% от заводской себестоимости)	тыс. руб.	0,3366	89 158,84
<b>Полная себестоимость (заводская себестоимость + стр.7)</b>	<b>тыс. руб.</b>	<b>33,99</b>	<b>9 005 042,66</b>
<b>Условно-переменные издержки</b>	<b>тыс. руб.</b>	<b>30,95</b>	<b>8 491 317,92</b>
<b>Условно-постоянные издержки</b>	<b>тыс. руб.</b>	<b>1,11</b>	<b>434 708,4</b>

### Определение цены готовой продукции

Цена продукта определяется по формуле:

$$Ц = C * (1 + P/100),$$

где С – полная себестоимость единицы готовой продукции;

Р – рентабельность продукции (25 %).

$$Ц = 33,99 * 1,25 = 42,49 \text{ тыс. руб./т.}$$

## Анализ безубыточности по действующему производству

Цель анализа – определение точки безубыточности, т.е. минимального объема продаж, начиная с которого предприятие не несет убытков.

1) Определение точки безубыточности аналитическим способом:

$$Q_{кр} = \frac{Изд_{пост}}{Ц_{1гп} - Изд_{пер}}$$

$$Q_{кр} = 434\,708,4 / (42,49 - 30,95) = 37\,669,71 \text{ т/год}$$

2) Определение точки безубыточности графическим способом:

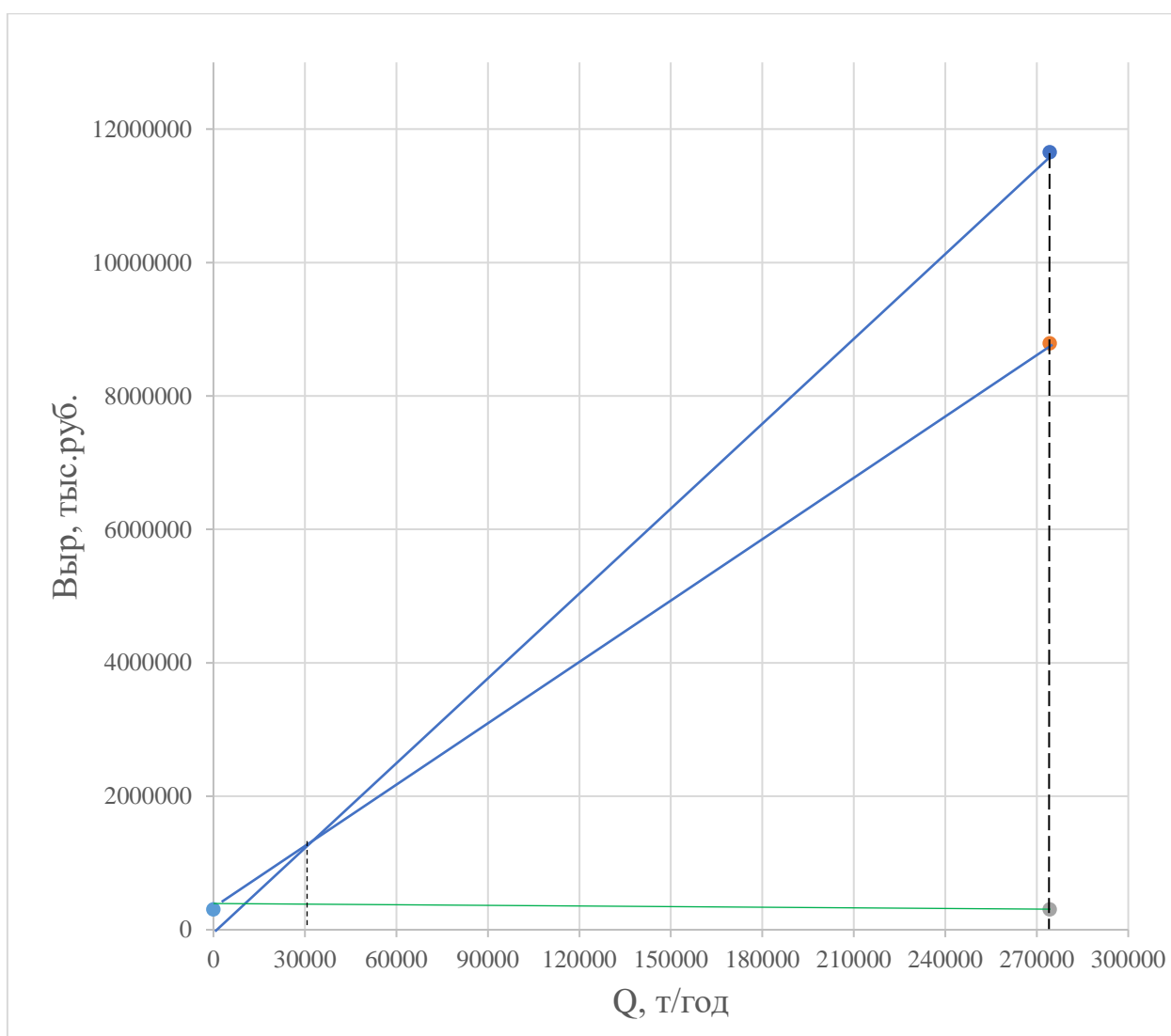


Рисунок 20 – График безубыточности

По графику безубыточности определяется  $Q_{кр} = 35000$  т/год.

## 7.5 Определение технико-экономических показателей

Определение технико-экономических показателей происходит только для одного из двенадцати продуктов производства –  $MgF_2$  (2628 т/год).

Табл. 14 – Технико-экономические показатели

Наименование показателя	Ед. изм.	Плановый год
1. Объем производства	т	2628
2. Объем продаж	т	2628
3. Цена одной тонны	тыс. руб.	42,49
4. Выручка от продажи (2*3)	тыс. руб.	111 663,72
5. Суммарные издержки	тыс. руб.	89 260,26
5.1. Издержки условно-переменные	тыс. руб.	84 913,18
5.2. Издержки условно-постоянные	тыс. руб.	4347,084
6. Операционная прибыль (4-5)	тыс. руб.	22 403,46
7. Налог на прибыль (6*20%)	тыс. руб.	4480,69
8. Чистая прибыль (6-7)	тыс. руб.	17 922,77
9. Себестоимость 1 тонны	тыс. руб.	33,99
10. Стоимость основных средств	тыс. руб.	121,8

## 8. Социальная ответственность

### Введение

В данной дипломной работе рассматривается установка для сублимирования гексафторосиликат аммония  $(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6$ . Потенциальными потребителями могут быть любые производства, где процесс сублимации имеет место быть и является частью технологии.

Основное оборудование представляет из себя индукционную барабанную печь для сублимации рудной смеси и шнековый питатель этой печи. Данная печь имеет диаметр равный 3 м и длину 45 м. Большие размеры устройства вынуждают грамотно подойти к его установке в производственных условиях и обеспечению комфортными рабочими условиями, что прописано в эргономических требованиях далее.

Для разработки и запуска производства нужно обязательное изучение всей документации, законов, правил и рекомендаций, относящихся к строительству, эксплуатации, а также учитывание чрезвычайных событий (ЧС).

В разделе «Социальная ответственность» обозначаются ключевые моменты для конкретного диплома и конкретного технологического процесса.

## **8.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**

Охрана труда (ОТ) в России рассматривалась как одно из важнейших социально-экономических, санитарно-гигиенических и экологических мероприятий, направленных на обеспечение безопасных и здоровых условий труда.

Основными законодательными документами, лежащими в основе трудового законодательства и ОТ, являются:

Конституция РФ (ст. 7 п 2 «В РФ охраняется труд и здоровье людей...», ст. 37 п.3. «Каждый человек имеет право на безопасный труд...», ст.181 «Об основах охраны труда в Российской федерации»).

В трудовом кодексе РФ сказано, что государство заботится об улучшении условий и охране труда на предприятиях. Каждый работник имеет право на условия, отвечающие требованиям безопасности и гигиены, а администрация обязана внедрять современные средства безопасности, предупреждающие возникновение профессиональных заболеваний рабочих и служащих.

При проектировании цеха для обеспечения дальнейшей безопасности производства и рабочего персонала следует учесть следующие характеристики опасностей, имеющих место быть на данном производстве:

- опасность поражения химически агрессивными веществами;
- опасность поражения, электрическим током;
- взрыво- и пожароопасность;
- возможность получения механических травм.

Отдельного внимания требуют эргономические требования. Они устанавливаются к оборудованию производства, которое связано с рабочими в процессе монтажа, ремонтов и самой эксплуатации [38].

Входящие в конструкцию производственного оборудования различные специальные средства (ограждения, вентиляция, экраны и др.), обеспечивающие контроль опасных и вредных факторов производства, не должны затруднять работу персонала. Конструкция оборудования должна обеспечивать нагрузку на рабочего, при которой энергозатраты организма за смену не превышают 1046,7 кДж/ч (250 ккал/ч).

Между человеком и системой управления машиной предусмотреть оптимальный уровень автоматизации, для обеспечения функциональности работы с учетом безопасности рабочих и облегчения тяжести труда.

Требования к рабочему месту должны быть обязательно, а именно – рабочее место должно обеспечивать комфортные условия для выполнения работы в нужной позиции (сидя и/или стоя). Позиция работы выбирается исходя из вида работы и ее физической тяжести, размеров рабочей зоны и необходимости смены положения в процессе, а также учитывая особенности технологические (ведение записей, наблюдение или иные физические действия).

Контроль выполнения эргономических требований осуществляется в обязательном порядке на стадиях проектирования, изготовления, ремонта и эксплуатации производственного оборудования. Происходят данные проверки всеми возможными методами: расчетными, инструментальными и экспертными.



## 8.2 Производственная безопасность

Как и на любом производстве, существует ряд вредных или же опасных факторов, которые могут возникать при разработке и эксплуатации изучаемого промышленного оборудования. Перечень этих пунктов собран и представлен ниже в таблице 15 [39].

Табл. 15 – Возможные опасные и вредные факторы

Факторы	Этапы работ			Нормативные документы
	Разработка	Изготовление	Эксплуатация	
1. Высокая температура материальных объектов производственной среды	+	+	+	ГОСТ 12.4.011-99 Средства защиты работающих.
2. Раздражающее влияние $\text{NH}_4\text{F}$		+	+	ГОСТ 4518-75 Аммоний фтористый. Технические условия. ГОСТ 12.4.011-99 Средства защиты работающих.

3. Повышенный уровень шума	+	+	+	ГОСТ 12.1.029-80 Средства и методы защиты от шума. ГОСТ 12.1.003-2014 ШУМ. Общие требования безопасности. СП 51.13330-2011 Защита от шума. ГОСТ 12.4.011-99 Средства защиты работающих.
4. Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека	+	+	+	ГОСТ 12.1.019-2017 Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты. ГОСТ 12.1.030-81 Электробезопасность. Защитное заземление, зануление. ГОСТ 12.4.011-99 Средства защиты работающих.
5. Взрыво- и пожароопасность цеха	+	+	+	ГОСТ 12.4.011-99 Средства защиты работающих.

### 8.2.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов

Фактор №1: Высокая температура материальных объектов производственной среды.

Источником возникновения данного фактора является оборудование производства, а именно барабанные печи.

Несоблюдение техники безопасности может вызвать ожоги тканей организма человека.

Для минимизации воздействия высоких температур от барабанных печей обязательно применения средств индивидуальной защиты (СИЗ) и средств коллективной защиты (СКЗ) в виде устройств: автоматического контроля и сигнализации; оградительные; термоизолирующие; дистанционного управления; знаков безопасности.

Фактор №2: Раздражающее влияние  $\text{NH}_4\text{F}$

Источником возникновения этого фактора является непосредственно  $\text{NH}_4\text{F}$  – один из исходных веществ технологической цепи.

При несоблюдении норм данное соединение воздействует раздражающе на глаза и кожу человека. Фтористый аммоний при контакте с парами воды гидролизует, образуя очень агрессивную плавиковую кислоту. Эта кислота очень агрессивна, ядовита, при попадании на кожу вызывает опасные ожоги.

Для исключения воздействия фтористого аммония на человека необходимы в обязательном порядке СИЗ (резиновые перчатки, очки и др.) и СКЗ в виде устройств: оградительных; автоматического контроля и сигнализации; герметизирующих; для вентиляции и очистки воздуха; для удаления токсичных веществ; дистанционного управления; знаков безопасности.

Фактор №3: Повышенный уровень шума.

Источником возникновения данного фактора является оборудование производства.

Повышенный уровень шума вызывает невротоподобное состояние у людей, ухудшает слуховую чувствительность.

Для минимизации вредного воздействия этого фактора на человека обязательно использование СИЗ (беруши, наушники и др.) и СКЗ в виде устройств: оградительных; звукоизолирующих звукопоглощающих; автоматического контроля и сигнализации; дистанционного управления; знаков безопасности.

Фактор 4: Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека.

Источником возникновения данного фактора является оборудование производства, работающее от электрической цепи (индукционная барабанная печь, шнековый питатель, скруббер и др.).

Для исключения чрезвычайных происшествий (ЧП) обязательно использование СИЗ и СКЗ в виде: оградительных устройств; автоматического контроля и сигнализации; изолирующих устройств и покрытий; устройств защитного заземления и зануления; устройств автоматического отключения; устройств выравнивания потенциалов и понижения напряжения; устройств дистанционного управления; предохранительных; молниеотводов и разрядников; знаков безопасности.

Фактор 5: Взрыво- и пожароопасность цеха.

Цех данного производства относится к помещениям класса А, так как фтористый аммоний относится к 8 классу опасности. Нельзя допускать нагревания или соприкосновения с открытым огнём.  $\text{NH}_4\text{F}$  разлагается при разогреве ( $168^\circ\text{C}$ ) или при сжигании с образованием токсичных и едких паров, в том числе фтористого водорода, оксидов азота и аммиака, реагирует с трифторидом хлора с опасностью взрыва. Для исключения возможных трагических последствий обязательно использование СИЗ, СКЗ и выполнение всех правил по документации.

### 8.3 Экологическая безопасность

Борьба за экологию – вопрос, которого не может не касаться химическая промышленность. Вопрос о химическом заражении и загрязнении окружающей среды решается направлением реагентов на замкнутый цикл, надежной очисткой воздуха, выходящего из производственного помещения.

При переработке фтористого натрия наиболее вероятно химическое воздействие на окружающую среду. Химическим загрязнением являются выбросы в атмосферу отработанных технологических газов, неуловимых обычной системой. Для таких необходимы «тонкие» системы отчистки.

При выборе площадки для строительства следует учитывать «розу ветров», рельеф местности и условия строительства на данной территории, с целью наименьшего загрязнения важных народнохозяйственных объектов и населенных пунктов.

Для борьбы с загрязнением должны быть применены следующие мероприятия:

- 1) организация технологического процесса, исключая выброс газа и пыли в атмосферу;
- 2) надежная герметизация оборудования.
- 3) организация эффективной системы очистки выходящих газов в местах специализированного выброса.

При оценке последствий воздействия на экологию важное место занимают цифры предельно допустимых концентраций (ПДК) веществ, о которых идет речь. В соответствии с требованиями, содержание вредных примесей в атмосферном воздухе и водоемах не должно вызывать патологических реакций в организме человека или приводить к заметным воздействиям на флору и фауну. Важно, что ПДК подразумевает концентрацию вещества уже в воздухе, а не содержание его в выбросы производства.

В России приняты два вида нормативов атмосферных загрязнений – максимально разовые и среднесуточные ПДК. Первые – для предохранения населения от неблагоприятных реакций при кратковременном воздействии токсичных веществ во вдыхаемом воздухе. Среднесуточные предупреждают вредное влияние на население атмосферных загрязнений при их длительном вдыхании.

Химическим веществом, за концентрацией которого нужно следить в данном техническом производстве, является аммиак (табл. 16, табл. 17) [52] [53].

Табл. 16 – ПДК в воздухе рабочей зоны

Наименование вещества	Формула	Величина ПДК, мг/м <sup>3</sup>	Преимущественное агрегатное состояние в воздухе в условиях производства	Класс опасности
Аммиак	NH <sub>3</sub>	20	п	4

Табл. 17 – ПДК в воздухе городских и сельских поселений

Наименование вещества	Формула	ПДК, макс. разовая, мг/м <sup>3</sup>	ПДК, среднесуточная, мг/м <sup>3</sup>	Класс опасности
Аммиак	NH <sub>3</sub>	0,2	0,04	4

При работе с данным соединением следует применять СИЗ, соблюдать правила личной гигиены, не допускать попадания препарата вовнутрь организма и на кожу

Помещения, где проводится работа с аммиаком, оборудованы общей приточно-вытяжной вентиляцией. Контроль содержания вредных веществ в воздухе и их концентраций систематически проводится санитарными органами. Для 4 класса опасности проверки проводятся не реже 1 раза в квартал.

## 8.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Чрезвычайное происшествие на то и чрезвычайное, что его не ждут и не ожидают. Поэтому к возможным ситуациям можно отнести все, которые только могут быть – техногенные, природные, биологические, экологические.

Самым же стоящим внимания является взрыво- и пожароопасность.

Цех относится к помещениям класса А, так как в результате некоторой реакции выделяется фтороводород, его взаимодействие с огнем или искрой взрывоопасно. Поэтому электрооборудование в отделении применяется в обычном исполнении с повышенной герметичностью. Так как некоторое оборудование сделано из стали X18H10T, материалов, способных гореть, то отделение переработки относится к зданиям I категории. Во избежание возникновения пожара необходимо соблюдать следующие правила:

- запрещается пользоваться органическими смазочными материалами;
- соблюдать герметичность аппаратов, не допускать смешения газовой смеси с парами воды;
- не допускать перегрузок токоведущих частей;
- не загромождать помещение и проходы к аппаратам посторонним оборудованием и материалами, способными гореть;
- курить только в специально отведенных местах;
- обеспечить наличие в помещениях средств пожаротушения: углекислотные огнетушители ОУ-2, ОУ-5; порошковые огнетушители ОПС-6, ОПС-10, асбестовое полотно.

Мероприятия по предотвращению возникновения пожаров и взрывов зависят от слаженности персонала и соблюдения техник безопасности.

В случае возникновения пожара необходимо немедленно эвакуировать весь персонал из цеха и сообщить пожарной команде. Немедленно отключить подачу газовой смеси, отключить ток, удалить находящиеся вблизи огня горючие и огнеопасные материалы, охладить место возгорания струей из огнетушителя. Необходимо предусматривать автоматическое отключение системы по аварийному режиму.

Меры противопожарной безопасности:

- исключения применения пожаро- и взрывоопасных веществ, либо снижение их доли;
- автоматизация и механизация процесса, своевременный контроль технологической аппаратуры;
- строгое соблюдение технологического режима;
- использование электрооборудования в закрытом исполнении;
- административно-режимные мероприятия (запрещение открытого огня);
- установка звуковой и световой сигнализации;
- установка на пожароопасных участках средств пожаротушения;
- обучение персонала действиям в условиях пожара.



## Заключение

В представленной диссертационной работе была проведена работа по разработке принципиально новой барабанной вращающейся печи для сублимации гексафторосиликата аммония в процессе фтор-аммонийной обработки титаномагнетитового концентрата. Была изучена тема индукционного обогрева в промышленности и, соответственно, рассчитаны все конструкционные параметры печи и ее внешнего индукционного обогрева.

В разделе «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережения» был проведен SWOT анализ, рассчитана себестоимость одного из продуктов, найдены основные технико-экономические характеристики, построен график безубыточности.

В разделе дипломной работы «Социальная ответственность» была написана очень важная часть, так как она касается не столько грамотной работы оборудования, сколько самого главного – безопасности людей. Были рассмотрены все возможные вредные и опасные факторы производства, описаны меры устранения и предотвращения ЧП. Также прописаны пункты правовых норм и экологической безопасности.

Данная разработка имеет большую значимость, может быть реализована на самом деле и найдет широкое применение не только во фтор-аммонийной обработке титаномагнетитового концентрата, но и в других промышленных крупнотоннажных процессах. Имея ввиду безопасную, качественную и экономически выгодную работу данной барабанной печи, она может иметь большую значимость в промышленности.

## Список использованных источников

- 1) Борисенко Л. Ф., Делицын Л. М., Полубабкин В. А., Усков Е. Д. Комплексное использование титаномагнетитовых руд. – М., 1997. – 65 с.: ил.
- 2) СТО ТПУ 2.5.01-2014
- 3) Карелин В. А., Карелин А. И. Фторидная технология переработки концентратов редких металлов: Монография / Отв. ред. В. А. Матюха. – Томск: Изд-во НТЛ, 2004. – 221 с.: ил.
- 4) Романков П. Г., Фролов В. Ф., Флисюк О. М. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи): Учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., испр. – СПб.: ХИМИЗДАТ, 2009. – 544 с., ил.
- 5) Беляев В.М. Расчет и проектирование средств защиты. Беляев В. М. Миронов В.М., Сечин А.И. – Томский политехнический университет. – 2-е изд. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 184 с.
- 6) Борисов В. А., Дьяченко А. Н., Кантаев А. С. Определение оптимальных параметров сублимационной очистки гексафторсиликата аммония от примесей. Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т.317, – № 3. С. 73-76.
- 7) Лисиенко В. Г., Щелоков Я. М., Ладыничев М. Г. Топливо. Рациональное сжигание, управление и технологическое использование. Справочное издание: В 3-х книгах. Книга 2 / Под ред. В. Г. Лисиенко. – М.: Теплотехник, 2004. – 832 с.
- 8) Цыпков В. Ш., Фокин К. Ф. Теплотехническое оборудование, - Изд.: Москва «Стройиздат», - 1973.
- 9) Простяков А. А., Индукционные нагревательные установки. М., 1970.

10) Михалев М. Ф. Расчет и конструирование машин и аппаратов химических производств: Примеры и задачи: учебное пособие для вузов / Под об. ред. М.Ф. Михалева. – Ленинград: Машиностроение, 1984.

11) Лацинский А. А. Конструирование сварных химических аппаратов: Справочник. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1981. – 382 с., ил.

12) Софронов В. Л., Русаков И. Ю. Расчет бандажей вращающихся аппаратов: практическое руководство/ В. Л. Сафронов, И. Ю. Русаков. – 3-е изд., перераб. – Северск: СТИ НИЯУ МИФИ, 2012. – 29 с.

13) Бобров Ю. Л., Овчаренко Е. Г., Шойхет Б. М., Петухова Е. Ю. Теплоизоляционные материалы и конструкции: Учебник для средних профессионально-технических учебных заведений. – М.: ИНФРА-М, 2003г. – 268 с.

14) Левченко П. В. Расчеты печей и сушил силикатной промышленности: Уч. пособие для вузов. 2-е изд, стереотипное. Перепечатка с издания 1958 г. – М.: ООО ИД «Альянс», 2007. – 365 с.

15) Канторович З. Б. Основы химических машин и аппаратов: Уч. пособие для вузов. 3-е изд., переработанное и дополненное. – М.: Гос. н. т. изд-во машиностроит. лит-ры, 1960 – 744 с.

16) Домашнев А. Д. Конструирование и расчет химических аппаратов: Уч. пособие для вузов. – М.: Гос. н. т. изд-во машиностроит. лит-ры, 1961. – 321 с.

17) Федин А. С., Ворошилов Ф. А., Кантаев А. С., Ожерельев О. А. Исследование процесса сублимации гексафторосиликата аммония. Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т.323, – № 3. С.23-27.

18) Федин А. С., Ожерельев О. А., Ворошилов Ф. А., Кантаев А. С., Костарева Т. В. Исследование десублимации гексафторосиликата аммония. Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т.323, – № 3. С.28-33.

19) Матюхин В. И. Конструкция и расчет индукционных тигельных печей: Уч. пособие., Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2003, - 61 с.

20) Бодажков В. А. Индукционный нагрев труб. Изд-во «Машиностроение», - 1969, - 152 с., ил.

21) Марширов И. В., Головичев А. И. Конструкции, особенности работы и расчет индукционных тигельных печей: Уч. пособие по курсу «Печи литейных цехов» для студентов специальности 150204 – «Машины и технология литейного производства»/ Алт. гос. техн. ун-т им. И. И. Ползунова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2006 – 68с.

22) Немков В. С., Демидович В. Б. Теория и расчет устройств индукционного нагрева. – Л.: Энергоатомиздат. Ленинград. отд-ние, 1988. – 280 с.; ил.

23) Слухоцкий А. Е., Немков В. С., Павлов Н. А., Бамунэр А. В. Установки индукционного нагрева: Учебное пособие для вузов/ Под ред. А. Е. Слухоцкого. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1981. – 328 с., ил.

24) Беляев В. М., Миронов В. М. Конструирование и расчет элементов оборудования отрасли. Часть I / Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, - 2011. – 300 с.

25) ГОСТ Р 34233.1 – 2017 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Общие требования (утв. приказом Росстандарта от 14.12.2017 N 1989-ст)

26) ГОСТ Р 34233.2 – 2017 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет цилиндрических и конических обечаек, выпуклых и плоских днищ и крышек (утв. приказом Росстандарта от 14.12.2017 N 1990-ст)

27) ГОСТ 14249-89 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность.

28) Лацинский А. А., Толчинский А. Р. Основы конструирования и расчета химической аппаратуры/ Изд-ие 2-е, переработанное и дополненное, Л., «Машиностроение», - 1970. – 752 с.

29) ГОСТ Р 28759.2-90 Фланцы сосудов и аппаратов стальные плоские приварные.

30) Изоляционный материал: [Электронный ресурс]. URL: <https://www.farpost.ru/ussuriisk/home/materials/isolation/negorjuchjaja-izoljacija-supersil-do-1200-s-31308126.html> (Дата обращения - 03.01.2019)

31) Изоляционный материал: [Электронный ресурс]. URL: [http://www.zdanija.ru/BuildingMaterialsProducts/p2\\_articleid/4864](http://www.zdanija.ru/BuildingMaterialsProducts/p2_articleid/4864) (Дата обращения - 03.01.2019)

32) СП 61.13330.2012 Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов. Москва, - 2012.

33) СНиП 2.04.14-88 «Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов»

34) Романков П. Г., Фролов. В. Ф., Флисюк О. М. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи): Учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., испр. – СПб.: ХИМИЗДАТ, 2009. – 544 с., ил.

35) Бобров Ю. Л., Овчаренко Е. Г., Шойхет Б. М., Петухова Е. Ю. Теплоизоляционные материалы и конструкции: Учебник для средних профессионально-технических учебных заведений. –М.: ИНФРА-М, 2003г. – 268 с.

36) ТУ 5952-156-17644763-09 Материалы иглопробивные теплозащитные типа Supersil и Supersilika., с изменением №1

37) Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 01.04.2019)

38) ГОСТ 12.2.049-80 ССБТ. Оборудование производственное. Общие эргономические требования

39) ГОСТ 12.0.003-2015 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.

- 40) ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности.
- 41) ГОСТ 12.1.007-76 ССБТ. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности.
- 42) ГОСТ 12.1.010-76 ССБТ. Взрывобезопасность. Общие требования.
- 43) ГОСТ 12.1.029-80 ССБТ. Средства и методы защиты от шума. Классификация.
- 44) ГОСТ 12.1.030-81 ССБТ. Электробезопасность. Защитное заземление, зануление.
- 45) ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля.
- 46) ГОСТ 12.2.003-91 ССБТ. Оборудование производственное. Общие требования безопасности.
- 47) ГОСТ 12.4.011-89 ССБТ. Средства защиты работающих. Общие требования и номенклатура видов защиты.
- 48) СН 2.2.4/2.1.8.562-96 Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки.
- 49) СП 51.13330.2011 Защита от шума.
- 50) Федеральный закон от 22.07.2013 г. №123 – ФЗ, Технический регламент о требованиях пожарной безопасности.
- 51) ГН 2.2.5.3532-18 Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны.
- 52) ГН 2.2. 5.2308-07 Ориентировочно безопасный уровень воздействия (ОБУВ) вредных веществ в воздухе рабочей зоны.
- 53) ГН 2.1.6.3492-17 Предельно-допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений.
- 54) ГН 2.1.6.2309-07 Ориентировочно безопасный уровень воздействия (ОБУВ) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест.
- 55) ГОСТ Р 22.0.01-2016 Безопасность в ЧС. Основные положения.

56) ГОСТ Р.22.3.03-94 Безопасность в ЧС. Защита населения. Основные положения.

57) ГОСТ Р 22.0.07-95 Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Источники техногенных чрезвычайных ситуаций. Классификация и номенклатура поражающих факторов и их параметров.

58) Федеральный закон от 21 декабря 1994 г. № 68-ФЗ. О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера (с изменениями и дополнениями).

59) Гаврикова Н. А. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие / Н.А. Гаврикова, Л.Р. Тухватулина, И.Г. Видяев, Г.Н. Серикова, Н.В. Шаповалова; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 73 с.

60) Экономика и управление производством. Расчет экономической части дипломного проекта: метод. указ. для студентов хим. спец. ИДО/ сост. Т. Г. Рыжакина. – Томский политехнический университет. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2007. – 22 с.

61) Расчет шнековых механизмов: методические указания к практическим работам по дисциплинам «Конструирование и расчет элементов оборудования отрасли» и «Конструирование и расчет машин и аппаратов отрасли»/ сост.: М. Ю. Сарылов, В. И. Шатохин. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КнАГТУ», 2015. – 12 с.

62) Козлов С. Н., Дубинина Н. В. Основы расчета и конструирование машин и аппаратов пищевых производств: Методическое пособие к практическим занятиям для студентов очной и заочной форм обучений направления 151000.62 «Технологические машины и оборудование»/ Рубцовский индустриальный институт. – Рубцовск, 2014. – 102 с.

63) ГОСТ 8734-75 Трубы стальные бесшовные холодноформированные. - М.: Стандартинформ, 2007. – 12 с.

64) Конвейеры: Справочник/ Р. А. Волков, А. Н. Гиутов, В. К. Дьячков и др. Под общ. ред. Ю. А. Пертена. Л.: Машиностроение Ленингр. отд-ние, 1984. 367 с., с ил.

65) Соколов В. И. Основы расчета и конструирование машин и аппаратов пищевых производств: Учебник для вузов по специальности «Машины и аппараты пищевых производств». – М.: Машиностроение, 1983. – 447 с., ил.

66) Технология изготовления спиралей шнеков. Гевко Б. М. – Львов: Высшая шк Изд-во при Львов. ун-те, 1986. – 128 с.

67) Геррман Х. Шнековые машины в технологии. ФРГ, 1972. Пер. с нем. под ред. Л. М. Фридмана. Л., «Химия», 1975. – 232 с., с ил.

68) ГОСТ 23360-78 Основные нормы взаимозаменяемости. Соединения шпоночные с призматическими шпонками. Размеры шпонок и сечений пазов. Допуски и посадки (с изменениями № 1, 2).

69) Романков П. Г., Фролов. В. Ф., Флисюк О. М. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи): Учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., испр. – СПб.: ХИМИЗДАТ, 2009. – 544 с., ил.

70) Конструкция шнека: [Электронный ресурс]. URL: [http://www.shneks.ru/shneki\\_construction.html](http://www.shneks.ru/shneki_construction.html) (Дата обращения – 29.12.2018)

71) Керженцев В. А. Проектирование оборудования пищевых производств. Ч. 2. Ациклически работающие машины: конспект лекций. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. – 78 с.

72) Анурьев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя: В 3 т. Т.1. – 8-е изд., перераб. и доп. Под ред. И. Н. Жестковой. – М.: Машиностроение, 2001. – 920 с.: ил.

73) ГОСТ 36306 Подшипник шариковый радиально-упорный однорядный.

74) ГОСТ 617-2006 Трубы медные и латунные круглого сечения общего назначения.



75) РД 26-01-158-86 Аппараты сушильные с вращающимися барабанами газовые. Нормы и методы расчета на прочность.

76) Дытнерский Ю. И. Основные процессы и аппараты химической технологии: Пособие по проектированию. Под ред. Ю.И. Дытнерского. – М.: «Химия», 1983. 272 с.

77) ГОСТ 27120-86 Печи химических производств с вращающимися барабанами общего назначения. Общие технические требования (с Изменением N 1).

78) Характеристика материала: [Электронный ресурс]. URL: <http://vzrti.ru/materials/material-perftrack-ffkm-kalrez-simriz/> (Дата обращения - 19.05.2019)

79) O'Donnell T. A., Wood D. G., Pong T. K. H. Extraction and purification of titanium products from titanium minerals: Пат. 628464 Австралия, МКИ<sup>5</sup> C01 G 023102 The University of Melbourne- № 48186 190; Заявл. 1812.89; Опубл. 17.09.92

80) Hukkanen E., Welden H. The production of vanadium and steel from titanomagnetites II Int. J. Miner. Process.- 1985.- Vol. 815, №1-2. – P. 82-102.

81) Д. Н. Решетов, А. П. Гусенков, Ю. Н. Дроздов и др. Конструкционная прочность. Трение, износ, смазка. Т. IV-1 / Под общ. ред. Д. Н. Решетова. – 864 с.: ил.

82) ГОСТ 27134-86 Аппараты сушильные с вращающимися барабанами. Основные параметры и размеры

83) ГОСТ 2584-86 Провода контактные из меди и ее сплавов. Технические условия (с Изменением N 1)

84) ГОСТ 1050-2013Metalлопродукция из нелегированных конструкционных качественных и специальных сталей. Общие технические условия (с Поправкой)

85) Таблица химической стойкости материалов: [Электронный ресурс]. URL: <https://tehtab.ru/Guide/GuideMatherials/ApplicationLimitsTables/MajorResistanceTable1/> (Дата обращения - 19.05.2019)

# Приложение А

Раздел 1, 2, 3, 5

Literature review, Description of process diagram, Device construction,  
Construction materials selection

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4КМ71	Балло Евгения Александровна		

Консультант школы отделения НОЦ им. Н. М. Кижнера:

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

Консультант – лингвист отделения (НОЦ):

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Ажель Ю. П.			

## 1. Literature review

There are two types of ores in our planet deposits: solid and impregnated. The amount of solid ores has significantly decreased over time; then impregnated ones become more important. Titanomagnetite possesses the largest part of both types, which is around 90-95 %, as well as primary isolated ilmenite (crichtonite  $\text{FeO} \cdot \text{TiO}_2$ ). Titanomagnetite is a thin intergrowth of ilmenite in magnetite formed as the decomposition of the solid solution. This mineralization has a structure of irregular shaped grains with 0.1-2 mm interfaces [1].

Extracting precious inclusions from the tailings has become a topical issue. According to the assumptions, about 20% of commercial elements are used from the extracted 100%. Therefore, increasing the recovery rate is one of primary tasks in mining. The gradual solution of this problem not only enhances the use of mined ores, but is also of great geological and economic importance for us.

Titanomagnetite ores are widely used in industry, for example, as a raw material for the iron, steel and vanadium salts production. But for sure, it is necessary to increase the use of new methods of raw materials processing and improve the old ones as the manufacturing processes. The design of furnace units as well as the characteristics of raw material preparing and melting are improved; all these facts are directly related to the desire to increase the extraction degree of vanadium (for example), which is still not high enough. In addition, there are such items, as environmental pollution, rejection of land for storage of ore tails, the creation of places for storing sludges, etc., and as the processing of titanomagnetites is a large-tonnage production, these items are quite huge. That is why people continue searching for new solutions for the processing of titanium magnetite ores and concentrates to develop the most rational production.

This paper is focused on the technological process based on the fluoride method for processing concentrates. This topic is very relevant today, as it is the most progressive and technological promising. The fluoride technology is based on the treatment of titanium-magnetite concentrate with fluoride compound at

high temperatures to isolate vanadium fluoride, followed by temperature and technical treatments for obtaining other components of the concentrate [3].

The order of the technological scheme is as follows: fluorination → sublimation of → sublimation of ammonium hexafluorotitanate → pyrohydrolysis → reduction of ferrum.

The fluoridation and sublimation are carried out in rotating furnaces, and it is a novelty in this field. This master's thesis is based on the drum device work for the sublimation of titanomagnetite concentrate just after the first stage - fluoridation.

As a first step, it should be said that the sublimation process can be performed using two types of equipment: periodical and continuous. The periodic devices are usually used in nuclear industry and only in small volume productions. This thesis is devoted to concentrate processing in large quantities, and that type of equipment is not suitable. There are rotating furnaces between continuous equipment, which can reach up to 5 m in diameter and 200 m in length. That is why it is possible to choose and calculate the machine for almost any large-scale production.

A rotating furnace is a technical equipment of continuous action with a cylindrical working space, in which, due to the slight incline of the drum and rotation, the processed material moves along the furnace being heated by one of big variety of methods. Rotating furnaces are known and spread all over the world. This equipment is widely used at various factories in different industries. For example, in non-ferrous metallurgy the rotary machines are used for sintering slurries, roasting aluminum oxide hydrate, sinter leaching, and many other purposes. In other industries (ferrous metallurgy, chemistry, construction engineering, etc.) such furnaces are one of the furnace equipment types in large-scale productions for heat treatments of various materials (mainly lumps, less often – friable materials) [7].

The rotating furnace is valued for:

- 1) Complete mechanization of the device;
- 2) Low sensitivity to the particles` size of the processed raw materials;
- 3) Ability of selection heating method and type of heat transfer agent;
- 4) Uniform heating due to rolling furnace volume.

This equipment varies technically in body dimensions and devices for feeding and unloading the material, while there are technologically different variations of the process. Usually internal heating is used choosing different types of fuel [8]. Depending on the type of the working material, different ways for heating, such as fuel oil, natural gas, own reaction gases and exhaust gases from a direct heating furnace, solid fuel in the form of coke breeze or coal dust can be used. The most popular burners are the “pipe-in-pipe” type, nozzles or special pulverized coal burners [7].

During the sublimation of ammonium hexafluorosilicate, the atmosphere is full of ammonium and fluoride compounds, which must not react with any heat. Therefore, the second method for heating the raw material in drum aggregates - indirect heating - is useful here.

With the growing requirements for environmental protection, furnaces with wall heating (indirect heating) can significantly simplify the system for cleaning gas emissions and reduce the loss of processed material [7].

The relevance of this work is also in the development of fundamentally new sublimation equipment, excluding any type of fuel. And the issue is induction heating.

The induction heating is an induction by an alternating magnetic field of electric currents, which perform the process. These high frequency currents allow non-contact heating of electrically conductive materials.

Unfortunately, there is lack of information on the induction heating for drum furnaces in the existing scientific literature, or it is insufficiently detailed. Therefore, the prototype of the developed induction device, an induction crucible

furnace playing a big role in the industry, is widely known and often described in scientific papers.

In comparison with other heating methods, induction heating works without participation of convective or radiant energy exchange and use of any contact devices. In addition, the induction method provides heating at high specific efficiency, and, consequently, high heating rate, which is difficult to obtain using other methods [9].

But if we talk about the induction furnace devices, there are some major benefits:

- 1) they are suitable for flammable and explosive processes;
- 2) there is small amount of pollution during the process (due to the poverty of combustion products);
- 3) there is temperature equalization throughout the device;
- 4) environmental protection and safety (electromagnetic waves do not extend beyond the device).

The purpose of this thesis is technological and mechanical calculation of the rotating induction furnace for ammonium hexafluorosilicate sublimation and its screw feeder for the material into the working cavity.

## 2. Description of process diagram

The basis of this master's thesis is fluoride treatment of titanium-magnetite concentrate.

The order of the technological process is as follows: fluoridation → sublimation of GFSA → sublimation of GPTA → pyrohydrolysis → reduction of Fe.

The initial composition of titanomagnetite concentrate is presented in the Table 1.

Table 1 – Mixture composition #1

<b>Component</b>	<b>Mass, tons/year</b>
FeO	21700,0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	46000,0
FeTiO <sub>3</sub>	26000,0
MgO	1700,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1600,0
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	200,0
SiO <sub>2</sub>	2800,0
<b>Total</b>	<b>100000,0</b>

Annual production capacity is 100,000 tons per year. With the help of a double screw feeder, the titanomagnetite concentrate is mixed with NH<sub>4</sub>F in a 1:1.7 ratio. The mixture enters the rotating furnace, where the fluorination at 150°C occurs. As a result of this stage, there are products VF<sub>5</sub>, and coproducts: H<sub>2</sub>O and NH<sub>3</sub>.

The mixture composition after fluoridation is given in Table 2. This mass goes into the rotating furnace by a screw feeder for sublimation of GFSA, and after that there are SiO<sub>2</sub> and NH<sub>4</sub>F as products. The process occurs at 320°C.

Table 2 – Mixture composition #2

<b>Component</b>	<b>Mass, tons/year</b>
FeF <sub>2</sub>	44426,3
FeF <sub>3</sub>	65010,6
(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> TiF <sub>6</sub>	33908,1
MgF <sub>2</sub>	2628,0
AlF <sub>3</sub>	2636,7
(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SiF <sub>6</sub>	8306,7
NH <sub>4</sub> F	15439,2
<b>Total</b>	<b>172355,6</b>

The third stage is the sublimation of GPTA, which also takes place in the rotating furnace. The temperature of this process is 600°C. The composition of the mixture supplied by the screw feeder can be seen in Table 3. At the end of this stage there is a product is Ti.

Table 3 – Mixture composition #3

<b>Component</b>	<b>Mass, tons/year</b>
FeF <sub>2</sub>	44426,3
FeF <sub>3</sub>	65010,6
(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> TiF <sub>6</sub>	33908,1
MgF <sub>2</sub>	2628,0
AlF <sub>3</sub>	2636,7
<b>Total</b>	<b>148609,7</b>

The residual part of the titanomagnetite concentrate (table 4) is fed to pyrohydrolysis - the process of the decomposition of fluorides with water. The temperature of this stage is 600°C. The product is insoluble sedimentary MgF<sub>2</sub> and coproducts, such as volatile HF and H<sub>2</sub>O.

Table 4 – Mixture composition #4

<b>Component</b>	<b>Mass, tons/year</b>
FeF <sub>2</sub>	44426,3
FeF <sub>3</sub>	65010,6
MgF <sub>2</sub>	2628,0
AlF <sub>3</sub>	2636,7
<b>Total</b>	<b>114701,7</b>



The last technological process of the scheme is the carbon reduction of Fe. The composition of the incoming mixture is presented in Table 5. The temperature of the reduction process is 2000°C. The products are CO<sub>2</sub>, Fe and Al.

Table 5 – Mixture composition #5

<b>Component</b>	<b>Mass, tons/year</b>
FeO	34012,0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	46000,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1600,0
<b>Total</b>	<b>81612,0</b>

### 3. Device construction

The rotating furnace consists of a drum inclined to the horizon at  $2^\circ$  angle. The drum is driven by an electric motor through a gearbox and an open gear transmission. A gear ring (connected to a drive station via a gear wheel) serves to rotate the device. Because of the induction winding outside the drum and its heating, the gear wheel is located at the start of the device, and only after it the heating begins.

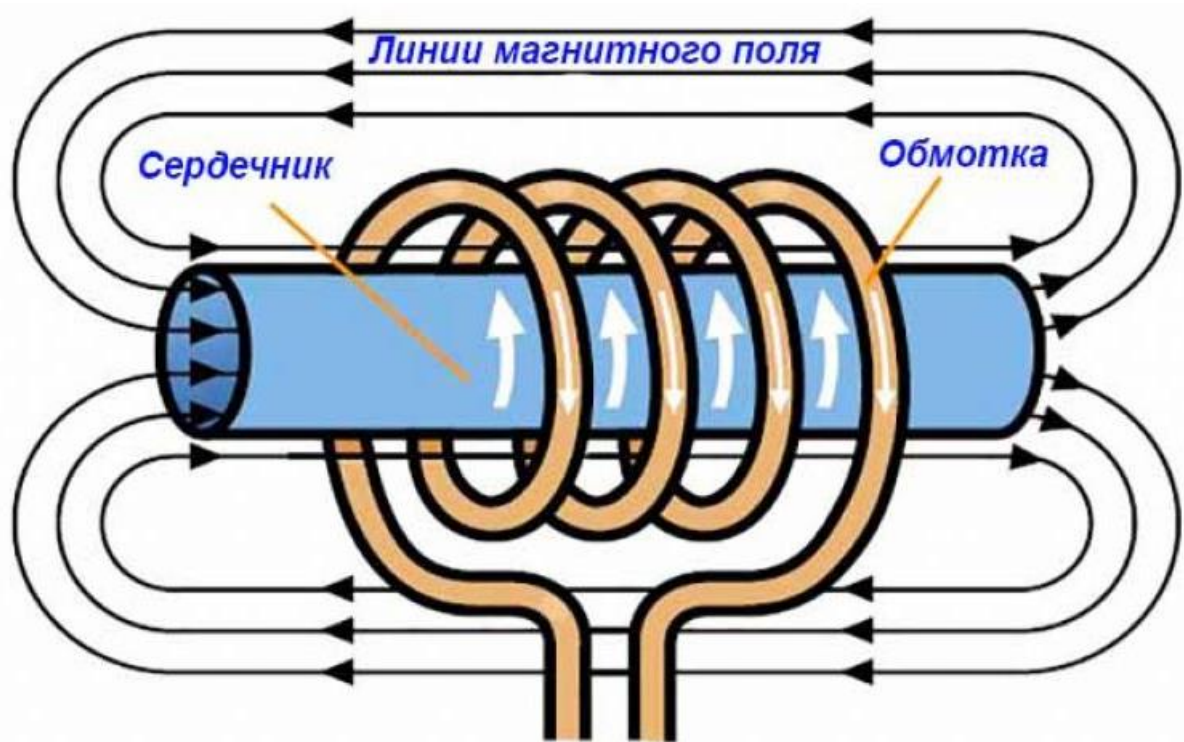
The drum operates continuously; as the result of such mixing, there is high and stable heating quality. The declared furnace capacity is 100,000 tons per year, at the atmospheric pressure and temperature of  $320^\circ\text{C}$ .

To transfer the pressure from the mass of all the furnace rotating parts, the drum is equipped with two zeolite bands, which are placed on the rollers of the reference stations. The bands are loose, with small gaps, based on the thermal expansion of the body. The first band located near the gear at the start of the drum has supporting rollers, while the second one is on an axial bearing to prevent the drum from horizontal moving (the rollers are arranged horizontally, the band fits to the side).

There is a hopper at the edge of the drum for loading ore mixture. Loading into the furnace is performed with a screw feeder. The movement of the material inside occurs due to the rotation and inclination of the drum. At the end of the drum there is a labyrinth seal that works as an obstacle for the material. After compaction, there is a stationary bunker, where the processed material is unloaded.

Induction heating is the heating by electric currents induced by alternating magnetic field. The conductive part (in this case, the drum body) must be placed in the inductor consisted of certain number of copper wire turns. Special generator helps to induce certain frequency in the inductor, as the result, the electromagnetic field arises around the device (pic. 1). It induces eddy currents in the drum; that

is why there is a temperature rise of the under the heat (according to Joule-Lenz law).



Picture 1 – Induction heating

Each induction furnace devices has specific operating parameters. The heating temperature of the unit is determined by the frequency of the inductor current. This type of furnace needs a cooling system. There are situations when the inductor induces currents on itself, and without cooling it can deform. The temperature of cooling water is slightly higher than the environment one (in this device 40°C). Ammonium hexafluorosilicate is not completely removed at 300°C, therefore it is necessary to increase it. IR spectroscopy and X-ray phase analysis data has shown that the reaction proceeds completely at 320°C [6]. This temperature is taken as the minimum working temperature. All heating and cooling parameters are calculated and selected in 6.3 “Calculation of induction heating”.

For ensuring the stable process of furnaces with internal heating, professional finishing or facing is used in order to cause damage by chemical, thermal, mechanical or physical effects. And, due to temperature changes, this

design implementation requires constant monitoring of durability. In the designed unit, the heating of the raw material occurs exactly through the drum`s body, which means the facing will be an unnecessary obstacle and completely lose the sense. But the absence of facing is one of the distinguishing points of this work. The projected rotating furnace is a mechanically loaded element itself, specially working by induction winding outside.

## 5. Construction materials selection

As was written previously, for the rotating furnace the working conditions are: 350°C, atmospheric pressure, ammonium fluoride atmosphere. In respect these conditions, the main material for the drum was chosen steel 12X18H10T. This steel is heat-resistant and is capable of operating at temperatures up to  $\approx 600^\circ\text{C}$ , it is relatively poorly brittle due to prolonged exposure to high temperatures.

The corrosion rate for 12X18H10T in that working environment will be  $< 0.001$  mm / year, with no visible changes [table 12.1, 81]. The service life of this equipment is assumed equal 10 years [82].

Sublimation in the drum occurs due to heating of the body from outside by the induction method. Induction winding is made of copper pipes, M2 brand [74]. And for such copper windings, the service life is assumed equal 6 years [83].

Steel 12X18H10T was also chosen for the nozzles. Kalrez brand perforating rubber was chosen as a gasket material for choke joints. This type of gasket has high plasticity, high resistance to aggressive conditions and stable process at 300°C [24] [78].

The material of the bandages and rollers stations adopted steel CT45. This unalloyed special steel has increased strength; it is specifically used for the manufacture of gears, shafts, tires and other parts, which has increased requirements [84]. The service life is assumed equal 10 years [82].

The processed titanomagnetite concentrate passes from the fluorination stage (process temperature is 150°C) to the furnace for sublimation through the screw feeder. To eliminate the state of emergency, and to help the material do not lose its heat, the screw feeder should have thermal insulation. Supersil from PLC «RLB Silika», made of pure silica fiber, was chosen as the insulating material. It was designed specifically for numerous using at temperatures up to 1200°C, reduces the likelihood of fire and eliminates the flame spread [30].

## Приложение Б. Значения коэффициентов

Таблица 18 – Значения коэффициента  $R_\beta$

Угол наклона конвейера $\beta$	0	5	10	15	20
Коэффициент уменьшения производительности $R_\beta$	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6

Таблица 19 – Рекомендуемая частота вращения винта шнекового конвейера

Наименование груза	Размер груза, мм	Частота вращения винта, об/мин
Гипс, известь, мел, песок сухой	менее 60	50 – 120
Глина сухая, гравий, известняк	менее 60	40 – 100
Глина сухая, шлак кусковой	более 60	40 – 80
Песок сырой	менее 60	40 – 80
Глина сырая	менее 60	30 – 60

Таблица 20 – Значения коэффициентов  $A$ ,  $\varphi$

Группа грузов	$A$	$\varphi$	$\omega$
Легкие неабразивные	65	0,4	1,2
Легкие малоабразивные	50	0,32	1,6
Тяжелые малоабразивные	45	0,25	2,5
Тяжелые абразивные	30	0,125	4,0

Таблица 21 – Диаметр и шаг винта

Диаметр, мм	100	125	160	200	250	320	400	500	650	800
Шаг, мм										
- для сыпучих материалов	100	125	160	200	250	320	400	500	650	800
- для вязких материалов	80	100	125	160	200	250	320	400	500	650

Таблица 22 – Критерий Рейнольдса

D <sub>и</sub> /d <sub>тр.э</sub>	Критерий Рейнольдса					
	3000	10000	50000	100000	250000	500000
8	0,400	0,270	0,184	0,161	0,1393	0,1273
10	0,391	0,264	0,180	0,1573	0,1362	0,1246
12	0,344	0,218	0,1485	0,1298	0,1124	0,1030
15	0,294	0,198	0,135	0,118	0,1024	0,0936
20	0,254	0,1715	0,117	0,1023	0,0885	0,0812

Таблица 23 – Коэффициенты воды

Темп- ра, °С	Коэф-т теплопроводност и λ, кДж/м·ч·град	Коэф-т кинемат. вязкости ν·10 <sup>6</sup> , м <sup>2</sup> /с	Коэффициент температуропроводн ости α·10 <sup>4</sup> , м <sup>2</sup> /ч	Pr
0	1,985	1,79	4,7	13,7
10	2,068	1,30	1,9	9,56
20	2,156	1,00	5,1	7,06
30	2,223	0,805	5,3	5,50
40	2,282	0,659	5,5	4,30
50	2,332	0,566	5,6	3,56