

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

Школа **Инженерная школа новых производственных технологий**
 Отделение школы (НОЦ) **Научно-образовательный центр Н.М.Кижнера**
 Направление подготовки **18.04.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии**

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Вакуумная установка для выращивания кристаллов LiYF₄ с разработкой основного оборудования

УДК 621.52-047.84:548.52

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4КМ71	Меньшов Павел		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Семакина О.К.	К.т.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

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

По разделу «Социальная ответственность»

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

Консультант по разделу «Механический расчет оборудования»

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

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

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

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

Школа **Инженерная школа новых производственных технологий**
 Отделение школы (НОЦ) **Научно-образовательный центр Н.М.Кижнера**
 Направление подготовки **18.04.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии**

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

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

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

Студенту:

Группа	ФИО
4KM71	Меньшов Павел

Тема работы:

ВАКУУМНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ВЫРАЩИВАНИЯ КРИСТАЛЛОВ LiUF₄ С РАЗРАБОТКОЙ ОСНОВНОГО ОБОРУДОВАНИЯ	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	1236/с от 18.02.2019

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

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе</p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p><u>Вакуумная ростовая установка.</u> Среда – воздушная; Рабочее разряжение – 10⁻³ Па; Рабочая температура – 1500 °С; <u>Исполнение по материалу:</u> Все элементы конструкции должны быть выполнены из стали 12Х18Н10Т. Режим работы: периодический Требования к эксплуатации и обслуживанию: Простота ремонта и доступность для обслуживания.</p>
---	---

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<p>Вакуумный, конструктивный и механический расчеты, а также раздел социальной ответственности и финансового менеджмента, ресурсоэффективности и ресурсосбережения</p>
<p>Перечень графического материала</p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>Лист 1. Технологическая схема А1; Лист 2. Общий вид диффузионного насоса А1; Лист 3. Выносные элементы диффузионного насоса А1; Лист 4. Изометрия диффузионного насоса А1; Лист 5. Общий вид ростовой камеры А1; Лист 6. Общий вид ростовой камеры А1; Лист 7. Изометрия ростовой камеры А0; Лист 8. Техничко-экономические показатели А1; Лист 9. Исследовательская часть А1; Лист 10. Изометрия ростовой установки.</p>
<p>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i></p>	
<p>Раздел</p>	<p>Консультант</p>
<p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>	<p>Креницына Зоя Васильевна</p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Романова Светлана Владимировна</p>
<p>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</p>	
<p>Реферат</p>	
<p>Исследование методов выращивания кристаллов редкоземельных элементов из расплава</p>	

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

Задание выдал руководитель / консультант (при наличии):

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Семакина Ольга Константиновна	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4КМ71	Меньшов Павел		

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 с использованием компьютерного 3-х мерного моделирования, коммерческих симуляторов и	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-

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

Реферат

Данная магистерская работа включает в себя расчет двух аппаратов из схемы получения лазерных кристаллов LiYF_4 . Были произведены вакуумный и механический расчеты оборудования.

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

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

Цель работы – расчет и выбор подходящего насоса, проектирование камеры ростовой установки.

Установлено, что выбранный диффузионный насос и спроектированная камера ростовой установки удовлетворяет всем условиям технологического процесса.

Магистерская диссертация состоит из графической части и пояснительной записки. Графическая часть состоит из 2 листов формата А0 и 8 листов формата А1. Пояснительная записка состоит из 176 страниц, и включает в себя 27 таблиц, 47 рисунков и 33 источников литературы

Abstract

This master paper includes calculation of two apparatus from obtaining LiYF₄ laser crystals scheme. Vacuum and mechanical calculations for equipment were made. In the mechanical part, the wall thickness, the reinforcement of the holes, the flange connection and some others calculations were made.

In the section «Social responsibility», the issues of ensuring the safe operation of personnel and protection of the environment are considered.

In the section "Financial Management, Resource Efficiency and Resource Saving», a break-even schedule was constructed and technical and economic indicators were calculated.

Purpose of work, calculation and selection of suitable pump, designing of the vacuum growth chamber.

Selected equipment satisfies all the conditions of the technological process.

The diploma project consists of a graphic part and an explanatory note. The graphic part consists of 2 sheets of A0 format and 8 sheets of A1 format. Explanatory note consists of 176 pages, 27 tables, 47 drawings and 33 Sources of literature.

Содержание

Введение	9
1. Описание технологической схемы	11
2. Расчет диффузионного насоса	13
2.1 Вакуумный расчет насоса	15
2.1.1 Вакуумный расчет системы	16
2.2 Механический расчет насоса	22
2.2.1 Расчетные параметры	23
2.2.2 Расчет толщин стенок	26
2.2.2.1 Расчет толщины стенки корпуса насоса	26
2.2.2.2 Расчет толщины стенки рубашки	30
2.2.3 Расчет толщины плоского приварного днища	32
2.2.4 Расчет и подпор патрубков	34
2.2.5 Расчет фланцевого соединения	35
2.2.6 Расчет укрепления отверстий	46
3. Расчет камеры роста кристаллов	51
3.1 Механический расчет камеры	51
3.1.1 Исходные данные	55
3.1.2 Расчетные параметры	55
3.2 Расчет толщин стенок	58
3.2.1 Расчет толщины стенки обечайки корпуса камеры	58
3.2.2 Расчет толщины стенки рубашки	62
3.3 Расчет толщины плоского приварного днища	64
3.4 Расчет плоской прямоугольной двери	66
3.4.1 Расчет крепления двери	67
3.4.2 Расчет рамы двери камеры	70
3.5 Расчет и подбор патрубков	73
3.6 Расчет фланцевого соединения	74
3.7 Расчет укрепления отверстий	85
3.8 Расчет болтов для крепления камеры к стойке	90
4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	94
5. Социальная ответственность	118
6. Исследование методов выращивания кристаллов редкоземельных элементов из расплава	130
Заключение	150
Список трудов	151
Список использованных источников	153
Приложение	156

Введение

Поскольку на данный момент времени спрос на монокристаллы, которые обладают совершенными свойствами довольно высок ввиду развития микроэлектроники, медицины и химической промышленности. Потребность в новых материалах на рынке, ставит задачу разработки оборудования, способного поддерживать необходимые условия для производства кристаллов. В проектируемой аппаратуре необходимо предусмотреть компенсацию механических колебаний, т.к. это сказывается на качестве получаемого кристалла, и он растет с дефектами кристаллической решетки. Механические колебания, т. е. неравномерность скорости вращения и вытягивания, устраняют с помощью регулирования системы. При выборе привода необходимо учесть разность температур и трение в уплотнении затравки и держателя. Установка должна быть закреплена таким образом, в котором была бы исключена возможность вибрации. Внутренняя поверхность емкости с расплавом не должна уступать по чистоте самому расплаву. При выращивании кристаллов желательны вакуум, или инертная атмосфера. Также следует отметить, что осуществление выращивания разными способами в одной установке позволит сэкономить значительные средства на производство, поэтому стоит задача проектирования оборудования, способного соответствовать целому ряду требований.

Существует масса методов и способов выращивания монокристаллов, но их объединяет общий принцип – создание оптимальных условий кристаллизации. Под условиями кристаллизации следует понимать такие параметры как движущая сила кристаллизации, поведение движущей силы во время процесса кристаллизации. Также значительным влиянием на процесс кристаллизации исходные материалы, их чистота, состав и параметры среды, величина скорости вращения расплава, скорости перемешивания.

Под методом выращивания следует понимать такие признаки как форма и размер тигля с расплавом, тип и источник нагрева, положение и скорость движения затравки.

Большинство способов выращивания базируются на выводах из кинетической теории роста кристаллов. В течении процесса роста необходимо поддерживать постоянное распределение температур, что обеспечивается расположенным в камере роста нагревателя и холодильника.

Все методы выращивания кристаллов из расплавов основываются на выводах из кинетической теории роста кристаллов. Рост кристаллов возможен только тогда, когда вблизи поверхности кристалла поддерживается постоянный градиент температуры, что подразумевает наличие в кристаллизационной установке нагревателя и холодильника.

Чохральский предложил метод особенно пригодный для выращивания металлических монокристаллов. Расплав вытягивается из расплава с помощью охлаждаемого вала, на краю затравки начинается кристаллизация в виде монокристалла. Для предотвращения обрыва образующегося капилляра, его вес должен находиться в соответствии с капиллярной силой.

Скорость выращивания по методу Чохральского зависит от величины температурного распределения у края Кристаллизации. Чем больше разность температур, тем выше скорость роста. Чаще всего необходимые входные параметры определяются эмпирическим путем. Обычно скорость вытягивания находится в пределах от 0,1 до 4 см/час. Однако совершенство выращиваемого монокристалла зависит от скорости роста: чем меньше скорость, тем выше совершенство кристаллической решетки. Постоянный градиент температур обеспечивается экранами, и другой тепловой изоляцией. Температурный градиент и форму фронта кристаллизации регулируют с помощью вспомогательных нагревателей охлаждая элементы внутри вакуумной системы.

Растущий спрос на совершенные монокристаллы, особенно полупроводниковые, делает актуальной проблему разработки оборудования, способной выдерживать необходимые условия.

1. Описание технологической схемы

Технологическая схема изображена на рис.1.1. Загрузка исходного материала (шихты) помещается в камеру (3), включается насос предварительного разряжения (1), после достижения минимального разряжения для включения диффузионного насоса линия форвакуумный насос-камера закрывается.

Принцип действия диффузионного(пароструйного) насоса основан на использовании в качестве откачиваемого элемента высокоскоростной паровой струи. После подачи напряжения на нагреватель вакуумное масло, залитое внутрь, закипает. Образующийся пар проходит по паропроводу, далее отражается от специальных перегородок, и захватывает с собой частицы газа, после чего рубашка охлаждения конденсирует пар, и он стекает обратно к каналам паропровода.

Продолжается откачка камеры с помощью диффузионного насоса (2). После достижения разряжения 10^{-4} Па включается водяное охлаждение в рубашке камеры, и запускается температурная программа. Ток от источника питания подается на охлаждаемые токовводы, далее на подключенный к ним графитовый нагреватель с заданным сечением. Тепло от нагревателя передается в тигель, где происходит плавление шихты. После полного плавления шихты опускается вал затравки, который последовательно вытягивает кристалл.

Разряжение в системе контролируется с помощью мановакуумметра, термопарных и ионизационных ламп, подключенных к вакуумметрам.

Температура в камере контролируется с помощью термопары (ТПП) и пирометра (Тера-50), подключенных к терморегуляторам. Также контролируется расход воды охлаждения, при недостатке которого отсекается подача тока на графитовый нагреватель.

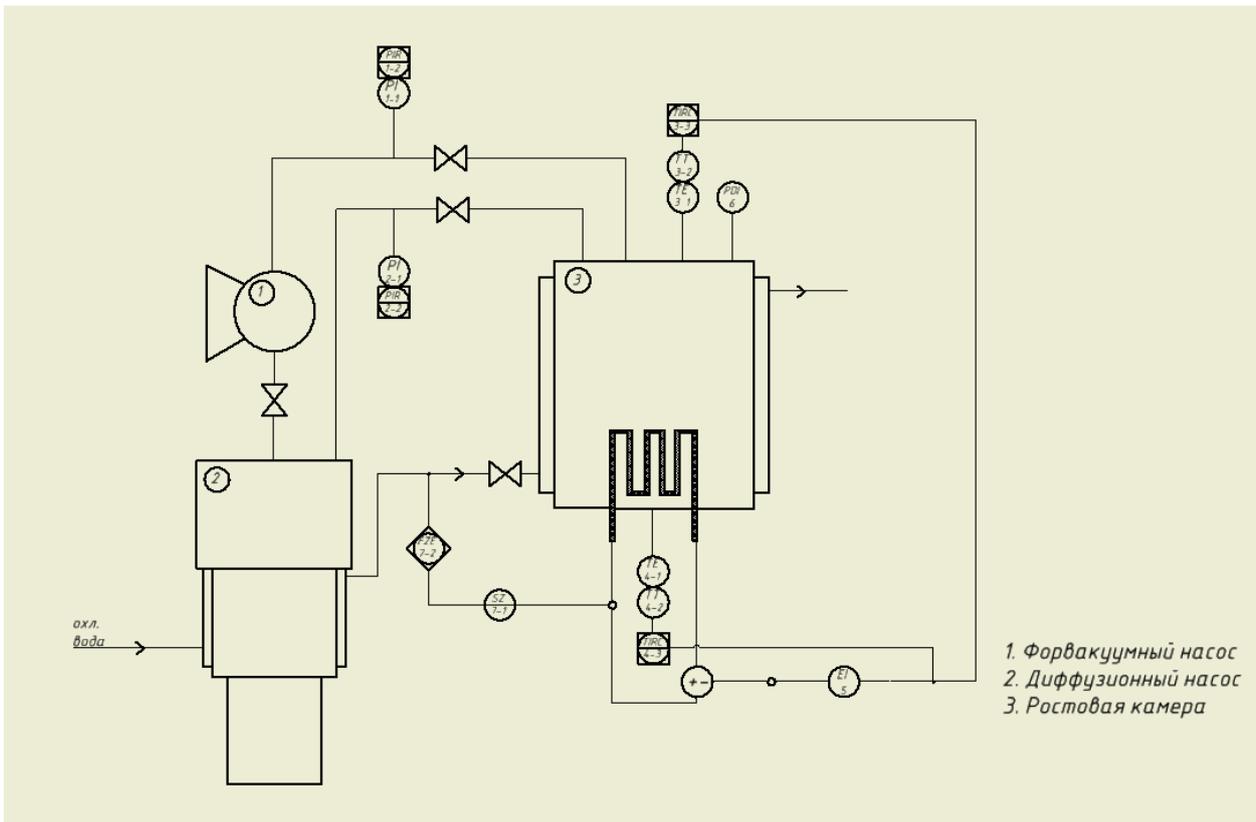


Рисунок 1. Технологическая схема вакуумной ростовой установки Редмет-8

2. Расчет диффузионного насоса

Расчетная модель диффузионного насоса приведена на рис. 2.1.

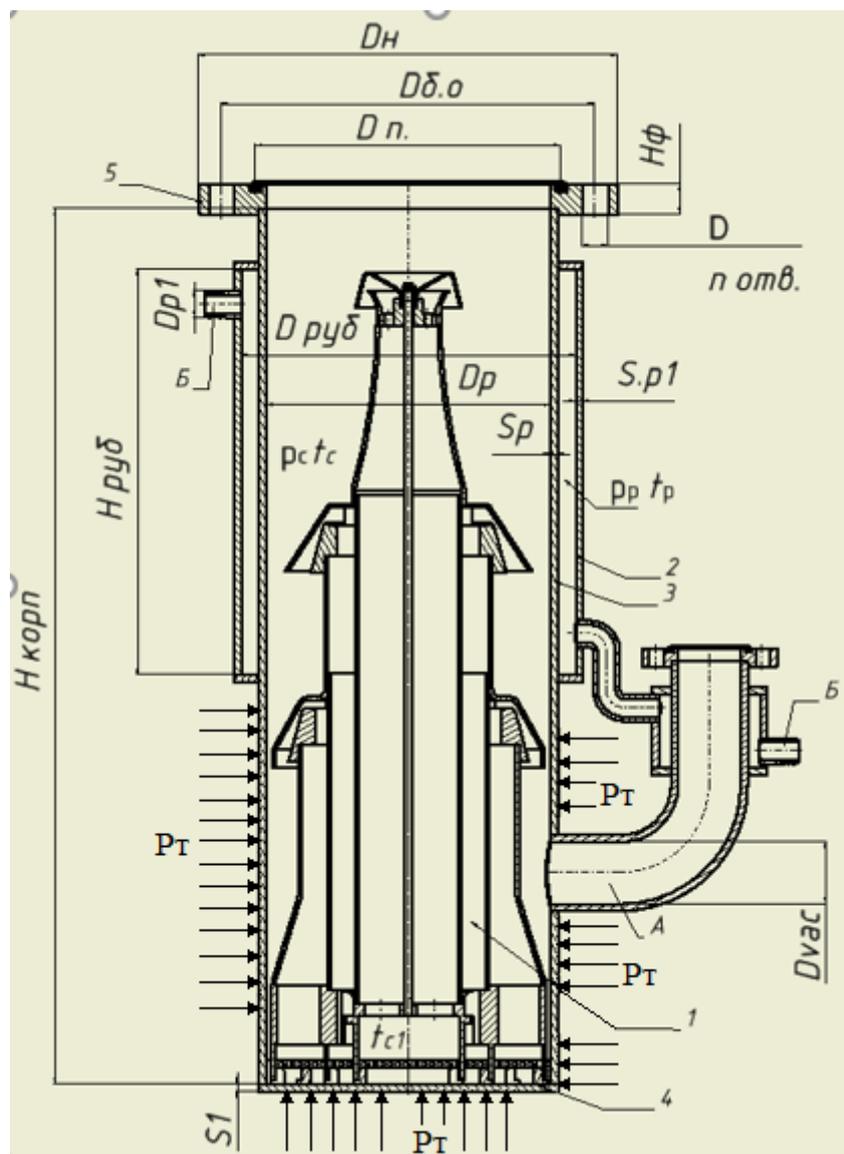


Рисунок 2.1. Расчетная модель диффузионного насоса

1 - паропровод; 2 - цилиндрическая обечайка охлаждающей рубашки;

3 - цилиндрическая обечайка корпуса; 4 - приварное плоское днище;

5 - плоский фланец

А - штуцер для выхода на форвакуумный насос; Б, В - патрубки воды охлаждения

					ФЮРА ВУ 000 000 ПЗ		
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			
Выполнил	Меньшов П.				Лит.	Лист	Листов
Провер.	Беляев В.М.						
Н. Контр.					Ростовая установка		
Утверд.							

Принятые обозначения на расчетной модели:

D - диаметр отверстий во фланце, мм;

D_{Π} - диаметр прокладки, мм;

$D_{\text{бо}}$ - диаметр болтовой окружности, мм;

$D_{\text{н}}$ - наружный диаметр фланца, мм;

$D_{\text{руб}}$ - диаметр рубашки охлаждения, мм;

$D_{\text{р}}$ - диаметр корпуса, мм;

$D_{\text{р1}}$ - диаметр патрубков в рубашке, мм;

D_{vac} - диаметр штуцера для форвакуумного насоса, мм;

$H_{\text{руб}}$ - длина рубашки охлаждения, мм;

$H_{\text{корп}}$ - длина корпуса, мм;

$p_{\text{р}}$ - давление в рубашке охлаждения, МПа;

$p_{\text{с}}$ - рабочее разряжение внутри аппарата, МПа;

$t_{\text{с}}$ - температура среды в зоне охлаждения, °С;

$t_{\text{с1}}$ - температура среды в зоне нагрева, °С;

$t_{\text{р}}$ - температура в рубашке охлаждения, °С;

s_1 - толщина днища, мм;

$s_{\text{р}}$ - толщина обечайки корпуса, мм;

$s_{\text{р1}}$ - толщина обечайки рубашки охлаждения, мм.

2.1 Вакуумный расчет насоса

Исходные данные:

Среда – воздушная

Рабочее разряжение, Па

$$p_c := 10^{-3}$$

Температура кипения масла в насосе, °С

$$t_c := 150$$

Расход воды охлаждения, л/с

$$Q := 0.125$$

Начальная температура воды охлаждения, °С

$$t_{p1} := 13$$

Конечная температура воды охлаждения, °С

$$t_{p2} := 15$$

Диаметр внутренней части, м

$$D_p := 0.16$$

Длина диффузионного насоса, м

$$H_{\text{корп}} := 0.5$$

Диаметр байпасной линии, м

$$D_{\text{байпас}} := 0.25$$

Длина байпасной линии, м

$$L_1 := 1$$

Давление рабочее в рубашке, Мпа

$$P_p := 0.3$$

Наружное(атмосферное) давление, Мпа

$$P_T := 0.1$$

Размеры камеры:

Высота камеры, м

$$h := 0.825$$

Ширина камеры, м

$$a := 0.3$$

Длина камеры, м

$$b := 0.3$$

Диаметр плоских крышек камеры, м

$$d := 0.3$$

Рабочий объём будет равен:

$$V := h \cdot a \cdot b = 0.074 \text{ м}^3$$

2.1.1 Вакуумный расчет системы

Вакуумный расчет ведется по [1].

Вакуумная схема приведена на рис.2.2.

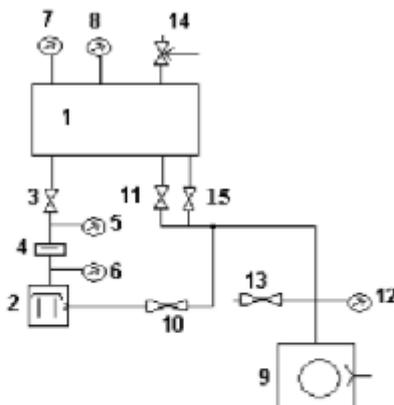


Рисунок 2.2 Типовая вакуумная схема:
1 - рабочий объем; 2 - высоковакуумный насос; 3 - затвор;
4 - ловушка; 5-8, 12 - вакуумметр; 10, 11, 13 - клапаны;
14 - натекатель; 15 - байпасный клапан

Выбор насоса:

Для расчета и выбора насоса найдем суммарный поток газов, поступающих в рабочий объём камеры.

$$Q_{\text{сумм}} := Q_{\text{пр}} + Q_{\text{нат}} + Q_{\text{диф}} + Q_{\text{пов}}$$

Поток $Q_{\text{пр}}$ связан с натеканием газа в вакуумную камеру как по соединениям, так и по сплошному материалу, которые не могут обеспечить абсолютную герметичность.

$$Q_{\text{пр}} := \sum_{i=1}^n q_{\text{пр}} \cdot A_i$$

где $q_{\text{пр}}$ - это удельная проницаемость i -ых материалов,

а A_i - площади всех сопутствующих материалов

Материал, из которого полностью выполнен насос – сталь 12Х18Н10Т, в первую очередь это связано с низкой вакуумной проницаемостью данной марки стали, чистотой и высокой коррозионной стойкостью. Обладает легкой свариваемостью и высокой механической прочностью. Также сталь устойчива к

межкристаллитной коррозии после сварочного нагрева, сравнительно мало охрупчивается в результате длительного воздействия высоких температур и может быть применена в качестве жаропрочного материала при температурах $\sim 600^\circ \text{C}$.

$$q_{\text{пр1}} := 7 \cdot 10^{-11}$$

$$q_{\text{пр2}} := 7.1 \cdot 10^{-13}$$

Удельная проницаемость стали 12X18H10T, $\text{м}^3\text{Па}/(\text{м}^2\text{с})$

Удельная проницаемость вакуумной резины, $\text{м}^3\text{Па}/(\text{м}^2\text{с})$

Найдем площадь поверхности вакуумной линии

Площадь стальных элементов:

Поверхность двери, закрывающей камеру, м^2

$$A_1 := h \cdot b = 0.247$$

Поверхность 2 плоских крышек камеры, м^2

$$A_2 := 3.14 \cdot \frac{d^2}{4} \cdot 2 = 0.141$$

Поверхность цилиндрической части камеры, м^2

$$A_3 := 0.8 \cdot h \cdot 2 \cdot 3.14 \cdot \frac{d}{2} = 0.622$$

Поверхность байпасной линии, м^2

$$A_4 := D_{\text{байпас}} \cdot 2 \cdot 3.14 \cdot L_1 = 1.57$$

Поверхность диффузионного насоса, м^2

$$A_5 := H_{\text{корп}} \cdot 3.14 \cdot D_p = 0.251$$

Поверхность блока вентилей и мелких узлов системы, м^2

$$A_6 := 0.1$$

Площадь поверхности резиновых уплотнений вакуумной линии

Поверхность трубок, сделанных из вакуумной резины, м^2

$$A_7 := 0.03$$

Поверхность прокладок, уплотняющих соединения системы, м^2

$$A_8 := 0.001$$

Тогда суммарная площадь поверхности будет равна

Площадь поверхности стали, м²

$$A_{\text{сталь}} := A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + A_6 = 2.932$$

Площадь поверхности резины, м²

$$A_{\text{рез}} := A_7 + A_8 = 0.031$$

Поток газа с поверхности рабочей камеры и элементов, расположенных в ней, м³Па/с

$$Q_{\text{пр}} := q_{\text{пр1}} \cdot A_{\text{сталь}} + q_{\text{пр2}} \cdot A_{\text{рез}} = 2.052 \times 10^{-10}$$

Удельное газовыделение q_i с поверхностей нагретых деталей и элементов рабочей камеры можно считать одинаковым и постоянным во времени ([1], табл 5). Так как скорость десорбции газов с поверхности экспоненциально зависит от температуры, то нагретые элементы десорбируют газы практически полностью на начальном этапе нагрева. Затем уровень газовыделения нагретых элементов становится постоянным и соответствует газовыделению отождённых в вакууме материалов.

$$q_{\text{повсталь}} := 1.2 \cdot 10^{-8}$$

Удельное газовыделение с поверхности стали, м³Па/ (м²с)

Удельное газовыделение с поверхности резины, м³Па/ (м²с)

$$q_{\text{поврез}} := 1.2 \cdot 10^{-7}$$

Суммарный поток газовыделения с поверхностей, м³Па/с

$$Q_{\text{пов}} := q_{\text{повсталь}} \cdot A_{\text{сталь}} + q_{\text{поврез}} \cdot A_{\text{рез}} = 3.89 \times 10^{-8}$$

Диффузионное газовыделение связано с выделением газов из конструкционных материалов и зависит от материала и его предварительной обработки [1], м³Па/м²с

$$q_{\text{дифсталь}} := 3.4 \cdot 10^{-10}$$

Суммарный поток диффузионного газовыделения, м³Па/с

$$Q_{\text{диф}} := q_{\text{дифсталь}} \cdot A_{\text{сталь}} = 9.968 \times 10^{-10}$$

Поток газов, связанный с натеканием в рабочую камеру обычно берется по характеристикам элементов вакуумных систем, а при их отсутствии – равным или несколько большим произведения чувствительности течеискателя на число мест, которые могут стать источником натекания

Минимальный обнаруживаемый поток пробного вещества с помощью галогенного течеискателя, м³Па/с

$$q := 3 \cdot 10^{-7}$$

Количество мест, способных быть источниками натекания, в основном это места соединения деталей, фланцы, торцевые уплотнения:

$$n := 13$$

Поток газов, связанный с натеканием, м³Па/с

$$Q_{\text{нат}} := q \cdot n = 3.9 \times 10^{-6}$$

Тогда суммарный поток газов, поступающий в рабочий объём будет равен

$$Q_{\text{сумм}} := Q_{\text{пр}} + Q_{\text{нат}} + Q_{\text{диф}} + Q_{\text{пов}} = 3.94 \times 10^{-6} \quad \text{м}^3\text{Па/с}$$

Таким образом теперь мы можем определить необходимую эффективную быстроту откачки рабочей камеры

$$\text{по условию } p_{\text{раб}} := 10^{-3} \quad \text{Па}$$

Быстрота откачки без учета коэффициента типа насоса, м³/с

$$S_0 := \frac{Q_{\text{сумм}}}{p_{\text{раб}}} = 3.94 \times 10^{-3}$$

где $p_{\text{раб}}$ - рабочее давление, Па

Быстрота насоса рассчитывается следующим образом:

$$v := 2$$

$$S_H := v \cdot S_0 = 7.88 \times 10^{-3} \quad \text{м}^3/\text{с}$$

Где v - это коэффициент, зависящий от типа насоса, в случае с пароструйным насосом $v=2$

При выборе насоса должны выполняться два условия:

1) $p_{пр} < p$. Если это условие не выполняется, то необходимо выбрать насос с меньшим предельным давлением.

2) $S_H > S_{Hрасч}$

По каталогу [1] выбираем вакуумный насос, имеющий номинальную быстроту действия большую или равную расчетному значению.

Выбираем диффузионный насос из каталога [2],

Выбранный насос DFYK - 80 имеет следующие характеристики (табл 2.1).

Таблица 2.1 Характеристики насоса DFYK – 80

Наименование	АВПР-60Д
Быстрота действия, л/с	145
Предельное остаточное давление, Па	$3 \cdot 10^{-5}$
Наибольшее выпускное давление, Па	40
Мощность нагревателя, кВт	0,45
Рекомендуемые форвакуумный насос, л/с	2,4
Диаметр фланца входного, мм	160
Тип охлаждения	Водяное

Выбор вспомогательного насоса.

Большинство насосов, такие как пароструйные, турбомолекулярные и др., для запуска и работы требуют создания и поддержания определенного разрежения во всей вакуумной системе, включая насос.

Так как вспомогательный насос обеспечивает предварительное разрежение в камере, чтобы выбрать тип вспомогательного насоса, необходимо по каталогу уточнить значения давления запуска p_3 основного насоса и подобрать насос предварительного разрежения, способный обеспечить указанное давление.

Во время работы основного насоса вспомогательный насос производит откачку из высоковакуумного насоса. Давление на входе во вспомогательный насос

должно быть меньше выпускного давления на выходе из высоковакуумного насоса. Т.е. вспомогательный насос должен быть способен не только удалять определенное количество газов, поступающих из основного насоса, но и поддерживать определенное выпускное давление на выходе основного насоса.

Наибольшее выпускное давление выбранного насоса, Па

$$p_{i1} := 40$$

Требуемое рабочее давление вспомогательного насоса, Па

$$n := 2$$

$$p_i := \frac{p_{i1}}{n} = 20$$

Где n - это коэффициент запаса, принимается от 2 до 10(принимаем 2)

Выбор вспомогательного насоса производим по аналогии, по каталогу [2], выбранный насос АВПР-60Д (табл. 2.2).

Таблица 2.2 Характеристики насоса АВПР-60Д

Наименование	АВПР-60Д
Скорость откачки, л/с	17,2
Предельное парциальное давление без газобалласта, кПа	$4 \cdot 10^{-5}$
Предельное остаточное давление без газобалласта, кПа	$5 \cdot 10^{-4}$
Предельное остаточное давление с газобалластом, кПа	$7 \cdot 10^{-4}$
Диаметр фланца входного, мм	35
Тип масла	ВМ-1С

Время предварительной откачки. Проверяется возможность использования выбранного вспомогательного насоса для предварительной откачки рабочей камеры (т.е. определяется способность выбранного насоса достичь предварительного разрежения за необходимое время).

Для этого рассчитывается эффективная быстрота откачки конкретно для этого насоса

Скорость откачки для насоса АВПР-60Д, м³/с

$$S_H := 0.0172$$

$$S_0 := \frac{S_H}{1.35} = 0.013$$

Тогда время предварительной откачки рабочей камеры без учета газовыделения определяется как:

Атмосферное давление, Па

Предельное давление для включения диффузионного насоса, Па $p_1 := 101.3 \cdot 10^3$

$$p_2 := 40$$

$$t := \frac{V}{S_0} \cdot \ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right) = 45.672 \quad \text{сек}$$

где V – объем рабочей камеры, м^3 ;

S_0 – эффективная быстрота откачки камеры, $\text{м}^3/\text{с}$;

p_1 – давление перед началом откачки, Па;

p_2 – давление после откачки, Па.

2.2 Механический расчет насоса

Конструкция:

Диффузионный насос состоит из цилиндрической обечайки 3 с рубашкой 2, в которую подается охлаждающая вода. Дно насоса 4 выполнено в виде плоского приварного днища без отверстий. Также имеется штуцер для подключения форвакуумного насоса А, штуцер имеет рубашку, которая соединена с рубашкой корпуса диффузионного насоса. Крепление форвакуумного насоса и штуцера осуществляется с помощью фланцев, герметичность обеспечивается прокладками из вакуумной резины круглого или прямоугольного сечения. Внутри диффузионного насоса устанавливается паропровод 1, который, в свою очередь состоит из системы сопел разной высоты.

Принцип работы:

В диффузионный насос наливается вакуумное масло высотой $h_{ж}$, под днище монтируется резистивный нагреватель. Нагрев масла происходит до температуры кипения. Пары масла накапливаются, создавая при этом необходимое давление, под которым он поднимается в паровом трубопроводе и попадает в кольцевой зазор сопел первой, второй и третьей ступеней откачки. Когда пар проходит по соплу, он теряет свою движущую силу и плотность, вследствие чего образовавшаяся струя становится шире и направляется на заранее охлажденную стену корпуса насоса. Таким образом, пары конденсируются в капли и стекают обратно в нагревательную камеру, после чего процесс повторяется. Благодаря вышеописанной работе парогенерации, поток газовых молекул, который двигается в противоположном направлении, сталкивается с частицами пара и проникает в них. В итоге в процессе конденсации газ отделяется и выводится из насоса наружу. Благодаря тому, что инерция струи пара больше встречной инерции молекул газа, первая не изменяет своё направление, блокируя при этом попадание газов в область низкого давления. В этом процессе заложен смысл откачки газа через выхлопной патрубок, и такой метод полностью исключает остаточный уровень газовых молекул в обрабатываемой среде.

2.2.1 Расчетные параметры

Основные характеристики стали определяются согласно [3].

Рабочая температура в области кипения масла

$$t_{c1} := 150 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Т.к. в зоне охлаждения температура несколько ниже 20°C , поэтому принимаем температуру в зоне охлаждения 20°C

$$t_p := 20 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Материал, из которого выполнена установка 12X18H10T, в первую очередь это связано с низкой вакуумной проницаемостью данной марки стали, чистотой и высокой коррозионной стойкостью. Обладает легкой свариваемостью и высокой

механической прочностью. Также сталь устойчива к межкристаллитной коррозии после сварочного нагрева, сравнительно мало охрупчивается в результате длительного воздействия высоких температур и может быть применена в качестве жаропрочного материала при температурах ~600° С.

Допускаемое напряжение для стали 12х18н10т при гидравлических испытаниях:

$n_T := 1.1$ Коэффициент запаса прочности при условиях гидравлических испытаний

$R_{et} := 196$ Предел текучести стали при 20 °С

$$\sigma_{и} := \frac{R_{et}}{n_T} = 178.182 \quad \text{МПа}$$

Допускаемое напряжение материала при рабочей температуре в области кипения масла

$\sigma_{д150} := 168$ МПа

Допускаемое напряжение при рабочей температуре в области охлаждения ($t=20$ °С)

$\sigma_{д20} := 184$ МПа

Сварка аппарата полуавтоматическая, сварной шов стыковой односторонний, контролируемая длина сварных швов 100%

$\phi_p := 0.9$

Прибавка к расчетным толщинам конструктивных элементов

Скорость коррозии материала от действия заданной среды, мм/год

$$P := 0.01 \quad [4]$$

Срок эксплуатации аппарата, лет

$$t_v := 10$$

Прибавка для компенсации коррозии и эрозии, мм

$$c_1 := P \cdot t_v = 0.1$$

Поправка на минусовое отклонение, согласно [5], мм

$$c_2 := 0.08$$

На утонение стенки элемента сосуда при технологических операциях, мм

$$c_3 := 0.12$$

Прибавка к расчетным толщинам конструктивных элементов [3], мм

$$c := \text{ceil}(c_1 + c_2 + c_3) = 1$$

Расчет давлений

Поскольку аппарат работает под разряжением, толщину стенки определяем исходя из действия наружного давления.

Давление в аппарате согласно [7]:

Расчетное давление, действующее на диффузионный насос в рабочих условиях:

Расчетное давление складывается из разряжения в насосе и давления в рубашке

$$P_c := 0.3 + 0.1 \text{ МПа}$$

$$P_{и1} := 1.25 \cdot P_c \cdot \frac{\sigma_{д20}}{\sigma_{д150}} \quad P_{и1} = 0.548 \text{ МПа}$$

Рабочее давление в рубашке

$$P_p := 0.3 \text{ МПа}$$

Давление при гидравлических испытаниях в рубашке насоса

$$P_{и2} := 1.25 \cdot P_p \cdot \frac{\sigma_{д20}}{\sigma_{д150}} \quad P_{и2} = 0.411 \text{ МПа}$$

2.2.2 Расчет толщин стенок

2.2.2.1 Расчет толщины стенки корпуса насоса (поз.3 рис. 2.1)

Цель выполняемого расчета, найти толщину стенки из условия прочности и устойчивости.

Расчетная схема приведена на рис. 2.3

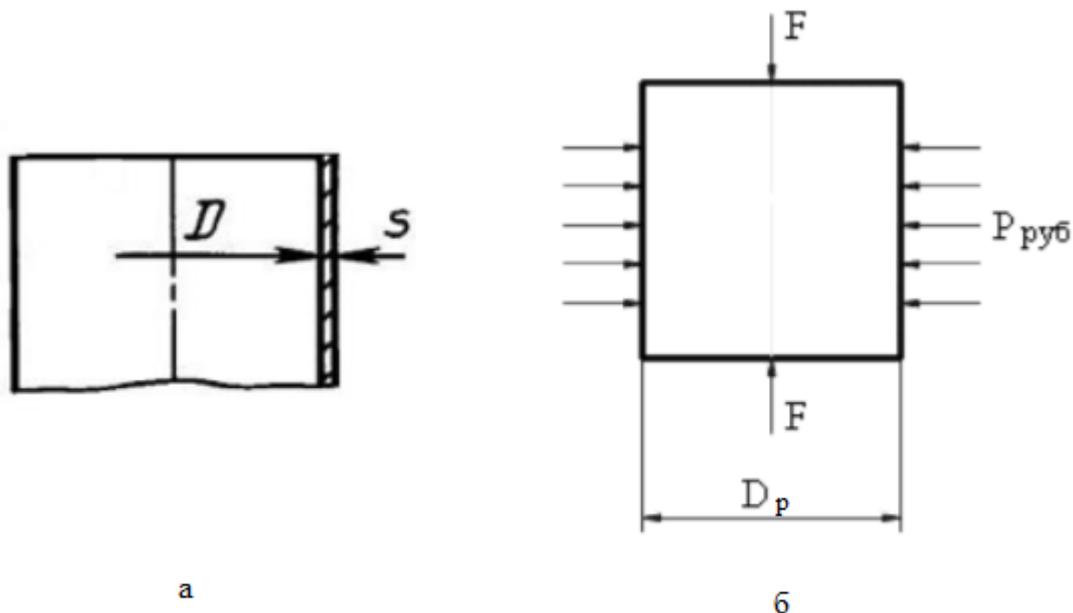


Рисунок 2.3 Расчетная схема обечайки аппарата:
а - изображение стенки в сечении
б - возникающие нагрузки

Расчет толщины стенки проводим по [7].

Внутренний диаметр аппарата, мм

$$D_p := 160$$

Коэффициент прочности сварных швов

$$\phi_s := 0.9$$

Модуль упругости для стали при рабочей температуре, $\cdot 10^5$ МПа

$$E := 1.94$$

Расчетная длина обечайки, мм

$$H_{корп} := 500$$

Исходя из того, что на обечайку насоса будет действовать два разных давления (давление в рубашке и атмосферное давление) рассчитаем толщину стенки для разных давлений

Расчет толщины стенки для зоны действия атмосферного давления

Атмосферное давление, МПа

$$P_{атм} := 0.1$$

Коэффициент В рассчитывается по формуле, согласно с [7]

$$B := \max \left[\begin{array}{c} 1 \\ 0.47 \cdot \left(\frac{P_{\text{атм}}}{E} \right)^{0.067} \cdot \left(\frac{H_{\text{корп}}}{D_p} \right)^{0.4} \end{array} \right] = 1$$

Тогда расчетная толщина стенки равна:

$$s_p := \max \left[\begin{array}{c} 1.06 \cdot \frac{10^{-2} \cdot D_p}{B} \cdot \left(\frac{P_{\text{атм}}}{E} \cdot \frac{H_{\text{корп}}}{D_p} \right)^{0.4} \\ \frac{1.2 \cdot P_{\text{атм}} \cdot D_p}{2 \cdot \sigma_{\text{д150}} - P_{\text{атм}}} \end{array} \right] = 0.817 \quad \text{мм}$$

Расчет толщины стенки в области действия рубашки охлаждения

$$B := \max \left[\begin{array}{c} 1 \\ 0.47 \cdot \left(\frac{P_c}{E} \right)^{0.067} \cdot \left(\frac{H_{\text{корп}}}{D_p} \right)^{0.4} \end{array} \right] = 1$$

Тогда расчетная толщина стенки равна:

$$s_p := \max \left[\begin{array}{c} 1.06 \cdot \frac{10^{-2} \cdot D_p}{B} \cdot \left(\frac{P_c}{E} \cdot \frac{H_{\text{корп}}}{D_p} \right)^{0.4} \\ \frac{1.2 \cdot P_c \cdot D_p}{2 \cdot \sigma_{\text{д150}} - P_c} \end{array} \right] = 1.423 \quad \text{мм}$$

Расчетная толщина стенки из условия прочности для давления испытаний

Расчет коэффициента

$$B := \max \left[\begin{array}{c} 1 \\ 0.47 \cdot \left(\frac{P_{\text{и1}}}{E} \right)^{0.067} \cdot \left(\frac{H_{\text{корп}}}{D_p} \right)^{0.4} \end{array} \right] = 1$$

Расчет толщины стенки

$$s_p := \max \left[\left[\frac{1.06 \cdot 10^{-2} \cdot D_p \cdot \left(\frac{P_{и1}}{E} \cdot \frac{H_{корп}}{D_p} \right)^{0.4}}{B} \right], \left[\frac{1.2 \cdot (P_{и1}) \cdot D_p}{2 \cdot \sigma_{и} - (P_{и1})} \right] \right] = 1.613 \text{ мм}$$

Исполнительную толщину стенки рассчитываем с поправкой на прибавку

$$s_{\text{мм}} := \text{ceil}(s_p + c) = 3 \text{ мм}$$

Принимаем исполнительную толщину стенки равной $s_{\text{мм}} := 4 \text{ мм}$

Допускаемое наружное давление для данной толщины стенки будет равно

Из условия прочности:

$$p_{\Pi} := \frac{2 \cdot \sigma_{д150} \cdot (s - c)}{D_p + (s - c)} = 6.184 \text{ МПа}$$

$$B_1 := \min \left[\left[\frac{1}{9.45 \cdot \frac{D_p}{H_{корп}} \cdot \sqrt{\frac{D_p}{100(s - c)}}} \right] \right] = 1$$

Допускаемое давление из условия устойчивости в пределах упругости будет равно:

$n_y := 2$ коэффициент запаса устойчивости

$$p_e := \frac{2.08 \cdot E \cdot D_p}{n_y \cdot B_1 \cdot H_{корп}} \left[\frac{100(s - c)}{D_p} \right]^{2.5} = 3.108 \text{ МПа}$$

Тогда допускаемое наружное давление будет равно

$$p := \frac{p_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{p_{\Pi}}{p_e} \right)^2}} = 2.777 \text{ МПа}$$

Проверка условия применимости формул безмоментной теории:

$$\frac{s-c}{D_p} = 0.019 < 0.1, \text{ условия применения формул выполняются}$$

Осевое сжимающее усилие от давления на днище и крышку:

$$F_{\text{дв}} := P_T \cdot \pi \cdot \left(\frac{D_p}{2}\right)^2 \cdot 10^{-6} = 2.011 \times 10^{-3} \quad \text{МН}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия прочности

$$F_{\text{дс}} := \pi \cdot (D_p + s - c) \cdot (s - c) \cdot \sigma_{\text{д20}} = 2.827 \times 10^5 \quad \text{МН}$$

При расчетной схеме, изображенной на рис. 2.4 $l_{\text{пр}} := H_{\text{корп}}$

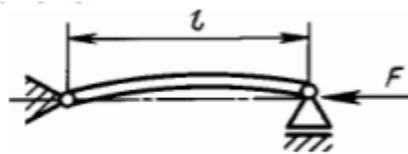


Рисунок 2.4 Расчетная схема нагружения осевым сжимающим усилием обечайки

Рассчитаем гибкость

$$\lambda := \frac{2.83 \cdot l_{\text{пр}}}{D_p + s - c} = 8.681$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие в пределах упругости из условия устойчивости

$$F_{\text{дЕ}} := \begin{cases} \text{if } \frac{l_{\text{пр}}}{D_p} \geq 10 & = 37.058 \\ \begin{cases} F_{\text{дЕ1}} \leftarrow 31 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{E}{n_y} \cdot D_p^2 \cdot \left[100 \cdot \frac{(s-c)}{D_p}\right]^{2.5} \\ F_{\text{дЕ2}} \leftarrow \left(\frac{\pi}{\lambda}\right)^2 \cdot \frac{\pi \cdot (D_p + s - c) \cdot (s - c) \cdot E}{n_y} \\ F_{\text{дЕ}} \leftarrow \min(F_{\text{дЕ1}}, F_{\text{дЕ2}}) \end{cases} \\ F_{\text{дЕ}} \leftarrow 31 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{E}{n_y} \cdot D_p^2 \cdot \left[100 \cdot \frac{(s-c)}{D_p}\right]^{2.5} \quad \text{otherwise} \end{cases}$$

$$F_{\text{дЕ}} = 37.058 \quad \text{МН}$$

Тогда суммарное допускаемое осевое сжимающее усилие будет вычислено по формуле:

$$F_d := \frac{F_{d\sigma}}{\sqrt{1 + \left(\frac{F_{d\sigma}}{F_{dE}}\right)^2}} = 37.058 \quad \text{МН}$$

Проверка условия устойчивости:

$$\frac{P_T}{P} + \frac{F}{F_d} = 0.036 \quad \bullet < 1 \quad \text{условие устойчивости выполняется}$$

По условию максимально действующее на обечайку давление $P = 0,4$ МПа, а рассчитанное допускаемое давление $P_d = 2,7$ МПа, следовательно, допустимо нагружать обечайку давлением $P = 0,4$ МПа. Условие прочности выполняется.

2.2.2.2 Расчет толщины стенки рубашки (рис. 2.1 поз. 2.)

Цель расчета - найти толщину стенки из условия прочности

Расчетная схема рубашки изображена на рис. 2.5

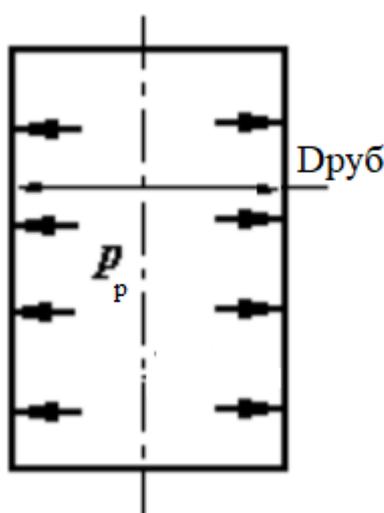


Рисунок 2.5 Расчетная схема обечайки рубашки

Расчетная и исполнительная толщина стенок цилиндрической обечайки при внутреннем избыточном давлении находим исходя из [7]:

Внутренний диаметр рубашки определяется как:

$$D_{\text{руб}} := D_p + 2 \cdot s + 10 = 178 \text{ мм}$$

Внутреннее избыточное давление в рубашке, МПа

$$s_{p1} := \max \left(\left(\frac{P_p \cdot D_{\text{руб}}}{2 \cdot \sigma_{д150} \cdot \phi_p - P_p} \right), \left(\frac{P_{и2} \cdot D_{\text{руб}}}{2 \cdot \sigma_{и} \cdot \phi_p - P_{и2}} \right) \right) \quad s_{p1} = 0.228 \text{ мм}$$

Исполнительная толщина стенки аппарата:

$$s_{\text{мм}} := \text{ceil}(s_{p1} + c) \quad s = 2 \text{ мм}$$

Принимаем толщину стенки рубашки равную 4 мм $s_{\text{мм}} := 4 \text{ мм}$

Проверка условия применимости формул безмоментной теории:

$$\frac{s - c}{D_{\text{руб}}} = 0.017$$

т.к. $0,017 < 0.1$, то условия применения формул выполняются

Допускаемое внутреннее избыточное давление вычисляют по формуле:

$$P_d := \frac{[2 \cdot \sigma_{д150} \cdot \phi_p \cdot (s - c)]}{D_{\text{руб}} + (s - c)} = 5.012 \text{ МПа}$$

Проверка условия прочности стенок, цилиндрической обечайки от действия внутреннего давления

$$\text{Пров1} := \begin{cases} \text{"Проверка условия прочности выполняется"} & \text{if } P_d > P_{и2} \\ \text{"Проверка условия прочности НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Пров1} = \text{"Проверка условия прочности выполняется"}$$

2.2.3 Расчет толщины плоского приварного днища (рис. 2.1 поз. 4)

Цель расчета - найти толщину днища из условия прочности

Расчетная схема приведена на рис. 2.6

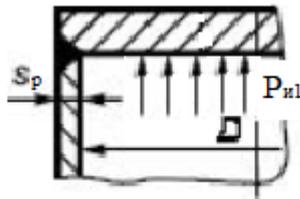


Рисунок 2.6 Расчетная схема плоского приварного днища

Толщину плоского круглого днища, вычислим по формуле [7].

$$s_1 := K \cdot K_0 \cdot D_p \cdot \sqrt{\frac{P_p}{\phi_p \cdot \sigma_{д150}}}$$

По таблице выбираем тип крепления днища к обечайке и, соответственно, коэффициент [табл. 4, 7], выбранные параметры изображены на табл. 2.3

Таблица 2.3 Выбранный тип крепления днища к обечайке

Тип днища	Условия	К
	$\frac{s - c}{s_1 - c} \geq 0,25$ $D_p = D$	0,41

$$K := 0,41$$

$$D_p = 160$$

Т.к. днище без отверстий, принимаем коэффициент K_0 равным 1

$$K_0 := 1$$

$$s_1 := K \cdot K_0 \cdot D_p \cdot \sqrt{\frac{P_{н1}}{\phi_p \cdot \sigma_{д150}}} = 3.948 \quad \text{мм}$$

$$s_{\text{нн}} := \text{ceil}(s_1 + c) = 5 \quad \text{мм}$$

Таким образом исполнительная толщина плоского днища будет равна 5 мм

Допускаемое давление для плоского днища, МПа

$$P_d := \frac{s_1 - c}{K \cdot K_0 \cdot D_p} \cdot (\phi_p \cdot \sigma_{д150}) = 6.795$$

$$\frac{s_1 - c}{D_p} = 0.018 < 0.11, \text{ условие применимости формул выполняется}$$

Толщина стенки цилиндрической обечайки, мм $s_{\text{цо}} := 4$

$$\frac{s_{\text{цо}} - c}{s - c} = 0.75 > 0.25, \text{ условие применимости формул выполняется}$$

По условию максимально действующее на днище давление $P=0,4$ МПа, а рассчитанное допускаемое давление $P_d= 6,795$ МПа, следовательно, допустимо нагружать обечайку давлением $P= 0,4$ МПа. Условие прочности выполняется.

2.2.4 Расчет и подбор патрубков (Б, рис. 2.1)

Цель - найти минимальный диаметр патрубков для входа и выхода воды охлаждения

Количество охлаждающей воды для диффузионного насоса

$$G := 0.0354 \quad \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

Плотность воды

$$\rho_p := 1000 \quad \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Скорость воды

$$\omega := 0.5 \quad \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

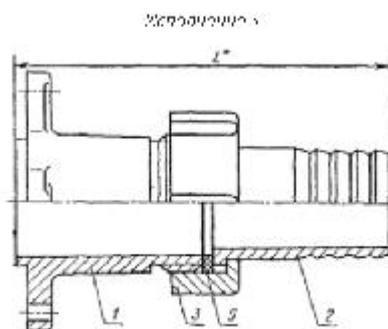


Рисунок 2.7 Изображение патрубка

Определяем внутренний диаметр патрубка (рис. 2.7) для подвода и отвода охлаждающей воды по [11].

Диаметр патрубка равен:

$$d := \sqrt{\frac{4 \cdot G}{\pi \cdot \omega \cdot \rho_p}} = 9.494 \times 10^{-3} \quad \text{м} \quad \text{при давлении } 0,3 \text{ МПа}$$

Рассчитанный диаметр округляем до ближайшего большего значения 10мм в соответствии с нормализованным диаметром условного прохода патрубков. Размеры патрубка приведены в табл. 2.3

Табл.2.4 Размеры патрубка[8]

Dy	D	d3	L
10	M20x1.5	15	17

Патрубки для подключения форвакуумного насоса, исходя из рекомендации [1], принимаются равными диаметру входного патрубка в форвакуумный насос

$$D_{\text{vac}} := 35 \quad \text{мм}$$

2.2.5 Расчет фланцевого соединения (рис. 2.1 поз.5)

Цель расчета - проверить спроектированный фланец на условие прочности, условие прочности прокладки, условие статической прочности, а также на угол поворота.

Расчет фланцевого соединения, соединяющего диффузионный насос с вакуумной системой, проводим по [14].

Материал обечаек и фланцев 12X18Н10Т;

Материал болтов 40Х по [14];

Материал прокладки резина вакуумная [14], т.к. температура в области уплотнения сравнительно невысока и материал обладает низким показателем проницаемости, и повсеместное использование делает его легкодоступным;

Фланцы приварные встык;

Уплотнительная поверхность выбрана согласно с рекомендациями из [1] (рис. 2.8) и нагрузки, действующие на фланец при нагрузках разрушения приведены на рис. 2.9.

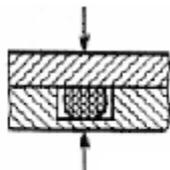


Рисунок. 2.8 Изображение уплотнительной поверхности фланца в разрезе

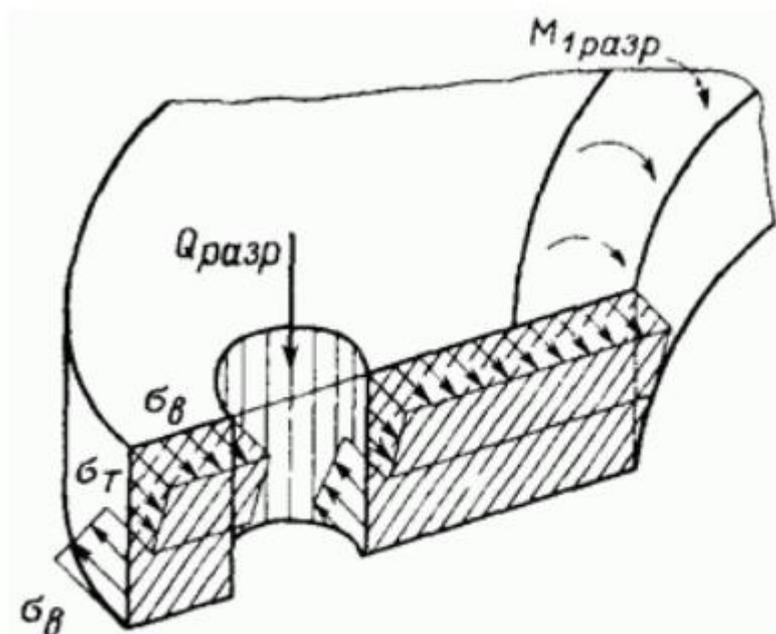


Рисунок 2.9 Нагрузки, действующие на фланец при нагрузках разрушения

Исходные данные

Так как под диаметр прохода 160 мм не изготавливается стандартный фланец, проектируем фланец, исходя из расчетов прочности, с предварительными размерами, принятыми из конструкторских соображений.

Необходимый диаметр для соединения с распределительной камерой, мм	$D := 160$
Количество шпилек	$n := 8$
Расчетная температура, при которой работает фланец, °C	$t := 150$
Максимальное давление, действующее на фланец, МПа	$P := 0.4$
Диаметр фланца наружный, мм	$D_H := 235$
Диаметр расположения болтовых отверстий, мм	$D_{б.о} := 210$
Толщина тарелки фланца, мм	$H_{\phi} := 17$
Диаметр отверстий, мм	$D_{ш} := 14$
Наружный диаметр прокладки	$D_{нп} := 170$
Шпильки	M10

Определение расчетных параметров

Расчетные температуры

Расчетная температура неизолированных фланцев

$$t_{\phi} := 0.96t \quad t_{\phi} = 144 \quad ^{\circ}\text{C}$$

Расчетная температура шпилек

$$t_{\sigma} := 0.85 \cdot t = 127.5$$

$$t_{\sigma} = 127.5 \quad ^{\circ}\text{C}$$

Допускаемое напряжение для материала шпилек

$$t := \begin{pmatrix} 100 \\ 200 \end{pmatrix} \quad \sigma := \begin{pmatrix} 225 \\ 222 \end{pmatrix}$$

$$\sigma_{д.6} := \text{Floor}(\text{linterp}(t, \sigma, t_{\sigma}), 0.5) \quad \sigma_{д.6} = 224 \quad \text{МПа}$$

Модуль упругости для шпилек при рабочей температуре

$$t := \begin{pmatrix} 100 \\ 200 \end{pmatrix} \quad E := \begin{pmatrix} 2.08 \cdot 10^5 \\ 2.01 \cdot 10^5 \end{pmatrix}$$

$$E_{\sigma} := \text{Floor}(\text{linterp}(t, E, t_{\sigma}), 0.01) \quad E_{\sigma} = 2.061 \times 10^5 \quad \text{МПа}$$

Допускаемое напряжение для шпилек при $t=20^{\circ}\text{C}$

$$\sigma_{20.6} := 230 \text{ МПа}$$

Модуль упругости для шпилек при температуре испытания

$$E_{20.6} := 2.18 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Коэффициент линейного расширения стали 40Х при $t=20-200^{\circ}\text{C}$

$$\alpha_{\sigma} := 13.4 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{K}}$$

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

допускаемое напряжение для стали
12x18н10т при рабочей температуре, МПа

$$\sigma_{д150} = 168$$

допускаемое напряжение для стали
12x18н10т при 20°C, МПа

$$\sigma_{д20} = 184$$

Модуль упругости для стали 12x18н10т при
20°C, МПа

$$E_{20} := 1.98 \cdot 10^5$$

Модуль упругости для стали 12x18н10т
при рабочей температуре, МПа

$$\underline{E} := 1.92 \cdot 10^5$$

Коэффициент линейного расширения для стали
12x18н10т при t=20-200°C, 1/К

$$\alpha_{\phi} := 16.8 \cdot 10^{-6}$$

Выбираем толщину прокладки 6 мм для обеспечения герметичности

Эффективная ширина прокладки круглого сечения прокладки, b₀

$$b_{\Pi} := 6 \text{ мм}$$

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

$$b_0 = 6$$

Характеристики прокладки по [14]

Прокладочный коэффициент

$$\underline{m} := 1$$

Удельное давление обжатия прокладки, МПа

$$q_{\text{обж}} := 4$$

Допускаемое удельное давление, МПа

$$q_d := 20$$

Коэффициент обжатия

$$K_{\text{обж}} := 0.09$$

Ширина прокладки, мм

$$\underline{h} := 6$$

Условный модуль сжатия прокладки, МПа

$$E_{\Pi} := 0.4 \cdot 10^{-4} \cdot \left(1 + \frac{b}{2 \cdot h}\right) \cdot 10^5 = 4.1$$

Расчетный диаметр прокладки равен:

$$D_{\text{сп}} := D_{\text{нп}} - b_0 = 164 \text{ мм}$$

Усилие, необходимое для смятия прокладки при затяжке

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

$$P_{\text{обж}} = 618.265 \text{ Н}$$

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

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

$$R_{\text{п}} = 1.237 \times 10^3 \text{ Н}$$

Площадь поперечного сечений шпилек для диаметра резьбы М10, приложение Д.1 [14].

$$f_{\text{с}} := 52.2 \text{ мм}^2$$

Суммарная площадь сечения шпилек по внутреннему диаметру резьбы или нагруженному сечению наименьшего диаметра.

$$A_{\text{с}} := n \cdot f_{\text{с}} \quad A_{\text{с}} = 417.6 \text{ мм}^2$$

Равнодействующая нагрузка от давления

$$Q_{\text{д}} := 0.785 \cdot D_{\text{сп}}^2 \cdot P \quad Q_{\text{д}} = 8.445 \times 10^3 \text{ Н}$$

Приведенная нагрузка, вызванная воздействием внешней силы и изгибающего момента:

Внешний изгибающий момент примем равным нулю, исходя из условий

$$M := 0 \text{ Н}\cdot\text{мм}$$

Приведенная нагрузка, вызванная внешней осевой силой или моментом, принимаем равным весу аппарата, т.к. у аппарата отсутствуют опоры, и нагрузка действует на фланец

$$F_{\text{вв}} := 300 \text{ Н}$$

Тогда:

$$Q_{FM} := F + \frac{4 \cdot M}{D_{сп}} = 300 \quad \text{Н}$$

Податливость прокладки

$$y_{\Pi} := \frac{K_{обж}}{E_{\Pi} \cdot \pi \cdot D_{сп} \cdot b_{\Pi}} = 7.101 \times 10^{-6}$$

Расстояние между опорными поверхностями гаек

$L_{60} := 60$ мм Длина шпильки, найдена исходя из толщины фланцев

$d := 10$ мм Диаметр шпильки, т.к. была выбрана шпилька М10

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

$$L_6 = 65.6 \quad \text{мм}$$

Податливость шпилек, мм/Н

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

$$y_6 = 7.206 \times 10^{-7}$$

Расчетные параметры фланцев:

$s_{цф} := 4$ мм толщина обечайки

Параметр длины обечайки

$$l_0 := \sqrt{D \cdot s_{цф}} \quad l_0 = 25.298 \quad \text{мм}$$

Отношение наружного диаметра тарелки фланца к внутреннему диаметру

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

$$K = 1.469$$

$$\beta_T := \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \log(K)) - 1}{(1.05 + 1.945 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} \quad \beta_T = 1.723$$

$$\beta_U := \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \log(K)) - 1}{1.36(K^2 - 1) \cdot (K - 1)} \quad \beta_U = 5.743$$

$$\beta_Y := \frac{1}{K - 1} \left(0.69 + 5.72 \cdot \frac{K^2 \cdot \log(K)}{K^2 - 1} \right) \quad \beta_Y = 5.27$$

$$\beta_Z := \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} \quad \beta_Z = 2.728$$

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

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

Коэффициент λ

$$\lambda := \frac{\beta_F \cdot h + l_0}{\beta_T \cdot l_0} + \frac{\beta_V \cdot h^3}{\beta_U \cdot l_0 \cdot s_{цo}^2} \quad \lambda = 0.757$$

Угловая податливость фланцев:

Угловая податливость фланца при затяжке

$$y_\phi := \frac{0.91 \cdot \beta_V}{\lambda \cdot l_0 \cdot s_{цo}^2 \cdot E_{20}} \quad y_\phi = 8.252 \times 10^{-9} \quad \frac{\text{мм}}{\text{Н}}$$

Коэффициент, учитывающий изгиб тарелки фланца между шпильками

$$C_F := \max \left[1, \sqrt{\frac{\pi \cdot D_{б.o}}{n \cdot \left(2 \cdot d + \frac{6 \cdot h}{m + 0.5} \right)}} \right] \quad C_F = 1.369$$

Плечо действия усилий в шпильках для приварных встык и плоских фланцев

$$b := 0.5 \cdot (D_{б.o} - D_{сп}) \quad b = 23 \quad \text{мм}$$

Плечо усилия от действия давления на фланец для всех типов фланцев

$$e := 0.5 \cdot (D_{сп} - D + s_{цo}) \quad e = 4 \quad \text{мм}$$

Коэффициент жесткости фланцевого соединения для приварных встык фланцев

$$\gamma := \frac{1}{y_{\Pi} + y_{\phi} \cdot \frac{E_{206}}{E_6} + 2 \cdot b^2 \cdot y_{\phi} \cdot \frac{E_{20}}{E}} \quad \gamma = 5.929 \times 10^4$$

Коэффициент жесткости фланцевого соединения, нагруженного внутренним давлением или внешней осевой силой для приварных встык с торообразными прокладками

$$\alpha := 1 - \frac{y_{\Pi} - 2e \cdot y_{\phi} \cdot b}{y_{\Pi} + y_{\phi} + 2 \cdot b^2 \cdot y_{\phi}} \quad \alpha = 0.663$$

Коэффициент жесткости фланцевого соединения, нагруженного внешним изгибающим моментом

$\alpha_M := 1$ По условию фланец не нагружен внешним изгибающим моментом, поэтому принимаем коэффициент равным 1

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

$$\alpha_{\phi 1} := \alpha_{\phi} \quad \alpha_{\phi 2} := \alpha_{\phi 1} \quad \alpha_{\text{ш}1} := \alpha_{\phi} \quad h_{\text{ш}} := 3 \quad t_{\phi 1} := t_{\phi}$$

$$h_1 := h \quad h_2 := h_1 \quad \alpha_{\text{ш}2} := \alpha_{\text{ш}1} \quad t_{\phi 2} := t_{\phi 1}$$

$$s1 := (\alpha_{\phi 1} \cdot h_1 + \alpha_{\text{ш}1} \cdot h_{\text{ш}}) \cdot (t_{\phi 1} - 20)$$

$$Q_t := \gamma \cdot [s1 + (\alpha_{\phi 2} \cdot h_2 + \alpha_{\text{ш}2} \cdot h_{\text{ш}}) \cdot (t_{\phi 2} - 20) - \alpha_{\phi} \cdot (h_1 + h_2) \cdot (t_{\phi} - 20)] = 1.048 \times 10^3$$

$$Q_t = 1.048 \times 10^3 \text{ Н}$$

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

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

$$P_{\phi 1} = 7.032 \times 10^3 \text{ Н}$$

$$P_{\phi 2} := \max(P_{\text{обж}}, 0.4 \cdot A_{\phi} \cdot \sigma_{20.6})$$

$$P_{62} = 3.842 \times 10^4 \text{ Н}$$

Расчетная нагрузка на шпильки фланцевых соединений при затяжке фланцевого соединения:

$$P_{6M} := \max(P_{62}, P_{61}) \quad P_{6M} = 3.842 \times 10^4 \text{ Н}$$

Расчетная нагрузка на шпильки фланцевых соединений в рабочих условиях

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

$$P_{6p} = 4.242 \times 10^4 \text{ Н}$$

Проверка прочности шпилек и прокладки

Расчетные значения в шпильках

При затяжке:

$$\sigma_{61} := \frac{P_{6M}}{A_6} \quad \sigma_{61} = 92 \text{ МПа}$$

В рабочих условиях

$$\sigma_{62} := \frac{P_{6p}}{A_6} \quad \sigma_{62} = 101.574 \text{ МПа}$$

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

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

$$q_{\text{ш}} := \frac{\max(P_{6M}, P_{6p})}{\pi \cdot D_{сп} \cdot b_{п}} \quad q = 13.721 \text{ МПа}$$

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

$Usl_prokl = \text{"Условия прочности прокладки выполняются"}$

Расчет фланцев на статическую прочность

Расчетный изгибающий момент, действующий на приварной встык фланец при затяжке

$$M_M := C_F \cdot P_{6p} \cdot b \quad M_M = 1.21 \times 10^6 \text{ Н}\cdot\text{мм}$$

Расчетный изгибающий момент, действующий на фланец в рабочих условиях

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

$$M_P = 1.384 \times 10^6 \text{ Н}\cdot\text{мм}$$

Расчетные напряжения во фланце при затяжке:

Меридиональное изгибное напряжение во втулке приварного встык фланца

$$c_0 := 1 \text{ мм} \quad \text{прибавка на коррозию}$$

$$S_0 := 14 \text{ мм} \quad \text{Толщина втулки приварного встык фланца}$$

$$h := 34 \text{ мм} \quad \text{Толщина фланца, вместе с ответной частью}$$

$$D_{пр} := 200 \text{ мм} \quad \text{Приведенный диаметр фланца}$$

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

$$\sigma_{0M} = 47.292 \text{ МПа}$$

Напряжение в тарелке приварного встык фланца или плоского в условиях затяжки

Радиальное напряжение

$$\sigma_{Rm} := \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + l_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot l_0 \cdot D} \cdot M_M \quad \sigma_{Rm} = 22.7 \text{ МПа}$$

Окружное напряжение

$$\sigma_{Tm} := \frac{\beta_Y \cdot M_M}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_{Rm} \quad \sigma_{Tm} = -27.465 \text{ МПа}$$

Расчетные напряжения во фланце в рабочих условиях:

Меридиональные изгибные напряжения для приварных встык фланцев с прямой втулкой и плоских фланцев

$$\sigma_{0p} := \frac{M_p}{\lambda \cdot (S_0 - c_0)^2 \cdot D_{пр}} \quad \sigma_{0p} = 54.085 \quad \text{МПа}$$

Максимальные меридиональные мембранные напряжения во втулке приварного встык фланца

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

$$\sigma_{0mp} = 1.231 \quad \text{МПа}$$

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

Радиальное напряжение

$$\sigma_{Rp} := \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + l_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot l_0 \cdot D} \cdot M_p \quad \sigma_{Rp} = 25.96 \quad \text{МПа}$$

Окружное напряжение

$$\sigma_{Tp} := \frac{\beta_Y \cdot M_p}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_{Rp} \quad \sigma_{Tp} = -31.41 \quad \text{МПа}$$

$$\sigma_d := 184 \quad \text{МПа} \quad \text{Допускаемое напряжение для материала фланца при температуре испытаний}$$

$$\sigma_{20} := 184 \quad \text{МПа} \quad \text{Допускаемое напряжение для материала фланца при рабочей температуре}$$

$$\sigma_0 := 3 \cdot \sigma_d = 552 \quad \text{МПа} \quad \text{по [6]}$$

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

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

PR_3 := "Условия статической прочности выполняются"

KT := 1.3 коэффициент, учитывающий стесненность температурных деформаций

$$Usl_3 := \begin{cases} PR_1 & \text{if } \max(|\sigma_{0M} + \sigma_{RM}|, |\sigma_{0M} + \sigma_{TM}|) > KT \cdot \sigma_0 \\ PR_2 & \text{if } \max(|\sigma_{0p} - \sigma_{0mp} + \sigma_{Tp}|, |\sigma_{0p} - \sigma_{0mp} + \sigma_{Rp}|, |\sigma_{0p} + \sigma_{0mp}|) > KT \cdot \sigma_0 \\ PR_3 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Usl_3 = "Условия статической прочности выполняются"

Проверка углов поворота фланцев

Угол поворота приварного встык фланца, плоского фланца

$$\Theta := M_p \cdot Y_\phi \cdot \frac{E_{20}}{E} \quad \Theta = 0.012$$

$$\Theta_d := 0.013$$

Допустимый угол поворота плоского фланца

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

Usl_P = "Условие поворота плоского фланца выполняется"

2.2.6 Расчет укрепления отверстий (рис. 2.1 А, Б)

Цель расчета - определить, нуждаются ли отверстия для патрубков в укреплении, а также определить основные параметры укрепляющего элемента в случае необходимости.

Расчетная схема укрепления отверстий изображена на рис. 2.10

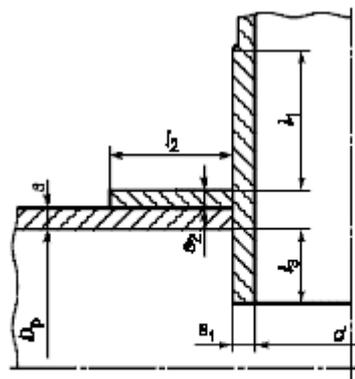


Рисунок. 2.10 Расчетная схема укрепления отверстий

Расчет укрепления отверстий ведется по [13]

Исходные данные:

Внутренний диаметр оболочки	$D_{\text{вн}} := 160$	мм
Внешнее давление на цилиндрическую обечайку	$P_{\text{вн}} := 0.1$	МПа
Расчётная температура	$t_R := 150$	°C
Длина неукреплённой части оболочки	$l := 500$	мм
Расчетная толщина стенки рубашки	$s_p = 1.613$	мм
Расчетная толщина стенки обечайки насоса	$s_{p1} = 0.228$	мм
Исполнительная толщина стенки оболочки	$s := 4$	мм
Диаметр отверстия	$d1 := 35$	мм
Прибавка расчетной толщины стенки	$c := 1$	мм
Коэффициент прочности сварных швов	$\phi := 1$	
Допускаемое напряжение для стали при 20 °C	$\sigma_{20} = 184$	МПа;
Минимальное значение предела текучести стали при 20 °C	$R_{p1.0} := 225$	МПа;

Допускаемое напряжение для материала при расчётной температуре:

Для стали 12X18H10T при $t=150$ °C:

$$\sigma_{д150} = 168 \quad \text{МПа};$$

Допускаемое напряжение для стали 12X18H10T при нормальных условиях:

$$\sigma_{20} := \text{Floor}(\sigma_{д20}, 0.5) = 184 \quad \text{МПа};$$

Давление при испытании на прочность:

$$P_{\text{исп}} := 1.25 \cdot P_{\text{вн}} \cdot \frac{\sigma_{20}}{\sigma_{д150}} = 0.137 \quad \text{МПа};$$

Расчетные внутренние диаметры укрепляемых элементов определяем согласно с [13]

Для штуцера на цилиндрической обечайке

$$D_{p1} := D$$

Расчетные диаметры отверстия:

$$d_{p1} := d1 + 2c$$

$$d_{p1} = 37 \quad \text{мм}$$

Расчетные длины штуцера:

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

Ширина зоны укрепления в переходах и днищах вычисляются по формуле

$$l_p := \sqrt{D_{p1} \cdot (s - c)} \quad l_p = 21.909 \quad \text{мм}$$

Расчётная толщина стенки оболочки:

$$s_{\text{рас}} := \max \left[\begin{array}{l} 1.06 \cdot \frac{10^{-2} \cdot D_p}{B} \cdot \left(\frac{P_{и1}}{E} \cdot \frac{H_{\text{корп}}}{D_p} \right)^{0.4} \\ \frac{1.2 \cdot (P_{и1}) \cdot D_p}{2 \cdot \sigma_{и} - (P_{и1})} \end{array} \right] = 0.295 \quad \text{мм}$$

Проверка условий применения формул для расчета укрепления отверстий

$$\text{пров1} := \begin{cases} \text{"Отношение диаметров НЕ выполняется"} & \text{if } \left(\frac{d_{p1} - 2 \cdot c}{D} \geq 1 \right) \\ \text{"Отношение толщины к диаметру НЕ выполняется"} & \text{if } \left(\frac{s - c}{D} \geq 0.1 \right) \\ \text{"Условия применения формул выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\boxed{\text{пров1} = \text{"Условия применения формул выполняются"}}$$

Расчетный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$$d_o := 2 \cdot \left[\left(\frac{s - c}{s_p} \right) - 0.8 \right] \cdot \sqrt{D_{p1} \cdot (s - c)} \quad d_o = 409.8 \quad \text{мм}$$

Проверка условий необходимости дальнейшего расчета укреплений отверстий:

$$\text{пров3} := \begin{cases} \text{"НЕ требуется укрепление отверстий"} & \text{if } d_o \geq d_{p1} \\ \text{"требуется укрепление отверстий"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\boxed{\text{пров3} = \text{"НЕ требуется укрепление отверстий"}}$$

Проведем по аналогии расчет необходимости укрепления отверстий в охлаждающей рубашке:

Для штуцера на цилиндрической обечайке

$$D_{p1} := 178 \quad \text{мм}$$

$$d1 := 15 \quad \text{мм}$$

Расчетные диаметры отверстия :

$$d_{p1} := d1 + 2c$$

$$d_{p1} = 17 \quad \text{мм}$$

Расчетные длины штуцера:

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

Ширина зоны укрепления в переходах и днищах вычисляются по формуле

$$l_p := \sqrt{D_{p1} \cdot (s - c)} \quad l_p = 23.108 \quad \text{мм}$$

Расчётная толщина стенки оболочки:

$$s_{p1} := \max \left(\left(\frac{P_p \cdot D_{руб}}{2 \cdot \sigma_{д150} \cdot \phi_p - P_p} \right), \left(\frac{P_{и2} \cdot D_{руб}}{2 \cdot \sigma_{и} \cdot \phi_p - P_{и2}} \right) \right) = 0.228 \quad \text{мм}$$

Проверка условий применения формул для расчета укрепления отверстий

$$\text{пров1} := \begin{cases} \text{"Отношение диаметров НЕ выполняется"} & \text{if } \left(\frac{d_{p1} - 2 \cdot c}{D} \geq 1 \right) \\ \text{"Отношение толщины к диаметру НЕ выполняется"} & \text{if } \left(\frac{s - c}{D} \geq 0.1 \right) \\ \text{"Условия применения формул выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{пров1} = \text{"Условия применения формул выполняются"}$$

Расчетный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$$d_o := 2 \cdot \left[\left(\frac{s - c}{s_{p1}} \right) - 0.8 \right] \cdot \sqrt{D_{p1} \cdot (s - c)} \quad d_o = 570.52 \quad \text{мм}$$

Проверка условий необходимости дальнейшего расчета укреплений отверстий:

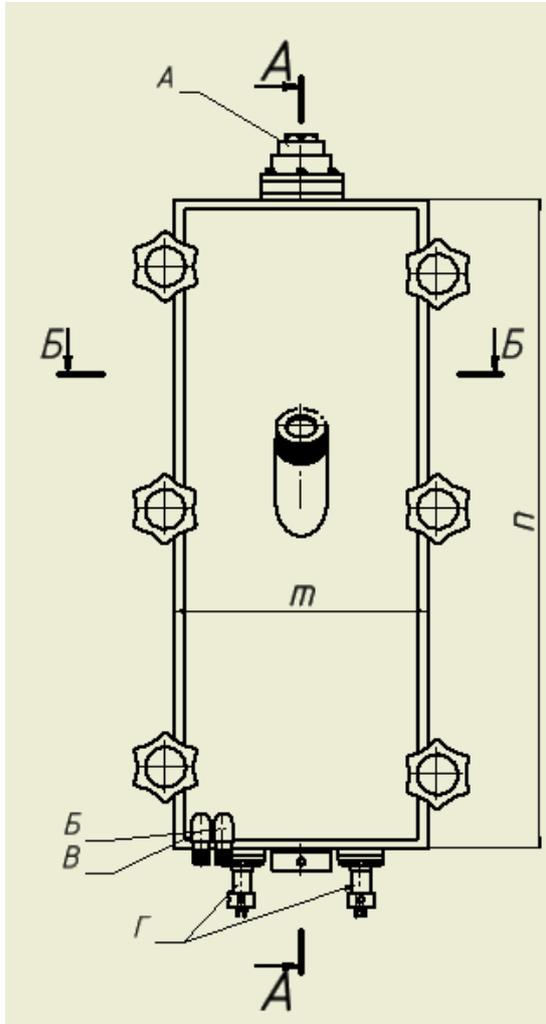
$$\text{пров3} := \begin{cases} \text{"НЕ требуется укрепление отверстий"} & \text{if } d_o \geq d_{p1} \\ \text{"требуется укрепление отверстий"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

пров3 = "НЕ требуется укрепление отверстий"

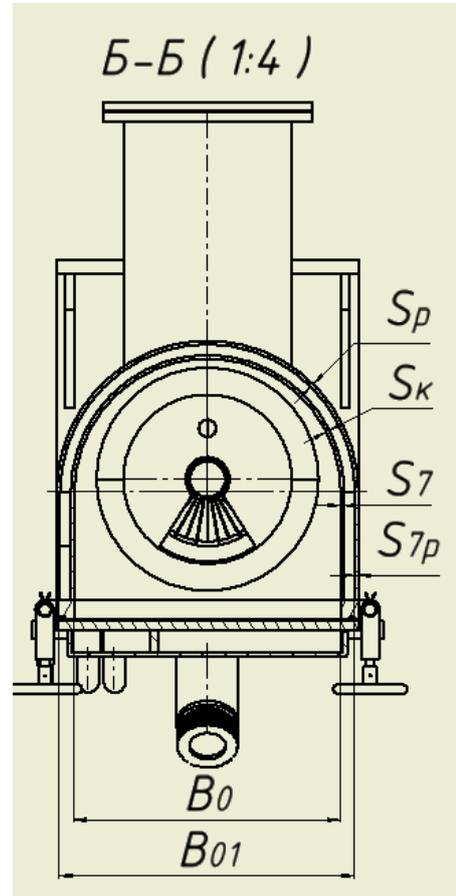
3. Расчет камеры роста кристаллов

3.1 Механический расчет камеры

Расчетная модель ростовой камеры представлена на рис. 3.1



а



б

					ФЮРА ВУ 000 000 ПЗ		
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			
Выполнил	Меньшов П.				Лит.	Лист	Листов
Провер.	.Беляев В.М.						
Н. Контр.					Ростовая установка		
Утверд.							

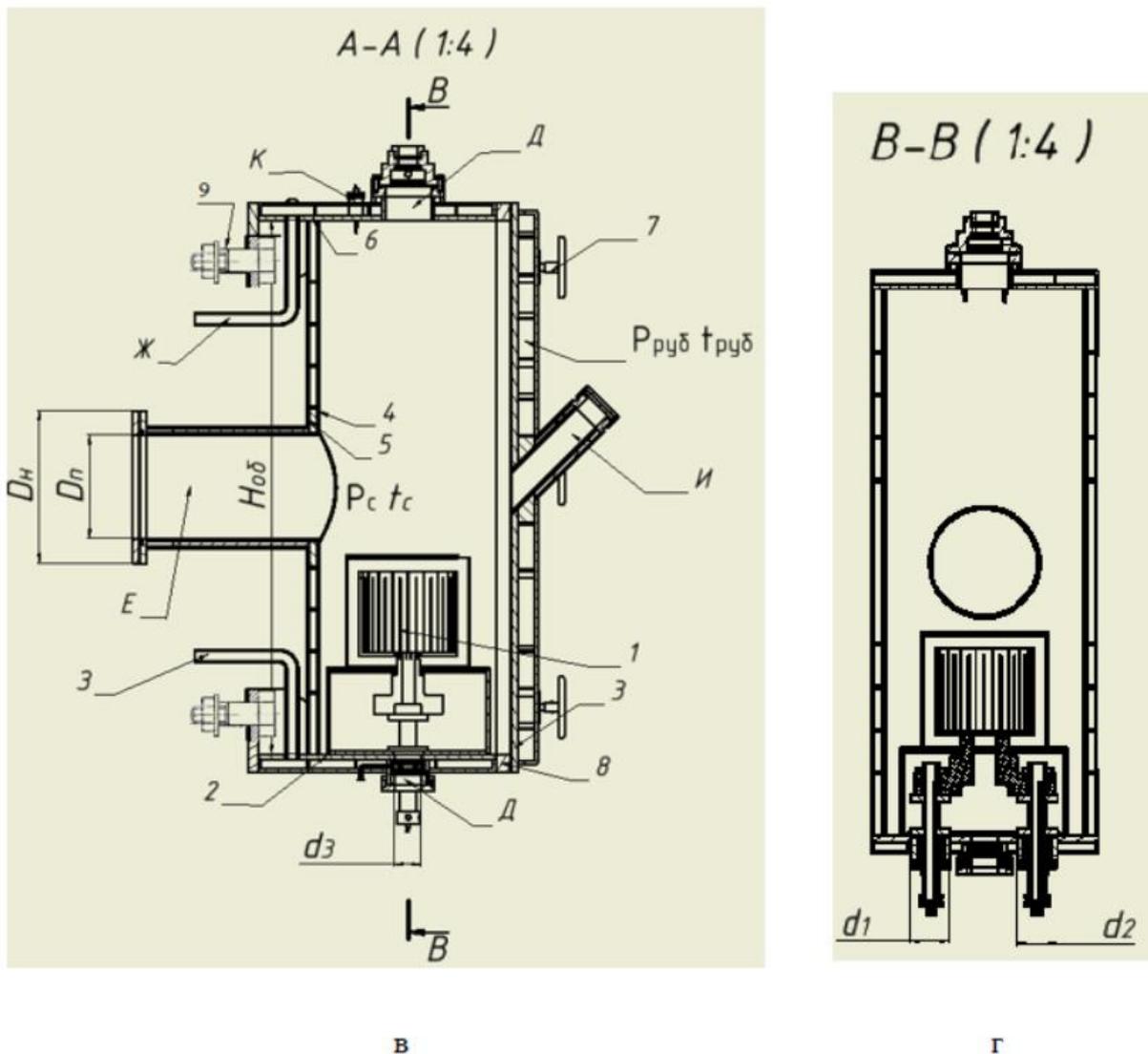


Рис. 3.1. Расчетная модель камеры роста:

а - вид спереди; б - сечение Б-Б вид сверху;

в - сечение А-А вид сбоку; г - сечение В-В;

- 1 - графитовая оснастка; 2 - плоское днище; 3 - плоская дверь камеры;
 4 - обечайка корпуса камеры; 5 - обечайка рубашки; 6 - плоская крышка;
 7 - трубки (6 шт.).

А - штуцер верхнего ввода полого вала; Б,В - вход и выход воды охлаждения двери; Г - токовводы; Д - уплотнение нижнего и верхнего полого вала;
 Е - штуцер выхода на байпасную линию; Ж, З - патрубки охлаждения днища, обечайки камеры и крышки; И - смотровое окно; К - электрические вводы

Принятые обозначения на расчетной модели

V_0 - внутренний размер камеры в поперечном сечении, мм;

V_{01} - внутренний размер рубашки камеры в поперечном сечении, мм;

D_H - наружный диаметр фланца выхода на байпасную линию, мм;

D_{II} - диаметр прохода штуцера выхода на байпасную линию, мм;

d_1, d_2 - диаметр отверстия в плоском днище для токоввода, мм;

d_3 - диаметр отверстия в плоском днище для узла уплотнения ввода полого вала, мм;

$H_{об}$ - высота обечайки корпуса и рубашки корпуса, мм;

m - ширина плоской двери, мм;

n - высота плоской двери, мм;

P_C - рабочее разряжение в камере, Па;

$P_{руб}$ - давление в рубашках охлаждения элементов камеры, МПа;

s_p - толщина полуцилиндрической обечайки рубашки, мм;

s_K - толщина полуцилиндрической обечайки корпуса камеры, мм;

s_7 - толщина боковой стенки обечайки камеры, мм;

s_{7p} - толщина боковой стенки рубашки камеры, мм;

t_C - рабочая температура в камере, °С;

$t_{руб}$ - рабочая температура в рубашке, °С;

Конструкция:

Корпус камеры роста кристаллов состоит из обечайки 4, выполненной в виде полуцилиндра и плоских пластин. В корпусе имеется штуцер для выхода на линию обеспечения разряжения Е. Днище 2 и крышка 6 плоские приварные. В днище устанавливаются токовводы Г и уплотнение нижнего ввода полого вала Д. В крышке устанавливаются электрические вводы для термопары К и уплотнение верхнего ввода полого вала А. Вышеописанные детали оснащены рубашкой для равномерного охлаждения. Также имеется прямоугольная дверь с рубашкой охлаждения З. В двери предусмотрен патрубок для установки смотрового окна И. Крепление двери осуществляется с помощью 6-ти струбцин.

Принцип работы:

На подставку на графитовый нагреватель устанавливается тигель с загруженным материалом. После закрытия камеры и обеспечения ее необходимым разряжением. Разряжение производится в две ступени. Предварительное разряжение обеспечивается форвакуумным насосом через штуцер Е, далее линия форвакуумный насос - камера закрывается. Открывается линия диффузионный насос - камера. Подается вода в рубашки охлаждения. По достижении необходимого разряжения включается нагрев. Токовводы, подключенные к трансформатору и передают напряжение на резистивный графитовый нагреватель. По достижению необходимого температурного градиента, в расплав металлов опускается верхний ввод полого вала (затравка) и сцепляется с расплавом, после чего поднимается, вытягивая за собой кристалл.

3.1.1 Исходные данные

Необходимо подобрать и рассчитать вакуумную камеру, в которой будет происходить рост лазерных кристаллов LiYF_4 , камера должна обеспечивать герметичность до 10^{-3} и быть устойчива к воздействию высоких температур.

Среда – воздушная

Рабочее разряжение, Па	$P_c := 10^{-3}$
Предельная температура нагревателя, °C	$t_c := 1500$
Предельная температура стенки, °C	$t_{\text{стенки}} := 200$
Расход воды охлаждения, л/с	$Q := 0.125$
Начальная температура воды охлаждения, °C	$t_{p1} := 13$
Конечная температура воды охлаждения, °C	$t_{p2} := 15$
Давление рабочее в рубашке, МПа	$P_{\text{руб}} := 0.3$

Давление, действующее на обечайку корпуса. Складывается из разницы между разряжением внутри аппарата и давлением в рубашке, МПа.

Принимаем разряжение внутри аппарата, МПа $P := -0.1$

$$P_v := |P| + P_{\text{руб}} = 0.4$$

3.1.2 Расчетные параметры

Основные характеристики стали определяются согласно с [3]

Максимальная температура стенки в камере

$$t_{\text{стенки}} := 200 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Т.к. в зоне охлаждения температура несколько ниже 20°C , поэтому принимаем температуру в зоне охлаждения 20°C

$$t_p := 20 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Материал, из которого выполнена установка 12X18Н10Т, в первую очередь это связано с низкой вакуумной проницаемостью данной марки стали, чистотой и высокой коррозионной стойкостью. Обладает легкой свариваемостью

и высокой механической прочностью. Также сталь устойчива к межкристаллитной коррозии после сварочного нагрева, сравнительно мало охрупчивается в результате длительного воздействия высоких температур и может быть применена в качестве жаропрочного материала при температурах $\sim 600^\circ \text{C}$.

Допускаемое напряжение для стали 12х18н10т при гидравлических испытаниях

Коэффициент запаса прочности в условиях гидравлических испытаний

$$n_T := 1.1$$

Предел текучести стали при 20°C $R_{e20} := 196$

$$\sigma_{\text{н}} := \left(\frac{R_{e20}}{n_T} \right) = 178.182 \quad \text{МПа}$$

Допускаемое напряжение материала при рабочей температуре

$$\sigma_{\text{д}200} := 160 \quad \text{МПа} \quad [3]$$

Допускаемое напряжение при рабочей температуре в области охлаждения

$$\sigma_{\text{д}20} := 184 \quad \text{МПа}$$

Сварка аппарата полуавтоматическая, сварной шов стыковой односторонний, контролируемая длина сварных швов 100%

$$\phi_p := 0.9$$

Прибавка к расчетным толщинам конструктивных элементов

Скорость коррозии материала от действия заданной среды, мм/год

$$П := 0.01 \quad [4]$$

Срок эксплуатации аппарата, лет

$$\tau_{\text{в}} := 10$$

Прибавка для компенсации коррозии и эрозии, мм

$$c_1 := П \cdot \tau_{\text{в}} = 0.1$$

Поправка на минусовое отклонение, согласно с [5], мм

$$e_2 := 0.08$$

На утонение стенки элемента сосуда при технологических операциях, мм

$$e_3 := 0.12$$

Прибавка к расчетным толщинам конструктивных элементов [3], мм

$$e := \text{ceil}(e_1 + e_2 + e_3) = 1$$

Расчет давлений

Поскольку аппарат работает под разряжением, толщину стенки определяем исходя из действия наружного давления

Давление в аппарате согласно с [7]:

Расчетное давление, действующее на обечайку корпуса камеры в рабочих условиях:

$$P_{\text{в}} := 0.4 \text{ МПа}$$

Давление при гидравлических испытаниях в камере [19]:

$$P_{\text{и1}} := 1.25 \cdot P_{\text{руб}} \cdot \frac{\sigma_{\text{д20}}}{\sigma_{\text{д200}}} \quad P_{\text{и1}} = 0.431 \text{ МПа}$$

Давление в рубашке охлаждения камеры:

Расчетное давление:

$$P_{\text{руб}} := 0.3 \text{ МПа}$$

Давление при гидравлических испытаниях в рубашке камеры

$$P_{\text{и2}} := 1.25 \cdot P_{\text{руб}} \cdot \frac{\sigma_{\text{и}}}{\sigma_{\text{д20}}} \quad P_{\text{и2}} = 0.363 \text{ МПа}$$

3.2 Расчет толщин стенок

3.2.1 Расчет толщины стенки обечайки корпуса камеры (поз. №4, рис. 3.1)

Цель выполняемого расчета, найти толщину стенки из условия прочности и устойчивости.

Расчет полуцилиндрической обечайки необходимо проводить по [20], согласно п. 6.3.2.2 расчет проводится по [7], где B_0 (рис. 3.1 б) - внутренний диаметр обечайки.

Расчетная схема приведена на рис. 3.2

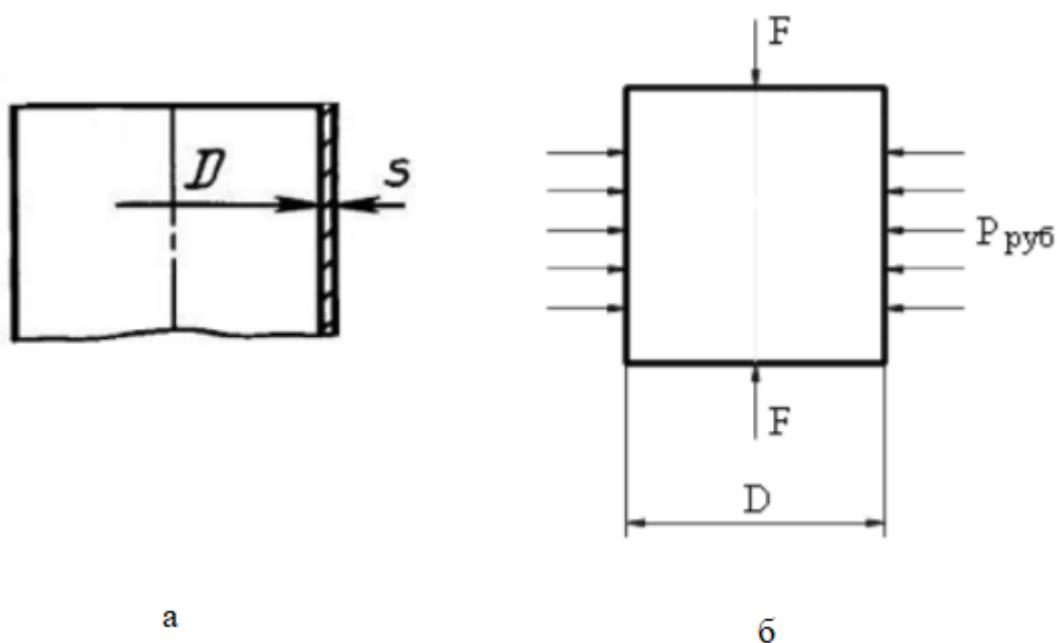


Рисунок 3.2 Расчетная схема обечайки аппарата:
а - изображение стенки в сечении
б - возникающие нагрузки

Расчет толщины стенок для ростовой камеры, согласно с [7]

$D := 320$ Внутренний диаметр аппарата, т.к. $B_0=320$, мм

$\phi_{св} := 0.9$ Коэффициент прочности сварных швов

$E := 1.9 \cdot 10^5$ МПа Модуль упругости для стали при рабочей температуре

$H_{об} := 825$ мм Расчетная длина обечайки

Коэффициент В рассчитывается по формуле, согласно с [7]

$$B := \max \left[\frac{1}{0.47 \cdot \left(\frac{P_B}{E} \right)^{0.067} \cdot \left(\frac{H_{об}}{D} \right)^{0.4}} \right] = 1$$

Тогда расчетная толщина стенки равна:

$$s_K := \max \left[\frac{1.06 \cdot 10^{-2} \cdot D \cdot \left(\frac{P_B}{E} \cdot \frac{H_{об}}{D} \right)^{0.4}}{1.2 \cdot P_B \cdot D} \right] = 2.656 \text{ мм}$$

$$\frac{2 \cdot \sigma_{Д200} - P_B}{}$$

Расчетная толщина стенки для давления испытаний

Расчет коэффициента

$$B := \max \left[\frac{1}{0.47 \cdot \left(\frac{P_{И1}}{E} \right)^{0.067} \cdot \left(\frac{H_{об}}{D} \right)^{0.4}} \right] \quad B = 1$$

Расчет толщины стенки

$$s_{И1} := \max \left[\frac{1.06 \cdot 10^{-2} \cdot D \cdot \left(\frac{P_{И1}}{E} \cdot \frac{H_{об}}{D} \right)^{0.4}}{1.2 \cdot (P_{И1}) \cdot D} \right] = 2.738 \text{ мм}$$

$$\frac{2 \cdot \sigma_{И} - (P_{И1})}{}$$

Исполнительную толщину стенки рассчитываем с поправкой на прибавку

$$s := \text{ceil}(s_K + c) = 4 \text{ мм}$$

Принимаем исполнительную толщину стенки равной $s := 4$

Допускаемое наружное давление для данной толщины стенки будет равно

Из условия прочности:

$$P_{\Pi} := \frac{2 \cdot \sigma_{\text{д}200} \cdot (s - c)}{D + (s - c)} = 2.972 \quad \text{МПа}$$

$$B_1 := \min \left[\left[9.45 \cdot \frac{D}{H_{\text{об}}} \cdot \sqrt{\frac{D}{100(s - c)}} \right] \right] = 1$$

Допускаемое давление из условия устойчивости в пределах упругости будет равно:

$n_y := 2$ коэффициент запаса устойчивости

$$P_e := \frac{2.08 \cdot E \cdot D}{n_y \cdot B_1 \cdot H_{\text{об}}} \left[\frac{100(s - c)}{D} \right]^{2.5} = 0.652 \quad \text{МПа}$$

Тогда допускаемое наружное давление будет равно

$$p := \frac{P_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{P_{\Pi}}{P_e} \right)^2}} = 0.637 \quad \text{МПа}$$

Проверка условия применимости формул безмоментной теории:

$$\frac{s - c}{D} = 9.375 \times 10^{-3} < 0.1, \text{ условия применения формул выполняются}$$

Принимаем толщину стенки, равной максимальному значению из условий, толщина стенки равна 4мм

Осевое сжимающее усилие от давления на днище и крышку:

$$F_{\text{дн}} := P_{\text{руб}} \cdot \pi \cdot \left(\frac{D}{2} \right)^2 \cdot 10^{-6} = 0.024 \quad \text{МН}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия прочности

$$F_{\text{д}\sigma} := \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot \sigma_{\text{д}20} = 5.601 \times 10^5 \quad \text{МН}$$

При расчетной схеме изображенной на рис. 3.3

$$l_{\text{пр}} := H_{\text{об}}$$

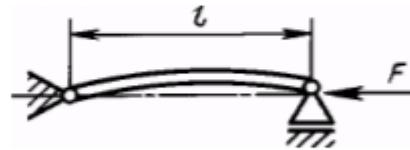


Рисунок 3.3 Расчетная схема нагружения осевым сжимающим усилием обечайки

Рассчитаем гибкость

$$\lambda := \frac{2.83 \cdot l_{\text{пр}}}{D + s - c} = 7.228$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие в пределах упругости из условия устойчивости

$$F_{dE} := \begin{cases} \text{if } \frac{l_{\text{пр}}}{D} \geq 10 & = 25.663 \\ \left| \begin{array}{l} F_{dE1} \leftarrow 31 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{E}{n_y} \cdot D^2 \cdot \left[100 \cdot \frac{(s-c)}{D} \right]^{2.5} \\ F_{dE2} \leftarrow \left(\frac{\pi}{\lambda} \right)^2 \cdot \frac{\pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot E}{n_y} \\ F_{dE} \leftarrow \min(F_{dE1}, F_{dE2}) \end{array} \right. \\ F_{dE} \leftarrow 31 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{E}{n_y} \cdot D^2 \cdot \left[100 \cdot \frac{(s-c)}{D} \right]^{2.5} \text{ otherwise} \end{cases}$$

$$F_{dE} = 25.663 \quad \text{МН}$$

Тогда суммарное допускаемое осевое сжимающее усилие будет вычислено по формуле:

$$F_d := \frac{F_{d\sigma}}{\sqrt{1 + \left(\frac{F_{d\sigma}}{F_{dE}} \right)^2}} = 25.663 \quad \text{МН}$$

Проверка условия устойчивости:

$$\frac{P_B}{P} + \frac{F}{F_d} = 0.629 \quad \bullet < 1 \quad \text{условие устойчивости выполняется}$$

По условию максимально действующее на обечайку давление $P = 0,4$ МПа, а рассчитанное допускаемое давление $P_d = 0,6$ МПа, следовательно, допустимо нагружать обечайку давлением $P = 0,4$ МПа. Условие прочности и устойчивости выполняется.

Поскольку обечайка выполнена в виде полуцилиндра с плоскими боковыми стенками, необходимо рассчитать толщину боковой стенки по [20]

$$s_7 := \max \left(s, 0.25 \cdot D \cdot \sqrt{\frac{P_B}{\sigma_{д200}} + c} \right) = 5 \quad \text{мм}$$

3.2.2 Расчет толщины стенки рубашки (поз. №5, рис. 3.1)

Цель выполняемого расчета, найти толщину стенки из условия прочности.

Расчетная схема изображена на рис. 3.4

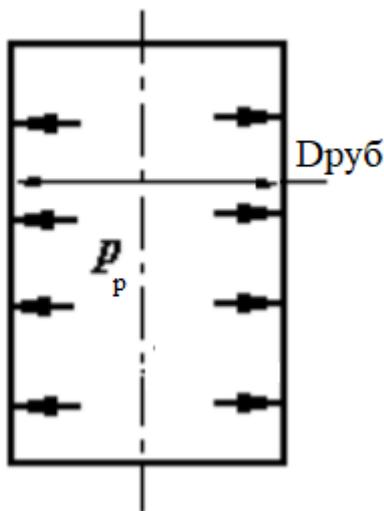


Рисунок 3.4 Расчетная схема обечайки рубашки

Расчет полуцилиндрической обечайки необходимо проводить по [20], согласно п. 6.3.2.2 расчет проводится по [7], где D_0 (рис 3.1) - внутренний диаметр обечайки.

Расчетная и исполнительные толщины стенок цилиндрической обечайки при внутреннем избыточном давлении находим исходя из [7]:

Внутренний диаметр рубашки

$$B_{01} := 358 \quad \text{мм}$$

$$D_{\text{вн}} := B_{01} \quad \text{мм}$$

$$s_p := \max \left(\left(\frac{P_{\text{руб}} \cdot D_{\text{вн}}}{2 \cdot \sigma_{\text{д200}} \cdot \phi_p - P_{\text{руб}}} \right), \left(\frac{P_{\text{и2}} \cdot D_{\text{вн}}}{2 \cdot \sigma_{\text{и}} \cdot \phi_p - P_{\text{и2}}} \right) \right) \quad s_p = 0.406 \quad \text{мм}$$

Исполнительная толщина стенки аппарата:

$$s := \text{ceil}(s_p + c) = 2$$

Принимаем толщину стенки рубашки равную 4 мм $s := 4 \text{ мм}$

Проверка условия применимости формул безмоментной теории:

$$\frac{s - c}{D_{\text{вн}}} = 8.38 \times 10^{-3}$$

т.к. $0,00838 < 0.1$, то условия применения формул выполняются

Допускаемое внутреннее избыточное давление вычисляются по формуле:

$$P_{\text{д}} := \frac{[2 \cdot \sigma_{\text{д200}} \cdot \phi_p \cdot (s - c)]}{D_{\text{вн}} + (s - c)} = 2.393 \quad \text{МПа}$$

Проверка условия прочности стенок, цилиндрической обечайки от действия внутреннего давления

$$\text{Пров1} := \begin{cases} \text{"Проверка условия прочности выполняется"} & \text{if } P_{\text{д}} > P_{\text{и2}} \\ \text{"Проверка условия прочности НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Пров1} = \text{"Проверка условия прочности выполняется"}$$

Поскольку обечайка выполнена в виде полуцилиндра с плоскими боковыми стенками, необходимо рассчитать толщину боковой стенки по [20].

$$s_{7p} := \max \left(s, 0.25 \cdot D_{\text{ВН}} \cdot \sqrt{\frac{P_{\text{руб}}}{\sigma_{\text{д20}}}} + c \right) = 4.614 \text{ мм}$$

Принимаем толщину плоской боковой стенки $s=5$ мм

3.3 Расчет толщины плоского приварного днища (поз. №2 рис. 3.1)

Расчетная схема приведена на рис. 3.5

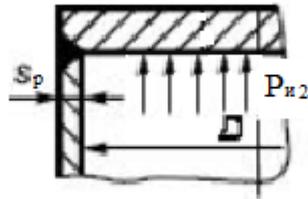


Рисунок 3.5 Расчетная схема плоского приварного днища

Цель расчета - найти толщину днища из условия прочности

Толщину плоского круглого днища, вычислим по формуле

$$s_1 := K \cdot K_0 \cdot D_p \cdot \sqrt{\frac{P}{\phi_p \cdot \sigma_{\text{д200}}}} \quad [7]$$

По таблице [7] выбираем тип крепления днища к обечайке

Таблица 3.1 Выбранный тип крепления днища к обечайке

Тип днища	Условия	K
	$\frac{s-c}{s_1-c} \geq 0,25$ $D_p = D$	0,41

$$K := 0.41$$

$$D_p := 320$$

Хорды отверстий в наиболее ослабленном диаметральном сечении днища

$$d_1 := 20 \text{ мм}$$

$$d_2 := 20 \text{ мм}$$

$$d_3 := 40 \text{ мм}$$

$$K_0 := \sqrt{\frac{1 - \left(\frac{d_1}{D_p} + \frac{d_2}{D_p} + \frac{d_3}{D_p}\right)^3}{1 - \left(\frac{d_1}{D_p} + \frac{d_2}{D_p} + \frac{d_3}{D_p}\right)}} = 1.146$$

$$s_1 := K \cdot K_0 \cdot D_p \cdot \sqrt{\frac{P_{н2}}{\phi_p \cdot \sigma_{д200}}} = 7.548 \text{ мм}$$

$$s := \text{ceil}(s_1 + c) = 9 \text{ мм}$$

Таким образом исполнительная толщина плоского днища принимаем равной 10 мм

Допускаемое давление для плоского днища

$$P_d := \frac{s - c}{K \cdot K_0 \cdot D_p} \cdot (\phi_p \cdot \sigma_{д200}) = 7.664 \text{ МПа}$$

$$\frac{s_1 - c}{D_p} = 0.02 < 0.11, \text{ условие применимости формул выполняется}$$

По условию допускаемое давление для днища 7.664 МПа, а максимально действующее на днище давление 0,431 МПа, следовательно, допустимо нагружать днище давлением 6,92.

Принимаем толщину плоской крышки 10 мм, т.к. нагрузки и расчетная схема аналогична днищу. Плоская крышка изображена на рис 3.1Б поз 6

3.4 Расчет плоской прямоугольной двери (поз. № 5, рис. 3.1)

Расчетная схема приведена на рис. 3.6

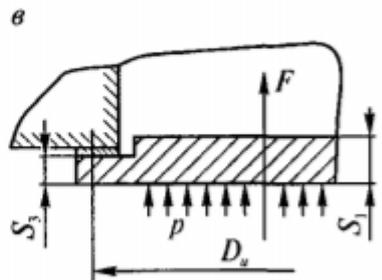


Рисунок 3.6 Расчетная схема плоской двери

Цель расчета - найти толщину плоской двери из условия прочности

Расчет ведется по [16]

Коэффициент K_m :

По [16] коэффициент K_m равен:

$$K_m := 0.53$$

Размеры плоской двери приведены на рис. 3.1 А, поз.6

$$m := 340 \text{ мм}$$

$$n := 850 \text{ мм}$$

$$p := 0.4 \text{ МПа}$$

Где m и n - размеры прямоугольной крышки;

p - максимально действующее на крышку давление.

Коэффициент Y определяется по формуле:

$$Y := \frac{1.41}{\sqrt{1 + \left(\frac{m}{n}\right)^2}} = 1.309$$

Тогда расчетная толщина стенки будет равна

$$s_d := K_m \cdot Y \cdot m \cdot \sqrt{\frac{p}{\sigma_{д200}}} = 11.795 \text{ мм}$$

Тогда исполнительная толщина стенки будет равна

$$s := \text{Ceil}(s_d + c, 1) = 13 \quad \text{мм}$$

Принимаем толщину плоской двери ростовой камеры 14 мм $s := 14$

$$P_d := \left(\frac{1}{K_m \cdot Y} \cdot \frac{s - c}{m} \right)^2 \cdot \sigma_{d200} = 0.486 \quad \text{МПа}$$

По условию максимально действующее давление на дверь равно 0,4 МПа, тогда как допускаемое давление 0,486, следовательно, можно нагружать плоскую дверь давлением 0,4 МПа.

3.4.1 Расчет крепления двери (поз. №7 рис. 3.1)

Цель расчета - определение толщины корпуса струбины из условия прочности

Крепление двери к обечайке осуществляется с помощью 6 прижимных струбин,

Шпильки М10х1.5 g6 х50 ГОСТ 7817-80.

Изображение струбины приведено на рис. 3.7, 3.8

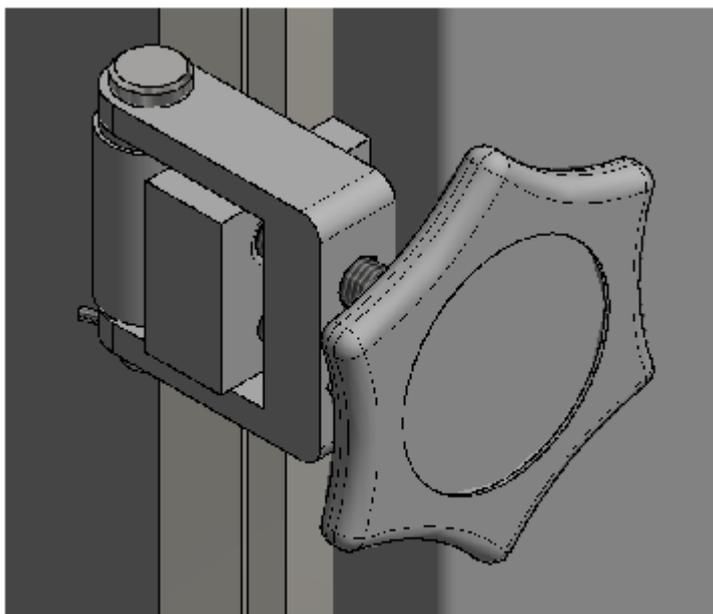


Рисунок 3.7 Изображение струбины в изометрии

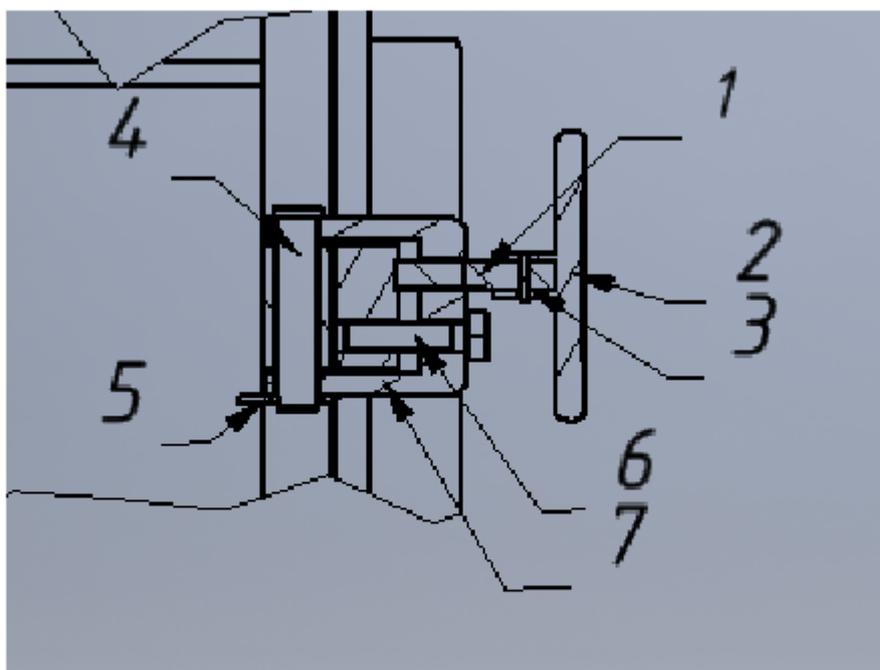


Рисунок 3.8 Изображение струбцины
1 - Прижимная шпилька; 2 - рукоять; 3 - штифт; 4 - ось; 5 - шплинт;
6 - фиксирующий винт; 7 - корпус

Расчетная схема корпуса струбцины изображена на рис. 3.9

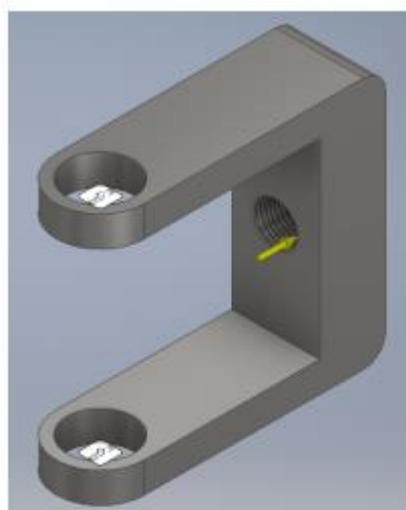


Рисунок 3.9 Расчетная схема корпуса струбцины

Расчет корпуса струбцины произведен в программе Autodesk Inventor
Материал корпуса струбцины сталь 40X Выбор стали обусловлен легкой свариваемостью, широкой доступностью и относительной дешевизной, а также из соображений унификации всех крепежных деталей.

Допускаемое напряжение для стали 40Х при изгибе, МПа
 Давление, действующее на прокладку в рабочих условиях, МПа
 Прокладочный коэффициент по [14]
 Толщина прокладки, мм

$\sigma_{40\text{хд}} := 190$
 $P := 0.2$
 $m1 := 1$
 $b_0 := 6$

Усилие, необходимое для смятия прокладки найдем по упрощенной формуле, поскольку вакуум в камере также прижимает дверь к камере и герметизирует соединение:

$$P_{\text{обж}} := 0.5b_0 \cdot m1 \cdot |P| \cdot 2(m + n) = 1.428 \times 10^3 \text{ Н}$$

Сила действует на резьбу корпуса струбцины. Напряжения, возникающие в корпусе струбцины изображены на рис. 3.10

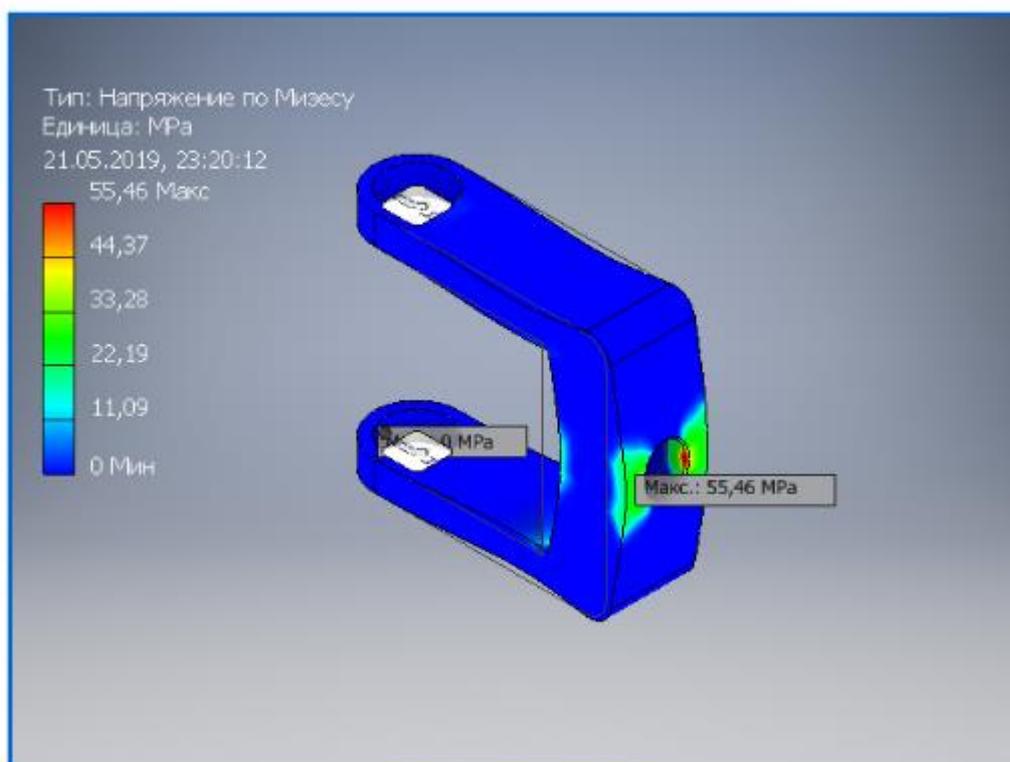


Рисунок 3.10 Распределение напряжений в корпусе струбцины

Максимальное напряжение, возникающее в корпусе струбцины - 55, 46 МПа

$$\sigma_{40\text{х}} := 55.46 \text{ МПа}$$

Предельные смещения при усиллии на струбцину равному 2.8 кН изображены на рис. 3.11

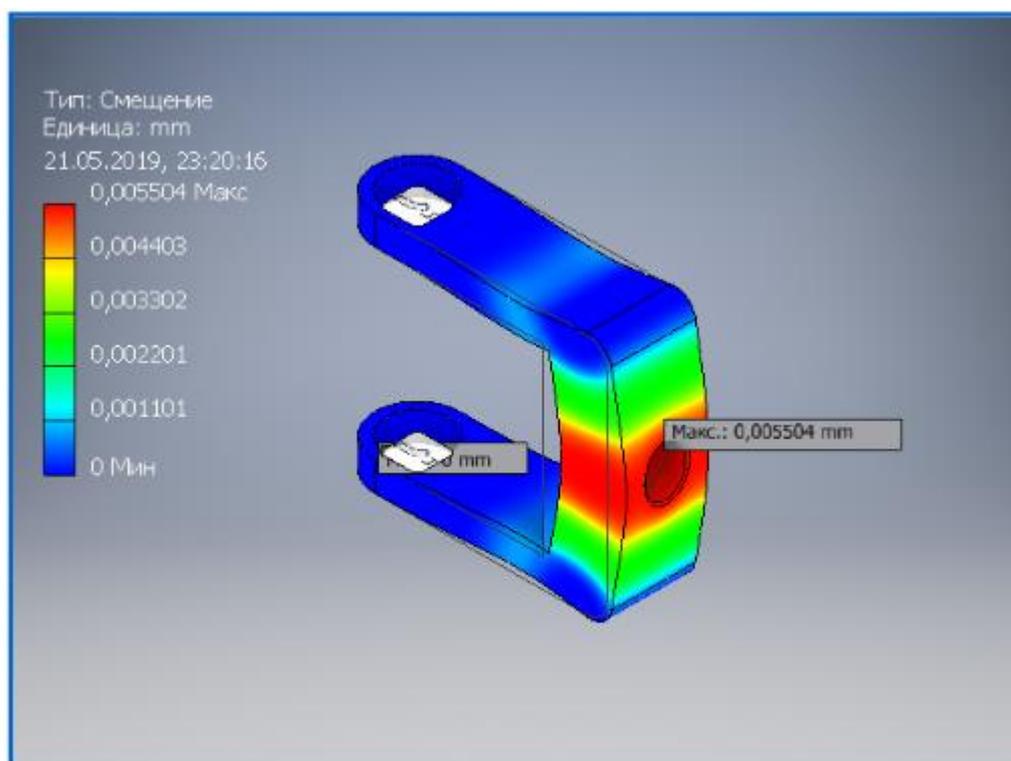


Рисунок 3.11 Смещения в корпусе струбины в рабочих условиях

Параметрический расчет показал, что для соблюдения условия прочности, минимальная толщина корпуса должна быть не менее 18 мм, принимаем 20 мм.

Проверка условия прочности.

По условию, допускаемое напряжение для стали 40Х $\sigma_{40хд}=190$ МПа, а напряжение в рабочем состоянии $\sigma_{40х}=55$ МПа.

$$190 > 55$$

Условие прочности выполняется

3.4.2 Расчет рамы двери камеры (поз.8 рис. 3.1)

Цель - найти толщину приварной рамы из условия прочности.

Расчет рамы произведен в программе Autodesk Inventor

Материал, из которого выполнена рама 12Х18Н10Т, в первую очередь это связано с низкой вакуумной проницаемостью данной марки стали, чистотой и высокой коррозионной стойкостью. Обладает легкой свариваемостью и высокой механической прочностью. Также сталь устойчива к межкристаллитной коррозии после сварочного нагрева, сравнительно мало охрупчивается в

результате длительного воздействия высоких температур и может быть применена в качестве жаропрочного материала при температурах $\sim 600^{\circ}\text{C}$.

Допускаемое напряжение для стали 12X18H10T при 200°C МПа $\sigma_{\text{д}200} = 160$

Давление, действующее на раму в рабочих условиях, МПа $P_{\text{рама}} := 0.2$

Давление, действующее на обечайку в рабочих условиях, МПа $P_{\text{в}} = 0.4$

Давление действует на внешние грани рамы. Рама жестко закреплена с торца.

Напряжения, возникающие в раме изображены на рис. 3.12.

Поскольку рама приварена к обечайке, необходимо учесть также деформацию обечайки

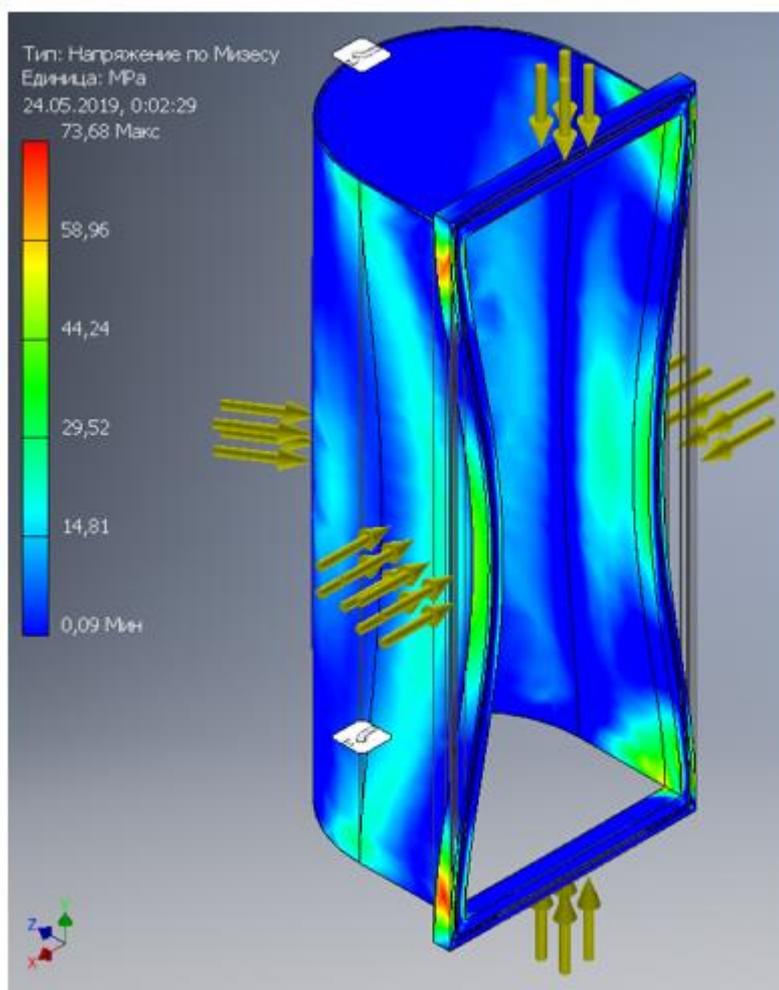


Рисунок 3.12 Распределение напряжений в корпусе рамы и в обечайке.

Максимальное напряжение, возникающее в раме - 73.68 МПа

$$\sigma_{\text{рама}} := 73.68 \text{ МПа}$$

Предельные смещения при давлении на раму 0,2 МПа изображены на рис. 3.13

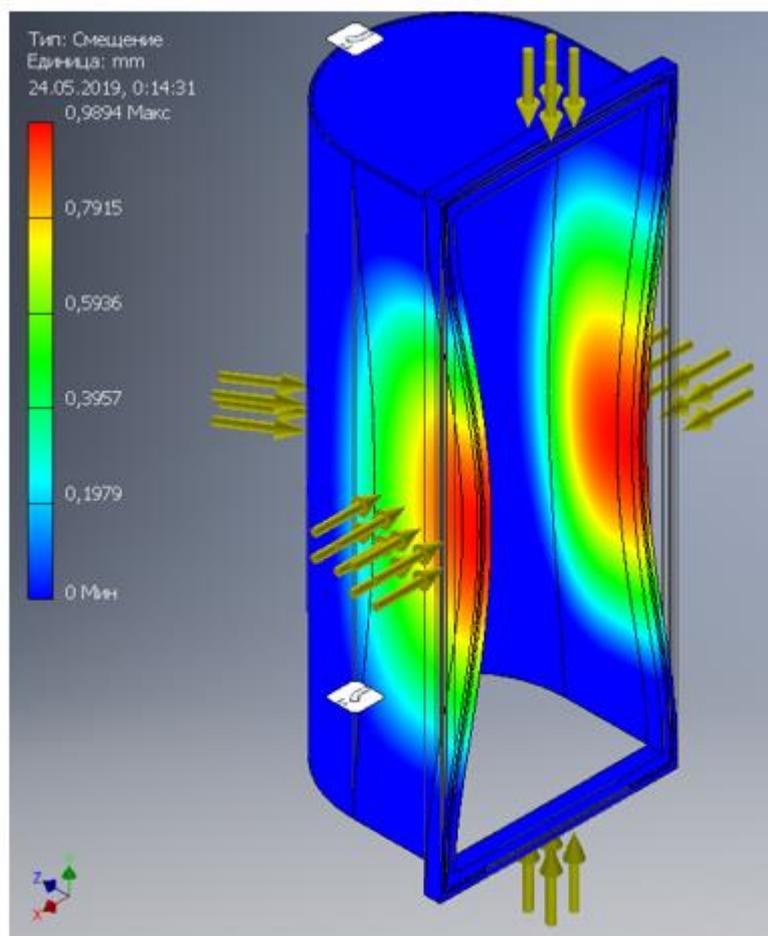


Рисунок 3.13 Смещения в корпусе камеры и раме в рабочих условиях

Параметрический расчет показал, что для соблюдения условия прочности, минимальная толщина рамы должна быть не менее 14 мм, принимаем 22 мм.

Проверка условия прочности.

По результатам расчета, допускаемое напряжение для материала рамы $\sigma_{д200}=160$ МПа, а напряжение при толщине рамы $s=22$ мм в рабочем состоянии $\sigma_{40x}=73.68$ МПа.

$$160 > 73.68$$

Условие прочности выполняется

3.5 Расчет и подбор патрубков (Ж, 3, рис. 3.1)

Цель - найти минимальный диаметр патрубков для входа и выхода воды охлаждения

$$G := 0.0354 \quad \frac{\text{кг}}{\text{с}} \quad \text{Количество охлаждающей воды}$$

$$\rho_p := 1000 \quad \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \quad \text{Плотность воды}$$

$$\omega := 0.5 \quad \frac{\text{м}}{\text{с}} \quad \text{Скорость воды}$$

Патрубок изображен на рис. 3.14

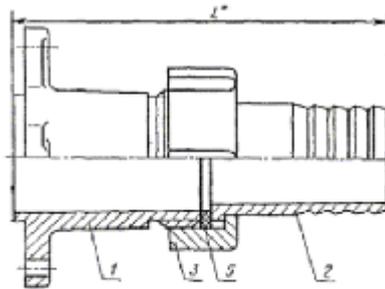


Рис.3.14 Изображение патрубка

Внутренний диаметр патрубка для подвода и отвода охлаждающей воды

Диаметр патрубка равен:

$$d_{\text{гдт}} := \sqrt{\frac{4 \cdot G}{\pi \cdot \omega \cdot \rho_p}} = 9.494 \times 10^{-3} \quad \text{м} \quad \text{при давлении } 0,3 \text{ МПа} \quad [11]$$

Рассчитанный диаметр округляем до ближайшего большего значения 10мм в соответствии с нормализованным диаметром условного прохода патрубков.

Табл.3.2 Выбор патрубка [8]

Dy	D	d3	L
10	M20x1.5	15	17

3.6 Расчет фланцевого соединения (штуцер Е, рис. 3.1)

Цель расчета - проверить спроектированный фланец на условие прочности, условие прочности прокладки, условие статической прочности, а также на угол поворота.

Расчет фланцевого соединения, соединяющего камеру с байпасной линией, рис. 3.1.Б, фланец штуцера Е.

Материал обечаек и фланцев 12Х18Н10Т

Материал болтов 40Х по [14]

Материал прокладки резина вакуумная [14], т.к. температура в области уплотнения сравнительно невысока и материал обладает низким показателем проницаемости, и повсеместное использование делает его легкодоступным.

Фланцы приварные встык.

Согласно с рекомендациями из [1] уплотнительная поверхность выбрана на рис. 3.15 и нагрузки, действующие на фланец при нагрузках разрушения приведены на рис. 3.16.

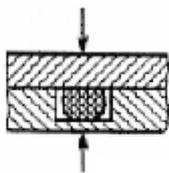


Рисунок. 3.15 Изображение уплотнительной поверхности фланца в разрезе

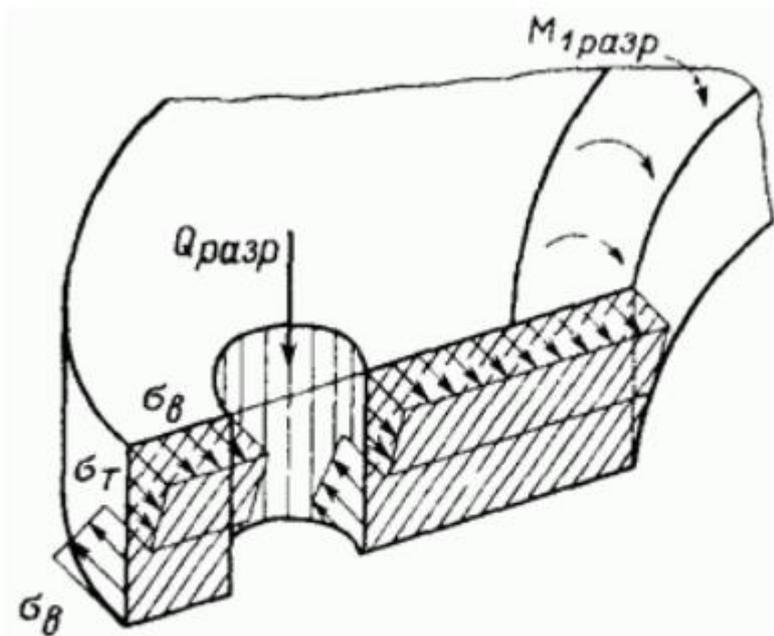


Рисунок 3.16 Нагрузки, действующие на фланец при нагрузках разрушения

Исходные данные

Так как под диаметр прохода 160 мм не изготавливается стандартный фланец, проектируем фланец исходя из расчетов прочности, с предварительными размерами, принятыми из конструкторских соображений.

$D_{\phi} := 160$ мм Необходимый диаметр для соединения с байпасной линией

$n := 8$ Количество шпилек

$t := 200$ °С Расчетная температура, при которой работает фланец

$P := 0.1$ МПа Максимальное давление, действующее на фланец

Диаметр фланца наружный $D_{\text{Н}} := 260$ мм

Диаметр болтовых отверстий $D_{\text{б.о}} := 225$ мм

Толщина тарелки фланца $h := 17$ мм

Диаметр шпилек $D_{\text{ш}} := 12$ мм

Наружный диаметр прокладки $D_{\text{нп}} := 170$ мм

Шпильки M10

Определение расчетных параметров

Расчетные температуры

Расчетная температура неизолированных фланцев

Расчетная температура шпилек

$$t_{\sigma} := 0.85 \cdot t = 170 \quad ^\circ\text{C}$$

$$t_{\phi} := 0.96t \quad t_{\phi} = 192 \quad ^\circ\text{C}$$

Допускаемое напряжение для материала шпилек

$$t := \begin{pmatrix} 100 \\ 200 \end{pmatrix} \quad \sigma := \begin{pmatrix} 225 \\ 222 \end{pmatrix}$$

$$\sigma_{\text{д.}\sigma} := \text{Floor}(\text{linterp}(t, \sigma, t_{\sigma}), 0) \quad \sigma_{\text{д.}\sigma} = 222.5 \text{ МПа}$$

Модуль упругости для шпилек при рабочей температуре

$$t := \begin{pmatrix} 100 \\ 200 \end{pmatrix} \quad E := \begin{pmatrix} 2.08 \cdot 10^5 \\ 2.01 \cdot 10^5 \end{pmatrix}$$

$$E_{\sigma} := \text{Floor}(\text{linterp}(t, E, t_{\sigma}), 0.01) \quad E_{\sigma} = 2.031 \times 10^5 \text{ МПа}$$

Допускаемое напряжение для шпилек при $t=20^\circ\text{C}$

$$\sigma_{20\sigma} := 230 \text{ МПа}$$

Модуль упругости для шпилек при температуре испытания

$$E_{20\sigma} := 2.18 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Коэффициент линейного расширения стали 40X при $t=20-200^\circ\text{C}$

$$\alpha_{\sigma} := 13.4 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{K}}$$

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

допускаемое напряжение для стали 12x18н10т при рабочей температуре, МПа $\sigma_{д200} = 160$

допускаемое напряжение для стали 12x18н10т при 20°C, МПа $\sigma_{д20} = 184$

Модуль упругости для стали 12x18н10т при 20°C, МПа $E_{20} := 1.98 \cdot 10^5$

Модуль упругости для стали 12x18н10т при рабочей температуре, МПа $\underline{E} := 1.92 \cdot 10^5$

Коэффициент линейного расширения для стали 12x18н10т при $t=20-200^\circ\text{C}$, 1/К $\alpha_{\phi} := 16.8 \cdot 10^{-6}$

Выбираем толщину прокладки 6 мм, для обеспечения герметичности

Эффективная ширина торообразной прокладки, b_0

$$b_{\Pi} := 6 \text{ мм}$$

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

$$b_0 = 6$$

$$\underline{\text{Пров1}} := \begin{cases} \text{"Проверка условия прочности выполняется"} & \text{if } p_{д} > P_{и2} \\ \text{"Проверка условия прочности НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Пров1} = \text{"Проверка условия прочности выполняется"}$$

Характеристики прокладки по [14]

Прокладочный коэффициент $\underline{m} := 1$

Удельное давление обжатия прокладки, МПа $q_{обж} := 4$

Допускаемое удельное давление, МПа $q_{д} := 20$

Коэффициент обжатия $K_{обж} := 0.09$

Ширина прокладки, мм $\underline{h} := 6$

$$E_{\Pi} := 0.4 \cdot 10^{-4} \cdot \left(1 + \frac{b_{\Pi}}{2 \cdot h} \right) \cdot 10^5 = 6 \quad \text{МПа} \quad \text{Условный модуль сжатия прокладки}$$

Расчетный диаметр прокладки равен:

$$D_{\text{СП}} := D_{\text{НП}} - b_0 = 164 \text{ мм}$$

Усилие, необходимое для смятия прокладки при затяжке

Так как

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

$$P_{\text{обж}} = 154.566 \text{ Н}$$

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

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

$$R_{\text{П}} = 309.133 \text{ Н}$$

Площадь поперечного сечений шпилек для диаметра резьбы М10, приложение Д.1 [14]

$$f_{\text{Г}} := 52.2 \text{ мм}^2$$

Суммарная площадь сечения шпилек по внутреннему диаметру резьбы или нагруженному сечению наименьшего диаметра

$$A_{\text{Г}} := n \cdot f_{\text{Г}} \quad A_{\text{Г}} = 417.6 \text{ мм}^2$$

Равнодействующая нагрузка от давления

$$Q_{\text{д}} := 0.785 \cdot D_{\text{СП}}^2 \cdot P \quad Q_{\text{д}} = 2.111 \times 10^3 \text{ Н}$$

Приведенная нагрузка, вызванная воздействием внешней силы и изгибающего момента

Внешний изгибающий момент примем равным нулю, исходя из условий

$$M := 0 \text{ Н}\cdot\text{мм}$$

Приведенная нагрузка, вызванная внешней осевой силой или моментом, принимаем 100 Н, т.к часть веса узла байпасной линии воздействует на фланец

$$F := 100 \text{ Н}$$

Тогда:

$$Q_{FM} := F + \frac{4 \cdot M}{D_{сп}} = 100 \quad \text{Н}$$

Податливость прокладки

$$y_{II} := \frac{K_{обж}}{E_{II} \cdot \pi \cdot D_{сп} \cdot b_{II}} = 4.852 \times 10^{-6}$$

Расстояние между опорными поверхностями гаек

$$L_{60} := 60 \text{ мм}$$

Длина шпильки, найдена исходя из толщины фланцев

Внешний диаметр шпильки, т.к. был выбрана шпилька М10 $d := 10 \text{ мм}$

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

$$L_6 = 65.6 \quad \text{мм}$$

Податливость шпилек, мм/Н

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

$$y_6 = 7.206 \times 10^{-7}$$

Расчетные параметры фланцев:

$$s_{цо} := 4 \quad \text{мм} \quad \text{толщина обечайки}$$

$$S_0 := 14 \quad \text{мм} \quad \text{Толщина фтулки фланца}$$

Параметр длины обечайки

$$l_0 := \sqrt{D_{ф} \cdot S_0} \quad l_0 = 47.329 \quad \text{мм}$$

Отношение наружного диаметра тарелки фланца к внутреннему диаметру

$$K := \frac{D_H}{D_{ф}}$$

$$K = 1.625$$

$$\beta_T := \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \log(K)) - 1}{(1.05 + 1.945 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} \quad \beta_T = 1.656$$

$$\beta_U := \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \log(K)) - 1}{1.36(K^2 - 1) \cdot (K - 1)} \quad \beta_U = 4.59$$

$$\beta_Y := \frac{1}{K - 1} \left(0.69 + 5.72 \cdot \frac{K^2 \cdot \log(K)}{K^2 - 1} \right) \quad \beta_Y = 4.21$$

$$\beta_Z := \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} \quad \beta_Z = 2.219$$

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

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

Коэффициент λ

$$\lambda := \frac{\beta_F \cdot h + l_0}{\beta_T \cdot l_0} + \frac{\beta_V \cdot h^3}{\beta_U \cdot l_0 \cdot S_0^2} \quad \lambda = 0.676$$

Угловая податливость фланцев:

Угловая податливость фланца при затяжке

$$Y_\Phi := \frac{0.91 \cdot \beta_V}{\lambda \cdot l_0 \cdot S_0^2 \cdot E_{20}} \quad Y_\Phi = 4.028 \times 10^{-10} \frac{\text{мм}}{\text{Н}}$$

Коэффициент, учитывающий изгиб тарелки фланца между шпильками

$$C_F := \max \left[1, \sqrt{\frac{\pi \cdot D_{\text{б.о}}}{n \cdot \left(2 \cdot d + \frac{6 \cdot h}{m + 0.5} \right)}} \right] \quad C_F = 1.417$$

Плечо действия усилий в шпильках для приварных встык и плоских фланцев

$$b := 0.5(D_{\text{б.о}} - D_{\text{сп}}) \quad b = 30.5 \quad \text{мм}$$

Плечо усилия от действия давления на фланец для всех типов фланцев

$$e := 0.5 \cdot (D_{\text{сп}} - D_\Phi + S_0) \quad e = 9 \quad \text{мм}$$

Эквивалентная толщина плоских фланцев

$$S_0 = 14 \text{ мм} \quad \text{Толщина фланца в месте соединения с обечайкой}$$

Коэффициент жесткости фланцевого соединения для приварных встык фланцев

$$\gamma := \frac{1}{y_{\Pi} + y_{\delta} \cdot \frac{E_{20\delta}}{E_{\delta}} + 2 \cdot b^2 \cdot y_{\Phi} \cdot \frac{E_{20}}{E}} \quad \gamma = 1.563 \times 10^5$$

Коэффициент жесткости фланцевого соединения, нагруженного внутренним давлением или внешней осевой силой для приварных встык с торообразными прокладками

$$\alpha := 1 - \frac{y_{\Pi} - 2e \cdot y_{\Phi} \cdot b}{y_{\Pi} + y_{\delta} + 2 \cdot b^2 \cdot y_{\Phi}} \quad \alpha = 0.267$$

Коэффициент жесткости фланцевого соединения, нагруженного внешним изгибающим моментом

По условию фланец не нагружен внешним изгибающим моментом, поэтому принимаем коэффициент равным 1

$$\alpha_M := 1$$

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

$$\begin{aligned} \alpha_{\Phi 1} &:= \alpha_{\Phi} & \alpha_{\Phi 2} &:= \alpha_{\Phi 1} & \alpha_{\text{ш}1} &:= \alpha_{\delta} & h_{\text{ш}} &:= 3 & t_{\Phi 1} &:= t_{\Phi} \\ h_1 &:= h & h_2 &:= h_1 & \alpha_{\text{ш}2} &:= \alpha_{\text{ш}1} & t_{\Phi 2} &:= t_{\Phi 1} \end{aligned}$$

$$s1 := (\alpha_{\Phi 1} \cdot h_1 + \alpha_{\text{ш}1} \cdot h_{\text{ш}}) \cdot (t_{\Phi 1} - 20)$$

$$Q_t := \gamma \cdot [s1 + (\alpha_{\Phi 2} \cdot h_2 + \alpha_{\text{ш}2} \cdot h_{\text{ш}}) \cdot (t_{\Phi 2} - 20) - \alpha_{\delta} \cdot (h_1 + h_2) \cdot (t_{\delta} - 20)] = 3.811 \times 10^3$$

$$Q_t = 3.811 \times 10^3 \text{ Н}$$

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

$$P_{\bar{\sigma}1} := \max \left[\alpha \cdot (Q_d + F) + R_{\Pi} + \frac{4 \cdot \alpha_M \cdot M}{D_{\text{сп}}}, \alpha \cdot (Q_d + F) + R_{\Pi} + \frac{4 \cdot \alpha_M \cdot M}{D_{\text{сп}}} - Q_t \right]$$

$$P_{\bar{\sigma}1} = 900.653 \quad \text{Н}$$

$$P_{\bar{\sigma}2} := \max(P_{\text{обж}}, 0.4 \cdot A_{\bar{\sigma}} \cdot \sigma_{20.6})$$

$$P_{\bar{\sigma}2} = 3.842 \times 10^4 \quad \text{Н}$$

Расчетная нагрузка на шпильки фланцевых соединений при затяжке фланцевого соединения:

$$P_{\bar{\sigma}M} := \max(P_{\bar{\sigma}2}, P_{\bar{\sigma}1}) \quad P_{\bar{\sigma}M} = 3.842 \times 10^4$$

Расчетная нагрузка на шпильки фланцевых соединений в рабочих условиях

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

$$P_{\bar{\sigma}p} = 4.385 \times 10^4 \quad \text{Н}$$

Проверка прочности шпилек и прокладки

Расчетные значения в шпильках

При затяжке:

$$\sigma_{\bar{\sigma}1} := \frac{P_{\bar{\sigma}M}}{A_{\bar{\sigma}}} \quad \sigma_{\bar{\sigma}1} = 92 \quad \text{МПа}$$

В рабочих условиях

$$\sigma_{\bar{\sigma}2} := \frac{P_{\bar{\sigma}p}}{A_{\bar{\sigma}}} \quad \sigma_{\bar{\sigma}2} = 105.004 \quad \text{МПа}$$

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

Usl_bolti = "Условия прочности выполняются"

$$q := \frac{\max(P_{\bar{\sigma}_M}, P_{\bar{\sigma}_P})}{\pi \cdot D_{сп} \cdot b_{II}} \quad q = 14.185 \quad \text{МПа}$$

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

Usl_prokl = "Условия прочности прокладки выполняются"

Расчет фланцев на статическую прочность

Расчетный изгибающий момент, действующий на приварной встык фланец при затяжке

$$M_M := C_F \cdot P_{\bar{\sigma}_M} \cdot b \quad M_M = 1.661 \times 10^6 \text{ Н}\cdot\text{мм}$$

Расчетный изгибающий момент, действующий на фланец в рабочих условиях

$$M_P := C_F \cdot \max[P_{\bar{\sigma}_P} \cdot b + (Q_d + Q_{FM}) \cdot e, |Q_d + Q_{FM}| \cdot e] \quad M_P = 1.923 \times 10^6 \text{ Н}\cdot\text{мм}$$

Расчетные напряжения во фланце при затяжке:

Меридиональное изгибное напряжение во втулке приварного встык фланца

$$c_0 := 1 \quad \text{мм}$$

Прибавка на коррозию

D.пр приведенный диаметр фланца

$$h := 34 \quad \text{Толщина фланца, вместе с ответной частью, мм}$$

$$D_{пр} := D_{\phi} + S_0 = 17 \text{ мм}$$

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

$$\sigma_{0M} = 83.476 \text{ МПа}$$

Наряжение в тарелке приварного встык фланца или плоского в условиях затяжки

Радиальное напряжение

$$\sigma_{RМ} := \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + l_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot l_0 \cdot D_\phi} \cdot M_M \quad \sigma_{RМ} = 24.81 \quad \text{МПа}$$

Окружное напряжение

$$\sigma_{ТМ} := \frac{\beta_Y \cdot M_M}{h^2 \cdot D_\phi} - \beta_Z \cdot \sigma_{RМ} \quad \sigma_{ТМ} = -17.26 \quad \text{МПа}$$

Расчетные напряжения во фланце в рабочих условиях:

Меридиональные изгибные напряжения для приварных встык фланцев с прямой втулкой и плоских фланцев

$$\sigma_{0p} := \frac{M_p}{\lambda \cdot (S_0 - c_0)^2 \cdot D_{пр}} \quad \sigma_{0p} = 96.693 \quad \text{МПа}$$

Максимальные меридиональные мембранные напряжения во втулке приварного встык фланца

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

$$\sigma_{0mp} = 0.311 \quad \text{МПа}$$

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

Радиальное напряжение

$$\sigma_{Rp} := \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + l_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot l_0 \cdot D_\phi} \cdot M_p \quad \sigma_{Rp} = 28.739 \quad \text{МПа}$$

Окружное напряжение

$$\sigma_{Tp} := \frac{\beta_Y \cdot M_p}{h^2 \cdot D_\phi} - \beta_Z \cdot \sigma_{Rp} \quad \sigma_{Tp} = -19.993 \quad \text{МПа}$$

$\sigma_d := 153$ МПа Допускаемое напряжение для материала фланца при температуре испытаний

$\sigma_{20} := 196$ МПа Допускаемое напряжение для материала фланца при рабочей температуре

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

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

PR_3 := "Условия статической прочности выполняются"

KT := 1.3 коэффициент, учитывающий стесненность температурных деформаций

$\sigma_0 := 3 \cdot \sigma_d = 459$ МПа по гост 34233.1-2017 [6]

Usl_3 :=
$$\begin{cases} \text{PR}_1 & \text{if } \max(|\sigma_{0M} + \sigma_{RM}|, |\sigma_{0M} + \sigma_{TM}|) > KT \cdot \sigma_{20} \\ \text{PR}_2 & \text{if } \max(|\sigma_{0P} - \sigma_{0MP} + \sigma_{TP}|, |\sigma_{0P} - \sigma_{0MP} + \sigma_{RP}|, |\sigma_{0P} + \sigma_{0MP}|) > KT \cdot \sigma_0 \\ \text{PR}_3 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Usl_3 = "Условия статической прочности выполняются"

Проверка углов поворота фланцев

Угол поворота приварного встык фланца, плоского фланца

$$\Theta := M_P \cdot Y_\Phi \cdot \frac{E_{20}}{E} \quad \Theta = 7.99 \times 10^{-4}$$

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

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

Usl_P = "Условие поворота плоского фланца выполняется"

3.7 Расчет укрепления отверстий (штуцера E, рис. 3.1)

Цель расчета - определить, нуждаются ли отверстия для патрубков в укреплении, а также определить основные параметры укрепляющего элемента в случае необходимости.

Расчетная схема укрепления отверстий изображена на рис. 3.17

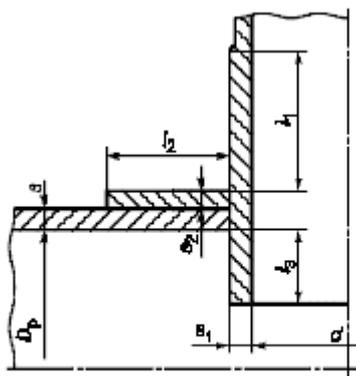


Рисунок. 3.17 Расчетная схема укрепления отверстий

Расчет укрепления отверстий ведется по [13]

Исходные данные:

Внутренний диаметр оболочки

$$D := 320 \text{ мм}$$

Давление, действующее на штуцер, принимаем равным давлению, действующему на стенку камеры

$$P_B = 0.4 \text{ МПа}$$

Расчётная температура

$$t_R := 150 \text{ C}^\circ$$

Длина неукреплённой части оболочки

$$l_1 := 825 \text{ мм}$$

Расчетная толщина стенки камеры $s_K = 2.738 \text{ мм}$ (см. раздел 3.2.1)

Расчетная толщина стенки рубашки камеры $s_P = 0.406 \text{ мм}$ (см. раздел 3.2.2)

Исполнительная толщина стенки оболочки

$$s := 4 \text{ мм}$$

Диаметр отверстия

$$d1 := 160 \text{ мм}$$

Прибавка расчетной толщины стенки

$$c := 1 \text{ мм}$$

Коэффициент прочности сварных швов

$$\phi := 0.8$$

Допускаемое напряжение для стали при 20 °С

$$\sigma_{20} = 196 \text{ МПа};$$

Минимальное значение предела текучести стали при 20 °С

$$R_{p1.0} := 225 \text{ МПа};$$

Допускаемое напряжение для материала при расчётной температуре:

Для стали 12Х18Н10Т при $t=200$ °С :

$$\sigma_{д200} = 160 \text{ МПа};$$

Допускаемое напряжение для стали 12Х18Н10Т при нормальных условиях:

$$\sigma_{20} := \text{Floor}(\sigma_{д20}, 0.5) = 184 \text{ МПа};$$

Давление при испытании на прочность:

$$P_{\text{исп}} := 1.25 \cdot P_{\text{в}} \cdot \frac{\sigma_{20}}{\sigma_{д200}} = 0.575 \text{ МПа};$$

Расчетные внутренние диаметры укрепляемых элементов определяем согласно с [13]

Для штуцера на цилиндрической обечайке

$$D_{p1} := D \text{ мм}$$

Расчетные диаметры отверстия :

$$d_{p1} := d1 + 2c$$

$$d_{p1} = 162 \text{ мм}$$

Расчетные длины штуцера:

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

Ширину зоны укрепления в переходах и днищах вычисляют по формуле

$$l_p := \sqrt{D_{p1} \cdot (s - c)} \quad l_p = 30.984 \text{ мм}$$

Проверка условий применения формул для расчета укрепления отверстий

$$\text{пров1} := \begin{cases} \text{"Отношение диаметров НЕ выполняется"} & \text{if } \left(\frac{d_{p1} - 2 \cdot c}{D} \geq 1 \right) \\ \text{"Отношение толщины к диаметру НЕ выполняется"} & \text{if } \left(\frac{s - c}{D} \geq 0.1 \right) \\ \text{"Условия применения формул выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

пров1 = "Условия применения формул выполняются"

Расчетный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$$d_o := 2 \cdot \left[\left(\frac{s - c}{s_k} \right) - 0.8 \right] \cdot \sqrt{D_{p1} \cdot (s - c)} \quad d_o = 18.334 \text{ мм}$$

Проверка условий необходимости дальнейшего расчета укреплений отверстий:

$$\text{пров3} := \begin{cases} \text{"НЕ требуется укрепление отверстий"} & \text{if } d_o \geq d_{p1} \\ \text{"требуется укрепление отверстий"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

пров3 = "требуется укрепление отверстий"

Диаметр укрепляемых элементов

Для штуцера на цилиндрической обечайке

$$D_{p1} := D$$

Расчетные длины штуцеров:

$$l_1 := 260 \text{ мм}$$

$$d := 160 \text{ мм}$$

$$l_{1p} := \min \left[l_1, 1.25 \sqrt{(d + 2 \cdot c) \cdot (s - c)} \right] = 27.557$$

$$l_{3p} := 0$$

$$l_2 := 100 \text{ ширина кольца мм}$$

$$s_2 := 8 \text{ толщина кольца мм}$$

$$l_{2p} := \min \left[l_2, \sqrt{D \cdot (s_2 + s - c)} \right] = 59.33$$

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

$$l_p = 30.984 \text{ мм}$$

Отношения допускаемых напряжений, поскольку штуцер, накладное кольцо и обечайка изготовлены из одного материала:

$$\chi_1 := 1 \quad \chi_2 := 1 \quad \chi_3 := 1$$

$$d_p := 164 \text{ мм} \quad \text{наружный диаметр патрубка}$$

$$A_1 := l_{1p} \cdot (s - s_p - c) \cdot \chi_1 = 71.488$$

$$A_2 := l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 = 474.637$$

$$A_3 := 0$$

$$A_{p.c.} := l_p \cdot (s - s_p - c) = 80.378$$

$$A_p := 0.5 \cdot [(d_p) - d_o] \cdot s_p = 29.556$$

$$\text{Summ} := A_1 \cdot \chi_1 + A_2 \cdot \chi_2 + A_3 \cdot \chi_3 + A_{p.c.} = 626.503$$

$$\text{Prov} := \begin{cases} \text{"условие укрепления отверстия выполняется"} & \text{if Summ} > A_p \\ \text{"условие укрепления отверстия не выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Prov} = \text{"условие укрепления отверстия выполняется"}$$

Проведем по аналогии расчет необходимости укрепления отверстий в охлаждающей рубашке, обечайка охлаждающей рубашки изображена на рис 3.1

Б поз. 5

Для штуцера на цилиндрической обечайке

$$D_{p1} := D$$

$$d_1 := 160$$

Расчетные диаметры отверстия :

$$d_{o1} := d_1 + 2c$$

$$d_{p1} = 162 \text{ мм}$$

Расчетные длины штуцера:

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

Ширина зоны укрепления в переходах и днищах вычисляются по формуле

$$l_p := \sqrt{D_{p1} \cdot (s - c)} \quad l_p = 30.984 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки оболочки:

$$s_p = 0.406$$

Проверка условий применения формул для расчета укрепления отверстий

$$\text{пров1} := \begin{cases} \text{"Отношение диаметров НЕ выполняется"} & \text{if } \left(\frac{d_{p1} - 2 \cdot c}{D} \geq 1 \right) \\ \text{"Отношение толщины к диаметру НЕ выполняется"} & \text{if } \left(\frac{s - c}{D} \geq 0.1 \right) \\ \text{"Условия применения формул выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\boxed{\text{пров1} = \text{"Условия применения формул выполняются"}}$$

Расчетный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$$d_o := 2 \cdot \left[\left(\frac{s - c}{s_p} \right) - 0.8 \right] \cdot \sqrt{D_{p1} \cdot (s - c)} \quad d_o = 408.537 \text{ мм}$$

Проверка условий необходимости дальнейшего расчета укреплений отверстий:

$$\text{пров3} := \begin{cases} \text{"НЕ требуется укрепление отверстий"} & \text{if } d_o \geq d_{p1} \\ \text{"требуется укрепление отверстий"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\boxed{\text{пров3} = \text{"НЕ требуется укрепление отверстий"}}$$

3.8 Расчет болтов для крепления камеры к стойке поз .9 рис. 3.1

Расчетная схема изображена на рис. 3.18

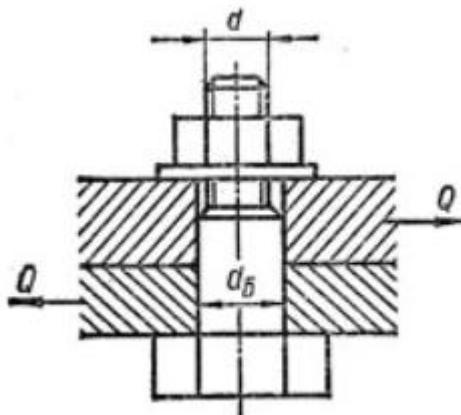


Рисунок 3.18 Расчетная схема крепежных болтов

Цель расчета - проверить болты на смятие, расчет ведется по [16]

Исходные данные:

Вылет консоли	$\underline{L} := 430$	мм
Сила, действующая на болты	$\underline{Q} := 12$	кН
Толщина крепежного листа:	$\underline{\delta} := 15$	мм
Число болтов	$z := 4$	

Назначаем материал основной конструкции сталь Ст3 [17]

$$\sigma_B := 450 \text{ МПа}$$

$$\sigma_T := 240 \text{ МПа}$$

$$\sigma_p := 160 \text{ МПа}$$

Требуемая высота крепежного листа из условия прочности на изгиб $[\sigma]_{и} \approx [\sigma]_p$

Изгибающий момент на крепежной пластине

$$\underline{M} := Q \cdot \frac{L}{2} = 2.58 \times 10^3 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

$$\underline{h} := \left[6 \cdot 10^3 \cdot \frac{M}{(\delta \cdot \sigma_p)} \right]^{\frac{1}{2}} = 80.312 \text{ мм}$$

Из конструктивных соображений принимаем высоту листа 130 мм, межосевое расстояние 180 мм.

На соединение действуют срезающая сила и осевая сила, приложенные в центре масс в плоскости стыка. Силы распределены по болтам. Допускаемые напряжения на срез в болтах класса прочности 5.8 ($\sigma_T = 400$ МПа):

$$[\tau]_{ср} = 0,25 \cdot 400 = 100 \text{ МПа.}$$

Диаметр стержня болта без зазора из условий среза по формуле из условия прочности

$$\tau_D := 100$$

$$d_c := \left[\frac{4 \cdot (Q \cdot 1000 + M)}{\pi \cdot \tau_D} \right]^{\frac{1}{2}} = 13.625 \quad \text{мм}$$

$$d := d_c \cdot 2 \quad d = 27.25$$

Где 2 - это коэффициент запаса прочности болтов

По [18] ближайший больший $d_c = d_1 = 27.25$ мм, что соответствует резьбе М28, выбираем болты М30

$$d_{\sigma} := 30 \quad \text{мм}$$

Проверка поверхности соединения на смятие, являющимся самым опасным усилием.

Предел твердости стали Ст3

$$\sigma_T := 400 \quad \text{МПа}$$

Допускаемое напряжение смятия

$$\sigma_{дсм} := 0.35 \cdot \sigma_T = 140 \quad \text{МПа}$$

Напряжение смятия, которым нагружены болты

$$\sigma_{см} := \frac{(Q \cdot 1000 + M)}{\delta \cdot d_{\sigma}} = 32.4 \quad \text{МПа}$$

$$\sigma_{дсм} > \sigma_{см}$$

Условие прочности выполняется

Комплект крепежных деталей:

БОЛТ М30–6g x 50.58 ГОСТ 7817-80;

ГАЙКА М30–6Н.5 ГОСТ 5915-70;

ШАЙБА 30.02 ГОСТ 10906-78;

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА

«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСООБЪЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
4КМ71	Меньшов Павел

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

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

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

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала инженерных решений (ИР)	<i>Проведение предпроектного анализа. Определение целевого рынка и проведение его сегментирования.</i>
2. Формирование плана и графика разработки и внедрения ИР	<i>Определение целей и ожиданий, требований проекта. Определение заинтересованных сторон и их ожиданий.</i>
3. Составление бюджета инженерного проекта (ИП)	<i>Определение технико-экономических показателей проекта и нахождение критического объема продаж.</i>
4. Оценка ресурсной, финансовой, социальной, бюджетной эффективности ИР и потенциальных рисков	<i>Проведение оценки экономической эффективности исследования.</i>

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)

1. «Портрет» потребителя	
2. Карта сегментирования рынка услуг	
3. Диаграмма Исикавы	
4. Цели и результаты проекта	
5. Организационная структура проекта	
6. Иерархическая структура работ по проекту	

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Креницына Зоя Васильевна	К.т.н		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4КМ71	Меньшов Павел		

4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

4.1 Сегментирование рынка

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

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

В данной работе продуктом и целевым рынком являются:

продукт: лазерные кристаллы LiYF₄;

целевой рынок: НИИ, частные лаборатории, заводы.

Сегментация рынка услуг по высокотемпературным вакуумным операциям по признаку изображена на Табл. 4.1.

Табл. 4.1. Карта сегментирования рынка услуг

Потенциальный потребитель	Масштаб заказа		
	Малый	Средний	Крупный
Научно исследовательские центры	$\beta \alpha$	α	
Частные лаборатории	β	$\gamma \beta$	
Заводы	$\gamma \beta \alpha$		γ

Фирма А – α , Фирма Б – β , Фирма В – γ

Результат сегментирования:

Основными сегментами данного рынка являются НИИ, заводы и, в меньшей степени, частные лаборатории.

Таким образом, предприятие намерено ориентироваться на заключение сделок и предоставление услуг для НИИ и заводов.

В будущем, перспективными сегментами рынка могут являться только частные лаборатории, и, возможно аналогичные предприятия за рубежом.

4.2 Диаграмма Исикавы

Область применения диаграммы:

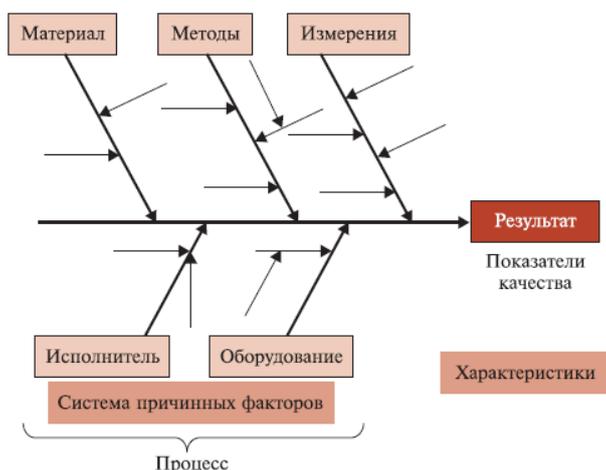
- Выявление причин возникновения проблемы;
- Анализ и структурирование процессов на предприятии;
- Оценка причинно-следственных связей.

Построение диаграммы начинают с формулировки проблемной области/темы, которая является объектом анализа и наносится на центральную горизонтальную стрелку диаграммы.

Затем выявляются факторы/группы факторов, влияющие на объект анализа.

Часто, для выявления таких факторов используется прием 6М:

- персонал (Manpower);
- оборудование (Machine);
- сырье, материалы, комплектующие (Material);
- технология проведения работ (Method);
- средства измерения и методы контроля (Measurement);



- производственная среда (Media).

Рис.4.1 Общий вид диаграммы Исикавы

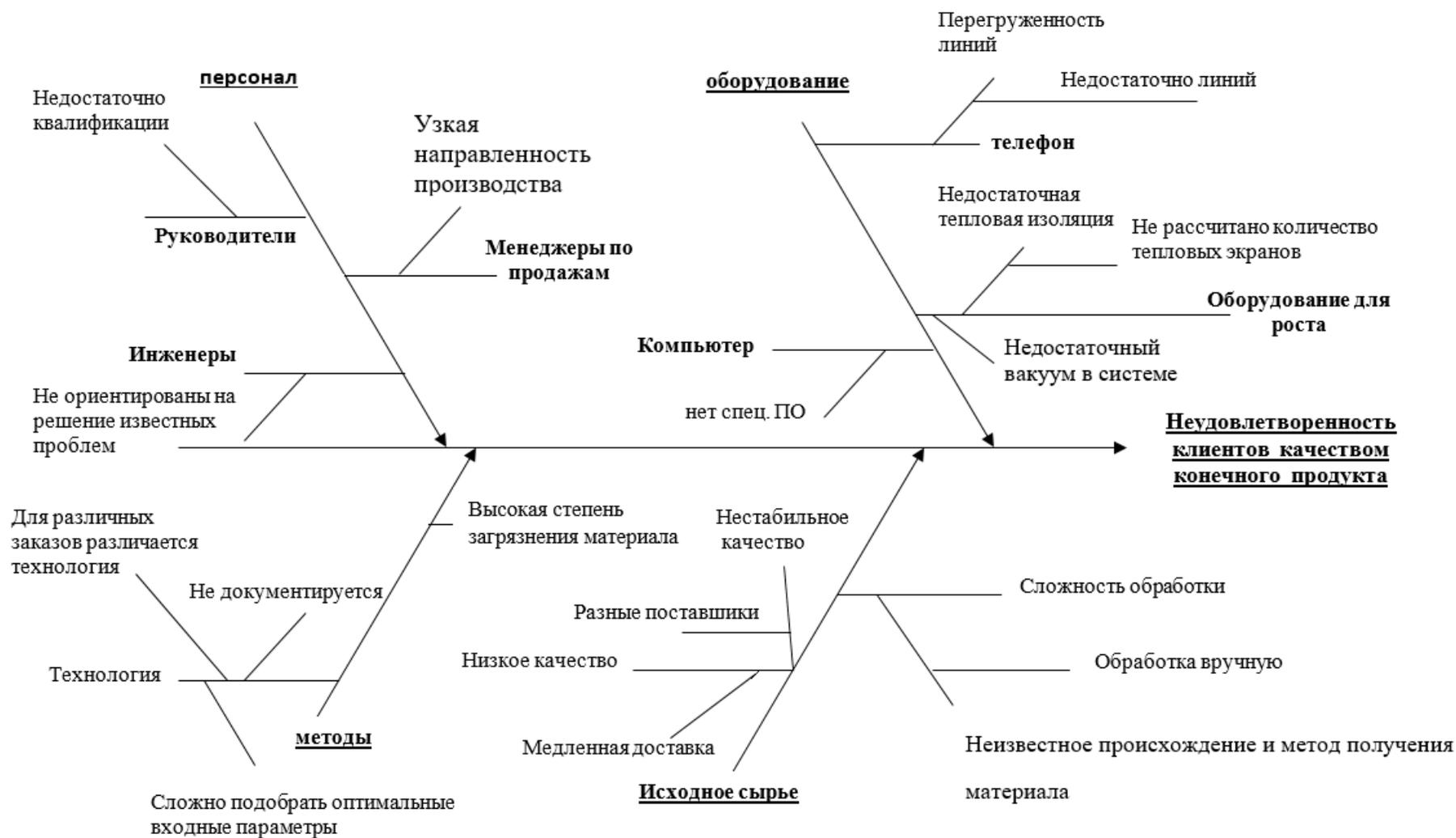


Рис.4.2. Диаграмма Исикавы

4.3 Оценка готовности проекта к коммерциализации

На какой бы стадии жизненного цикла не находилась научная разработка полезно оценить степень ее готовности к коммерциализации и выяснить уровень собственных знаний для ее проведения (или завершения). Для этого необходимо заполнить специальную форму, содержащую показатели о степени проработанности проекта с позиции коммерциализации и компетенциям разработчика научного проекта. Показатели приведены в табл. 4.2

Таблица 4.2

Бланк оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации

№ п/п	Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
1.	Определен имеющийся научно-технический задел	5	3
2.	Определены перспективные направления коммерциализации научно-технического задела	2	4
3.	Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке	3	4
4.	Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок	5	2
5.	Определены авторы и осуществлена охрана их прав	1	1

6.	Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	1	1
7.	Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	3	4
8.	Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	1	5
9.	Определены пути продвижения научной разработки на рынок	5	4
10.	Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	4	4
11.	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	5	5
12.	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	3	2
13.	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	5	5
14.	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	3	4
15.	Проработан механизм реализации научного проекта	5	5
	ИТОГО БАЛЛОВ	51	53

Вывод: Перспективность проекта – выше среднего

Разработчикам не хватает компетенций экономистов, в будущем возможно привлечение квалифицированного персонала, для эффективного распределения ресурсов и обеспечения высоких продаж.

4.4. Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования

Основным методом коммерциализации научно-технического исследования будет являться инжиниринг. Инжиниринг как самостоятельный вид коммерческих операций предполагает предоставление на основе договора инжиниринга одной стороной, именуемой консультантом, другой стороне, именуемой заказчиком, комплекса или отдельных видов инженерно-технических услуг, связанных с проектированием, строительством и вводом объекта в эксплуатацию, с разработкой новых технологических процессов на предприятии заказчика, усовершенствованием имеющихся производственных процессов вплоть до внедрения изделия в производство и даже сбыта продукции.

Таким образом самым главным и ценным будут являться полученные знания, полученные в ходе работы над проектом. Специалисты, в виду маленького штата будут вынуждены развиваться сразу по нескольким профилям производства, и, по прошествии времени, будут способны оказывать услуги консалтинга в данной отрасли. Пособствовать успешному продвижению разработки это может, тем, что выполняя новые задачи, будет получен ценный опыт, и специалисты будут более развиты в тех или иных областях

4.5 Инициация проекта

Группа процессов инициации состоит из процессов, которые выполняются для определения нового проекта или новой фазы существующего. В рамках процессов инициации определяются изначальные цели и содержание и фиксируются изначальные финансовые ресурсы. Определяются внутренние и внешние заинтересованные стороны проекта, которые будут взаимодействовать и влиять на общий результат научного проекта. Данная информация закрепляется в Уставе проекта.

Устав проекта документирует бизнес-потребности, текущее понимание потребностей заказчика проекта, а также новый продукт, услугу или результат, который планируется создать.

Таблица 4.3

Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
Заказчик	Получить кристалл LiYF_4 с необходимой кристаллической структурой, в определенные сроки за заранее обговоренную сумму
Руководство	Получить результат при минимальных затратах, с необходимым качеством.
Эксперт	Обеспечение исполнителя всеми необходимыми знаниями для выполнения проекта
Исполнитель	Обеспечить работоспособность ростовой установки, возможность непрерывной работы, и, как

	следствие максимально возможного выхода за установленный промежуток времени
--	--

Таблица 4.4

Цели и результат проекта

Цели проекта:	Получение лазерных кристаллов LiYF ₄
Ожидаемые результаты проекта:	Налаживание бесперебойной работы ростовой установки и продажа продукта
Критерии приемки результата проекта:	Чистота продукта, кристаллическая структура, лазерная проницаемость
Требования к результату проекта:	Требование:
	Производство требуемого количества продукции за минимальный промежуток времени
	Гарантия качества продукции
	Возможность проведения похожих процессов в данной установке
	Поддержание необходимых условий в установке

2. Организационная структура проекта. На данном этапе работы необходимо решить следующие вопросы: кто будет входить в рабочую группу данного проекта, определить роль каждого участника в данном проекте, а также прописать функции, выполняемые каждым из участников и их трудозатраты в проекте. Эту информацию представить в табличной форме (Таблица 4.5.2).

Рабочая группа проекта

№ п/п	Роль в проекте	Функции	Трудо- затраты, час.
1	Руководитель	Обеспечение команды необходимыми материалами, финансирование проекта, продажа продукта	30
2	Технолог	Выбор и реализация метода роста	2000
3	Инженер	Обеспечение минимально необходимого разряжения и герметичности в установке	2000
4	Инженер	Обеспечение бесперебойной работы системы охлаждения и нагрева	2000
4	Инженер – электрик	Наладка и мониторинг состояния электрической части установки	500
	Оператор	Мониторинг протекания процесса, фиксирование всех необходимых данных	1500
ИТОГО:			8030

4.6. Планирование управления научно-техническим проектом

Группа процессов планирования состоит из процессов, осуществляемых для определения общего содержания работ, уточнения целей и разработки последовательности действий, требуемых для достижения данных целей.

4.6.1. Иерархическая структура работ проекта

Иерархическая структура работ (иср) – детализация укрупненной структуры работ. В процессе создания иср структурируется и определяется содержание всего проекта. на рис. 4.6 представлена иерархическая структура работ по проекту.



Рис. 4.3. Иерархическая структура работ

4.6.2 Оценка сравнительной эффективности исследования

Построим таблицу, в которой проведем сравнительный анализ аналогов выполнения исследовательской работы.

Таблица 4.6

Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии	ПО	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Аналог 1	Аналог 2
1. Способствует росту производительности труда пользователя		0,1	5	2	4
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)		0,15	5	3	3
3. Помехоустойчивость		0,15	3	4	3
4. Энергосбережение		0,20	5	2	3
5. Надежность		0,25	5	3	4
6. Материалоемкость		0,15	5	3	4
ИТОГО		1			

В ходе расчетов были получены следующие данные, для анализа сравнительной эффективности разработки (Таблица 4.7)

Таблица 4.7

Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Аналог	Разработка
1	0,51	Интегральный финансовый показатель разработки	0,78 0,51
2	4,7	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	3,5 4,7
3	9,125	Интегральный показатель эффективности	4,4 9,125
4	2,056	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	0,48

Сравнение значений интегральных показателей эффективности позволяет понять и выбрать более эффективный вариант решения поставленной в магистерской диссертации технической задачи с позиции финансовой и ресурсной эффективности.

4.7 Определение ТЭП и точки безубыточности

4.7.1 Расчёт производственной мощности.

Под производственной мощностью химического предприятия (производства, цеха) понимается максимально возможный годовой выпуск готовой продукции в номенклатуре и ассортименте, предусмотренных на плановый период при наилучшем использовании производственного оборудования, площадей в результате внедрения инноваций или проведения организационно-технических мероприятий.

$$M = P_{\text{час.}} \cdot T_{\text{эф.}} \cdot K_{\text{об.}},$$

$$M = 0,022 \cdot 1384 \cdot 1 = 30,4$$

где $P_{\text{час.}}$ – часовая производительность оборудования в натуральных единицах;

$T_{\text{эф.}}$ – эффективный фонд времени работы оборудования (час.);

$K_{\text{об.}}$ – количество однотипного оборудования, установленного в цехе.

Эффективный фонд времени оборудования:

$$T_{\text{эфф}} = T_{\text{ном.}} - T_{\text{ППР}} - T_{\text{ТО}},$$

$$T_{\text{эф}}=247-74=173$$

где $T_{\text{ном.}}$ – номинальный фонд работы оборудования;

$T_{\text{ППР}}$ – время простоя в ремонтах за расчетный период (для расчета $T_{\text{ППР}}$ необходимо построить график ППР с указанием времени работы между ремонтами и временем простоя в ремонте);

$T_{\text{ТО}}$ – время технологических остановок.

$$T_{\text{ном}} = T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}},$$

$$T_{\text{ном}}=365-118-0=247$$

где $T_{\text{вых}}$ – количество выходных и праздничных дней в году;

Таблица 4.8

Баланс рабочего времени оборудования

Показатели	Количество дней (часов)
Календарный фонд времени	365 (2920)
Режимные потери рабочего времени	
Выходные и праздники	118
Номинальный фонд рабочего времени	247
Простой оборудования в ремонтах	74
Эффективное время работы оборудования за год	173

Для анализа использования оборудования рассчитываем экстенсивный и интенсивный коэффициенты.

Коэффициент экстенсивного использования оборудования равен

$$K_{\text{экс}} = T_{\text{эф}}/T_{\text{н}} .$$

$$K_{\text{экс}}=173/247=0,7$$

Коэффициент интенсивного использования оборудования равен

$$K_{\text{инт}} = Q_{\text{пп}}/Q_{\text{мах}} ,$$

$$K_{\text{инт}}=0,020/0,022=0,9$$

где $Q_{\text{пп}}$ – производительность единицы оборудования в единицу времени;

$Q_{\text{мах}}$ – максимальная производительность в единицу времени.

Интегральный коэффициент использования мощности:

$$K_{\text{им}} = K_{\text{экс}} \cdot K_{\text{инт}} .$$

$$K_{\text{им}}=0,9*0,7=0,63$$

Для определения фактического выпуска продукции рассчитывается производственная программа ($N_{\text{год}}$):

$$N_{\text{год}}= K_{\text{им}} * M,$$

$$N_{\text{год}}=0,63*30,4=19,345$$

где $K_{\text{им}}$ – коэффициент использования мощности.

4.7.2 Расчет себестоимости готовой продукции по действующему производству

Расчет годового фонда заработной платы цехового персонала

Расчет численности персонала:

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

Таблица 4.8

Расчет численности ИТР, служащих и МОП

Наименование должности	Категория	Тарифный разряд	Число штатных единиц	Количество смен в сутках	Штатная численность
Заведующий лабораторией	ИТР		1	1	1
Технолог	ИТР		1	1	1
Инженер-Электрик	ИТР		1	1	1
Инженер механик	ИТР		1	1	1
Оператор	Рабочий		1	1	1
Итого			5	5	5

Таблица 4.9

Баланс эффективного времени одного среднесписочного работника

№	Показатели	Дни	Часы
1.	Календарный фонд рабочего времени	365	2920
2.	Нерабочие дни выходные праздничные	182	
3.	Номинальный фонд рабочего времени	183	1464
4.	Планируемые невыходы: очередные и дополнительные отпуска невыходы по болезни или декретные отпуска отпуск в связи с учебой без отрыва от производства выполнение госуд. обязанностей	28 7 15 1	
5	Эффективный фонд рабочего времени	173	1384

Общий фонд заработной платы рабочих за год:

$$З_{год} = З_{осн} + З_{доп},$$

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

$Z_{доп}$ – дополнительный фонд заработной платы рабочих, тыс. руб.

Основной фонд заработной платы для рабочих повременщиков:

$$З_{осн} = З_{тар} + Пр,$$

где $Z_{тар}$ – тарифный фонд заработной платы, тыс. руб;

Пр – оплата премий, тыс. руб;

Тарифный фонд заработной платы:

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

где $Ч_{сп}$ – списочная численность рабочих данного разряда, чел.;

$T_{ст}$ – дневная тарифная ставка данного разряда, тыс. руб.

Дополнительная зарплата (ЗДОП):

$$З_{доп} = (ДН * З_{осн}) / ТЭФФ,$$

где ДН – количество дней невыхода на работу по планируемыми причинам (отпуск, ученические, гос.обязанности).

Районный коэффициент для г. Томска – 1,3.

Отчисления на социальные нужды на зарплату – 30 % от ($Z_{осн} + Z_{доп}$).

Расчет затрат на производство продукции

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.

Таблица 4.7.2.3

Расчет годовой потребности в сырье и материалах

Годы	Наименование сырья	Размерность	Количество оборотных средств на весь годовой выпуск, нат.ед.	Цена за единицу, руб	Затраты на оборотные средства, тыс.руб
1 год	Сырье:	Грамм	20000	12,5	250
	Фторид Иттрия				
	Фторид Лития				
	Фторид				
	Празеодима				
	Энергия:	кВт/час	14,24	3	0,042
Электричество					

Расчет амортизационных отчислений

Для расчета амортизационных отчислений необходимо учесть:

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

Таблица 4.10

Расчет амортизационных отчислений.

Наименование основных средств	Норма амортизации, %	1 год	
		С _{оф} , тыс.руб	АО, тыс.руб
1.Здание	15	200	30

2.Оборудова ние	15	2160	324
Трансформа тор	15	100	15
Блок управления	15	60	9
Ростовая установка Редмет - 8	15	2000	300
Итого		2360	354

Калькуляция себестоимости на производство и реализацию продукции при заданном объеме производства (Q)

Калькуляция себестоимости на производство и реализацию продукции при заданном объеме производства (Q=19,345)

Табл. 4.11

Калькуляция себестоимости продукции

Статьи затрат	Затраты на единицу готовой продукции тыс. руб.	Затраты на весь объем тыс.руб
1.Сырье	32,1	610
2.Электроэнергия на технолог. нужды	1	19,3
3.Заработная плата производственных рабочих	18,5	360
3.1 Отчисления на соц. нужды производственных рабочих (30%)	5,55	107,36
Итого переменных издержек	57	1100
4.Общепроизводственные	221,45	3510

накладные расходы		
4.1 Расходы на содержание и эксплуатацию оборудования:	0,3	5,7
-Амортизация оборудования	0,15	2,85
-Ремонт оборудования;	1	19,345
4.2 Заработная плата ИТР:	221	4265.3
-Заработная плата технолога	50	950
-Заработная плата механика	50	950
-Заработная плата заведующего лабораторией;	50	950
-Заработная плата инженера	20	380
- отчисления на социальные нужды 30%	51	984
Итого постоянных издержек	221,45	4,273
Цеховая (производственная)себестоимость	280,45	1140
5.Управленческие расходы	14,0225	349,6
Заводская себестоимость	294,47	1520
6. Коммерческие расходы	2,9	3,04
Полная себестоимость	297,4	4400
Итого условно-пере изд	57	1100,1
Итого условно-пост изд	221,45	3249

Определение цены готовой продукции

Цену продукта определяем по формуле:

$$Ц = С*(1+P/100),$$

где С – полная себестоимость единицы готовой продукции;

Р – рентабельность продукции (20%).

$$Ц_{тек} = 297,4*(1+20/100) = 356,8 \text{ тыс.руб.}$$

Принимаем цену равную 400 т.р (конкурентная цена на рынке)

Анализ безубыточности по действующему производству

Цель анализа – определение точки безубыточности, т.е. минимального объема продаж, начиная с которого предприятие не несет убытков. В точке безубыточности выручка от продажи продукции ($B_{пр}$) равна общим затратам на производство и реализацию продукции:

$$B_{пр} = Q * Ц = 7720 \text{ тыс. руб.}$$

Определение точки безубыточности:

Аналитическим способом:

$$Q_{кр} = \frac{\text{Изд}_{\text{пост}}}{Ц - \text{Изд}_{\text{пер}}} = \frac{221}{400 - 57} = 0,64 \text{ см}^3/\text{г.}$$

где $Ц_{гп}$ – цена единицы готовой продукции (1 см³);

$\text{Изд}_{гп}$ - удельные переменные издержки (переменные издержки на единицу готовой продукции – 1 тонну).

$$Q_{кр} = 0,64 \text{ см}^3$$

Графическим способом:

Графически точка безубыточности определяется согласно рис. 4.7.2

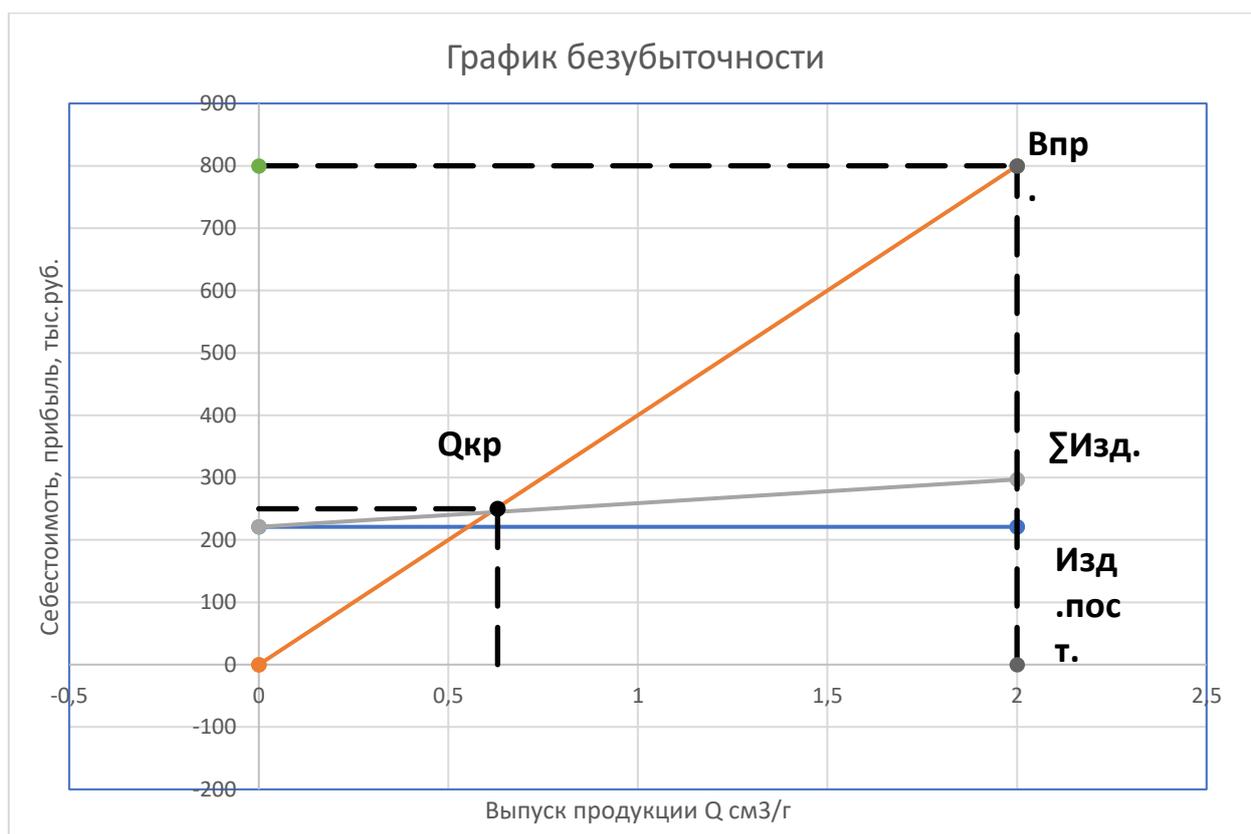


Рис.4.4 Графическое определение точки безубыточности

График масштабирован, т.к. выручка слишком высока, и определение графически не представляется возможным.

Полученное значение графическим способом $Q_{кр}=0,63$, см³/г.

Табл. 4.11

Таблица определения технико-экономических показателей

Наименование показателя	Единицы измерения	1 год
1.Объем производства	См ³	19,3
2.Объем продаж	См ³	19,3
3.Цена за единицу	тыс. руб.	400
4.Выручка от продажи	тыс. руб.	7720

5.Суммарные издержки	тыс. руб.	297
5.1.Издержки переменные	тыс. руб.	57
5.2.Издержки постоянные	тыс. руб.	221
6.Прибыль операционная	тыс. руб.	5790
7.Налог на прибыль	тыс. руб.	1147
8.Прибыль чистая	тыс. руб.	4642
9.Себестоимость 1 см3	тыс. руб.	297,4
10.Стоимость основных средств	тыс. руб.	2674
11.Численность основных рабочих	чел.	5
12.Фондовооруженность	тыс. руб/чел.	534,8
13.Фондоотдача	руб./руб	2,1
14.Фондоемкость	руб./руб	0,46
15.Производительность труда	тыс.руб./чел.	1544
16.Рентабельность производства	%	15,6
17.Рентабельность продаж	%	0,6
18.Критический объем продаж	См3	0.64
19.Критический объем продаж	тыс. руб	256

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
4КМ71	Меньшов Павел

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

Тема ВКР:

Расчет и проектирование вакуумной установки для выращивания кристаллов LiYF₄, легированных редкоземельными элементами	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	<i>Объектом исследования относится к технологии получения монокристаллов фторидов из расплава для использования в оптике. Ростовая установка Редмет – 8 предназначена для выращивания кристаллов редкоземельных элементов при температуре до 2000°С и предельным разряжением до 10⁻⁷.</i>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.	<i>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.</i>
2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	<i>– Вредные и опасные факторы: Недостаточная освещенность Повышенный уровень шума Отклонение показателей микроклимата в помещении Утечки вредных и токсичных веществ в атмосферу</i>
3. Экологическая безопасность:	<i>- Выбросы паров масла в атмосферу - Выброс твердых бытовых отходов в литосферу</i>
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	<i>-подтопление и затопление в весеннее половодье, ливневые дожди с градом, штормовые ветры, засухи, природные пожары, искусственные пожары -землетрясения (6-7 баллов) -инфекционные заболевания: эпидемии, эпизоотии, эпизофитии</i>

	<i>Наиболее типичным для Томска являются пожары</i>
--	---

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	20.03.2019
---	-------------------

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	Меньшов Павел		

5. Социальная ответственность

5.1 Введение

Выращивание кристаллов происходит при температуре до 2000°C и при высоком разряде, в ходе работы необходимо проводить множество подготовительных процессов, в процессе выполнения которых могут выделяться вредные вещества, которые, в свою очередь, могут губительным образом сказываться на здоровье человека. Разряд обеспечивается различными насосами и в процессе откачки в атмосферу могут выбрасываться пары вакуумного масла.

Процессы проводятся в лабораторном корпусе СФТИ ТГУ, потенциальными потребителями изготавливаемого материала будут являться научно-технологические центры, производящие лазерную технику. Социальная направленность заключается в содействии развитию коммуникационных возможностей общества, а именно в производстве высокотехнологичного оборудования, способного проецировать изображения на плоские прозрачные поверхности.

Таким образом, перед персоналом стоит задача выполнения всех норм и требований системы безопасности труда, которая включает в себя ряд конкретных требований и мер по видам опасных и вредных производственных факторов.

5.2 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.

Рабочее место оператора установки Редмет – 8 состоит из двух вакуумных насосов, трансформатора высокого напряжения, блока управления и непосредственно самой установки, которая включает в себя кинематическую и вакуумную систему, систему охлаждения, нагрева и подачи тока.

Потенциальную опасность и/или вред здоровью человека могут представлять только системы высокого напряжения и, в меньшей степени, вакуумные насосы вследствие воздействия на организм шума.

При работе в лаборатории с установкой Редмет -8 не наносится вред здоровью работников. Для организации работы по охране труда на предприятии создаются в случае необходимости службы охраны труда или привлекаются специалисты по

охране труда на договорной основе. Структура и численность работников службы охраны труда предприятия определяется работодателем с учетом рекомендаций государственного органа управления охраной труда.

Ответственность за состояние условий и охраны труда на предприятии возлагается на работодателя. В обязанности работодателя входит обеспечение безопасности оборудования, технологических процессов и применяемых сырья и материалов, выполнение требований законодательства и нормативных актов, в частности, организация медицинских осмотров при поступлении на работу и периодических осмотров в процессе работы.

5.3 Производственная безопасность

При выполнении работ возможно возникновение и воздействие на оператора следующих опасных и вредных факторов:

Таблица №5.1 Основные элементы производственного процесса, который формирует опасные и вредные факторы

Таблица 5.1 - Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разрабо тка	Изгогов ление	Эксплуа тация	
1.Отклонение показателей микроклимата	+	+	+	1. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений СанПиН 2.2.4.548-96[23] 2. ГОСТ 12.1.003-83 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Шум. Общие требования безопасности (с Изменением N 1) [22] 3. Санитарные правила и нормы СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 [21]
2. Превышение уровня шума		+	+	
3.Отсутствие или недостаток естественного света	+	+	+	
4.Недостаточная освещенность рабочей зоны	+	+	+	

5.Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека		+	+	4. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов.[24]
6. Утечки токсичных и вредных веществ в атмосферу		+	+	5. ГОСТ 12.1.005-88 Система стандартов безопасности труда (сбт). Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны [25]

5.4 Анализ опасных и вредных производственных факторов

5.4.1 Отклонение показателей микроклимата в помещении.

Микроклимат производственных помещений – метеорологические условия внутренней среды помещений, которые определяются действующими на организм человека сочетаниями температуры, влажности, скорости движения воздуха и теплового излучения; комплекс физических факторов, оказывающих влияние на теплообмен человека с окружающей средой, на тепловое состояние человека и определяющих самочувствие, работоспособность, здоровье и производительность труда. Показатели микроклимата: температура воздуха и его относительная влажность, скорость его движения. В процессе работы на отклонение показателей микроклимата в помещении могла бы повлиять работа установки, т.к. внутри аппарата температура зачастую достигает 2000° С, но поскольку в аппарате установлена система охлаждения, большее влияние на микроклимат оказывает система вентиляции в помещении.

Оптимальны такие параметры микроклимата, которые при длительном и систематическом воздействии на человека обеспечивают сохранение нормального функционального и теплового состояния организма без напряжения реакций терморегуляции, что создает ощущение теплового комфорта и служит предпосылкой для высокой работоспособности.

В таблице 5.2 указаны микроклиматические условия рабочей зоны с учетом избытков тепла, времени года и тяжести выполняемой работы согласно с [21]

Таблица №5.2 Допустимые нормы микроклимата в рабочей зоне производственных помещений

Сезон года	Категория тяжести выполняемых работ	Температура, С°		Относительная влажность, %		Скорость воздуха, м/сек	
		Фактическое значение	Допустимое значение	Фактическое значение	Допустимое значение	Фактическое значение	Допустимое значение
1	2	3	4	5	6	7	8
Холодный	Iб	23	19-24	40	15-75	0.1	0.1-0.2
Теплый		26	20-28	45	15-75	0.2	0.1-0.3

Все параметры микроклимата в рабочей зоне соответствуют нормативным значениям.

5.4.2 Превышение уровней шума.

Производственный шум различной интенсивности и спектра(частоты), длительно воздействуя на работающих, может привести со временем к понижению остроты слуха у последних, а иногда и к развитию профессиональной глухоты. Помимо местного действия – на орган слуха, шум оказывает и общее действие на организм работающих. Шум является внешним раздражителем, который воспринимается и анализируется корой головного мозга, в результате чего при интенсивном и длительно действующем шуме наступает перенапряжение центральной нервной системы, распространяющееся не только на специфические слуховые центры, но и на другие отделы головного мозга.

Источником повышенных значений шума в помещении являются насосы, вследствие наличия быстро вращающихся элементов.

Необходимо следить, чтобы в помещении уровни шума на рабочих местах не превышали предельно допустимых значений, установленных для данных видов работ в соответствии с действующими санитарно-эпидемиологическими нормативами.

Согласно [22] Устанавливаются допустимые уровни звукового давления и эквивалентного уровня звука. Допустимое и фактическое значение для лабораторного помещения отображено в таблице 5.3:

Таблица №5.3 Допустимые уровни звукового давления и эквивалентного уровня звука [3]

Рабочие места	Уровень звука, дБа	
	Фактическое значение	Допустимое значение
Лабораторное помещение	80	60

Уровень звука в рабочей зоне не соответствует нормативному значению, и требует наличия средств индивидуальной защиты.

5.4.3 Отсутствие или недостаток естественного света.

Рациональное освещение рабочих мест обеспечивает безопасные и здоровые условия труда. Источником возникновения недостаточной освещенности помещения может являться поломки установленных ламп для освещения лаборатории. Освещение, соответствующее санитарным нормам, является самым главным условием гигиены труда и культуры производства. При хорошем освещении устраняется напряжение зрения, ускоряется темп работы. При недостаточном освещении глаза сильно напрягаются, темп работы снижается. Недостаточное освещение рабочих мест отрицательно влияет на хрусталик глаза, что может привести к близорукости.

Оценка освещенности рабочей зоны проводится в соответствии с [23], параметры систем освещения на рабочих местах представлена в табл. 5.4

Таблица №5.4 Параметры систем естественного и искусственного освещения на рабочих места

Наименование рабочего места	Тип светильника и источника света	Освещенность, лк	
		Фактическое значение	Нормативное значение
1	2	3	4
Лабораторное помещение	ЛБ20-2 (люминесцентные лампы)	550	>500

Освещенность в рабочей зоне соответствует нормативным значениям.

5.4.4 Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека

Наибольшую опасность при эксплуатации электрических устройств и проведении ремонтно-профилактических работ представляет поражение электрическим током вследствие присоединения к токоведущим частям аппаратуры и к частям прибора, находящимся под напряжением.

Помещение лаборатории относится к категории по условиям опасности поражения электрическим током, без опасности поражения электрическим током, в которых отсутствуют условия, создающие повышенную или особую опасность.

Фактор поражения электрическим током требует проведения мероприятий по его устранению.

Мероприятия, проводимые для устранения факторов поражения электрическим током:

- а) все лица, приступающие к работе с электрооборудованием, проходят инструктаж на рабочем месте, допуск к самостоятельной работе разрешается лишь после проверки знаний техники безопасности;
- б) осуществляется постоянный контроль качества и исправности защитных приспособлений и заземлении, ремонтно-наладочные работы на действующих электроустановках производится только с использованием защитных средств;
- в) эксплуатация электроустановок предусматривает введение необходимой технической документации; обеспечивается недоступность к токоведущим частям, находящимся под напряжением; корпуса приборов и электроустановок заземляются [25].

5.4.5 Утечки токсичных и вредных веществ в атмосферу

Работа в данном лабораторном помещении характеризуется опасностью вдыхания вредных веществ, таких как, например, пары масла, пары хлороформа. Эти вещества, имеющие класс опасности 3 и 2 соответственно, находятся в воздухе в агрегатном состоянии паров. Вышеописанные вещества при длительном воздействии могут вызывать рак груди, химическую пневмонию и аллергическую реакцию. Согласно [26], устанавливается предельно допустимая концентрация паров данного вещества в воздухе рабочей зоны, равная 5 мг/м^3 (для обоих веществ). Несмотря на то, что показатели ПДК в норме, рекомендуется обеспечить помещение постоянным притоком свежего воздуха, для того, чтобы значения концентрации веществ не увеличивались в будущем.

Фактические значения концентрации и ПДК отображены в таблице 5.5:

Таблица №5.5. ПДК веществ в воздухе рабочей зоны

Вещество	ПДК, мг/м ³	
	Фактическое значение	Допустимое значение
Пары хлороформа	1	5
Пары вакуумного масла(ВМ-2)	0,03	5

Показатели предельно допустимой концентрации вредных веществ в рабочей зоне в норме.

5.5 Обоснование мероприятий по снижению уровней воздействия опасных и вредных факторов на работника.

Отклонение от показателей микроклимата в помещении регулируется с помощью регулируемой системы отопления.

Недостаточной освещенности в рабочей зоне не возникает.

Чтобы избежать воздействия шумов на организм работника, должны быть использованы СИЗ, такие как противозумные вкладыши, противозумные наушники [26]. Также, потенциальным решением в будущем может являться вынос всех насосов в отдельное, звукоизолированное помещение.

Чтобы избежать вредного воздействия паров хлороформа или паров вакуумного масла на организм человека, помещение было подключено к вентиляционной системе лабораторного корпуса. Также, были проведены вентиляционные рукава к насосам и к шкафу с реагентами. Таким образом, обеспечивается постоянный приток свежего воздуха в помещение, что не позволяет вышеперечисленным веществам скапливаться в воздухе помещения.

Согласно с «Правилами устройства электроустановок» помещение характеризуется как помещения с повышенной опасностью. Так как в помещении имеется работающий трансформатор тока(>110А).

Для обеспечения безопасной эксплуатации трансформатора должны соблюдаться следующие требования:

1. Для обеспечения защиты от случайного прикосновения к токоведущим частям необходимо применять следующие способы и средства:

- защитные оболочки;
- защитные ограждения (временные или стационарные);
- защитные барьеры.
- безопасное расположение токоведущих частей.

- малое напряжение;
- защитное отключение;
- предупредительная сигнализация, блокировки, знаки безопасности.

2. Для обеспечения защиты от поражения электрическим током при прикосновении к металлическим нетоковедущим частям, которые могут оказаться под напряжением в результате повреждения изоляции, применяют следующие способы:

- защитное заземление;
- выравнивание потенциалов;
- защитное экранирование;
- систему защитных проводов;
- защитное отключение;
- изоляцию нетоковедущих частей;
- средства индивидуальной защиты.

В помещении лаборатории при работе с трансформатором используются следующие средства и способы:

- защитные ограждения (стационарные);
- защитное экранирование;
- защитное отключение;
- изоляцию нетоковедущих частей;
- средства индивидуальной защиты.

Таким образом на рабочем месте используется достаточно средств и способов для безопасной эксплуатации электрооборудования.

5.6 Экологическая безопасность

В настоящее время, когда вопрос встает проблема рационального использования природных ресурсов, охраны окружающей среды, уделяется большое внимание организации разумного воздействия на природу. Необходимо

совершенствовать технологические процессы с целью сохранения окружающей среды от вредных выбросов. Комплексное использование сырья прогрессивно с позиции экологии. Разработаны безотходные технологии, позволяющие вернуть отходы вновь в производство. Несмотря на успехи в области комплексного использования сырья в промышленности имеются значительные неиспользованные возможности.

При выполнении научно-исследовательской работы используются вещества, обеспечивающие минимальное воздействие на окружающую среду. Используемые вещества расходуются в минимальных количествах. В процессе проведения экспериментов вещества проходят механическую и тепловую обработку.

Никаких вредных выбросов в атмосферу, литосферу и гидросферу во время работы не обнаружено.

Направление утилизации отходов:

- в атмосферу. При эксплуатации предприятиями воздушного бассейна можно поддерживать с помощью применения эффективных очистных аппаратов или посредством местных отсосов вытяжкой вентиляционной системы (зонтов, рукавов, кожухов, вытяжных шкафов) с последующей очисткой запыленного воздуха (газов) в аппаратах пылеуловителях.
- в литосферу. Здесь имеет место незначительные выбросы в окружающую среду твердых отходов. Твердые отходы, в виде бытового мусора, выбрасываются в урну.
- в гидросферу. В ходе выполнения работы компоненты взвешивались в сухом виде, никаких растворов не предусматривалось.

5.7 Защита в чрезвычайных ситуациях

Помещение лаборатории находится на цокольном этаже корпуса ИТЦ СФТИ ТГУ. Здание корпуса находится в черте города Томска. Стены здания сложены из керамического кирпича и обладают большой прочностью. Здание устойчиво к воздействию природных опасностей – ураганов, наводнений и способно обеспечить

защиту находящихся в нем людей от природных опасностей. Во избежание затопления подвальных помещений талыми водами своевременно производится очистка прилегающей территории от снега. Для оперативной эвакуации сотрудников и студентов в случае возникновения чрезвычайной ситуации в здании предусмотрено несколько аварийных выходов.

Каждый работник при обнаружении пожара или признаков горения (задымление, запах гари, повышение температуры и т.д.) обязан:

- убрать из помещения все огне- и взрывоопасные вещества, обесточить электроустановки;
- тушение пожара осуществлять всеми имеющимися в лаборатории противопожарными средствами (кошмой, песком, огнетушителем, водой);
- в соответствии с инструкцией о мерах ПБ запрещается тушить водой горящий бензин, а пенным огнетушителем перекись водорода и электропроводку;
- немедленно отключить питание и принять меры к тушению очага возгорания при помощи углекислотного или порошкового огнетушителя;
- немедленно сообщить об этом по телефону в пожарную охрану (при этом необходимо назвать адрес объекта, место возникновения пожара, а также сообщить свою фамилию);
- принять по возможности меры по эвакуации людей, тушению пожара и сохранности материальных ценностей.

Руководитель лаборатории (другое должностное лицо), прибывший к месту пожара, обязан:

- продублировать сообщение о возникновении пожара в пожарную охрану и поставить в известность вышестоящее руководство;
- в случае угрозы жизни людей немедленно организовать их спасение, используя для этого имеющиеся силы и средства;
- проверить включение в работу автоматических систем противопожарной защиты (оповещение людей о пожаре, пожаротушения, противодымной защиты);

- при необходимости отключить электроэнергию (за исключением систем противопожарной защиты), остановить работу устройств, агрегатов, выполнить другие мероприятия, способствующие предотвращению пожара и задымлению помещений;
- прекратить все работы в здании, кроме работ, связанных с мероприятиями по ликвидации пожара;
- удалить за пределы опасной зоны всех работников;
- организовать встречу подразделений пожарной охраны и оказать помощь в выборе кратчайшего пути для подъезда к очагу пожара.

По прибытию пожарного подразделения руководитель лаборатории (или лицо его, и замещающее) обязан проинформировать руководителя тушения пожара о конструктивных и технологических особенностях объекта, прилегающих строений и сооружений, количестве и пожароопасных свойствах хранимых и применяемых веществ, материалов, изделий и других сведениях, необходимых для успешной ликвидации пожара, а также организовать привлечение сил и средств объекта к осуществлению необходимых мероприятий, связанных с предупреждением развития пожара[28].

Заключение

Практическая значимость данного раздела заключается в обеспечении персонала безопасного выполнения задач, связанных с работой на установке Редмет - 8, внедренные меры безопасности соответствуют нормам, принятым законодательством РФ и не мешает технологическому процессу.

6. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ВЫРАЩИВАНИЯ КРИСТАЛЛОВ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ РАСПЛАВА

В основе современной классификации методов выращивания монокристаллов лежит способ создания оптимальных условий кристаллизации. Условия – это, прежде всего, движущая сила кристаллизации и поведение ее во времени, которое определяет скорость выращивания кристалла и степень ее стабилизации, форму фронта кристаллизации; это исходная шихта, величина и время перегрева расплава (раствора), характер и скорость его перемешивания, природа атмосферы кристаллизации, ориентировка затравочного кристалла.

Под методом понимают ряд отличительных признаков техники выращивания кристаллов: необходимость использования контейнера для удержания расплава (раствора), его конфигурация, тип источника нагрева, положение и направление фронта кристаллизации относительно зеркала расплава и т.п.

6.1 Выращивание кристаллов в тиглях

Под выращиванием кристаллов в тиглях следует понимать такие методы, в которых кристалл растет в каком-нибудь сосуде (тигле, лодочке, ампуле) и после кристаллизации заполняет значительную часть его объема. Помимо проблемы выбора подходящего материала тигля, общей для методов выращивания с применением тигля, они имеют тот недостаток, что взаимодействие с тиглем неблагоприятно сказывается на качестве кристалла. В первую очередь здесь следует назвать взаимодействие со стенкой тигля при росте и возникновение механических напряжений при охлаждении от температуры выращивания. Преимуществом этих методов выращивания по сравнению с выращиванием свободно растущих кристаллов является более простая технология и меньшая подверженность дефектам. Были разработаны различные приемы, чтобы ослабить действие неблагоприятных явлений. Сюда относятся помещение покрытий или порошкообразных защитных слоев перед стенкой тигля, применение мягкого (эластичного или пластичного) тигля, извлечение кристалла из тигля немного ниже температуры плавления с последующим свободным

охлаждением. Однако прежде всего тигельные методы дают возможность получать кристаллы относительно сложной формы. Так, например, кристаллы металла для механических испытаний во многих случаях выращиваются в форме, требуемой для аппаратов растяжения, с зажимными головками и определенным диаметром, так что обработка не требуется. В отношении технологии методы выращивания из тиглей можно разбить на 4 группы:

а – тигель остается в Т-поле неподвижным, и кристаллизация достигается медленным охлаждением;

б – тигель движется относительно печи в Т-градиенте;

в – вместо тигля перемещается печь.

г – расплавленная зона перемещается через тигель, для чего могут перемещаться или соответствующая печь, или тигель через эту печь.

Различные способы иногда комбинируются или во многих случаях после небольшого переоборудования могут осуществляться с той же самой аппаратурой.

На рис. 6.1 показаны установки с горизонтальными тиглем или лодочкой; соответственно имеются установки с вертикальным тиглем, которые зачастую предпочтительны.

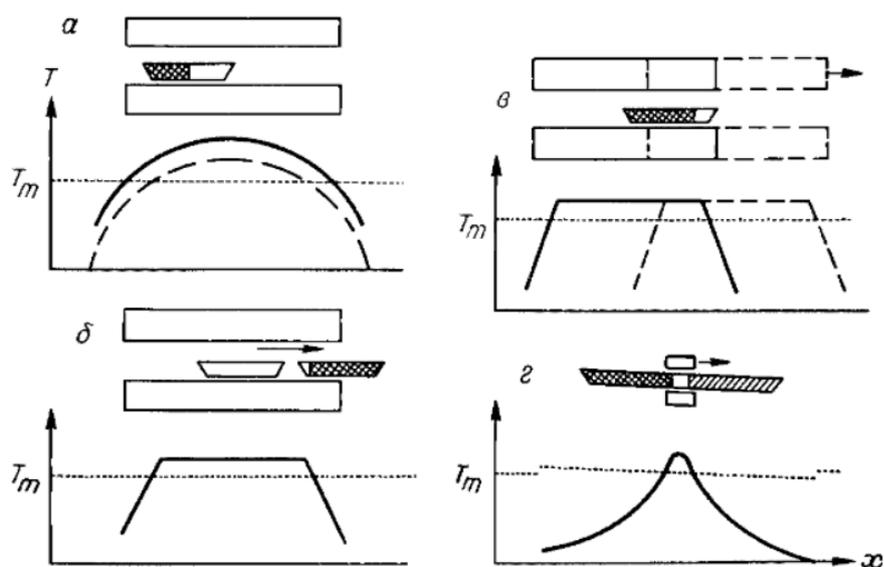


Рис. 6.1 Установки для выращивания кристаллов в тиглях и Т-кривые

а – уменьшение T при неподвижном тигле; б – перемещение тигля; в – перемещение печи; г – перемещение кольцевой печи.

Во всех названных вариантах тигельного выращивания возможно и осуществляется задание определенной ориентировки затравки. Однако при этом технологические издержки повышаются значительно, так как затравка не должна полностью расплавиться, но, с другой стороны, необходимо совершенно расплавить исходный материал. Так как при тигельных методах стремятся к наиболее простой технологии, то по большей части удовлетворяются спонтанным зародышеобразованием с последующим отбором зародышей.

На рис. 6.2 показан ряд таких устройств.

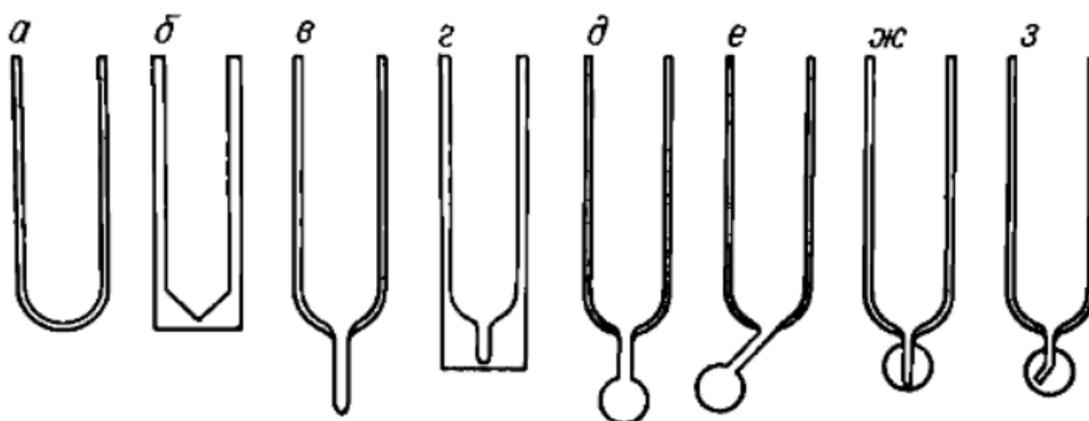


Рис. 6.2 Формы тиглей для отбора зародышей. а – дно тигля закруглено; б – дно острое (для некоторых веществ существенен угол конуса); в – дно тигля оттянуто в капилляр; г – капилляр или углубление небольшого диаметра, просверленное в дне тигля (в противоположность в дает однородные термические условия); д – отбор зародыша посредством сужения поперечного сечения для кристаллов; е – отбор зародышей посредством сужения поперечного сечения с ориентировкой; ж – отбор зародыша в капилляре; з – отбор в косом капилляре

В некоторых случаях известны подходящие тугоплавкие вещества, которые вследствие эпитаксии могут возбудить монокристаллический рост. При взаимодействии со стенкой тигля могут образоваться паразитические зародыши.

6.1.1 Кристаллизация свободно растущих кристаллов

С помощью относящихся сюда методов получены до сих пор лучшие кристаллы в отношении чистоты и реального строения, и поскольку вопрос стоит о выращивании из расплава, при высоких требованиях к кристаллам эти методы предпочтительны. Конечно, свободным ростом кристаллов технологически овладеть труднее, нежели выращиванием в тигле; выращивание требует тщательного, иногда продолжительного наблюдения, больших затрат и чревато нарушениями режима. Поэтому для соответствующих способов (помимо синтеза при высоких и сверхвысоких давлениях) разработаны крупные установки и машины, которые с необходимыми периферическими приборами достигают стоимости нескольких сотен тысяч марок. Только для крайне малых скоростей роста (порядка 0,1 мм/ч) эти методы выращивания непригодны, и здесь следует отдать предпочтение тигельным методам.

6.1.2. Кристаллизация с применением тиглей

При этих методах материал расплавляется в тигле, и затем в него сверху погружается заставка, на которой идет кристаллизация. О вариантах см. в разд. 2.1.1 и 3.2.1.2. Существенны технологические различия, связанные с величиной $T_{пл}$, родом нагрева, применением вакуума или давления, диаметром кристалла и т. д. Тигельные методы конкурируют с бестигельными. Существенным недостатком тигельных методов, естественно, является интенсивное взаимодействие расплава с материалом тигля. В остальном тигельные методы обладают преимуществами. Нет нужды в предварительно сформированном материале, затраты на регулирование и подверженность нарушениям режима относительно небольшие, T - поля легче

создавать и менять, а возможные размеры кристаллов относительно мало ограничены.

6.1.3 Метод Наккена–Киропулоса

Методы, названные по именам Наккена и Киропулоса характерны тем, что затравка укрепляется на кристаллодержателе, который одновременно выполнен как холодильник, и теплообмен между держателем, затравкой и расплавом имеет существенное значение. На этом основании применяются относительно массивные затравки, обладающие хорошим тепловым контактом с кристаллодержателем. Вообще растущий кристалл вращается и обычно медленно (несколько миллиметров в час) поднимается; однако скорость роста определяется в основном охлаждением, а не медленным вытягиванием, по меньшей мере в начальной фазе. Изотермы располагаются в расплаве концентрически вокруг охлажденной затравки, погруженной в расплав. Т-градиент остается всегда относительно небольшим. Вследствие охлаждения изотерма Т плавления проходит на известном расстоянии вне кристалла, и он растет из переохлажденного расплава при образовании кристаллических граней с полиэдрическим обликом. Так как, вообще говоря, у кристалла теплопроводность лучше, чем у расплава, изотермы по мере роста кристалла постепенно смещаются в направлении от кристалла. Когда теплоотвод из-за увеличения размеров кристалла притормаживается, полиэдрический фронт роста и изотерма Т плавления сближаются до тех пор, пока последняя не достигнет углов и ребер полиэдра. При дальнейшем росте фронт кристаллизации прилегает к изотерме Т плавления, так что прежде полиэдрические тела приобретают округлые контуры. Дальше кристалл может расти только при усилении его охлаждения (вытягивание или понижение Т расплава). Как видно, рост кристаллов за все время выращивания и соответственно для различных участков кристалла происходит при различных условиях.

Недостаток этого метода состоит прежде всего в плохом сцеплении кристалла с холодильником, так как в этом месте кристалл часто трескается и затем падает в расплав. В настоящее время при промышленном выращивании кристаллов переходят

повсюду к методу Бриджмена–Стокбаргера, который позволяет использовать более простые конструкции вакуумной аппаратуры.

6.1.4 Метод Чохральского

При методе Чохральского (рис.6.3) расплав находится в тигле, в который сверху погружается затравка, и на ней происходит кристаллизация. В соответствии со скоростью роста кристалл поднимается вверх, по большей части при вращении кристалла, а иногда и тигля, так что возникает более или менее вытянутый стержнеобразный кристалл. В отличие от предыдущего раздела, скорость вытягивания играет здесь существенную роль и должна быть точно синхронизирована с кристаллизацией, так что кристаллизация всегда должна происходить в верхней части поверхности расплава или соответственно в мениске расплава, несколько поднятом с кристаллом. Это обеспечивает лучшие возможности для наблюдения и контроля кристаллизации и позволяет поддерживать во время всего цикла выращивания более или менее одинаковые условия.

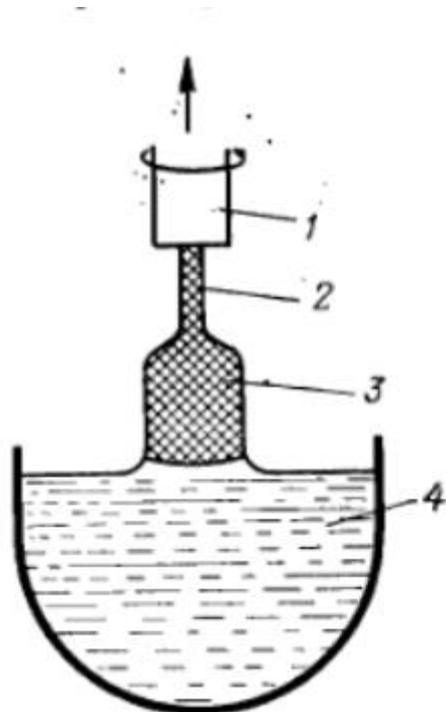


Рис. 6.3 Схема метода выращивания Чохральского.

1 – держатель затравки; 2 – затравка; 3 – растущий кристалл; 4 – тигель с расплавом

Вытягивание можно осуществлять поднятием кристалла или опусканием тигля (вместе с нагревательной системой). Следует заметить, что эффективная скорость вытягивания выше, чем задаваемая скорость, так как во время вытягивания поверхность расплава опускается.

Иногда во время вытягивания тигель медленно поднимают по отношению к нагревательной системе, так что опускание поверхности расплава компенсируется. Микроскопическая скорость роста, конечно, вследствие флюктуации различных параметров отличается от эффективной скорости вытягивания, которая представляет собой лишь среднее значение. Чтобы обеспечить рост (более или менее) цилиндрического кристаллического стержня в стационарных условиях, нужно соблюсти определенное положение фронта роста относительно мениска расплава. Форма мениска определяется равновесием между обусловленным поверхностным натяжением нормальным напряжением на поверхности мениска и гидростатическим разрежением в поднятом на h расплаве.

Также необходимо заметить, что существует зависимости между радиусом кривизны мениска в поперечном и продольном сечении и диаметром получаемого кристалла. Если фронт роста кристалла находится точно на том месте мениска, где проходит его вертикальная касательная (рис. 6.4 а), рост происходит стационарно с постоянным диаметром.

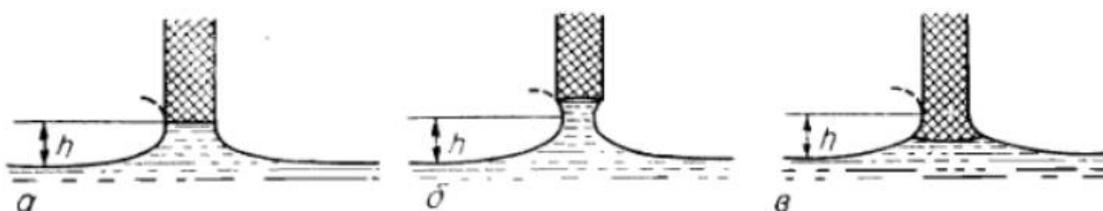


Рис. 6.4 Различные формы мениска жидкости в методе Чохральского

В практике выращивания, конечно, непосредственно устанавливается не h , а регулируется радиус кристалла во время роста посредством управления T и V вытягивания. Если фронт роста выше h , тогда диаметр кристалла уменьшается (рис.

б.4, б), если ниже h - диаметр кристалла увеличивается (рис. б.4, в). Зачастую стационарное положение у h нестабильно и требует для его удержания высоких затрат на регулирование или постоянного внимания и большого опыта оператора. Расширения кристалла достигают снижением T расплава или замедлением вытягивания, уменьшения радиуса кристалла - повышением T расплава или v вытягивания. Вследствие упомянутой нестабильности следует «поймать» желаемый диаметр кристалла подходящим регулированием и удерживать стационарное положение. При этом легко может случиться, что t расплава для стационарного роста толстого кристалла должна быть установлена выше, чем для стационарного роста тонкого кристалла; в большинстве случаев, конечно, как принято с самого начала, справедливо обратное. В течение цикла выращивания устанавливаемые регулируемые величины также могут значительно изменяться. Из-за приведенных соображений выращивание очень трудно автоматизировать. Тип фронта роста (выпуклый, плоский или вогнутый) не определяется видом мениска. Решает распределение T , которое регулируется тепловым потоком. Большое значение имеют конвекционные потоки, вследствие чего кристалл омывается расплавом различной T , теплота кристаллизации, отвод тепла вдоль кристаллического стержня и теплообмен через боковую поверхность кристалла. На конвекцию влияют вращение кристалла и тигля, на теплоту кристаллизации - v роста, на отвод тепла - T -градиент, на теплообмен через боковые поверхности - атмосфера и ее движение, далее излучение (непрозрачные и прозрачные кристаллы ведут себя по-разному), а также экраны, рефлекторы или последующие нагреватели. Проблема сложна и ее не просто обозреть. Наиболее подходит для выращивания слегка выпуклый фронт роста. В особых случаях для улучшения реальной структуры стремятся по возможности к плоскому фронту. Вогнутый фронт роста вообще неудовлетворителен.

Постоянные условия создаются, например, если выкристаллизовывающееся количество вещества в расплаве непрерывно (и с соответствующим легированием) восполняется. Можно постоянно вводить в плавильный тигель и расплавлять новый материал или постепенно расплавлять крупный слиток. В последнем варианте тигли

не нужны. Сюда относится способ выращивания «на пьедестале», в котором посредством ВЧ-нагрева расплавляют только вершину толстого стержня из кремния и затем из нее вытягивают кристалл небольшого диаметра

6.1.5 Выращивание посредством перемещения тигля или печи

Метод Бриджмена. Типичная установка для выращивания из расплава по этому методу была создана Бриджменом. Она находится в вертикальной трубчатой печи, по которой медленно опускается наполненный соответствующим материалом тигель или ампула. Максимальная T печи на 50–100 град выше $T_{пл}$ материала. В этой зоне печи ампула находится некоторое время для гомогенизации расплава, пока не начнется процесс опускания. T - градиент, необходимый для образования зародышей, создается различием расстояний до нагревательных обмоток, применением двухзонной печи или дополнительным холодильником

Метод Стокбаргера. Для выращивания по методу Стокбаргера необходим как можно более крутой T - градиент в области кристаллизации. Это достигается применением двух отдельно нагреваемых печей, между которыми часто располагается дополнительный холодильник, например теплоотводящий металлический лист. Опускание ампулы соответствует методу Бриджмена. С возрастанием диаметра тигля T - градиент в области оси кристалла выравнивается, так как здесь отдача тепла уменьшается. Поэтому в центре кристалла появляются также сильные нарушения, которые при оптически чистых наружных зонах могут дать замутненную область в центре. Помимо многочисленных, специфических для разных веществ вариантов метода Бриджмена, обусловленных высотой $T_{пл}$, сильной реакционной способностью или разложимостью, существуют еще варианты медленного перемещения печи при неподвижном тигле. Оба метода – перемещение тигля или печи – можно применять также с использованием лодочки в горизонтальной установке.

Аппаратура. Бриджмен в методе опускания искусным приемом добился роста только одного зародыша. Для этого он использовал стеклянный или кварцевый сосуд

(рис. 6.5), разделенный двумя сужениями на три связанные друг с другом емкости (А, Б и В). После того как ампула при опускании достигнет зоны, где температура несколько ниже $T_{пл}$, начинается кристаллизация. При этом хотя в В образуется несколько зародышей, но только один первым достигает сужения Д и вырастает в А. Аппаратура Бриджмена (рис. 6.6) с обособленной камерой для тигля и газовой продувкой была использована для выращивания кристаллов Au. Конструкция аппаратуры усложняется, если требуются более высокие T и атмосфера определенного газа или если требуется вырастить кристаллы сильно реакционноспособных материалов. Описана аппаратура Бриджмена с нагревательным Mo-элементом, газовой продувкой и автоматическим перемещением тигля для выращивания кристаллов металлов. Если опускание ампулы в печи с двумя независимо регулируемые нагревательными обмотками (рис. 6.7) осуществляется по принципу Стокбаргера, то T -градиент устанавливается лучше, чем при одной обмотке, и в нижней печи можно осуществить последующий отжиг при постоянной T . Вообще T в печах регулируется так, чтобы кристаллизация происходила как раз в зоне, где граничат обе печи. Чтобы достичь уверенного образования зародышей при вхождении вершины ампулы в эту зону, здесь крутизна T -градиента усиливается. Это достигается помещением между двумя печами сильно теплопроводящего листа (Cu, Pt), водяным охлаждением (проток воды через витки Cu-трубки) или помещением внутри печи листов-радиаторов (Pt) (рис. 6.8). Для выращивания фторидов разработана вакуумная аппаратура с графитовыми нагревательными элементами (рис. 6.9) и специальным держателем тигля (рис. 6.10).

Шрейбер сконструировал печь Стокбаргера с нагревателем на силитовых стержнях для выращивания галогенидов щелочных металлов. Работа содержит подробные данные по конструкции аппаратуры, по фотоэлектрическому T -регулированию и по процессу выращивания. Фториды выращивались также в атмосфере H_2F_2 , разбавленной He. Материалом нагревательных элементов служил Pt-Rh в двух параллельных обмотках. Эта аппаратура была технически усовершенствована и снабжена держателем тигля, который позволял выращивать

одновременно несколько кристаллов. Так как здесь печная камера продувается H_2F_2 , все части, которые соприкасаются с этим агрессивным газом, должны быть покрыты Ni или Сб.

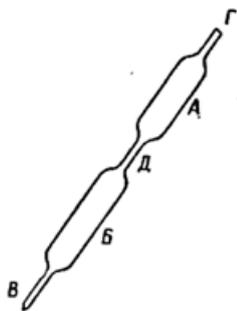


Рис. 6.5 Кристаллизационный сосуд Бриджмена.

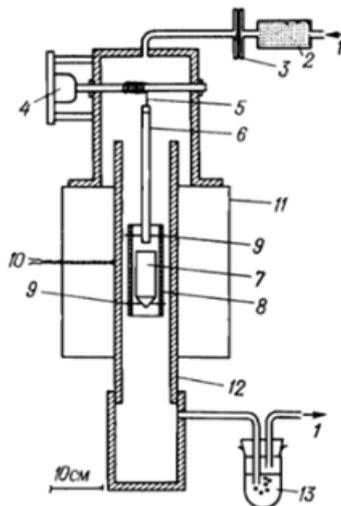


Рис. 6.6 Аппаратура для выращивания кристаллов Au по методу Бриджмена
 1-газовая продувка; 2-осушитель; 3-приспособление для измерения скорости газа; 4-мотор с регулируемой редукцией; 5-Pt-Rh проволока; 6-корундовый стержень; 7-тигель; 8-корундовый сосуд; 9-корундовый штифт; 10-термоэлемент; 11-печь; 12-газонепроницаемая корундовая трубка; 13-счетчик пузырьков газа.

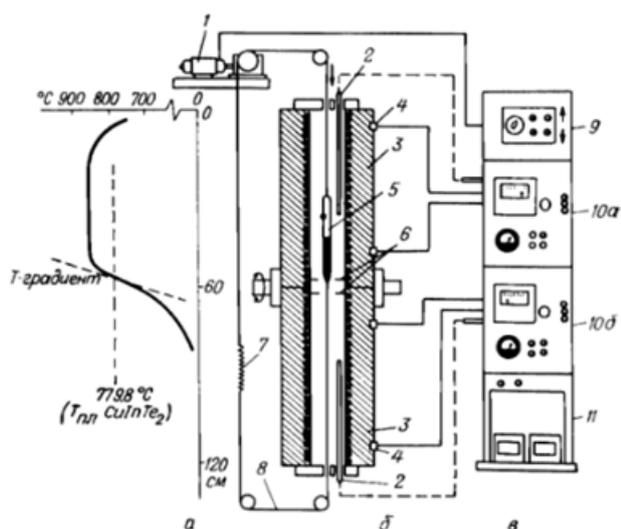


Рис. 6.7 Выращивание кристаллов по методу Стокбаргера в двухзонной печи. а - Т-профиль печи; б - двухзонная печь; в - регулируемый блок; 1 - регулируемый мотор с редуктором; 2 - термоэлементы; 3 - независимо регулируемые печи; 4 - подключение нагревательных обмоток печей; 5 - ампула; 6 - экран; 7 - пружина; 8 - проволока; 9 - регулятор для опускания ампулы; 10 - регулятор для нагрева верхней (10а) или нижней (10б) печи; 11 - стабилизатор напряжения

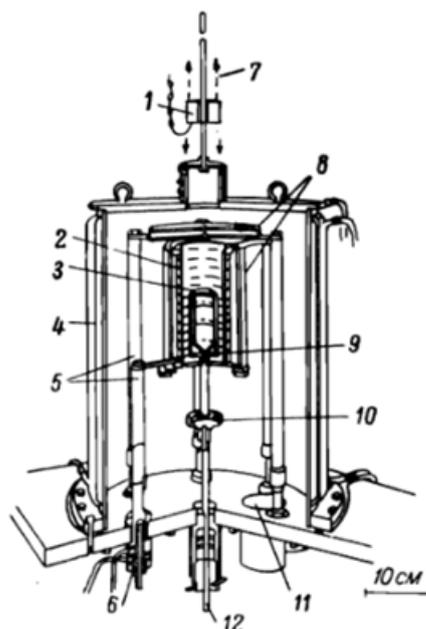


Рис. 6.8 Разрез вакуируемой печи для выращивания кристаллов флюорита

1-магнит для перемещения Wо-проволки по вертикали; 2-нагревательные элементы из графита; 3-Pt-тигель; 4-охлаждаемая водой рубашка; 5-графитовые стойки; 6-охлаждаемые водой подводы тока; 7-стеклянная трубка с делениями; 8-защита от излучения из Мо-жести; 9-держатель тигля; 10-изолированное соединение; 11-присоединение к вакуум-наосу и спуск промывного газа; 12-система рычагов для перемещения тигля.

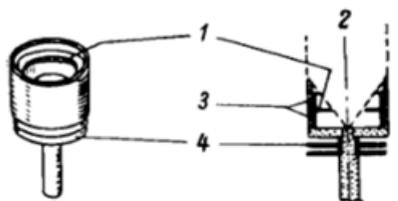


Рис.6.9 Держатель тигля из молибденовой жести.

1-Мо-шайба; 2-тигель; 3-распорная деталь из графита; 4-Мо-жесть для отвода тепла

6.1.6 Метод выращивания кристаллов $\text{LiYF}_4:\text{Pr}^{3+}$

Согласно [4], сущность способа выращивания кристаллов заключается в том, что устройство для выращивания монокристаллов фторидов из расплава вытягиванием вниз, включает нагреватель и тигель с калиброванным отверстием, размещенным в его нижней части. Тигель является одновременно нагревателем и выполнен из графита в форме вертикально установленного полого тонкостенного цилиндра, оснащенного в нижней части крышкой из графита с отверстием произвольной формы. Отверстие повторяет требуемое сечение выращиваемого кристалла, при этом поперечное сечение отверстия в крышке не превышает 1,5 мм, его длина составляет 0,1-1,0 мм, крышка выполнена съемной с обеспечением возможности неоднократного монтажа-демонтажа. Тигель-нагреватель снабжен электрическими подводами, выполненными из графита.

Нагрев шихты осуществляют посредством графитового тигля-нагревателя, выполненного из графита, который практически не смачивается расплавами фторидов, а форма вытягиваемых кристаллов повторяет форму отверстия в дне тигля-нагревателя. Графит выдерживает нагрев до температур, необходимых для выращивания кристаллов фторидов (1500°C), обладает низкой химической реакционной способностью, а также легко обрабатывается. Кроме того, стоимость графита много ниже стоимости платины, которая используется в аналогах.

Для процесса нагрева используется либо постоянный ток, либо переменный ток низкой частоты (50–60 Гц). Напряжение на нагревателе составляет единицы вольт. Вокруг тигля-нагревателя располагаются температурные экраны из молибдена, т.к. молибден хорошо отражает тепловое излучение и пропускает радиоизлучение. Таким образом, экран одновременно: обеспечивает создание достаточной температуры плавления, слабо агрегирует на поверхности сторонние примеси и при малой толщине обладает достаточной прочностью.

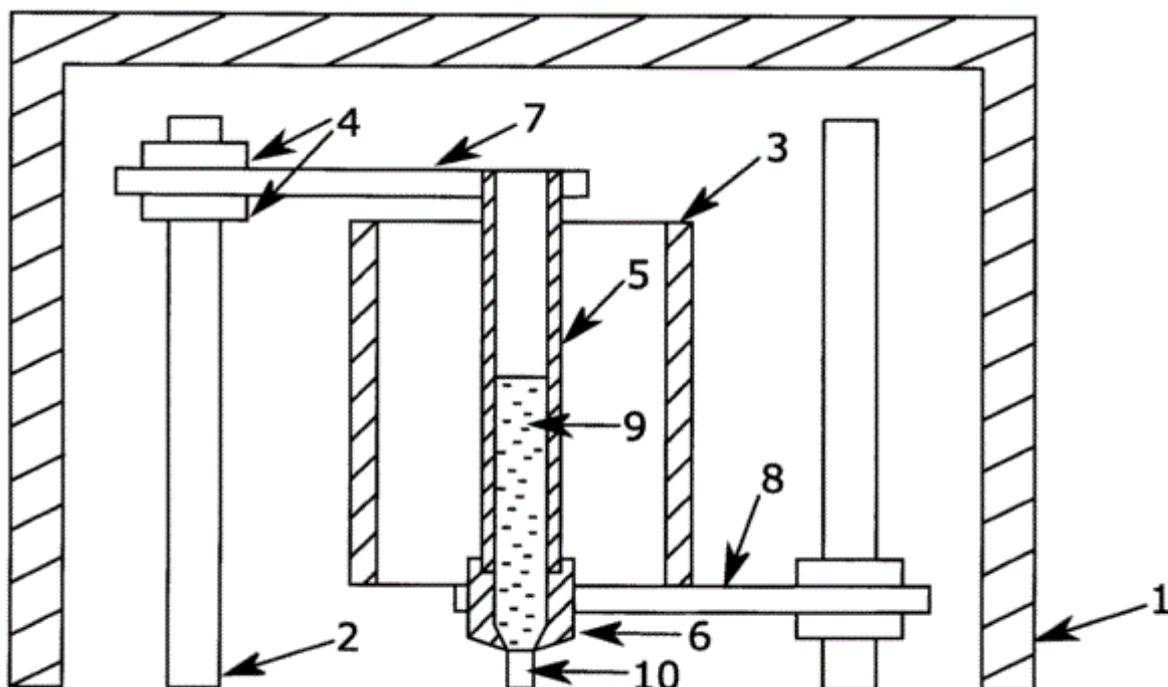


Рисунок 6.10 Устройство для выращивания кристаллов вытягиванием из расплава вниз в контролируемой атмосфере: 1 – вакуумируемая камера ростовой печи; 2 – токовводы; 3 – экраны нагревателя; 4 – гайки крепления электрических подводов к токовводам; 5 – графитовый полый цилиндр тигля-нагревателя; 6 – графитовая крышка с отверстием; 7, 8 – электрические подводы тигля-нагревателя; 9 – расплав; 10 – выращенный кристалл.

6.2 Постановка задачи исследования

Задачей исследования является получение кристалла LiYF_4 , легированного Pr на вышеописанной вакуумной ростовой установке Редмет – 8 (см. раздел 1). Диаметр кристалла должен быть не менее 1 мм, длина не менее 20 см.

Также кристалл должен обладать необходимыми свойствами, предъявляемыми заказчиком.

6.3 Методики исследования

6.3.1 Подготовка исходного материала

Поскольку на данный момент на Российском рынке доступен только YF₃ марки не чище чем хч, то исходное сырье нуждается в предварительной очистке.

Фторид иттрия марки хчв количестве 300г предварительно был отожжён в вакуумной печи при температуре 700°C при разряжении до 10⁻³ Па в течение 5 часов с использованием азотной ловушки. Разряжение обеспечивается насосом НВР-5Д. После отжига масса образца составила 282 г, таким образом, количество примесей во фториде иттрия составляет 6%.

После отжига остается необходимость в более тонкой очистке. Для этого отожженный фторид иттрия помещается в графитовый тигель и далее в камеру ростовой установки.

Перегонка происходит при разряжении 10⁻⁴ Па. Перегонка происходит при температуре 1350°C в течение 7-ми часов. Схема перегонки приведена на рис. 6.11.

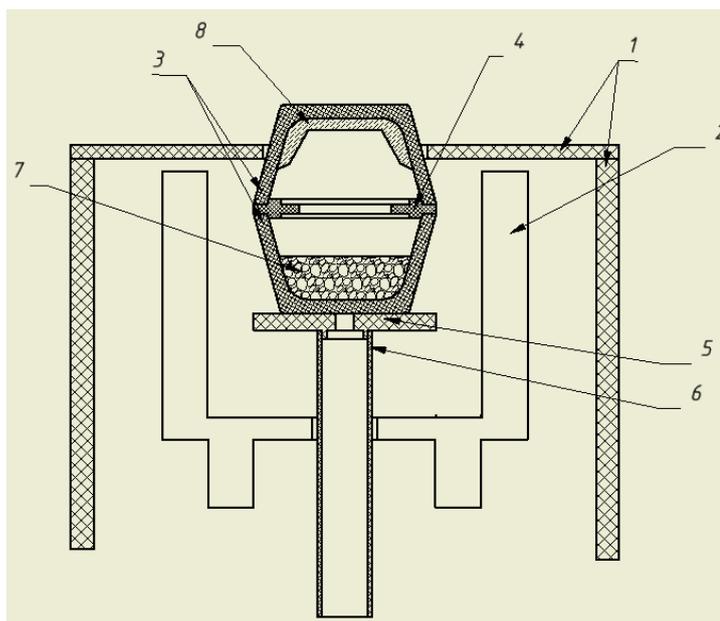


Рисунок 6.11 Схема перегонки фторида иттрия.

1 – графитовые экраны; 2 – графитовый нагреватель; 3 – тигли из стеклоуглерода; 4 – перегородка; 5 – подставка для тигля; 6 – держатель подставки; 7 – расплав YF₃; 8 – конденсат YF₃

Также в ходе исследования было выявлено, что при установке мембраны из графитовой ткани перегонка проходит более эффективно.

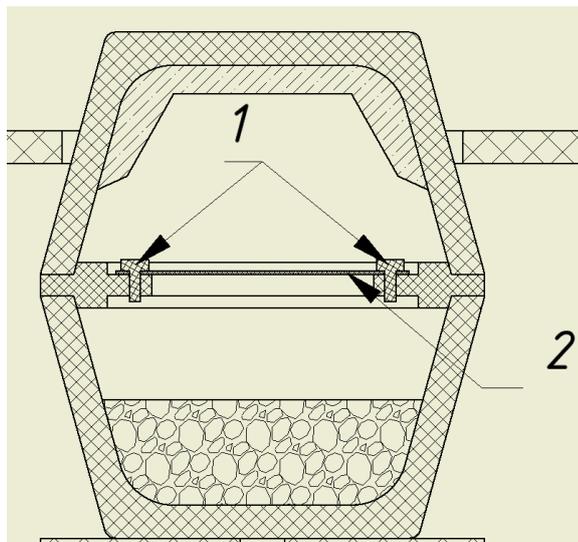


Рисунок 6.12 Тигель с установленной мембраной

1 – графитовые оси, 2 – мембрана из графитовой ткани

6.3.2 Выращивание кристаллов

Выращивание монокристалла $\text{LiYF}_4:\text{Pr}^{3+}$. В тигель (рис. 6.13), установленный внутри камеры ростовой печи, засыпают порошки фторидов высокой чистоты LiF , YF_3 и PrF_3 9, проводят вакуумирование камеры ростовой печи до разряжения ниже 10^{-4} мм рт. ст., в камеру напускают газовую смесь CF_4+Ar , в соотношении 3:7, нагреватель разогревают до температуры выше температуры плавления шихты на 10°C , температуру поддерживают на протяжении всего процесса роста кристалла. Кристалл вытягивают методом Чохральского из расплава со скоростью около 20 мм/час. Данная оптимальная скорость, индивидуальная для каждого состава кристалла и зависящая от его теплофизических свойств, была выбрана эмпирическим путем, т.к. при уменьшении скорости увеличивается время процесса роста кристалла, а при увеличении скорости – снижается качество выращенного кристалла.

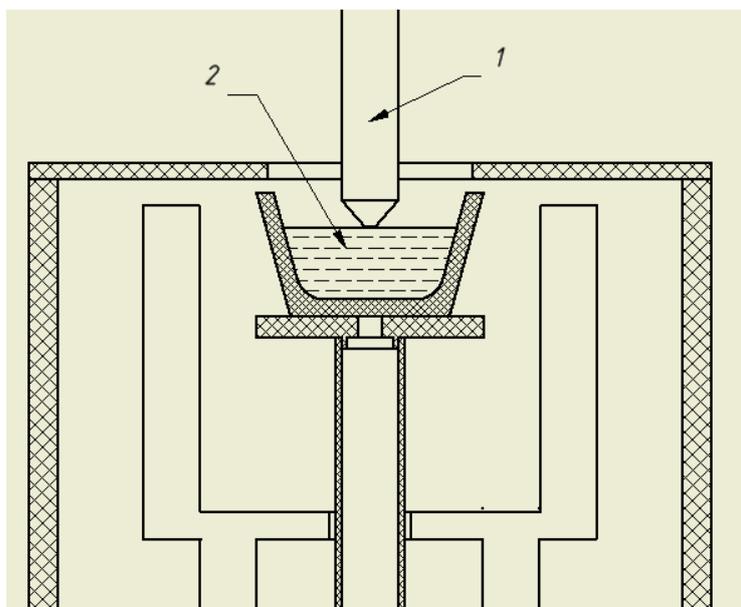


Рисунок 6.13 Схема выращивания кристалла LiYF₄.

1 – затравка, 2 – расплав LiYF₄

6.4 Результаты исследования

В результате научных исследований был выращен монокристалл LiYF₄:Pr³⁺, длиной 28 мм, диаметром 1,2 мм (рис. 6.14).



Рисунок 6.14 Фотография выращенного кристалла LiYF₄:Pr³⁺ круглого сечения диаметром 1,2 мм, длиной 28,0 мм на фоне линейки с ценой деления 1,0 мм;

Характеристики полученных кристаллов LiYF₄:Pr³⁺ представлены в табл. 6.1–6.3.

Таблица 6.1 Оптические свойства кристаллов

Параметр	Значения
Диапазон прозрачности	180-6700 нм
Сечение стимулированного излучения	1.8×10 ⁻¹⁹ /см ² (E c) при 1047 нм 1.2×10 ⁻¹⁹ /см ² (E⊥c) при 1053 нм
Время жизни флуоресценции	485 мкс для 1% Pr легирующего
Потери на рассеяние	<0.2%/см

Коэффициент поглощения (для 1.2% Pr)	$\alpha = 10.8 \text{ см}^{-1}$ (792.0 нмE c) $\alpha = 3.59 \text{ см}^{-1}$ (797.0 нмE⊥c)
Длина волны лазера	1047 нм (c, a-сечение) 1053 нм (⊥c, a или c-сечение)

Таблица 6.2 Физические свойства кристалла

Параметр	Значения
Химическая формула	$\text{LiYF}_4:\text{Pr}^{3+}$
Пространственная группа	$I4_1/a$
Pr атомов/см ³	1.40×10^{20} атомов/см ³ для 1% легирующего Pr
Модуль Юнга	85 ГПа
Структура кристалла	Тетрагональная
Параметры элементарной ячейки	$a=5.16 \text{ \AA}$, $c=10.85 \text{ \AA}$
Температура плавления	819°C
Твёрдость по шкале Мооса	4~5
Плотность	3.99 г/см ³
Теплопроводность	0.063 Вт/см/К
Удельная теплоемкость	0.79 Дж/г/К
Коэффициенты теплового расширения	$8.3 \times 10^{-6}/\text{K}$ c $13.3 \times 10^{-6}/\text{K}$ ⊥c

Таблица 6.3 Показатель преломления кристаллов

Длина волны (нм)	n_o	n_e
262	1.485	1.511
350	1.473	1.491
525	1.456	1.479
1050	1.448	1.470
2065	1.442	1.464

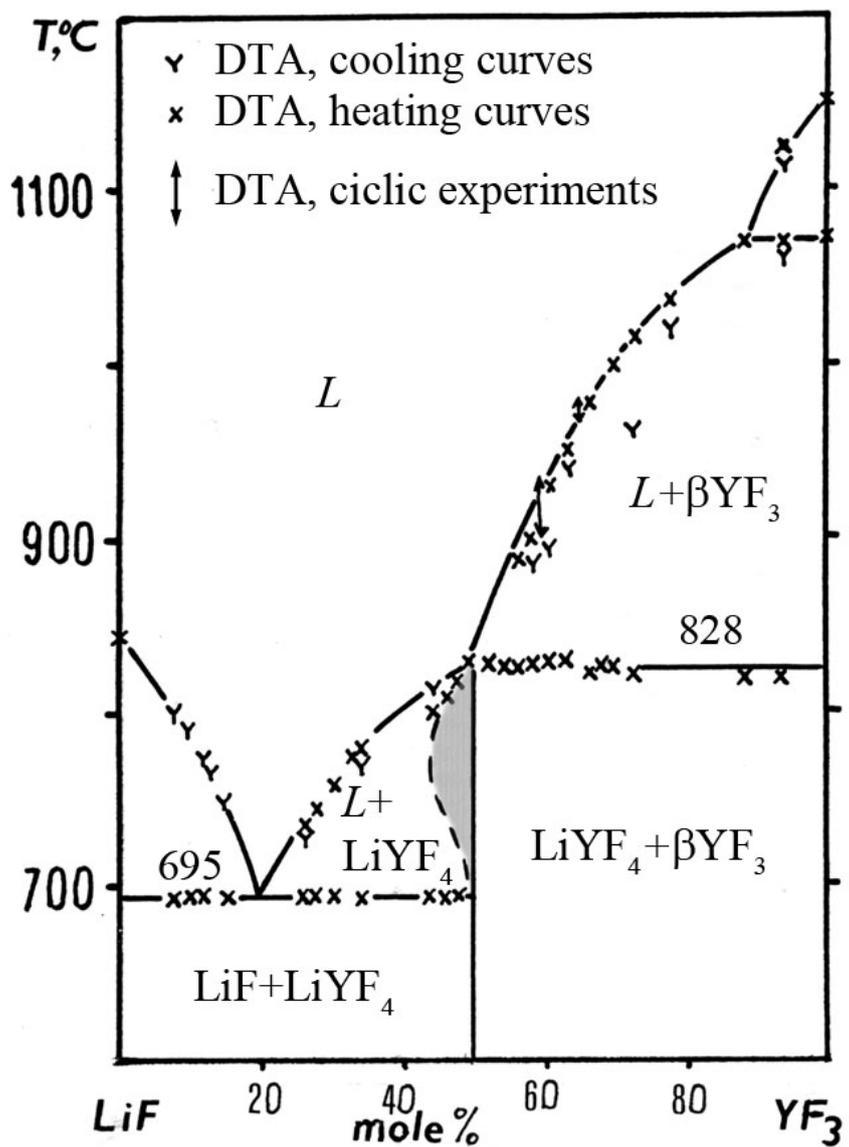


Рисунок 6.15 Фазовая диаграмма флуктуация типа фазового превращения в системе LiF-YF₃.

Выводы

Кристаллы фторидов обладают некоторыми преимуществами по сравнению с кристаллами оксидов. Более коротковолновая, чем у оксидов, граница собственного поглощения позволяет использовать фториды как матрицы для создания лазеров, работающих в УФ-диапазоне. Активаторами для УФ лазеров служат редкоземельные (Re^{3+}) ионы в основном Pr^{3+} .

Преимущества фторидов проявляются только в монокристаллах высокого качества, не содержащих фоновых примесей. В присутствии примесей появляются дополнительные полосы поглощения, и край собственного поглощения смещается к длинным волнам.

Следует подчеркнуть, что существенную роль играет разница скоростей при росте кристалла, так как при меньшей разнице в кристалле происходит выпадение второй фазы, которая имеет место по всей длине выращенного кристалла. Правильный выбор избытка фторида лития и разница скоростей дают возможность вырастить кристаллы $LiYF_4$, активированные ионами Pr^{3+} до 1 ат. % с высокой однородностью.

Устройство для выращивания кристаллов вытягиванием из расплава позволяет получить кристаллы $LiYF_4:Pr^{3+}$ круглого сечения диаметром 1,2 мм, длиной 28,0 мм с характеристиками, удовлетворяющими требованиям заказчика.

Заключение

В результате проделанной работы были подобраны оптимальные размеры для ростовой установки, такие как высота, ширина и длина камеры, байпасной линии, подобраны штуцеры.

Конструктивно - механический расчет, где была рассчитана и проверена на соответствующие условия прочность и устойчивость обечаек аппаратов, рубашек, плоских днищ, двери камеры, крепления двери камеры, расчет укрепления отверстий, была проведена проверка фланцевых соединений на прочность и герметичность, были рассчитаны болтовые соединения для крепления камеры.

По расчетам были построены чертежи "ФЮРА.ВУ.001.000 ВО", "ФЮРА.ВУ.001.001 ВО", "ФЮРА.ВУ.001.002 ВО", "ФЮРА.ВУ.002.000 ВО", "ФЮРА.ВУ.002.001 ВО", "ФЮРА.ВУ.002.001 ВО", "ФЮРА.ВУ.002.002 ВО".

СПИСОК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

Меньшова Павла

№	Наименование научного труда	Руко-писн. или печ.	Издательство, журнал (номер, год)	Номер стр.	Кол-во стр.	Фамилии соавторов
1	Drag reducing additives to oil and petroleum products	Печ.	Procedia Chemistry. – 2015 – Vol. 15.	371-377	6	Nesyn G.V Kononov K.B Vetrova O.V.
2	Ash and slag waste as secondary raw material	Печ.	Procedia Chemistry. – 2014 – Vol. 10.	184-191	7	Khlopun Y.V Nalesnik O.I
3	Anti-turbulent additives to oil and petroleum products	Печ.	Химия и химическая технология в XXI веке: материалы XVI Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых, посвященной 115-летию со дня рождения профессора Л.П. Кулёва: в 2 т., Томск, 25-29 Мая 2015. - Томск: ТПУ, 2015 - Т. 2	209-211	2	
4	Complex processing of ash and slag materials	Печ	Problems of Geology and Subsurface Development: Proceedings of the 18th International Scientific Symposium of students,	759-761	2	Khlopun Y. V

			Postgraduates and young Scientists devoted to the 115th Anniversary of Academician K.N. Satpaev and 120th Anniversary of Corresponding member of RAN of USSR F.N. Shakhov, Tomsk, April 7-11, 2014. - Tomsk: TPU Publishing House, 2014 - Vol. 2			
5	Решение проблемы обращения с золошлаками и формированию индустрии переработки и использования побочной продукции угольной энергетики	Печ	Неразрушающий контроль: сборник трудов V Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность. В 2 т, Томск, 26-30 Мая 2014. - Томск: ТПУ, 2014 - Т. 2	252-256	4	Хлупин Ю.В.

Список литературы

1. А.В. Юрьева, Расчёт вакуумных систем, Издательство Томского политехнического университета, 2012
2. [Электронный ресурс] Режим доступа: Компания«Гидромех» // www.gidromeh.ru –Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 30.05.2018)
3. ГОСТ 34233.1-2017. Нормы и методы расчета на прочность. Общие требования. М.: Изд-во стандартов, 2017. 26 с.
4. [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://normis.com.ua/2012-02-19-06-38-16> – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 30.05.2018)
5. ГОСТ 19903-2015. Прокат листовой горячекатаный. Сортамент (с Изменениями N 1-6) — М.: Изд-во стандартов, 1976. — 19 с.
6. ГОСТ 34233.3-2017. Нормы и методы расчета на прочность. Укрепление отверстий в обечайках и днищах при внутреннем и внешнем давлениях. Расчет на прочность обечаек и днищ при внешних статических нагрузках на штуцер. М.: Изд-во стандартов, 2017. 29 с.
7. ГОСТ 34233.2-2017. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет цилиндрических и конических обечаек, выпуклых и плоских днищ и крышек. М.: Изд-во стандартов, 2017.— 44 с..
8. АТК 24.218.06-90 Штуцера для сосудов и аппаратов стальных сварных. Типы, основные параметры, размеры и общие технические требования
9. Источник: https://znaytovar.ru/gost/2/АТК_242180690_SHtucera_dlya_so.html
10. ОСТ 26-291-94 Сосуды и аппараты стальные сварные. Общие технические условия
11. Лацинский А.А. Конструирование сварных химических аппаратов: Справочник. Спб.: Машиностроение. 1996. 382 с
12. Михалев М.Ф., Третьяков Н. П., Мильченко А. И., Зорбин В. В. Расчет и конструирование машин и аппаратов химических производств. М: Арис, 2010. - 312 с.
13. ГОСТ 34233.3-2017. Нормы и методы расчета на прочность. Укрепление отверстий в обечайках и днищах при внутреннем и внешнем давлениях. Расчет на

прочность обечаек и днищ при внешних статических нагрузках на штуцер. М.: Изд-во стандартов, 2008.—29 с.

14. ГОСТ 34233.4-2017 Нормы и методы расчета на прочность. Расчет на прочность и герметичность фланцевых соединений

15. 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.

16. Расчет болтовых соединений. [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.detalmach.ru/primer14.htm> Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 30.05.2018).

17. ГОСТ 380-94. Сталь углеродистая. Марки. М.: ИПК Изд-во стандартов, 1997 год, 15 с.

18. ГОСТ 7817-80. Болты. Технические условия. Конструкция и размеры: Сб. стандартов. - М.: Стандартинформ, 2006 г. - 7 с.

19. Руководящие указания по эксплуатации и ремонту сосудов и аппаратов, работающих под давлением ниже 0,07 МПа (0,7 кгс/кв. см) вакуумом) и вакуумом (РУА-93).

20. ГОСТ 34233.7— 2017 Нормы и методы расчета на прочность. Теплообменные аппараты. Москва изд-во стандартов, 2017 г. – 58 с.

21. СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.

22. ГОСТ 12.1.003-83 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Шум. Общие требования безопасности (с Изменением N 1)

23. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 "Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий" (с изменениями на 15 марта 2010 года)

24. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов.

25. ГОСТ 12.1.005-88 Система стандартов безопасности труда (ссбт). Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны [6]
26. ГОСТ 12.4.051-87 (СТ СЭВ 5803-86) Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Средства индивидуальной защиты органа слуха. Общие технические требования и методы испытаний
27. [Электронный ресурс], доступ 21.04.2019. Инструкция для пожарной безопасности в химической лаборатории. [<https://fire-declaration.ru/instrukcii/instrukciya-po-pozharnoy-bezopasnosti-dlya-laboratorii.html>]
28. Федеральный закон № 426-ФЗ от 28 декабря 2013 года «О специальной оценке условий труда»
29. Федеральный закон №184-ФЗ «о техническом регулировании от 27 декабря 2002 года.
30. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение. Методические указания. Изд-во ТПУ, 2014 г. – 73 с.
31. Патент № 2599672 [Устройство для выращивания монокристаллов фторидов и способ их получения](#)/ Морозов О.А., Наумов А.К., Ловчев А.В. – Оpubл. [10.10.2016](#). – Бюл. № [28](#).
32. Низамутдинов, А.С. Спектральные характеристики твердых растворов $LiY_{1-x}Lu_xF_4$, активированных ионами Ce^{3+} / А.С. Низамутдинов, В.В. Семашко, А.К. Наумов и др.// Физика твердого тела, 2008. – Т. 50. -- Вып. 9. – С. 1585–1588.
33. [Электронный ресурс], доступ 31.05.19. Кристаллы Nd:YLiF, Азимут ФОТОНИКС. [http://www.azimp.ru/catalogue/laser_crystals/42948/]

Приложение А

Раздел 6

Исследование методов выращивания кристаллов редкоземельных элементов из расплава
(наименование раздела)

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4КМ71	Меньшов Павел		

Консультант НОЦ Н.М. Кижнера ИШНПТ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Семакина Ольга Константиновна	К.т.н.		

Консультант – лингвист отделения иностранных языков ШБИП:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Ажель Юлия Петровна	-		

Томск - 2019

6. RARE-EARTH ELEMENT CRYSTAL GROWING METHODS RESEARCH

Modern classification of monocrystal growing methods is based on creation of optimal crystallization conditions. So conditions are the driving force of crystallization and its behavior during the time. Which determines the rate of crystal growth and the stabilization degree, the shape of the crystallization front; it is the initial feedstock, the degree and time of the melt overheating, the nature and speed of its mixing, the nature of the crystallization atmosphere, the crystal seed orientation.

A method is understood as a number of distinctive features of a crystal growing technique: the need to use a container to hold a melt, its configuration, the type of heat source, the position and direction of the crystallization front relative to the melt mirror, etc.

6.1 Growing crystals in crucibles

Growing crystals in crucibles should be understood as methods in which a crystal grows in a vessel (crucible, boat, ampoule) and, after crystallization it fills a significant part of its volume. Besides the problem of suitable material choosing, which is common for crucibles using methods, they have such disadvantage as interaction with crucible, which is adversely and effects on the quality of the crystal. Firstly, here we should mention the interaction with the crucible walls during growth and occurrence of mechanical stress due to growth temperature. The advantage of these growing methods in comparison with free-growing crystals is simpler technology and less susceptibility to defects. Various techniques have been developed to reduce the effects of adverse effects. These include placing coatings or powdered protection layers in front of the crucible wall, using a soft (flexible or ductile) crucible, removing the crystal from the crucible slightly below the melting point, followed by free cooling. However, crucible methods firstly make possible obtaining crystals of a relatively complex shape. So, for example, metal crystals for mechanical testing in many cases are growing in the form required for stretching machines, with clamping heads and a certain diameter, so that processing is not required. With regard to technology, the methods of growing from crucibles can be divided into 4 groups:

- a - the crucible remains stationary in the T-field, and crystallization is achieved by slow cooling;
- b - the crucible moves relative to the oven in the T-gradient;
- c - instead of the crucible moves oven.
- d - The melted zone moves through the crucible, by the moving corresponding oven or crucible through the oven

Different methods are sometimes combined, or in many cases after a small machine modernization, can be carried out with the same equipment.

Fig. 6.1 shows installations with horizontal crucible or boat; respectively, there are installations with a vertical crucible, which are more preferable.

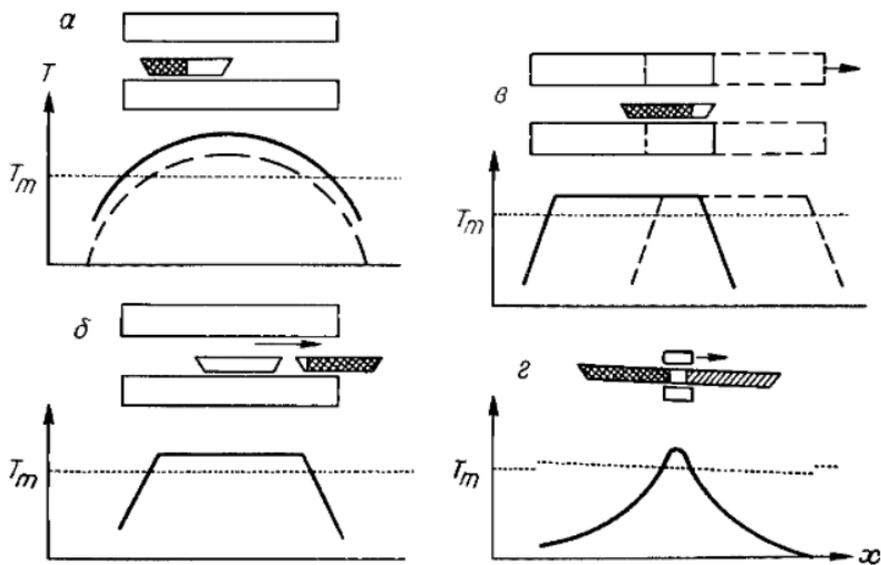


Fig. 6.1 Installations for crystal growing in crucibles and T-curves:

- a* – reducing T with fixed crucible; *b* – crucible movement;
- c* – oven movement; *d* – ring shaped oven movement.

In all the above-mentioned methods of crucible growing, it is possible to set a certain orientation of the fuse. However, the technological costs increase significantly, since the fuse should not completely melt, but on the other hand, it is necessary to completely melt the starting material. Since crucible methods tend to be the simplest technology, they are mostly satisfied with spontaneous nucleation and subsequent selection of germ.

Fig. 6.2 shows a number of such devices.

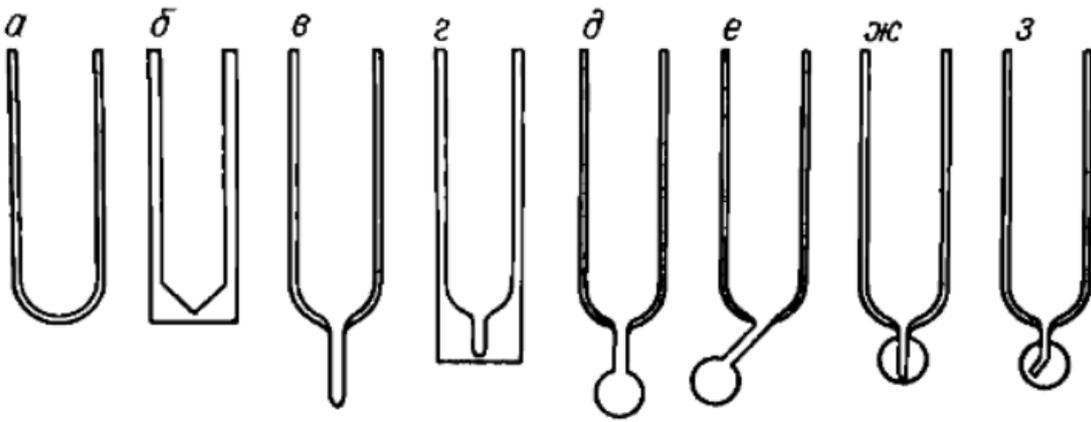


Fig. 6.2 Crucibles shapes for germ selection: *a* – crucible bottom rounded off; *б* – the bottom is sharp (for some substances the angle of the cone is significant); *в* – the bottom of the crucible drawn into the capillary; *z* – a capillary or a hollow of small diameter drilled in the bottom of the crucible; *д* - selection of the embryo by narrowing the cross section for crystals; *е* – selection of embryos by narrowing the cross-section with orientation; *жс* – selection of the embryo in the capillary; *з* – selection in the oblique capillary

In addition, there is suitable refractory substances, which, due to epitaxy, can induce single-crystal growth. When interacting with the crucible wall, parasitic embryos may form.

6.1.1 Crystallization of free-growing crystals

Via related to this methods, the best crystals with such characteristics as purity and real structure have been obtained so far, and since the question is about growing from a melt, these methods are preferable for high demands crystals. Of course, it is harder to master the free growth of crystals than growing in a crucible; cultivation requires accuracy, sometimes long-term observation, high costs and it is fraught with violations of the regime. Therefore, for the corresponding methods (except synthesis at high and ultrahigh pressures), large installations and machines have been developed, which is expensive considering necessary peripheral devices. Only for extremely low growth rates (about 0.1 mm / h) these cultivation methods are unsuitable, and here crucible methods should be preferred.

6.1.2. Crucible Crystallization

With these methods, the material is melting in a crucible, and then the fuse is immersed to melt from above. There are significant technological differences associated with T_m , the type of heating, the use of vacuum or pressure, the diameter of the crystal, etc. Crucible methods compete with the crucibles. Of course, a significant disadvantage of crucible methods is the intensive interaction of the melt with the crucible material. Besides this, crucible methods have advantages. There is no need for preformed material, the costs of regulation and susceptibility to mode violations are relatively small, T-fields are easier to create and change, and the possible sizes of crystals are relatively less limited.

6.1.3 Nakken – Kyropoulos method

The methods, named after Nakken and Kyropoulos, are characterized by the fact that the fuse is fixed on the crystal holder, which is also designed as a refrigerator, and the heat exchange between the holder, the fuse and the melt is essential. Massive primers, which have good thermal contact with the crystal holder are used based on this. In general, a growing crystal rotates and usually rises slowly (several millimeters per hour); however, the growth rate is determined mainly by cooling, rather than slow extrusion, at least in the initial phase. Isotherms are located in the melt concentrically around the cooled seed, which is immersed in the melt. The t -gradient is always relatively small. As a result of cooling, the melting isotherm T passes at a known distance outside the crystal, and it grows from a supercooled melt during the formation of crystal faces with a polyhedral appearance. Because the thermal conductivity of a crystal is better than that of a melt, the isotherms gradually shift in the direction away from the crystal as the crystal grows. When the heat sink slows down due to an increasing crystal size, the polyhedral growth front and the melting isotherm T approach each other until the latter reaches the corners and edges of the polyhedron. With further growth, the crystallization front is adjacent to the melting isotherm T , so that before polyhedral bodies acquire rounded form. Further, the crystal can grow only with cooling

boost (stretching or lowering T of the melt). As can be seen, the growth of crystals during the entire growth time and, accordingly, for different parts of the crystal occurs under different conditions.

The disadvantage of this method is primarily in the poor adhesion of the crystal to the refrigerator, since at this point the crystal often cracks and then falls into the melt. At the present time, in the case of industrial growing of crystals, the Bridgman – Stockbarger method, which allows the use of simpler vacuum equipment designs, is being used everywhere.

6.1.4 Czochralsky method

In Czochralski method (Fig. 6.3) the melt is in a crucible in which the seed is immersed from above, and there occurs crystallization. In accordance with the growth rate the crystal rises up, mostly when the crystal is rotated, and sometimes the crucible too, and then a more or less elongated rod-shaped crystal appears. Unlike the previous section, the growth rate plays a significant role and must be precisely synchronized with crystallization, so crystallization should always occur in the upper part of the melt surface or in the meniscus of the melt a bit raised with the crystal. This provides the best opportunities for observing and controlling crystallization and allows you to maintain more or less the same conditions during the entire growing cycle.

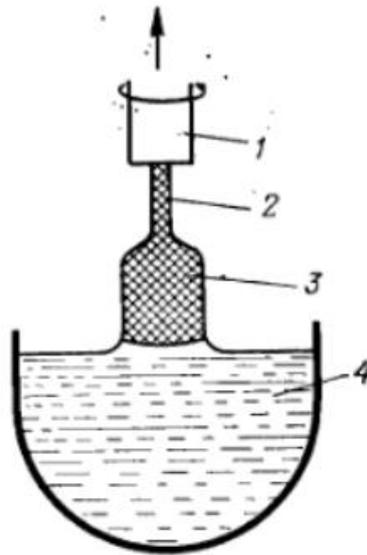


Fig. 6.3 Diagram of the Czochralski growth method:

- 1 - the holder of the fuse; 2 - fuse;
- 3 - growing crystal; 4 - crucible with melt

Pulling can be done by raising the crystal or lowering the crucible (together with the heating system). It should be noted that the effective rate of growth is higher than the defined speed, since during the growth the surface of the melt is getting low.

Sometimes during the growing process the crucible is slowly raised in relation to the heating system, so surface of the melt lowering is compensated. The microscopic growth rate due to the fluctuations of various parameters differs from the effective pull rate, which is only an average value. In order to ensure the growth (more or less) of a cylindrical crystalline rod in stationary conditions, it is necessary to observe a certain position of the growth front relative to the melt meniscus. The shape of the meniscus is determined by the equilibrium between the normal surface tension caused by the surface tension of the meniscus and the hydrostatic depression in the melt raised by h .

It also should be noted that there is a relationship between the radius of curvature of the meniscus in the transverse and longitudinal section and the diameter of the resulting crystal. If the crystal growth front is located exactly on the place of the meniscus where its vertical tangent passes (Fig. 6.4, a), the growth occurs stationary with a constant diameter.

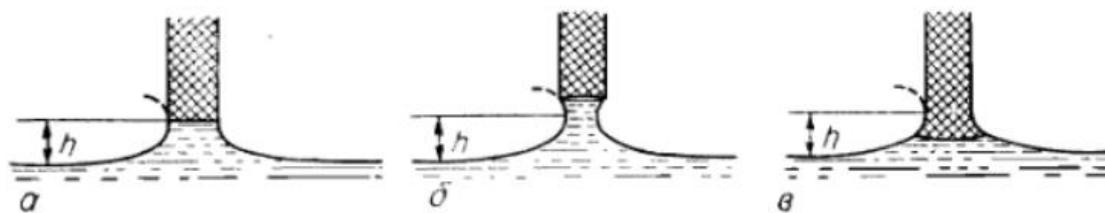


Fig. 6.4 Different forms of fluid meniscus in the Czochralski method

In the practice of growing setting not the h but regulating radius of crystal during the growth, by controlling the T and V of growing. If the growth front is higher than h , then the diameter of the crystal decreases (Fig. 6.4, b), if below h - the diameter of the crystal increases (Fig. 6.4, c). Often the stationary position of h is unstable and requires high regulation costs or constant attention and extensive operator experience for h retention. The crystal extension is achieved by reducing the temperature of the melt or slowing the growing; reducing the crystal radius — by increasing the temperature of the melt or volume of stretching. Because of this instability, the desired crystal diameter should be “caught” with suitable regulation and should be maintained at a steady state. During the growing cycle, the adjustable variables that can be set can also significantly change. Because of these considerations, cultivation is very difficult to automate. The type of growth front (convex, flat or concave) is not determined by the type of meniscus. Mostly, it is defined by the distribution of T , which is regulated by heat flow. Great importance have convection currents, as a result of this the crystal is washed by a melt of various T , the heat of crystallization, heat removal along the crystal rod and heat transfer through the lateral surface of the crystal. The convection is influenced by the rotation of the crystal and the crucible, on the solidification rate - v of the growth, on the heat transfer is T -gradient, on the heat exchange through side surfaces is the atmosphere and its movement, then radiation (opaque and transparent crystals behave differently), also screens, reflectors or subsequent heaters. The problem is complex and it's not easy to review it. Most suitable for growing slightly convex growth front. In special cases, in order to improve the real structure,

specialists are tending to a flat front whenever possible. The concave growth front is generally unsatisfactory.

Constant conditions are created if the crystallizing amount of the substance in the melt is continuously (and with appropriate doping) replenished. It is possible to constantly enter the melting crucible and melt a new material or gradually melt a large ingot. In the latter version, crucibles are not needed. This includes the method of growing “on a pedestal”, in which, by means of HF heating, only the top of a thick silicon rod is melted and then a small-diameter crystal is pulled out of it.

6.1.5 Method of growing LiYF₄ crystals: Pr³⁺ +

According to [2], the essence of the growing crystals method is that the device for growing single crystals of fluoride from the melt by pulling downwards includes a heater and a crucible with a calibrated hole placed on the bottom. The crucible is at the same time a heater and is made of graphite in the form of a vertically installed hollow thin-walled cylinder, equipped at the bottom with a graphite lid with an opening of arbitrary shape. The hole repeats the desired cross-section of the crystal being grown, the cross-section of the hole in the lid does not exceed 1.5 mm, its length is 0.1-1.0 mm, and the lid is made removable with the possibility of repeated assembly-disassembly. The crucible-heater is equipped with electrical supplies made of graphite.

The mixture is heated by means of a graphite crucible-heater made of graphite, which is practically not wetted by fluoride melts, and the shape of the extruded crystals follows the shape of the hole in the bottom of the crucible-heater. Graphite can withstand heating to temperatures necessary for growing fluoride crystals (1500 ° C), has a low chemical reactivity, and is also easily processed. In addition, the cost of graphite is much lower than the cost of platinum, which is used in analogues.

For the heating process, either direct current or alternating current of low frequency (50–60 Hz) is used. The voltage on the heater is a few volts. Around the crucible heater are temperature screens made of molybdenum, because molybdenum well reflects thermal radiation and transmits radio emission. Thus, the screen at the same time: ensures the

creation of a sufficient melting point, weakly aggregates third-party impurities on the surface, and with a small thickness has sufficient strength.

Growing a single crystal $\text{LiYF}_4:\text{Pr}^{3+}$. In the crucible-heater 5 (fig. 6.5), installed inside the chamber of the growth oven 1, powders of high-purity LiF , YF_3 and PrF_3 9 are poured, next, oven become vacuuming to a vacuum below 10–4 mm Hg. Then camera filled with the gas mixture of $\text{CF}_4 + \text{Ar}$, in the ratio 3: 7, the heater is heated to a temperature above the melting point of the charge by 10 ° C, the temperature is maintained throughout the process of crystal growth. Crystal 10 is pulled by the micro-pulling-down method from a melt 9 at a speed of about 20 mm / hour. This optimal speed, individual for each crystal composition and depending on its thermophysical properties, and it was chosen empirically, since as the speed decreases, the growth time of the crystal increases, and as the speed increases, the quality of the grown crystal decreases.

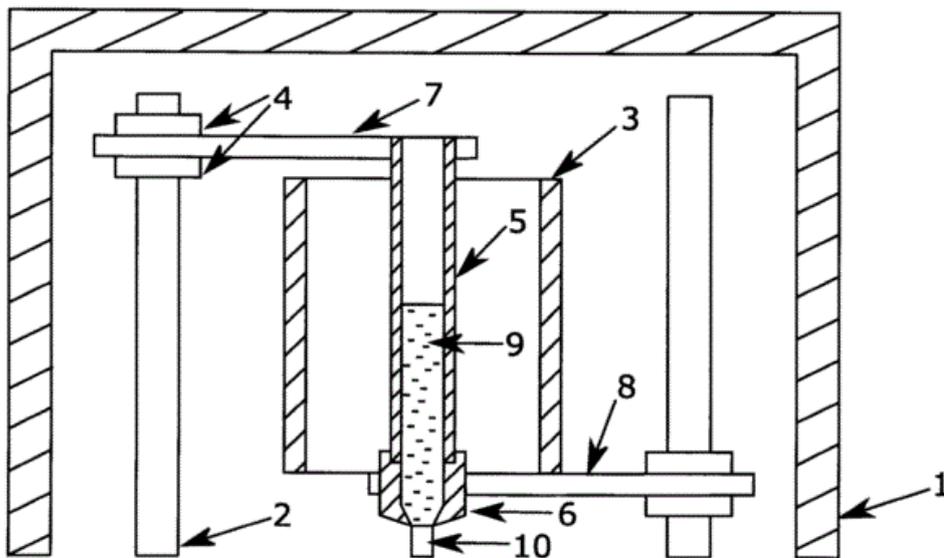


Figure 6.5. Device for growing crystals by pulling down from the melt in a controlled atmosphere: 1 — vacuumized chamber of the growth oven; 2 - current leads; 3 - heater screens; 4 - nuts fastening electrical leads to the current leads; 5 - graphite hollow cylinder of the crucible-heater; 6 - graphite cap with a hole; 7, 8 - electric supply crucible heater; 9 - melt; 10 - grown crystal

6.2 Growing by moving the crucible or furnace

Bridgman method. Bridgman created a typical installation for melt growing by this method. Crucible or ampoule filled with appropriate material a is slowly lowered through

vertical tube furnace. The maximum T of the furnace is 50–100 degrees higher than the T_{pl} of the material. In this zone of the furnace, the ampoule is located for some time to homogenize the melt, until the process of lowering begins. T - gradient required for the formation of nuclei, is created by the difference in the distances to the heating windings, the use of a two-zone furnace or an additional refrigerator.

Stockbarger method. For growing according to the Stockbarger method, it is necessary to have the steeper T -gradient in the crystallization region. It can be achieved by using two separately heated furnaces, with an additional refrigerator located between, for example, a heat-removing metal sheet. The lowering of the ampoule corresponds to the Bridgman method. With an increase in the diameter of the crucible, the T -gradient in the crystal axis region evens out, since here the heat transfer decreases. Therefore, strong disturbances also appear in the center of the crystal, which, with optically pure outer zones, can give a turbid area in the center. In addition to numerous variants of the Bridgman method, which are specific for different substances, which are determined by the height T_{pl} , strong reactivity or decomposability, there are also variants of the oven moving slowly with a fixed crucible. Both methods are about moving the crucible or the furnace can be applied using a boat in a horizontal installation.

Equipment. In the lowering method, Bridgman achieved the growth of only one embryo. He used a glass or quartz vessel for this (Fig. 6.6), which was divided by two constrictions into three interconnected vessels (A, B, and C). After the ampoule, while lowering, reaches a zone where the temperature is slightly below T_m , crystallization begins. In this case, although several embryos form in B, only one reaches the narrowing D first and grows into A. The Bridgman equipment (Fig. 6.7) with a separate crucible chamber and gas blowing was used to grow Au crystals. The design of the equipment is complicated if there are needs in higher T and the atmosphere of a certain gas or if there is requirement to grow crystals of highly reactive materials. The Bridgman apparatus was described with a heating element of Mo, gas purge and automatic crucible movement for growing Me crystals. . If the ampoule is lowered in the oven with two independently controlled heating windings (Fig. 6.8) by the Stockbarger principle, then the T -gradient is setting better than with one

winding, and in the lower oven becomes possible to perform subsequent annealing at a constant T. In general, T in furnaces is regulated so the crystallization takes place just in the both ovens border zone. In order to achieve a confident formation of embryos when the top of the ampoule enters target zone, the steepness of the T-gradient increases. This is achieved by placing a strongly heat-conducting sheet (Cu, Pt) between two furnaces, water-cooling (water flow through the turns of the Cu-tube) or by placing radiator sheets (Pt) inside the furnace (Fig. 6.9). Vacuum apparatus with graphite heating elements (fig. 6.9) and a special crucible holder fig. 6.10).

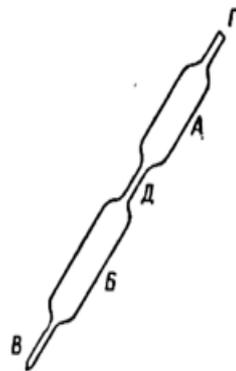


Fig. 6.6 Brigman crystallization vessel

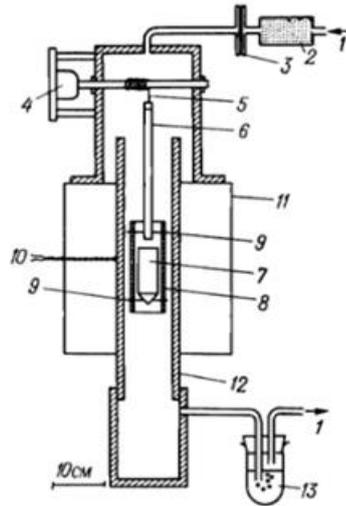


Fig. 6.7 Apparatus for growing Au crystals by Bridgman method

1-gas purge; 2-dryer; 3-device for measuring the gas velocity; 4-motor with adjustable reduction; 5-Pt-Rh wire; 6 corundum rod; 7 - crucible; 8 - corundum vessel; 9 corundum pin; 10 thermoelement; 11-oven; 12-gas tight corundum tube; 13 - gas bubble counter

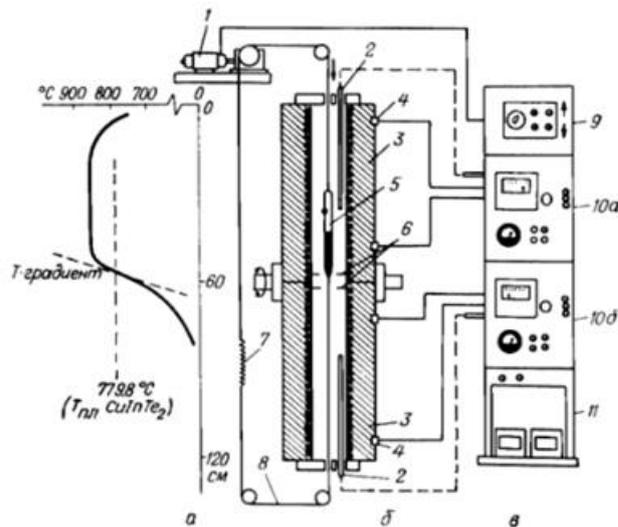


Fig. 6.8 Growing crystals according to the Stockbarger method in a two-zone furnace.
 a - T-profile of the furnace; б-dual-zone furnace; в-adjustable unit; 1-adjustable motor with gear; 2 thermoelements; 3-independent adjustable ovens; 4-connection of heated windings of furnaces; 5-ampoule; 6-screen; 7-spring; 8 wire; 9-regulator; 10-regulator for heating the upper (10a) or lower (10b) furnace; 11 - voltage regulator

Schreiber designed the Stockbarger furnace with a heater on silicon rods for growing alkali metal halides. The work contains detailed data about designing of the equipment, about photoelectric T-regulation and about process of growing. Fluorides were also grown in a H_2F_2 atmosphere, diluted with He. The material of the heating elements was Pt-Rh in two parallel windings. This equipment was technically improved and equipped with a crucible holder, which made possible to grow several crystals simultaneously. Since here the furnace chamber is being flushed with H_2F_2 , all parts that come into contact with this aggressive gas must be coated with Ni or Cb.

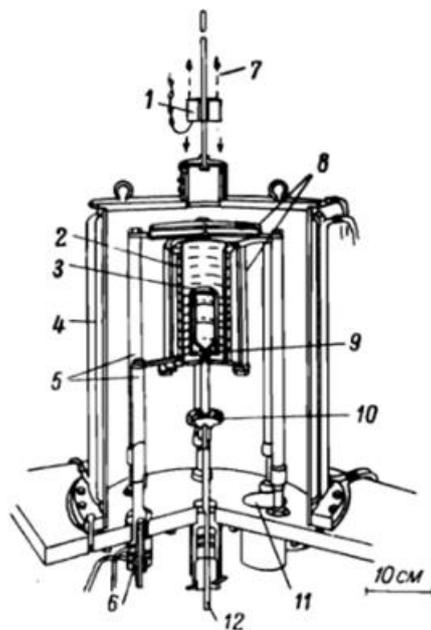


Fig. 6.9 Section of the vacuumized furnace for growing fluorite crystals

1-magnet for the Wo-wire vertical movement; 2-graphite heating elements; 3-Pt crucible; 4-water-cooled shirt; 5-graphite racks; 6-water cooled power supply; 7-glass graduation tube; 8-protection against radiation are made from Mo tin; 9-crucible holder; 10-isolated compound; 11-accession to the vacuum pump and the descent of the wash gas; 12-system levers for crucible movement

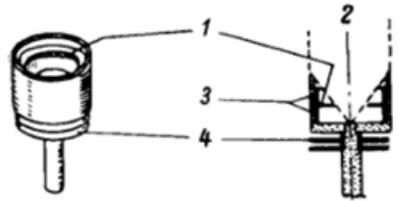


Fig.6.10 Holder of the crucible of Mo-tin.

1-Mo-washer; 2-crucible; 3- graphite spacer; 4-tin for heat dissipation

6.3 Setting a research task

The objective of the study is to obtaining a LiYF₄ crystal doped with Pr on the Redmet – 8 vacuum growth unit described above (Section 1). The diameter of the crystal must be at least 1 mm, length at least 20 cm.

In addition, the crystal must have the necessary properties shown by the customer.

6.4 Research Methods

6.4.1 Source material preparation

Because at the moment on the Russian market there is only YF₃ grades are no cleaner than cp, the raw materials need to be pre-cleaned.

300 g of cp grade Yttrium fluoride was previously annealed in a vacuum furnace at a temperature of 700 ° C with a discharge of up to 10⁻³ Pa for 5 hours using a nitrogen trap. Discharge is provided by the pump NVR-5D. After annealing, the sample mass was 282 g, so the amount of impurities in yttrium fluoride is 6%.

After annealing, the need for finer cleaning remains. To do this, annealed yttrium fluoride is placed in a graphite crucible and then into a growth plant.

Distillation occurs with a discharge around 10^{-4} Pa. Distillation takes place with 1350°C for 7 hours. Installation for distillation is shown in Fig. 6.11.

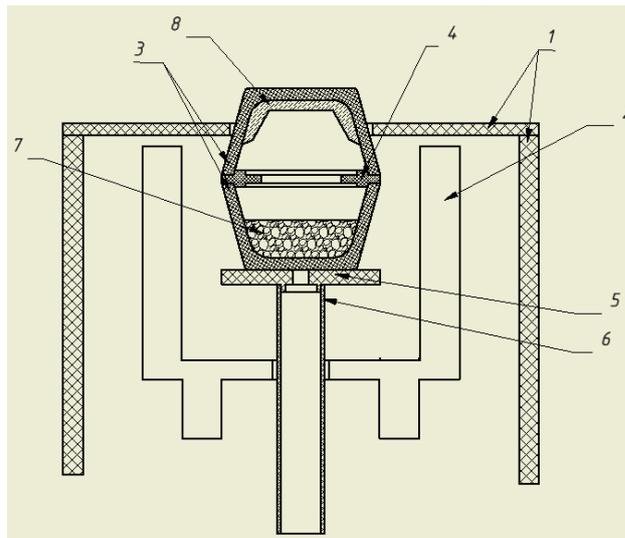


Figure 6.11 Installation for the distillation of yttrium fluoride:

1 - graphite screens; 2 - graphite heater; 3 - glass carbon crucibles; 4 - partition; 5 - crucible stand; 6 - stand holder; 7 - YF3 melt; 8 - condensed YF3

The study also revealed that installing a membrane made of graphite cloth (Fig. 6.12), made distillation more efficient.

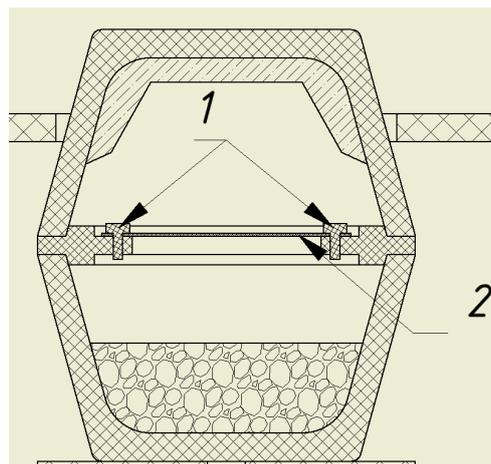
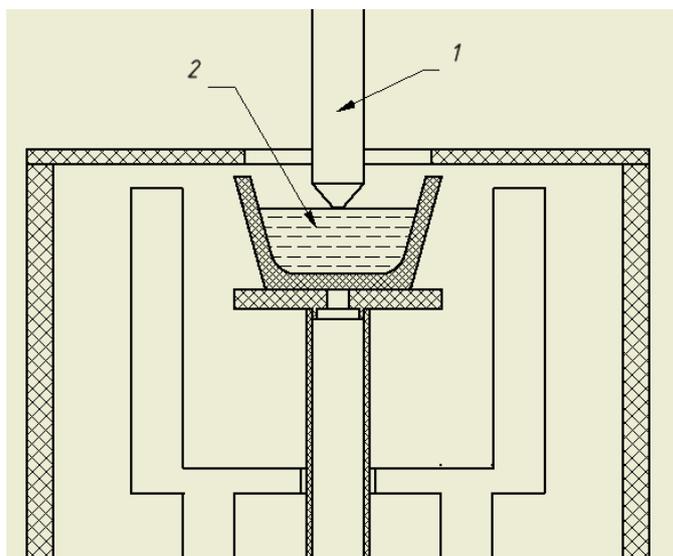


Figure 6.12 The crucible with the installed membrane

1 - graphite axes, 2 - graphite fabric membrane

6.3.2 Crystal Growing

Growing a single crystal $\text{LiYF}_4:\text{Pr}^{3+}$. In the crucible-heater 5 (fig. 6.13), installed inside the chamber of the growth oven 1, in crucible poured powders of high-purity LiF , YF_3 and PrF_3 , next, oven become vacuuming to a vacuum below 10^{-4} Pa. Then camera filled with the gas mixture of $\text{CF}_4 + \text{Ar}$, in the ratio 3: 7, the heater is heated to a temperature above the melting point of the charge by 10°C , the temperature is maintained throughout the process of crystal growth. Crystal is pulled by the Czochralski method from a melt with



a speed of about 15 mm / hour. This optimal speed, individual for each crystal composition and depending on its thermophysical properties.

Fig. 6.13 Growing LiYF_4 crystal scheme LiYF_4 : 1 – затравка, 2 – расплав LiYF_4

6.4 Research results

In result single crystal of $\text{LiYF}_4:\text{Pr}^{3+}$ was obtained. Crystal has 28 mm length and diameter around 1.2 mm (Fig. 6.14).



Fig 6.14 Picture of LiYF_4 crystal, cylindrical shape,

with a 1.2 mm in a diameter, 28.0 mm length, on the background of a ruler with a value of division 1.0 mm

Characteristics of the obtained LiYF₄: Pr³⁺ + crystals are presented in Table. 6.1–6.3.

Table 6.1 Optical properties of crystals

Parameter	Values
Tranparency range	180-6700 nm
The cross section of stimulated emission	1.8×10 ⁻¹⁹ /cm ² (E∥c) at 1047 nm 1.2×10 ⁻¹⁹ /cm ² (E⊥c) при 1053 nm
Fluorescence lifetime	485 mcs for 1% Pr doped
Scatter loss	<0.2%/cm
Absorption coefficient (for 1.2 % Pr)	α= 10.8 cm ⁻¹ (792.0 nmE∥c) α= 3.59 cm ⁻¹ (797.0 nmE⊥c)
Laser wavelength	1047 nm (∥c, a-section) 1053 nm (⊥c, a or c-section)

Table 6.2 Physical properties of the crystal

Parameter	Value
Chemical formula	LiYF ₄ :Pr ³⁺
Space group	I4 ₁ /a
Pr atoms/cm ³	1.40 x 10 ²⁰ atoms/cm ³ for 1% doping Pr
Young's modulus	85 GPa
Crystal structure	tetragonal
The unit cell parameters	a=5.16 Å, c=10.85 Å
Melting point	819°C
Mohs hardness	4~5
Density	3.99 g/cm ³
Thermal conductivity	0.063 W/cm/K

Specific heat capacity	0.79 J/g/K
Thermal extension coefficients	$8.3 \times 10^{-6} / \text{k} \parallel \text{c}$ $13.3 \times 10^{-6} / \text{k} \perp \text{c}$

Table 6.3 Crystal Refractive Index

Wavelength (nm)	n_o	n_e
262	1.485	1.511
350	1.473	1.491
525	1.456	1.479
1050	1.448	1.470
2065	1.442	1.464

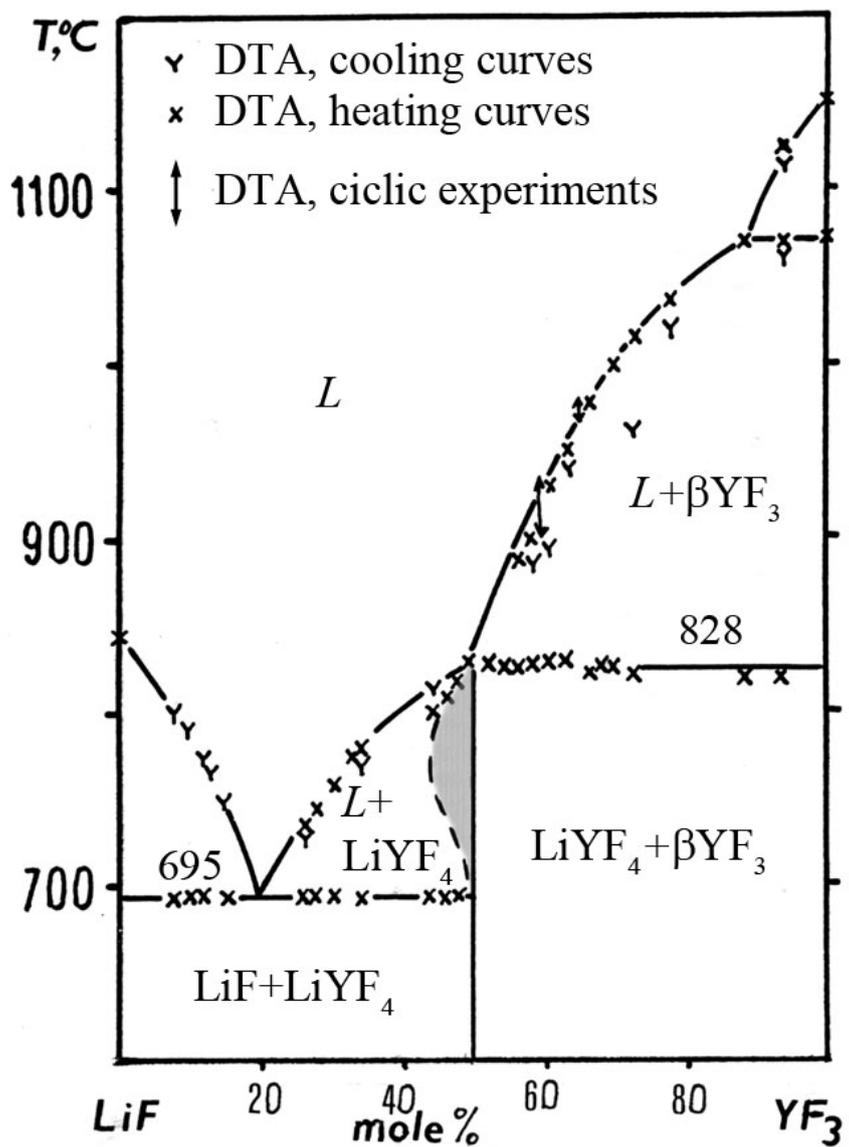


Figure 6.15 Phase diagram of fluctuation type of phase transformation in the system LiF-YF₃.

Conclusion

Fluoride crystals have several advantages over oxide crystals. A shorter wavelength than oxides, the intrinsic absorption limit allows the use of fluoride as a matrix to create lasers operating in the UV range. The activators for UV lasers are rare-earth (Re^{3+}) ions, mainly Pr^{3+} .

The advantages of fluorides are appears only in high quality single crystals that do not contain background impurities. In the presence of impurities, additional absorption bands appear, and the edge of the intrinsic absorption shifts to long waves.

It should be under colored that there is a significant role in difference in velocities during crystal growth, because with a smaller difference in a crystal, a second phase occurs, which occurs along the entire length of the grown crystal. The correct choice of an excess of lithium fluoride and the difference in velocities make it possible to grow LiYF_4 crystals activated by Pr^{3+} ions to 1 at. % with low anisotropy.

A device for growing crystals by melt pulling makes possible obtaining LiYF_4 : Pr^{3+} crystals of circular cross section with 1.2 mm in diameter and 28.0 mm length with necessary characteristics that customer requires.