

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

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

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Разработка технологического оборудования для получения экстракта из чаги

УДК 615.451.16:615.322

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4KM81	Нутфуллин Рустам Радифович		

Руководитель

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

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Кашук И.В.	к.т.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Романцов И.И.	к.т.н.		

Консультант по разделу «Механический расчет оборудования»

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

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата

Планируемые результаты обучения по ООП 18.04.02 выпуска 2020 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 пакетов	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ, <i>CDIO Syllabus</i> . Критерии АИОР, согласованные с требованиями

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

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

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

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП

(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
4KM81	Нутфуллин Рустам Радифович

Тема работы:

Разработка технологического оборудования для получения экстракта из чаги	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	62-11/с от 02.03.2020

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе (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.).</p>	<ul style="list-style-type: none"> - время экстракции – 5 часов; - концентрация твердого вещества в растворе – 8 %; - конечная концентрация – 50%; - температура выпаривания – 59,7 °С; - температура воды в конденсаторе – 10 °С; - объем бака с исходным раствором – 100 л; - плотность воды при температуре выпаривания – $983 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.
---	--

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i>	1 Теоретические и экспериментальные исследования 2 Описание технологической схемы 3 Конструирование и расчет оборудования 4 Расчет средств защиты оборудования 5 Механо-технологический раздел 6 Автоматизация и контроль производства 7 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение 8 Социальная ответственность
Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i>	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Кащук И.В.
Социальная ответственность	Романцов И.И.
Английский язык	Диденко А.В.
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Социальная ответственность	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	02.03.2020
--	------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Тихонов Виктор Владимирович.	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4KM81	Нутфуллин Рустам Радифович		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
4KM81	Нутфуллин Рустам Радифович

Школа	ИШНПТ	Отделение (НОЦ)	им. Н.М. Кижнера
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	18.04.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии

Тема ВКР:

Разработка технологического оборудования для получения экстракта из чаги	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	<p>Объект исследования – берёзовый гриб чага.</p> <p>Рабочая зона – производственный цех. Технологический процесс включает в себя следующие виды работ: сбор и транспортировка сырья, инспекция качества сырья, ополаскивание сырья водой, осушка сырья потоком воздуха, измельчение ручное и механическое, разделение измельченного сырья по фракциям, экстракция сырья, упаковка и отгрузка.</p> <p>Области применения – фармацевтическая промышленность.</p>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:	<p>Правовое обеспечение и организационные мероприятия согласно ГОСТ 12.4.299-2015 и ТК РФ от 30.12.2001 197-ФЗ.</p> <p>Законодательные и нормативные документы по теме:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Федеральный закон № 426-ФЗ от 28.12.2013 г.; 2. СанПиН 2.2.4.548-96; 3. ГОСТ 12.1.003-83; 4. СН 2.2.4/2.1.8.566-96; 5. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03; 6. ГОСТ 12.1.002-84; 7. ГОСТ Р 22.0.01-2016; 8. ГОСТ 12.0.004-90; 9. Федеральный закон № 123-ФЗ от 22.07.2008 г.; 10. Конституция Российской Федерации; 11. ГОСТ 12.0.003-2015; 12. СанПиН 2.2.4.3359-16; 13. Р 2.2.2006-05; 14. ГОСТ 12.1.038-82; 15. Федеральный закон № 184-ФЗ от 27.12.2002 г.; 16. ГОСТ 34347-2017; 17. ГОСТ 12.2.003-91.
2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов	<p>Выявить вредные факторы в производственном цеху: освещенность, шум, вибрации, микроклимат;</p> <p>Рассмотреть:</p> <ul style="list-style-type: none"> • требования к технике безопасности при работе с производственным оборудованием;

2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	<ul style="list-style-type: none"> • влияние психофизиологических факторов: монотонность труда, физические и эмоциональные перегрузки, умственное перенапряжение; • предлагаемые средства индивидуальной защиты для работы с производственным оборудованием: коллективная защита (пылеуловители, вентиляция), индивидуальные средства защиты (перчатки, респираторы, очки). <p>Выявить опасные факторы, относящиеся к оборудованию: повышенная температура рабочих поверхностей; электрический ток; короткое замыкание; движущиеся машины и механизмы; работа с оборудованием под вакуумом. Предлагаемые средства защиты: перчатки, спецодежда.</p>
3. Экологическая безопасность:	<p>Рассмотреть:</p> <ul style="list-style-type: none"> • правила утилизации отработанного сырья и сырья, не прошедшего инспекционный осмотр; • утилизация ТБО, люминесцентных ламп.
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	<p>Определить перечень наиболее возможных чрезвычайных ситуаций: возникновение пожара, взрыва вакуумной аппаратуры; разрушение зданий в результате разрядов атмосферного электричества. Наиболее актуальная ЧС – возникновение пожара.</p> <p>Рассмотреть профилактические мероприятия, требования к безопасности и меры по ликвидации её последствий:</p> <ul style="list-style-type: none"> • использование огнетушителя, песка, асбестового одеяла, пожарного крана и щита; • обеспечение средствами индивидуальной защиты; • организационная эвакуация работников.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	02.03.2020
--	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Романцов Игорь Иванович	К.Т.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4KM81	Нутфуллин Рустам Радифович		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСО- СБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
4KM81	Нутфуллин Рустам Радифович

Школа	ИШНПТ	Отделение (НОЦ)	им. Н.М. Кижнера
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	18.04.02 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, ин-формационных и человеческих	Определены стоимость материальных ресурсов, специального оборудования согласно рыночным це-нам г. Томска; тарифные ставки исполнителей научного исследования согласно штатному распи-санию НИ ТПУ.
2. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Определены отчисления во внебюджетные фонды

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала инженерных решений (ИР)	Анализ конкурентных технических решений рынка. Выполнение SWOT-анализа проекта.
2. Формирование плана и графика разработки и внедрения ИР	Составлена структура работ, определена трудо-емкость, разработан график проведения научного исследования.
3. Составление бюджета инженерного проекта (ИП)	Рассчитан бюджет научного исследования
4. Оценка ресурсной, финансовой, социальной, бюджетной эффективности ИР и потенциальных рисков	Определены интегральный финансовый показатель, интегральный показатель ресурсоэффективности, интегральный показатель эффективности.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)

1. Оценка конкурентоспособности НИ
2. Матрица SWOT
3. Диаграмма Ганта
4. Бюджет НИ
5. Основные показатели эффективности ИП

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	02.03.2020
--	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, зва-ние	Подпись	Дата
Доцент	Кашук Ирина Вадимовна	К.Т.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4KM81			

Реферат

В магистерской диссертации спроектирован и рассчитан экстрактор для экстракции лекарственного растительного сырья. Были произведены технологический, тепловой и конструктивно-механический расчет проектируемого оборудования.

Раздел Финансовый Менеджмент включает в себя определение ресурсоэффективности производимого оборудования.

В разделе социальной ответственности определены возможные опасные и вредные факторы, которые могут влиять на здоровье обслуживающего персонала.

Цель работы – разработка оборудования для проведения процесса экстракции для повседневных и медицинских нужд.

Магистерская диссертация состоит из 188 с., 32 рисунков, 39 таблиц, 83 источников литературы, 1 приложения.

В будущем планируется провести модернизацию оборудования с введением пульсационной аппаратуры в схему.

Оглавление

Реферат.....	9
Оглавление.....	10
Введение	14
1 Литературный обзор	16
2 Теоретические и экспериментальные исследования	17
3 Описание технологической схемы	23
4 Конструирование и расчет оборудования	24
4.1 Расчет экстрактора.....	24
4.1.1 Материальный баланс.....	24
4.1.2 Тепловой баланс.....	25
4.1.3 Конструктивный расчет.....	27
4.1.3.1 Определение основных размеров выпарного аппарата.....	27
4.1.3.2 Расчет и подбор штуцеров	29
4.1.3.3 Определение толщины тепловой изоляции.....	33
4.1.4 Механический расчет греющей камеры	34
4.1.4.1 Определение толщины стенки греющей камеры.....	34
4.1.4.2 Расчет цилиндрической обечайки на устойчивость в рабочих условиях.....	37
4.1.4.3 Расчет толщины стенки конического днища греющей камеры	38
4.1.4.4 Расчет толщины стенки эллиптической крышки.....	41
4.1.4.5 Расчет толщины трубной решетки	44
4.1.4.6 Расчет развальцовочного соединения	45
4.1.4.7 Расчет сопряжения цилиндрической и конической обечаек	46
4.1.4.8 Расчет сопряжения цилиндрической обечайки и эллиптического днища	53
4.1.4.9 Определение необходимости укрепления отверстий в греющей камере.....	60
4.1.4.10 Расчет фланцевого соединения для соединения эллиптической крышки и цилиндрической обечайки греющей камеры	66
4.1.4.11 Подбор опор для греющей камеры.....	79
4.1.5 Механический расчет сепаратора.....	80
4.1.5.1 Определение толщины стенки сепаратора	80
4.1.5.2 Расчет цилиндрической обечайки на устойчивость в рабочих условиях.....	82
4.1.5.3 Расчет толщины стенки конического днища сепаратора.....	83
4.1.5.4 Расчет толщины стенки эллиптической крышки.....	86

4.1.5.5 Расчет сопряжения цилиндрической и конической обечаек	88
4.1.5.6 Расчет сопряжения цилиндрической обечайки и эллиптического днища	89
4.1.5.7 Определение необходимости укрепления отверстий в сепараторе	90
4.1.5.8 Расчет фланцевого соединения для соединения эллиптической крышки и цилиндрической обечайки экстрактора	95
4.1.5.9 Подбор опор для сепаратора	97
4.1.6 Механический расчет экстрактора	99
4.1.6.1 Определение толщины стенки сепаратора	99
4.1.6.2 Расчет цилиндрической обечайки на устойчивость в рабочих условиях.....	100
4.1.6.3 Расчет толщины стенки конического днища сепаратора.....	102
4.1.6.4 Расчет толщины стенки эллиптической крышки.....	104
4.1.6.5 Расчет сопряжения цилиндрической и конической обечаек	107
4.1.6.6 Расчет сопряжения цилиндрической обечайки и эллиптического днища	107
4.1.6.7 Определение необходимости укрепления отверстий в экстракторе.....	108
4.1.6.8 Расчет решетки для сырья на механическую прочность и жесткость	111
4.1.6.9 Расчет фланцевого соединения для соединения эллиптической крышки и цилиндрической обечайки греющей камеры	113
4.1.6.10 Подбор опор для экстрактора	115
5 Расчет средств защиты оборудования	118
5.1 Защита от превышения давления	118
5.1.1 Расчет предохранительного клапана.....	119
5.2 Расчет защитного заземления	122
6 Механо-технологический раздел.....	126
7 Автоматизация и контроль производства.....	129
8 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	136
8.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	136
8.1.1 Анализ конкурентных технических решений	136
8.1.2 SWOT-анализ.....	138
8.2 Планирование научно-исследовательских работ.....	140
8.2.1 Структура работ в рамках научного исследования	140
8.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ	141
8.2.3 Разработка графика проведения научного исследования	142
8.3 Бюджет научно- исследования	145
8.3.1 Расчет материальных затрат НИ.....	145

8.3.2 Расчет затрат на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	146
8.3.3 Основная заработная плата исполнителей темы.....	146
8.3.4 Дополнительная заработная плата исполнителей темы.....	148
8.3.4 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)	148
8.3.5 Накладные расходы	149
8.3.6 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта.....	149
8.4 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	149
Заключение	152
9 Социальная ответственность	153
Введение	153
9.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.....	154
9.1.1 Правовые нормы трудового законодательства	154
9.1.2 Эргономические требования к правильному расположению и компоновке рабочей зоны	155
9.2 Производственная безопасность	156
9.2.1 Анализ выявленных опасных производственных факторов.....	157
9.2.1.1 Движущиеся машины и механизмы производственного оборудования	157
9.2.1.2 Оборудование, работающее под вакуумом	158
9.2.1.3 Пожарная и взрывная безопасность	158
9.2.1.4 Статическое электричество.....	159
9.2.1.5 Повышенная температура рабочих поверхностей.....	159
9.2.1.6 Электробезопасность	159
9.2.2 Анализ выявленных вредных производственных факторов.....	160
9.2.2.1 Отклонение показателей микроклимата рабочей зоны.....	160
9.2.2.2 Превышение уровня шума	160
9.2.2.3 Превышение уровня вибрации	161
9.2.2.4 Повышенная запылённость рабочей зоны.....	162
9.2.2.5 Физическая нагрузка.....	162
9.2.2.6 Монотонная работа	162
9.3 Экологическая безопасность.....	164
9.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	165
Заключение	166
Заключение	167
Список публикаций студента.....	169

Список использованных источников	170
Social responsibility	177
Introduction	178
1 Legal and institutional security issues	179
1.1 Legal standarts of labor law	179
1.2 Ergonomic requirements for the correct location and layout of the working area	179
2 Production Safety	181
2.1 Analysis of identified hazardous production factors.....	182
2.1.1 Moving transport and equipment	182
2.1.2 Vacuum equipment	182
2.1.3 Fire and explosion safety	182
2.1.4 Static electricity.....	183
2.1.5 Increased temperature of the working surface	183
2.1.6 Electrical safety	183
2.2 Analysis of identified harmful production factors	184
2.2.1 Deviation of the microclimate of the working area	184
2.2.2 Exceeding the noise level.....	184
2.2.3 Exceeding the vibration level.....	185
2.2.4 Increased dustiness of the working area	185
2.2.5 Physical effort	185
2.2.6 Monotonous work	186
3 Environmental safety	187
4 Safety in emergency situations	188
Conclusion	189

Введение

В настоящее время спрос на лекарственные средства растительного происхождения довольно высок, что подтверждается большим обилием данных товаров в аптеках. Большое количество предприятий занимаются сбором, переработкой и реализацией подобной продукции.

Согласно данным [1] Томская область обладает довольно большим потенциалом по сбору чаги, но не весь объем реализуется. В связи с этим, можно смело заявить, что сбор, переработка и реализация продукции из березового гриба чаги более чем актуален для данного региона.

Как указано в [2, с. 129], гриб паразитирует в местах нарушения древесины (трещины, надломы). Заготовка сырья [2, с. 129] возможна круглый год, но удобнее собирать чагу осенью или зимой, когда деревья безлистные и гриб хорошо заметен. В это время сырье обладает большей биологической активностью. Наросты срубают топором или срезают пилой со старых берез или свежесрубленных деревьев (во время лесозаготовок). Сырье используется в свежесобранном или подсушенном виде. Не следует собирать наросты (плодовые тела) с засохших деревьев и в нижней части ствола, так как это сырье малоактивно. С плодовых тел снимают верхний, покрытый трещинами слой с выросшими частями березы и внутренний - рыхлый, светло-коричневого цвета. Заготавливают среднюю, плотную часть нароста. Ее рубят на куски размером [3, с. 1385] до 10 см. После разделки куски сушат в сушилках или печах при температуре не выше 60°C.

В чаге содержатся [2, с. 129] водорастворимые хромогены — производные фенольных альдегидов, полифенолов, оксифенолкарбоновых кислот и их хинонов, а также гуминоподобная чаговая кислота (до 60%), полисахариды (6-8%), лигнин, клетчатка, стероидные, птериновые соединения, органические кислоты, тритерпеновые кислоты, свободные фенолы, соли кремния, железа, алюминия, кальция, магния, натрия, цинка, меди, марганца, много солей калия.

Согласно [2, с. 130; 4, с. 28], чагу используют как общеукрепляющее и противовоспалительное средство при заболеваниях желудочно-кишечного тракта (гепатита, язвы желудка, диареи) и как симптоматическое средство при опухолях различной локализации. Настой чаги назначают больным язвенной болезнью желудка и двенадцатиперстной кишки. Чага быстро снимает болевой синдром и диспепсические явления, нормализует функцию кишечника, повышает общий тонус. Положительное действие чаги на больных с желудочно-кишечными заболеваниями подтверждается данными рентгенологического исследования. Чагу, бифунгин применяют при псориазе, экземе и других кожных заболеваниях, лечение особенно эффективно в случаях сочетания кожного заболевания с различными воспалительными заболеваниями желудочно-кишечного тракта, печени, желчевыделительной системы. Препараты из чаги способствуют снижению сахара в крови и могут эффективно использоваться для различных форм диабета.

Клинические испытания [5] препаратов из чаги, проведенные при раке IV степени показывают, что у больных без кахексии уменьшается боль, повышается аппетит, увеличивается масса тела и т.д. За счет этого чага и препараты из нее являются довольно перспективными для применения в профилактической онкологии. Но области применения данного растительного сырья значительно шире. Это и бытовое применение в виде заварки для чая, настоев, различных напитков, пищевой промышленности, в рыбоводстве [6], животноводстве [7], косметической промышленности [8] и т.д. К сожалению, при большом количестве различных исследований и широкой области применения сырья, технология производства сложнее, чем технология производства чаёв.

В связи с этим поставлена цель — исследовать процесс экстракции лекарственного растительного сырья и разработать оборудование для проведения процесса для повседневных и медицинских нужд. Экстракция, согласно [9, 5ч., с. 188] — извлечение целевого компонента, находящегося в виде твердых растворимых включений внутри пористой структуры инертного тела.

Областью применения разрабатываемого оборудования является фармацевтическая промышленность. Проводя анализ современных предприятий, можно сделать вывод, что в фармацевтической и пищевой промышленности используются роторные, вертикальные экстракторы-перколяторы, ультразвуковые экстракторы и т.д.

Техническое значение — на основе существующего оборудования разработать новое, эффективное, энергосберегающее и экономически выгодное. В качестве прототипа для проектирования выбран экстрактор Сокслета. Данный аппарат до сих пор [10] остается самым распространенным и очень эффективным экстрактором непрерывного действия.

Имеющийся спрос на экстракты из чаги и отсутствие эффективной аппаратуры делают актуальной проблему разработки необходимого оборудования.

1 Литературный обзор

Лечебные свойства гриба чаги известны с древних времен. Жители европейской части России и Сибири использовали гриб для лечения злокачественных опухолей и заболеваний кишечника. Также известно [11,12], что русский князь Владимир Мономах вылечился от рака губы благодаря березовому грибу. В Древней Руси народные целители [13] составляли целые книги, которые описывали чудодейственные свойства данного гриба. Известный советский писатель Александр Солженицын упоминал [13] в своем романе «Раковый корпус» гриб, который способен вылечить рак. Нобелевская премия по литературе принесла автору не только известность и признание, но также он открыл миру такое доступное средство, которым тут же заинтересовались врачи и патологи из США и Америки. В 1950-1970 годы березовый гриб чага получил массу исследований.

Современные технологии производства экстрактов из чаги очень схожи.

Например, компания ООО «Роста» [14] работает с линией, которая включает в себя подготовку сырья, получение вытяжки чаги, добавление к вытяжке солей кобальта, фильтрация и упаривания вытяжки, стабилизация спиртом и фасовка готового продукта.

В то же время, компания CHAGAFOOD [15] разработала технологическую линию, которая включается в себя вакуумную экстракцию и сублимацию, фильтрование с помощью мембранных фильтров, вакуумную сушку, ультрафиолетовое обеззараживание, вакуумная пастеризация.

Компания Артлайф [16] применяет следующую технологию с использованием многоступенчатым противоточным экстрагированием растительного сырья в экстракторах циркуляционного типа, концентрирования в вакуум-выпарных установках и сушкой в распределительных сушилках.

В компании «Травы Байкала» используется упрощенная, но уникальная технология [17] экстракции, сгущения и сушки с использованием низких температур, что позволяет получить из гриба максимальную долю активного вещества без добавления красителей, добавок и консервантов.

Однако, рассмотренные технологии куда сложнее по исполнению и конструкциям, чем предлагаемый в выпускной квалификационной работе вариант. Использование известной технологии экстракции при помощи аппарата Сокслета позволяет извлечь из гриба максимальную долю полезных веществ, применить оборудование с довольно простой и понятной конструкцией и обеспечить максимальную движущую силу процесса экстракции.

2 Теоретические и экспериментальные исследования

Был проведен ряд исследований для определения свойств и характеристик сырья, необходимых для организации процесса проектирования оборудования.

Для определения кажущейся плотности из цельных кусков грибы были вырезаны образцы кубической формы, представленные на рисунке 1.



Рисунок 1 — Кубические образцы

Линейные размеры образцов замерялись с точностью 0,1 мм штангенциркулем согласно [18], взвешивание проводили на лабораторных весах ВСТ-150/5-0, представленных на рисунке 2. Результаты измерений представлены в таблице 2.



Рисунок 2 — Весы ВСТ-150/5-0\

Таблица 1 — Размеры сухих образцов

Номер образца	Сторона	Размер, см			Средний размер, см	Масса, г
1	a	2,23	2,20	2,16	2,20	3,26
	b	2,08	1,98	1,96	2,00	

	c	1,84	1,91	2,02	1,90	
2	a	2,51	2,55	2,59	2,55	4,45
	b	2,44	2,17	2,14	2,18	
	c	2,42	2,39	2,32	2,37	
3	a	2,93	2,89	2,76	2,86	8,00
	b	3,31	3,18	3,09	3,19	
	c	2,83	2,71	2,41	2,65	

Образцы были замочены в воде при комнатной температуре до достижения постоянства массы. Образцы представлены на рисунке 3.



Рисунок 3 — Замоченные образцы

Таблица 2 —Свойства замоченных образцов

Номер образца	Сторона	Размер, см			Средний размер, см	Масса, г
1	a	2,46	2,46	2,47	2,46	9,8
	b	2,17	2,19	2,22	2,19	
	c	2,18	2,19	2,19	2,18	
2	a	3,25	3,19	3,08	3,17	14,62
	b	2,44	2,33	2,27	2,34	
	c	2,67	2,71	2,41	2,59	
3	a	3,12	3,10	3,19	3,13	36,42
	b	3,45	3,56	3,61	3,54	
	c	2,59	2,85	3,08	2,84	

В результате исследований получены кажущиеся плотности сухих и мокрых образцов. При сравнении образцов получены коэффициенты набухания. Результаты представлены в таблице 3.

Таблица 3 —Свойства кускового сыря

Кажущаяся плотность сухого, г/см ³	Кажущаяся плотность мокрого, г/см ³	Коэффициент набухания
0,27...0,39	0,62...0,83	1,4...1,45

Значительный разброс в показателях, по нашему мнению, обусловлен неоднородностью свойств чаги от поверхности к внутреннему объёму.

Так же, была определена насыпная плотность измельчённого сыря согласно методике [19].

Согласно требованию фармакопеи [3], чага для экстрагирования должна быть измельчена менее 7 мм. Измельченное сырье показано на рисунке 4.



Рисунок 4 — Чага, измельченная менее 7 мм

Определено количество влаги при сравнении масс сухих и замоченного образцов. Количество поглощаемой образцом воды превышает по массе образца в 3...3,3 раза.

Проведённые опыты по измельчению чаги доступными нам способами (ручное разбивание и раздавливание, помол на дробилка щековая лабораторная ШД 10) дали значительную долю (до

20% от массы измельчаемого сырья) фракции менее 1 мм. Сырье было подвержено измельчению и просеву набором сит. Наличие мелкой фракции усложняет процесс очистки экстракта от мути. Фракция менее 1 мм представлена на рисунке 5.



Рисунок 5 — Чага, измельченная менее 1 мм

Был определён насыпной вес фракций чаги, г/см³:

- фракция -7 +1, г/см³ - 0,38;
- фракция -1, г/см³ - 0,43.

Дальнейшие исследования проводились с фракцией -7+1 мм.

В качестве лабораторной установки и прототипа для проектирования технологического оборудования использовался экстрактор Сокслета, представленный на рисунке 6, который обладает большим рядом преимуществ по сравнению с подобными установками. Он обладает довольно простой конструкцией, обеспечивает высокую эффективность экстрагирования и обладает максимальной движущей силой процесса экстракции.

Экстракцию проводили с сырьем, проходящим через сито 7 мм, но не проходящим через сито 1 мм. После каждого цикла, которых было 7, отбирали по 5 мл экстракта. Все 7 проб взвесили на лабораторных весах ВСТ-150/5-0. После этого отправили все пробы в песчаную баню для упаривания полученного экстракта до постоянной массы. Результаты данных исследований приведены в таблице 4.

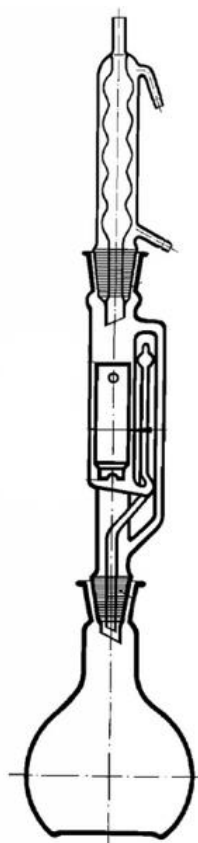


Рисунок 6 — Экстрактор Сокслета

Таблица 4 — Определение сухого остатка в экстракте

Номер бюкса	Масса пустого бюкса, гр	Масса бюкса и экстракта, гр	Масса бюкса и упаренного экстракта, гр	Сухой остаток, гр
1	19,050	24,015	19,060	0,010
2	16,250	21,120	16,270	0,020
3	16,050	20,900	16,070	0,020
4	13,875	18,735	13,895	0,020
5	14,280	19,160	14,310	0,030
6	18,840	23,690	18,890	0,050
7	16,515	21,415	16,545	0,030
Среднее значение				0,026

Бюксы с номерами 1, 4 и 7 отправили на инфракрасную спектроскопию. Полученные опытные данные представлены на рисунке 7.



Рисунок 7 — Результаты инфракрасной спектроскопии

На рисунке 7 бюкс под номером 1 указан красным цветом, номер 4 — зеленым, номер 7 — синим. Видно, что спектры схожи, единственное отличие – в концентрации веществ. Согласно таблице [19] можно определить наличие алициклических соединений с функциональной группой C–H, аминов с NH₂, простых эфиров и ацеталей с C–O–C, пероксиды с C–O–O и т.д. Исходя из литературных источников [3], описывающих состав чаги, наличие данных соединений подтверждается.

Для повышения качества получаемого экстракта, увеличения энерго-эффективности и снижения затрат на получение концентрата экстракта из чаги, было принято решение конструктивно объединить экстрактор и выпарной аппарат с вынесенной греющей камерой.

3 Описание технологической схемы

Технологическая схема представлена на листе графического материала №1. При поступлении сырья на производство необходимо проводить первоначальный осмотр качества сырья на инспекционном столе 1. Следующим этапом сырье отправляется на ополаскивание в моечную машину 2 и сушку воздушным потоком на роликовой сушилке 3. Далее сырье проходит предварительное измельчение, где его измельчают до размеров 7-10 см и отправляют в щековую дробилку 4 для измельчения до размеров частиц, проходящих через сито -7+1 мм. Измельченное сырье отправляется в просеиватель 5, где отделяется фракция -1 мм, которая отправляется в бункер 6 для хранения. Фракция -7+1 мм загружается в экстрактор 7. Предварительно заготовленная вода подогревается сепаратор-брызгоуловитель 9 при помощи кипятильника 10 и отправляется в холодильник-конденсатор 8, где конденсируется и попадает в экстрактор 7, пропитывая сырье. После достижения жидкостью определенного уровня первичный экстракт через переливную трубу 11 отправляется в сепаратор-брызгоуловитель 9. Цикл повторяется. После проведения определенного количества циклов, полученный экстракт концентрируется путем выпаривания воды и в результате концентрат сливается в емкость 12, а из экстрактора в емкость 13 сливается конденсат. Полученный концентрат отправляется в отделение упаковки и отгрузки для дальнейшей транспортировки до торговых точек. В системе создается разряжение 0,02 МПа вакуум-насосом, подключенным к холодильнику-конденсатору, температура процесса составляет 59,7 °С.

4 Конструирование и расчет оборудования

Данный раздел будет включать в себя расчет и конструирование аппаратуры для проведения процесса экстракции березового гриба чага.

4.1 Расчет экстрактора

В проекте используется выпарной аппарат периодического действия с вынесенной греющей камерой с исходными данными для расчета, полученные в результате лабораторных исследований:

- время экстракции – 5 часов;
- концентрация твердого вещества в растворе – 8 %;
- конечная концентрация – 50%;
- температура выпаривания – 59,7 °С;
- температура воды в конденсаторе – 10 °С;
- объем заливаемой воды – 100 л;
- плотность воды при t процесса – $983 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

4.1.1 Материальный баланс

Запишем уравнение материального баланса для всего количества раствора:

$$G_H = G_K + W; \quad (1)$$

по растворенному веществу:

$$G_H \cdot x_H = G_K \cdot x_K, \quad (2)$$

где G_H – массовый расход начального (исходного) раствора, кг/с; G_K – массовый расход конечного (упаренного) раствора, кг/с; W – массовый расход выпариваемой воды, кг/с; x_K – массовая доля растворенного вещества в исходном растворе; x_H – массовая доля растворенного вещества в упаренном растворе.

Определим производительность по исходному раствору:

$$G_H = \rho \cdot V_{об} \quad (3)$$

где ρ – плотность исходного раствора, согласно [20, с. 537] принимаем равной 998 кг/м^3 ; $V_{об}$ – объемный расход, $\text{м}^3/\text{с}$.

Объемный расход исходного раствора можно определить, воспользовавшись формулой:

$$V_{об} = 0.1 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}}.$$

Тогда:

$$G_H = \rho_{\text{в}} \cdot V_{об} = 998 \cdot 0.1 = 99.8 = 99.8 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}. \quad (4)$$

Определяем массовое количество упаренного раствора и выпаренной воды:

$$G_K = \frac{G_H \cdot x_H}{x_K} = \frac{99.8 \cdot 8}{50} = 16.0 = 16.0 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}. \quad (5)$$

Выпаренной воды будет:

$$W = G_H - G_K = 99.8 - 16.0 = 99.8 - 16.0 = 83.8 = 83.8 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}. \quad (6)$$

4.1.2 Тепловой баланс

Тепловой расчет выполняется на основе закона сохранения энергии, согласно которому приход теплоты должен быть равен ее расходу. Уравнение теплового баланса выпарного аппарата:

$$Q + G_H \cdot C_H \cdot t_H = G_K \cdot C_K \cdot t_K + W \cdot i_{\text{вт}} + Q_{\text{пот}} \quad (7)$$

где Q – расход теплоты на выпаривание, Вт; C_H , C_K – удельная теплоемкость начального (исходного) и конечного (упаренного) раствора, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$; t_H , t_K – температура начального раствора на входе в аппарат и конечного раствора на выходе его из аппарата, °С; $i_{\text{вт}}$ – удельная энтальпия вторичного пара на выходе из аппарата, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$; $Q_{\text{пот}}$ – расход теплоты на компенсацию потерь в окружающую среду, Вт.

Из уравнения теплового баланса находится расход теплоты на выпаривание, которое поступает с греющим паром:

$$Q = G_H \cdot C_H \cdot (t_K - t_H) + W \cdot (i_{\text{вт}} - C_{\text{в}} \cdot t_K) + Q_{\text{пот}} \quad (8)$$

Расход теплоты на нагревание раствора до температуры кипения:

$$Q_{\text{нагр}} = G_H \cdot C_H \cdot (t_K - t_H), \quad (9)$$

где C_H – удельная теплоемкость начального раствора, для воды равная $4190 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ [20, с. 537].

Тогда:

$$Q_{\text{нагр}} = \frac{G_H}{3600} \cdot C_H \cdot (t_K - t_H) = \frac{99.8}{3600} \cdot 4190 \cdot (60 - 20) = 4646.0 = 4646.0 \text{ Вт}. \quad (10)$$

Расход теплоты на испарение воды:

$$Q_{исп} = W \cdot (i_{вт} - C_{в.к} \cdot t_k), \quad (11)$$

где $C_{в.к}$ – удельная теплоемкость воды при t_k , согласно [20, с. 537] равна $4180 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$; $i_{вт}$ – удельная энтальпия вторичного пара на выходе из аппарата, согласно [20, с. 548] равна $2608300 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$.

Тогда

$$Q_{исп} = \frac{W}{3600} \cdot (i_{вт} - C_{в.к} \cdot t_k) = \frac{83.8}{3600} \cdot (2608300 - 4180 \cdot 60) = 54877.0 = 54877.0 \text{ Вт.}$$

Расход теплоты на компенсацию потерь в окружающую среду принимают [20, с. 247] в размере 3-5% от суммы ($Q_{нагр} + Q_{исп}$):

$$Q_{ном} = 0.4 \cdot (Q_{нагр} + Q_{исп}) = 0.4 \cdot (4646.0 + 54877.0) = 23809.0 = 23809.0 \text{ Вт} \quad (12)$$

Тогда расход теплоты на выпаривание:

$$Q = Q_{нагр} + Q_{исп} + Q_{ном} = 4646.0 + 54877.0 + 23809.0 = 83332.0 = 83332.0 \text{ Вт.}$$

Расход греющего пара в выпарном аппарате:

$$G_{г.п.} = \frac{Q}{r_{г.п.} \cdot x}, \quad (13)$$

где Q – расход теплоты на выпаривание, Вт; x – паросодержание (степень сухости) греющего пара примем равным 0,95; $r_{г.п.}$ – дельная теплота парообразования, принята при давлении 0,25 МПа согласно [21] и по справочным данным [20, с. 548] равная $2189,5 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$.

Тогда:

$$G_{г.п.} = \frac{Q}{r_{г.п.} \cdot x} = \frac{83332.0}{(2189500 \cdot 0.95)} = 0.04 = 0.04 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}.$$

Удельный расход пара определяется выражением:

$$d = \frac{G_{г.п.}}{\frac{W}{3600}} = \frac{0.04}{\left(\frac{83.8}{3600}\right)} = 1.7 = 1.7 \frac{\text{кг}}{\text{с}}. \quad (14)$$

Полезную разность температур можно вычислить по формуле:

$$\Delta t_{пол} = t_{г.п.} - t_k = 99.1 - 60 = 39.1 = 39.1 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (15)$$

где $t_{г.п.}$ – температура греющего пара, принимаем при давлении 0,1 МПа и согласно [20, с. 550] равной 99,1 °С; t_k – конечная температура раствора, равна 60 °С.

Площадь поверхности теплопередачи выпарного аппарата:

$$F = \frac{Q}{K \cdot \Delta t_{пол}} = \frac{83332.0}{(1000 \cdot 39.1)} = 2.13 = 2.13 \text{ м}^2, \quad (16)$$

где F – площадь поверхности нагрева, м^2 ; $Q_{г.п.}$ – теплота, отданная греющим паром раствору, Вт; $\Delta t_{пол}$ – средняя движущая сила $\Delta t_{ср}$, $^{\circ}\text{C}$; K – коэффициент теплоотдачи, принят ориентировочно согласно [20, с. 172] равным $1000 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$.

Номинальная поверхность теплообмена аппарата выбрана из стандартизированного ряда [21] $F_{ном} = 2.5 \text{ м}^2$.

4.1.3 Конструктивный расчет

4.1.3.1 Определение основных размеров выпарного аппарата

Объемный расход воды составляет:

$$V_v = \frac{W}{\rho_v} = \frac{83.8}{998} = 0.084 = 0.084 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}, \quad (17)$$

где W – количество выпаренной воды, $\frac{\text{кг}}{\text{ч}}$; ρ_v – плотность воды, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

Определим площадь проходного сечения трубок, исходя из скорости движения жидкости в трубках:

$$f_I = \frac{V_v}{w_{жс}} = \frac{0.084}{1.5} = 0.056 = 0.056 \text{ м}^2, \quad (18)$$

где $w_{жс}$ – скорость движения жидкости в трубках, примем ориентировочно согласно [20, с. 17] равной $1,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Исходя из площади проходного сечения трубок определяем число трубок:

$$n_I = \frac{f_I}{0.785 \cdot d_b^2} = \frac{0.056}{(0.785 \cdot 0.032^2)} = 69.7 = 69.7 \text{ шт.}, \quad (19)$$

где d_b – внутренний диаметр трубки, согласно [22] примем трубки диаметром 32 мм.

В таком случае расчетная длина трубок будет составлять:

$$L_{mp} = \frac{F_{ном}}{\pi \cdot d_p \cdot n_I} = \frac{2.5}{(\pi \cdot 0.038 \cdot 69.7)} = 0.3 = 0.3 \text{ м}, \quad (20)$$

где d_p – расчетный диаметр трубки, определяемый в зависимости от соотношения коэффициентов теплоотдачи в трубном и межтрубном пространстве α_1 и α_2 . Принимаем соотношение коэффициентов теплоотдачи $\alpha_1 \ll \alpha_2$ тогда $d_p = d_n$ – наружный диаметр трубки, равен 38 мм.

Расстояние между трубками:

$$t = 1.2 \cdot d_n + 2 = 1.2 \cdot 38 + 2 = 47.6 = 47.6 \text{ мм}, \quad (21)$$

где d_n – наружный диаметр трубы, мм.

Принимаем согласно [22, с. 18] данное расстояние равным 48 мм.

Диаметр греющей камеры выпарного аппарата [2, с. 18] $D_{г.к.} = 400$ мм.

Коэффициент заполнения $k_I = 0.7$.

Число труб, размещаемых на решетке:

$$n_{тр} = k_I \cdot \frac{\pi \cdot D_{г.к.}^2}{4 \cdot 0.866 \cdot t_m^2} = 0.7 \cdot \left[\frac{\pi \cdot 400^2}{(4 \cdot 0.866 \cdot 48^2)} \right] = 44.1 = 44.1 \text{ шт.} \quad (22)$$

$$n_{тр.} = 45 \text{ шт.}$$

Диаметр парового пространства в таком случае:

$$D_{nn} = 1.4 \cdot D_{г.к.} = 1.4 \cdot 400 = 560.0 = 560.0 \text{ мм.} \quad (23)$$

Согласно [22, 23] принимаем ближайшее стандартное значение в 600 мм.

Объемный расход пара можно определить при помощи уравнения:

$$V_{пара} = 3600 \cdot G_{г.н.} \cdot v_{уд.н.} = 3600 \cdot 0.04 \cdot 7.977 = 1148.0 = 1148.0 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}}, \quad (24)$$

где $v_{уд.п.}$ – удельный объем пара, принят в соответствии с [20, с. 548] равным $7.977 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$.

Для определения скорости пара в надскоковом пространстве воспользуемся формулой:

$$v_n = \sqrt{\frac{V_{пара}}{3600 \cdot 0.785 \cdot D_{n.n.}^2}} = \sqrt{\frac{1148.0}{(3600 \cdot 0.785 \cdot 0.6^2)}} = 1.06 = 1.06 \frac{\text{м}}{\text{с}}. \quad (25)$$

Тогда критерий Рейнольдса определим по формуле:

$$Re = \frac{v_n \cdot d_k}{\nu_n} = \frac{1.06 \cdot 0.0003}{(0.478 \cdot 10^{-6})} = 665.0 = 665.0, \quad (26)$$

где d_k – диаметр капли, принимаем равным 0,0003 м; ν_n – кинематическая вязкость пара, согласно [20, с. 537] равна $0.478 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$.

Коэффициент сопротивления исходя из этого [24, с. 97]: $\varepsilon = 0.44$.

Тогда скорость витания капли:

$$Re = \frac{v_n \cdot d_k}{\nu_n} = \frac{1.06 \cdot 0.0003}{(0.478 \cdot 10^{-6})} = 665.0 = 665.0 \frac{\text{м}}{\text{с}}, \quad (27)$$

где g – ускорение свободного падения, $\frac{\text{м}}{\text{с}^2}$; ρ_1 – плотность воды, принята в соответствии с [20, с. 537] равной $983 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; ρ_2 – плотность пара, принята в соответствии с [20, с. 548] равной $0,1301 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

Для проверки нормальной работы выпарной установки необходимо проверить выполнение следующего условия:

$$Usll = \begin{cases} \text{"Условие выполняется"} & \text{if } v_{\text{в}} > v_n \\ \text{"Условие не выполняется"} & \text{if } v_{\text{в}} < v_n \end{cases}$$

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

Как видим, условие успешно выполняется.

Объем пространства вторичного пара:

$$V_{\text{вн}} = \frac{W}{\rho_2 \cdot A} = \frac{83.8}{(0.1301 \cdot 3000)} = 0.215 = 0.215 \text{ м}^3, \quad (28)$$

где A – напряжение вторичного пара, согласно [25, с. 624] принимаем равным $3000 \frac{\text{м}^3}{\text{м}^3 \cdot \text{ч}}$.

Округлим до ближайшего: $V_{\text{в.н.}} = 0.25 \text{ м}^3$.

Высота пространства для вторичного пара:

$$H_{nn} = \frac{4 \cdot V_{\text{в.н.}}}{\pi \cdot D_{n.n.}^2} = \frac{4 \cdot 0.25}{(\pi \cdot 0.6^2)} = 0.884 = 0.884 \text{ м}, \quad (29)$$

Примем стандартное ближайшее значение: $H_{n.n} = 0.9$.

Внутренний диаметр циркуляционной трубы должен составлять не более 200 мм согласно [22], примем согласно [26]:

$$D_{\text{ц.т.вн}} = 100 \text{ мм}$$

Наружный диаметр при толщине стенки в 6 мм $D_{\text{ц.т.н}} = 112 \text{ мм}$

4.1.3.2 Расчет и подбор штуцеров

Определим размеры штуцера для ввода греющего пара в выпарную установку. Изначально необходимо определить объемный расход греющего пара по формуле:

$$V_{в.г.п.} = \frac{G_{г.п.}}{\rho_{г.п.}} = \frac{0.04}{0.579} = 0.07 = 0.07 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}, \quad (30)$$

где $\rho_{г.п.}$ – плотность греющего пара, по [20, с. 550] равна $0,579 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ для температуры греющего пара $99,1^\circ\text{C}$.

Согласно таблице 1.1 [20, с. 17], задаемся скоростью пара: $w_{г.п.} = 60 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Диаметр патрубка в таком случае будет составлять:

$$d_{в.г.п.} = \sqrt{\frac{V_{в.г.п.}}{0.785 \cdot w_{г.п.}}} = \sqrt{\frac{0.07}{(0.785 \cdot 60)}} = 0.0386 = 0.0386 \text{ м}. \quad (31)$$

Примем диаметр патрубка согласно [27] равным $d_{п.г.п.} = 40$ мм, толщина стенки:

$$s_{п.г.п.} = 3.5 \text{ мм}.$$

Определим размеры штуцера для вывода конденсата греющего пара. Объемный расход конденсата по формуле 30:

$$V_{кон.г.п.} = \frac{G_{г.п.}}{\rho_{кон.г.п.}} = \frac{0.04}{958} = 0.00004 = 0.00004 \frac{\text{м}^3}{\text{с}},$$

где $\rho_{кон}$ – плотность конденсата, по [20, с. 537] равна $983 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

Согласно таблице 1.1 [20, с. 17], задаемся скоростью конденсата: $w_{кон.г.п.} = 1 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Диаметр патрубка в таком случае по формуле 31 будет составлять:

$$d_{кон.г.п.} = \sqrt{\frac{V_{кон.г.п.}}{0.785 \cdot w_{кон.г.п.}}} = \sqrt{\frac{0.00004}{(0.785 \cdot 1)}} = 0.00714 = 0.00714 \text{ м}.$$

Примем диаметр патрубка согласно [27] равным $d_{п.кон.г.п.} = 25$ мм, толщина стенки:

$$s_{п.кон.г.п.} = 3.5 \text{ мм}.$$

Объемный расход вторичного пара по формуле 30:

$$V_{втор.п.} = \frac{W}{3600 \cdot \rho_{втор.п.}} = \frac{83.8}{(3600 \cdot 0.1301)} = 0.2 = 0.2 \frac{\text{м}^3}{\text{с}},$$

где $\rho_{втор.п.}$ – плотность вторичного пара, по [20, с. 550] равна $0,1301 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

Согласно таблице 1.1 [20, с. 17], задаемся скоростью вторичного пара: $w_{втор.п.} = 30 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Диаметр патрубка в таком случае по формуле 31 будет составлять:

$$d_{втор.н.} = \sqrt{\frac{V_{втор.н.}}{0.785 \cdot w_{втор.н.}}} = \sqrt{\frac{0.2}{(0.785 \cdot 30)}} = 0.092 = 0.092 \text{ м.}$$

Примем диаметр патрубка согласно [27] равным $d_{н.втор.н.} = 100$ мм, толщина стенки:

$$s_{н.втор.н.} = 4 \text{ мм.}$$

Объемный расход исходного раствора по формуле 30:

$$V_{н.} = \frac{W}{3600 \cdot \rho_{в.}} = \frac{83.8}{(3600 \cdot 998)} = 0.00002 = 0.00002 \frac{\text{м}^3}{\text{с}},$$

где $\rho_{в.}$ – плотность воды, по [20, с. 537] равна $998 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

Согласно таблице 1.1 [20, с. 17], задаемся скоростью исходного раствора: $w_{н.} = 0.5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Диаметр патрубка в таком случае по формуле 31 будет составлять:

$$d_{н.} = \sqrt{\frac{V_{н.}}{0.785 \cdot w_{н.}}} = \sqrt{\frac{0.00002}{(0.785 \cdot 0.5)}} = 0.0071 = 0.0071 \text{ м.}$$

Примем диаметр патрубка согласно [27] равным $d_{н.н.} = 25$ мм, толщина стенки:

$$s_{н.н.} = 3.5 \text{ мм, длина патрубка } 0,4 \text{ м.}$$

Объемный расход концентрата по формуле 30:

$$V_{кон} = \frac{G_{к}}{3600 \cdot \rho_{кон}} = \frac{16.0}{(3600 \cdot 1040)} = 0.00000427 = 0.00000427 \frac{\text{м}^3}{\text{с}},$$

где $\rho_{к}$ – плотность упаренного раствора, согласно проведенным исследованиям равна $1040 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

Согласно таблице 1.1 [20, с. 17], задаемся скоростью упаренного раствора: $w_{кон} = 0.5 \text{ м/с}$

Диаметр патрубка по формуле 31 в таком случае будет составлять:

$$d_{кон} = \sqrt{\frac{V_{кон}}{0.785 \cdot w_{кон}}} = \sqrt{\frac{0.00000427}{(0.785 \cdot 0.5)}} = 0.0033 = 0.0033 \text{ м.}$$

Примем диаметр патрубка согласно [27] равным $d_{н.кон} = 25$ мм, толщина стенки:

$$s_{н.кон} = 3.5 \text{ мм.}$$

Штуцера подбираем согласно [27], все размеры и конструкция представлены в таблице 5 и на рисунке 8 соответственно.

Таблица 5 – Таблица штуцеров

размеры в миллиметрах

D_y	d_b	D	D_1	D_2	b	h	d	n	l	H	d_H	S	Масса, кг
25	33	100	75	60	12	2	11	4	150	155	32	3,5	1,1
40	46	130	100	80	13	3	14	4	150	155	45	3,5	1,7
100	110	205	170	148	15	3	18	4	150	155	108	6,0	5,2

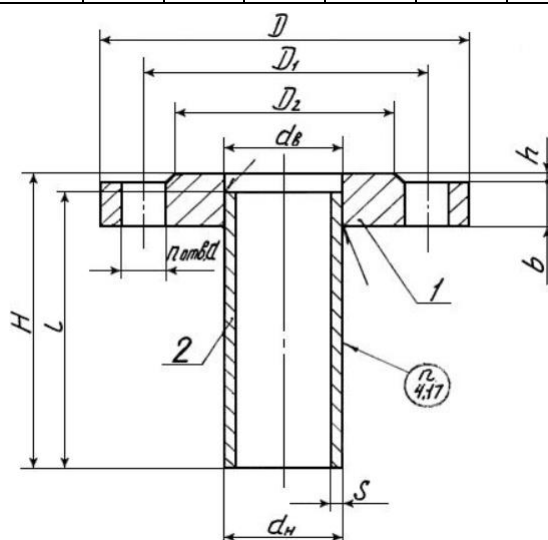


Рисунок 8 – Штуцер

Здесь 1 – фланец по [28], 2 – патрубок.

В качестве прокладок используются плоские эластичные прокладки из картона КАП согласно [29]. Часть фланцевого соединения с прокладкой, прижимаемого болтами, представлена на рисунке 9.

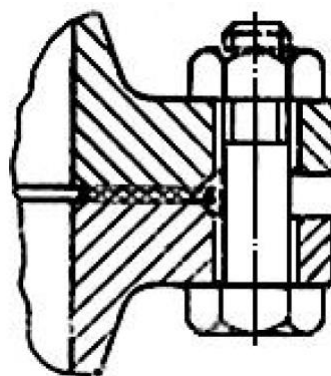


Рисунок 9 – Часть фланцевого соединения прокладкой

Согласно [30] подбираем плоские эластичные прокладки, параметры которых представлены в таблице ниже.

Таблица 6 – Тороидальные уплотнения

Проход условный D_y , мм	Давление условное P_y , МПа	Наружный диаметр прокладки D , мм	Внутренний диаметр прокладки d , мм	Масса 1000 шт., кг
25	0,1-0,63	63	29	10,0
40		85	45	17
100		151	106	37

Конструкцию уплотнения можно наблюдать на рисунке 10.

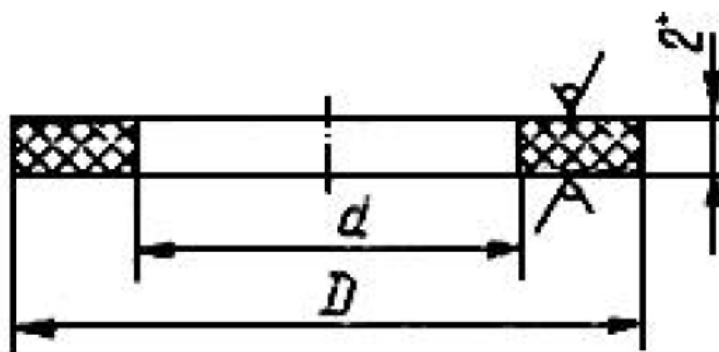


Рисунок 10 – Плоская эластичная прокладка

4.1.3.3 Определение толщины тепловой изоляции

Толщина тепловой изоляции определяется из равенства удельных тепловых потоков через слой изоляции от поверхности изоляции в окружающую среду:

$$\alpha_{\text{в}} \cdot (t_{\text{см}2} - t_{\text{в}}) = \frac{\lambda_{\text{и}}}{\delta_{\text{и}}} \cdot (t_{\text{см}1} - t_{\text{см}2}), \quad (32)$$

где $\alpha_{\text{в}}$ – коэффициент теплоотдачи от внешней поверхности изоляционного материала в окружающую среду, Вт/(м² · К); $t_{\text{см}2}$ – температура изоляции со стороны окружающей среды (температура определена техникой безопасности на предприятиях и равна 40 °С); $t_{\text{см}1}$ – температура изоляции со стороны аппарата, примем, что падения температуры не происходит и температура стенки равна температуре раствора – 60°С ; $t_{\text{в}}$ – температура окружающей среды (воздуха), °С; $\lambda_{\text{и}}$ – коэффициент теплопроводности изоляционного материала, Вт/(м · К).

Коэффициент теплоотдачи от внешней поверхности изоляционного материала:

$$\alpha_{\text{в}} = 9.3 + 0.058 \cdot t_{\text{см}2} = 9.3 + 0.058 \cdot 40 = 11.6 = 11.6 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}. \quad (33)$$

В качестве материала для тепловой изоляции выберем совелит (85 % магнезии + 15 % асбеста), имеющей коэффициент теплопроводности $\lambda_{и} = 0,098 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$. [31, с. 529].

Тогда толщина тепловой изоляции по формуле 32:

$$\alpha_{\text{в}} \cdot (t_{\text{см}2} - t_{\text{в}}) = \frac{\lambda_{и}}{\delta_{и}} \cdot (t_{\text{см}1} - t_{\text{см}2}) = 11,6 \cdot (40 - 20) = \frac{0,098}{\delta_{и}} \cdot (60 - 40) = 0,0084 \text{ м.}$$

Принимаем толщину изоляции 10 мм.

4.1.4 Механический расчет греющей камеры

В соответствии с характером проводимого процесса для аппаратуры подбираем высоколегированную сталь 12X18H10T. Выбор обусловлен высокими требованиями для оборудования, действующего в пищевой и фармацевтической промышленности.

4.1.4.1 Определение толщины стенки греющей камеры

Примем расчетную температуру равной температуре экстракции: $t_P = 60^\circ \text{C}$

Исходя из того, что проектируемый аппарат изготавливается не из стальных отливок [32, с. 15], а из листового проката, поправочный коэффициент η к допускаемым напряжениям должен быть равен единице $\eta = 1$.

Допускаемое напряжения определяется по таблице А.3 [32, с. 25] интерполируя стандартные значения с последующим округлением в меньшую сторону в пределах до 0,5 МПа:

$$t = \begin{pmatrix} 20 \\ 100 \end{pmatrix}; \sigma = \begin{pmatrix} 184 \\ 174 \end{pmatrix};$$

Допускаемое напряжение для стали 12X18H10T при расчетной температуре:

$$\sigma = \text{Floor}(\text{interp}(t, \sigma, t_P), 0,5) = 174 \text{ МПа.} \quad (34)$$

Модуль упругости определяется согласно [32, табл. В.1, с. 50]: $E = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$.

Допускаемое напряжение для стали с учетом поправочного коэффициента:

$$\sigma_D = \eta \cdot \sigma = 1 \cdot 174 = 174,0 = 174,0 \text{ МПа.} \quad (35)$$

Коэффициент запаса прочности для гидравлических испытаний согласно [32, с. 15]

$$n_m = 1,1.$$

Расчетное значение предела текучести при 20 °С для стали 12Х18Н10Т: $R_{el.0} = 276$ МПа.

Допускаемое напряжение для стали при гидравлических испытаниях:

$$\sigma_{II} = Floor\left(\frac{R_{el.0}}{n_m}, 0.5\right) = Floor\left(\frac{276}{1.1}, 0.5\right) = 250.0 = 250.0 \text{ МПа.} \quad (36)$$

По рекомендациям [32, табл. А.3, с. 11], примем: $\sigma_{20} = 184$ МПа.

Рабочее давление в аппарате: $P_{\text{в}} = 0.02$ МПа.

Давление снаружи аппарата: $P_{\text{н}} = 0.1$ МПа.

Плотность воздуха [20, с. 513] $\rho_{\text{н}} = 1.293 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

Расчетное значение внутреннего давления рассчитывается следующим образом:

$$P_{\text{в.расч.}} = P_{\text{в}} + \frac{\rho_{\text{н}} \cdot g \cdot L_{\text{тр}}}{10^9} = 0.02 + \frac{1.293 \cdot 9.81 \cdot 0.3}{10^9} = 0.02 = 0.02 \text{ МПа,} \quad (37)$$

где g – ускорение свободного падения, $\frac{\text{м}}{\text{с}^2}$, $L_{\text{тр}}$ – длина труб, м.

Влияние давления воздуха снаружи минимально, поэтому расчетное значение давления равно рабочему.

Расчетное значение наружного давления рассчитывается следующим образом:

$$P_{\text{н.расч.}} = P_{\text{н}} + \frac{\rho_{\text{в}} \cdot g \cdot L_{\text{тр}}}{10^9} = 0.1 + \frac{998 \cdot 9.81 \cdot 0.3}{10^9} = 0.1 = 0.1 \text{ МПа,} \quad (38)$$

Влияние давления столба жидкости минимально, поэтому расчетное значение давления равняется рабочему.

Пробное давления при гидравлических испытаниях внутри аппарата:

$$P_{\text{пр}} = 1.25 \cdot P_{\text{в.расч.}} \cdot \frac{\sigma_{20}}{\sigma_D} = 1.25 \cdot 0.02 \cdot \left(\frac{184}{174.0}\right) = 0.026 = 0.026 \text{ МПа,} \quad (39)$$

Сварной шов будет выполнен стыковым с двусторонним сплошным проваром выполняемый автоматической сваркой при длине контролируемых швов 100%. Тогда коэффициент сварного шва [32, с. 53] $\phi_p = 1$.

Годовой показатель коррозии $\Pi = 0.1 \frac{\text{мм}}{\text{год}}$.

Прибавки к расчетной стенки толщине для компенсации коррозии цилиндрической обечайки:

$$c_K = \Pi \cdot \tau_{\vartheta} = 0.1 \cdot 10 = 1.0 = 1.0 \text{ мм.} \quad (40)$$

Так как в аппарате отсутствуют высокие скорости среды, прибавку к расчетной толщине стенки для компенсации эрозии примем:

$$c_{\vartheta} = 0 \text{ мм.}$$

Тогда:

$$c_I = c_K + c_{\vartheta} = 1.0 + 0 = 1.0 = 1.0 \text{ мм.} \quad (41)$$

Согласно таблице 3 [33] принимаем: $c_2 = 0.5 \text{ мм.}$

Так как проектируемый аппарат не будет подвержен каким-либо технологическим операциям, можем принять, что $c_3 = 0 \text{ мм.}$

Тогда:

$$c = c_I + c_2 + c_3 = 1.0 + 0.5 + 0 = 1.5 = 1.5 \text{ мм.} \quad (42)$$

Максимальная расчетная толщина стенки из условия прочности:

$$s_{p.n} = \max \left(\frac{P_{в.расч.} \cdot D_{з.к.}}{2 \cdot \sigma_D \cdot \phi_p - P_{в.расч.}}, \frac{P_{н.расч.} \cdot D_{з.к.}}{2 \cdot \sigma_D \cdot \phi_p - P_{н.расч.}}, \frac{P_{нр} \cdot D_{з.к.}}{2 \cdot \sigma_D \cdot \phi_p - P_{нр}} \right) = 0.11 = 0.11 \text{ мм.} \quad (43)$$

Тогда исполнительная толщина стенки:

$$s_n = (s_{p.n} + c) = 0.11 + 1.5 = 1.61 = 1.61 \text{ мм.} \quad (44)$$

Коэффициент В:

$$B = \max \left[1, 0.47 \cdot \left(\frac{P_{н.расч.}}{10^{-5} \cdot E} \right)^{0.067} \cdot \left(\frac{H_{об}}{D_{з.к.}} \right)^{0.4} \right] = 1.0 = 1.0 . \quad (45)$$

Расчетная толщина стенки цилиндрической обечайки из условий устойчивости в соответствии с [34]:

$$s_{p.y} = \max \left[1.06 \cdot \frac{10^{-2} \cdot D_{з.к.}}{B} \cdot \left(\frac{P_{н.расч.}}{10^{-5} \cdot E} \cdot \frac{H_{об}}{D_{з.к.}} \right)^{0.4}, \frac{1.2 \cdot P_{н.расч.}}{2 \cdot \sigma_D - P_{н.расч.}} \right] = 1.14 = 1.14 = 1.14 \text{ мм.} \quad (46)$$

Соответственно, исполнительная толщина стенки по формуле 44:

$$s_y = (s_{p.y} + c) = 1.14 + 1.5 = 2.64 = 2.64 \text{ мм.}$$

Выберем максимальную исполнительную толщину стенки:

$$s = \max(s_n, s_y) = 2.64 \text{ мм.}$$

Согласно требованиям [35], аппараты диаметром 400 мм должны иметь толщину стенки обечайки не менее 4 мм. Согласно этой рекомендации и по конструктивным соображениям принимаем толщину стенки равной: $S = 6$ мм.

Проведем проверку условий применимости формул:

$$Usl_I = \begin{cases} \text{"Условие применимости формул выполняется"} & \text{if } \frac{S - c}{D_{2.к.}} \leq 0.1 \\ \text{"Условие применимости формул не выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_I = \text{"Условие применимости формул выполняется"}$$

Как видим, условия применимости формул выполняется.

4.1.4.2 Расчет цилиндрической обечайки на устойчивость в рабочих условиях

Допускаемое внутреннее избыточное давление вычисляем по формуле:

$$P_{дон} = 2 \cdot \sigma_D \cdot \phi_p \cdot \frac{(S - c)}{D_{2.к.} + (S - c)} = 3.871 \text{ МПа.} \quad (47)$$

В условиях испытаний:

$$P_{дон.и} = 2 \cdot \sigma_{II} \cdot \phi_p \cdot \frac{(S - c)}{D_{2.к.} + (S - c)} = 5.562 \text{ МПа.} \quad (48)$$

Коэффициент запаса устойчивости для рабочих условий согласно [32] $n_y = 2.4$.

Допускаемое наружное давление из условия прочности:

$$P_{дн} = 2 \cdot \sigma_D \cdot \frac{(S - c)}{D_{2.к.} \cdot (S - c)} = 0.87 = 0.87 \text{ МПа.} \quad (49)$$

Коэффициент B_I вычисляют по формуле:

$$B_I = \min \left[1, 9.45 \cdot \frac{D_{2.к.}}{H_{об}} \cdot \sqrt{\frac{D_{2.к.}}{100 \cdot (S - c)}} \right] = 1 \quad (50)$$

Допускаемое наружное давление из условия устойчивости в пределах упругости:

$$P_{дЕ} = \left(\frac{2.08 \cdot E \cdot 10^{-5} \cdot D_{2.к.}}{n_y \cdot B_I \cdot H_{об}} \right) \cdot \left[\frac{100 \cdot (S - c)}{D_{2.к.}} \right]^{2.5} = 3.1 = 3.1 \text{ МПа.} \quad (51)$$

Допускаемое наружное давление:

$$P_{\partial} = \frac{P_{\partial n}}{\sqrt{1 + \left(\frac{P_{\partial n}}{P_{\partial E}}\right)^2}} = \frac{0.87}{\sqrt{1 + \left(\frac{0.87}{3.1}\right)^2}} = 0.838 = 0.838 \text{ МПа.} \quad (52)$$

Осевое сжимающее усилие от давления на днище:

$$F_{o.c.y.} = 0.25\pi \cdot 10^{-6} \cdot (D_{\text{з.к.}}^2 - D_0^2) \cdot P_{\text{н.расч.}} = 0.0118 = 0.0118 \text{ МН,} \quad (53)$$

где D_0 – внутренний диаметр низа аппарата.

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия прочности:

$$F_{\partial.o.c.y} = \pi \cdot (D_{\text{з.к.}} + S - c) \cdot (S - c) \cdot \sigma_D = 995016.0 = 995016.0 \text{ МН.} \quad (54)$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие в пределах упругости из условия устойчивости:

$$F_{dE} = \frac{31 \cdot 10^{-11} \cdot E}{n_y} \cdot D_{\text{з.к.}}^2 \cdot \left[100 \cdot \frac{(S - c)}{D_{\text{з.к.}}} \right]^{2.5} = 5.55 = 5.55 \text{ МН.}$$

$$F_D = \frac{F_{\partial.o.c.y}}{\sqrt{1 + \left(\frac{F_{\partial.o.c.y}}{F_{dE}}\right)^2}} = \frac{1.02\text{e6}}{\sqrt{1 + \left(\frac{1.02\text{e6}}{5.55}\right)^2}} = 5.55 = 5.55 \text{ МН.} \quad (55)$$

Проверим условие устойчивости:

$$Usl_2 = \begin{cases} \text{"Условие устойчивости выполняется"} & \text{if } \frac{P_{\text{н}}}{P_{\partial}} + \frac{F_{o.c.y.}}{F_D} \leq 1 \\ \text{"Условие устойчивости не выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_2 = \text{"Условие устойчивости выполняется"} .$$

4.1.4.3 Расчет толщины стенки конического днища греющей камеры

Половина угла раствора при вершине конической обечайки $\alpha_I = 30^\circ$.

Фактические длины переходных частей $a_I = 200 \text{ мм}$.

Расчетный диаметр гладкой конической обечайки:

$$D_k = D_{\text{з.к.}} - 1.4 \cdot a_I \cdot \sin\left(\frac{\alpha_I \cdot \pi}{180}\right) = 400 - 1.4 \cdot 200 \cdot \sin\left(\frac{30 \cdot \pi}{180}\right) = 260.0 = 260.0 \text{ мм} \quad (56)$$

Внутренний диаметр меньшего основания конической обечайки $D_I = 100$ мм.

Толщина стенки гладкой конической обечайки, нагруженной внутренним избыточным давлением:

$$s_{KL.в} = \frac{P_{в.расч.} \cdot D_{2.к.}}{2 \cdot \sigma_D \cdot \phi_p - P_{в.расч.}} \cdot \left(\frac{1}{\cos\left(\frac{\alpha_I \cdot \pi}{180}\right)} \right) + c = 1.53 = 1.53 \text{ мм} \quad (57)$$

Эффективная длина конической обечайки составляет $l_{rE} = 450$ мм.

Безразмерный коэффициент $B_{Ir} = 1$.

Толщину стенки, нагруженная наружным давлением, в первом приближении вычисляют по формулам с введением эффективных размеров с последующей проверкой по формуле:

$$s_{KL.н} = \max \left[1.06 \cdot \frac{10^{-2} \cdot D_{2.к.}}{B_{Ir}} \cdot \left(\frac{P_{н.расч.}}{10^{-5} \cdot E} \cdot \frac{l_{rE}}{D_{2.к.}} \right)^{0.4}, \frac{1.2 \cdot P_{н.расч.} \cdot D_{2.к.}}{2 \cdot \sigma_D \cdot \phi_p - P_{н.расч.}} \cdot \left(\frac{1}{\cos\left(\frac{\alpha_I \cdot \pi}{180}\right)} \right) \right] + c = 2.84 = 2.84 \text{ мм.} \quad (58)$$

Примем толщину стенки гладкой конической обечайки равной толщине стенки цилиндрической обечайки: $s_{KL} = S = 6$ мм.

Проверка условия применения методики для конической обечайки

$$Usl_3 = \begin{cases} \text{"Условия применения формул НЕ выполняются"} & \text{if } \alpha_I > 70 \\ \text{"Условия применения формул НЕ выполняются"} & \text{if } \frac{s_{KL} \cdot \cos\left(\frac{\alpha_I \cdot \pi}{180}\right)}{D_{2.к.}} \leq 0.001 \\ \text{"Условия применения формул НЕ выполняются"} & \text{if } \frac{s_{KL} \cdot \cos\left(\frac{\alpha_I \cdot \pi}{180}\right)}{D_{2.к.}} \geq 0.05 \\ \text{"Условия применения формул выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$Usl_3 = \text{"Условия применения формул выполняются"} \quad .$

Расчетные длины переходных частей обечаек:

$$a_{1p} = 0.7 \cdot \sqrt{\frac{D_{2.к.}}{\cos\left(\frac{\alpha_I \cdot \pi}{180}\right)} \cdot (s_{KL} - c)} = 31.913 \text{ мм.} \quad (59)$$

$$a_{2p} = 0.7 \cdot \sqrt{D_{2.к.} \cdot (s_{KL} - c)} = 29.698 \text{ мм.}$$

Эффективные размеры конической обечайки вычисляют:

$$D_E = \max \left[\frac{D_{\text{з.к.}} + D_I}{2 \cdot \cos\left(\frac{\alpha_I \cdot \pi}{180}\right)}, \frac{D_{\text{з.к.}}}{\cos\left(\frac{\alpha_I \cdot \pi}{180}\right)} - 0.3 \cdot (D_{\text{з.к.}} + D_I) \cdot \sqrt{\frac{D_{\text{з.к.}} + D_I}{100 \cdot (s_{\text{кл.}} - c)}} \cdot \tan\left(\frac{\alpha_I \cdot \pi}{180}\right) \right] = 371.0 = 371.0 \text{ мм.}$$

$$l_E = \frac{D_{\text{з.к.}} - D_I}{2 \cdot \sin\left(\frac{\alpha_I \cdot \pi}{180}\right)} = \frac{(400 - 100)}{\left(2 \cdot \sin\left(\frac{30 \cdot \pi}{180}\right)\right)} = 300.0 = 300.0 \text{ мм.} \quad (60)$$

Коэффициент вычисляют по формуле:

$$B_{I.} = \min \left[1, 9.45 \cdot \frac{D_E}{l_E} \cdot \sqrt{\frac{D_E}{100 \cdot (S - c)}} \right] = 1. \quad (61)$$

Допускаемое наружное давление из условия прочности:

$$P_{\text{дн.кл.н}} = \frac{2 \cdot \sigma_D \cdot (s_{\text{кл.}} - c)}{\frac{D_{\text{з.к.}}}{\cos\left(\frac{\alpha_I \cdot \pi}{180}\right)} + (s_{\text{кл.}} - c)} = \frac{2 \cdot 174.0 \cdot (6 - 1.5)}{\left[\frac{400}{\cos\left(\frac{30 \cdot \pi}{180}\right)} + (6 - 1.5) \right]} = 3.36 = 3.36 \text{ МПа.} \quad (62)$$

Допускаемое наружное давление из условия устойчивости в пределах упругости:

$$P_E = \frac{2.08 \cdot 10^{-5} \cdot E}{n_y \cdot B_I} \cdot \frac{D_E}{l_E} \cdot \left[\frac{100 \cdot (s_{\text{кл.}} - c)}{D_E} \right]^{2.5} = 3.47 = 3.47 \text{ МПа.} \quad (63)$$

Допускаемое наружное давление вычисляют по формуле:

$$p_d = \frac{P_{\text{дн.кл.н}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{P_{\text{дн.кл.н}}}{P_E} \right)^2}} = \frac{3.36}{\sqrt{1 + \left(\frac{3.36}{3.47} \right)^2}} = 2.41 = 2.41 \text{ МПа.} \quad (64)$$

Проверим условие прочности и устойчивости для конического днища:

$$Usl_4 = \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } P_{\text{в.расч.}} < P_{\text{дн.кл.н}} \\ \text{"Условие прочности не выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_4 = \text{"Условие прочности выполняется"} \quad .$$

$$Usl_5 = \begin{cases} \text{"Условие устойчивости выполняется"} & \text{if } P_{\text{н.расч.}} < P_E \\ \text{"Условие устойчивости не выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_5 = \text{"Условие устойчивости выполняется"} \quad .$$

Проверка условий применимости формул:

$$Usl_6 = \begin{cases} \text{"Условие применимости формул выполняется"} & \text{if } 0.002 \leq \frac{s_{KL} \cdot \cos\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right)}{D_{2.к.}} \leq 0.1 \\ \text{"Условие применимости формул не выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_6 = \text{"Условие применимости формул выполняется"} .$$

Согласно [36] и на основании расчетов подбираем днище с внутренними базовыми размерами:

Таблица 7 – Коническое днище с углом в вершине $\alpha = 60^\circ$ размеры в миллиметрах

D	h	s	a_1	a_2	$\alpha, ^\circ$
400	105	6	40	30	60

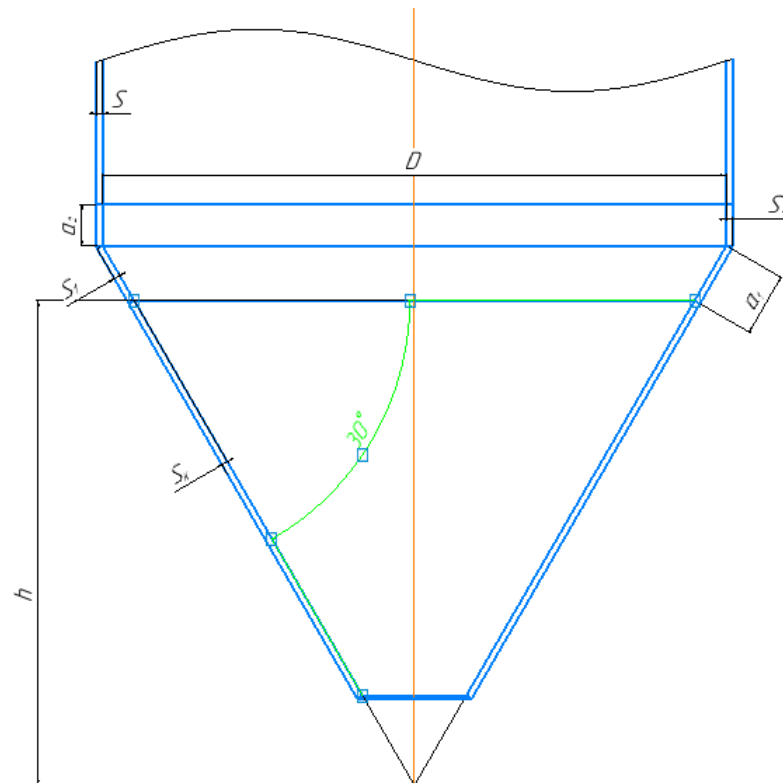


Рисунок 11 – Коническое днище

4.1.4.4 Расчет толщины стенки эллиптической крышки

Расчетная толщина крышки, нагруженные внутренним избыточным давлением, определяется по формуле:

$$s_{RI} = \max \left(\frac{P_{в.расч.} \cdot D_{з.к.}}{2 \cdot \sigma_{Д \cdot \phi_p} - 0.5 \cdot P_{в.расч.}}, \frac{P_{нр} \cdot D_{з.к.}}{2 \cdot \sigma_{H \cdot \phi_p} - 0.5 \cdot P_{нр}} \right) = 0.023 = 0.023 \text{ мм.} \quad (65)$$

Исполнительная толщина стенки по формуле 44:

$$s_K = s_{RI} + c = 0.023 + 1.5 = 1.523 = 1.523 \text{ мм.}$$

Принимаем толщину днища стандартного значения $s_{kp} = S = 6 \text{ мм.}$

Допускаемое внутреннее избыточное давление для крышки:

$$P_{дон.в} = \frac{2 \cdot \sigma_{Д \cdot \phi_p} \cdot (s_{kp} - c)}{D_{з.к.} + 0.5 \cdot (s_{kp} - c)} = 3.893 \text{ МПа.} \quad (66)$$

Для предварительного расчета коэффициент принимают равным $K_{\vartheta} = 0.9$.

Значение необходимой расчетной толщины стенки крышки, нагруженной наружным давлением, может быть предварительно вычислено по формуле:

$$s_{Ip} = \max \left(\frac{K_{\vartheta} \cdot D_{з.к.}}{161} \cdot \sqrt{\frac{n_y \cdot P_{н.расч.}}{10^{-5} \cdot E}}, \frac{1.2 \cdot P_{н.расч.}}{2 \cdot \sigma_{Д}} \right) = 0.775 = 0.775 \text{ мм.} \quad (67)$$

Исполнительная толщина стенки в таком случае будет составлять по формуле 44:

$$s_{K.H} = s_{Ip} + c = 0.775 + 1.5 = 2.27 = 2.27 \text{ мм.}$$

Принимаем толщину днища стандартного значения: $s_{kp} = S = 6 \text{ мм.}$

Допускаемое наружное давление из условия прочности:

$$P_{p.kp} = \frac{2 \cdot \sigma_{Д} \cdot (s_{kp} - c)}{D_{з.к.} + 0.5 \cdot (s_{kp} - c)} = \frac{2 \cdot 174.0 \cdot (6 - 1.5)}{[400 + 0.5 \cdot (6 - 1.5)]} = 3.89 = 3.89 \text{ МПа.} \quad (68)$$

Высота выпуклой части крышки по внутренней поверхности без учета цилиндрической части:

$$H_{\vartheta} = 0.25 \cdot D_{з.к.} = 0.25 \cdot 400 = 100.0 = 100.0 \text{ мм.} \quad (69)$$

Коэффициент определяется по формуле:

$$x_{kp} = 10 \cdot \frac{(s_{kp} - c)}{D_{з.к.}} \cdot \left(\frac{D_{з.к.}}{2H_{\vartheta}} - \frac{2H_{\vartheta}}{D_{з.к.}} \right) = 10 \cdot \left[\frac{(6 - 1.5)}{400} \right] \cdot \left[\frac{400}{(2 \cdot 100.0)} - \frac{2 \cdot 100.0}{400} \right] = 0.169 = 0.169 \text{ мм.} \quad (70)$$

Коэффициент вычисляют по формуле:

$$K_{\vartheta.kp} = \frac{1 + (2.4 + 8x_{kp}) \cdot x_{kp}}{1 + (3.0 + 10x_{kp}) \cdot x_{kp}} = \frac{[1 + (2.4 + 8 \cdot 0.169) \cdot 0.169]}{[1 + (3.0 + 10 \cdot 0.169) \cdot 0.169]} = 0.912 = 0.912 \quad (71)$$

Допускаемое наружное давление из условия устойчивости в пределах упругости:

$$p_{E.кр} = \frac{2.6 \cdot 10^{-5} \cdot E}{n_y} \cdot \left[\frac{100 \cdot (s_{кр} - c)}{K_{э.кр} \cdot D_{э.к.}} \right] = \frac{2.6 \cdot 10^{-5} \cdot (2 \cdot 10^5)}{2.4} \cdot \left[\frac{100 \cdot (6 - 1.5)}{(0.912 \cdot 400)} \right] = 2.67 = 2.67 \text{ МПа.} \quad (72)$$

Допускаемое наружное давление определяется формулой:

$$P_{доп.н} = \frac{p_{р.кр}}{\sqrt{1 + \left(\frac{p_{р.кр}}{p_{E.кр}} \right)^2}} = 2.201 \text{ МПа.} \quad (73)$$

Проверим условия прочности и устойчивости:

$$Usl_{31} = \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } P_{в.расч.} < p_{р.кр} \\ \text{"Условие прочности не выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_{31} = \text{"Условие прочности выполняется"} \quad .$$

$$Usl_{32} = \begin{cases} \text{"Условие устойчивости выполняется"} & \text{if } P_{н.расч.} < p_{E.кр} \\ \text{"Условие устойчивости не выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_{32} = \text{"Условие устойчивости выполняется"} \quad .$$

Проверка условий применимости формул:

$$Usl_{33} = \begin{cases} \text{"Условие применимости формул выполняется"} & \text{if } \frac{s_{кр} - c}{D_{э.к.}} \leq 0.1 \\ \text{"Условие применимости формул не выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_{33} = \text{"Условие применимости формул выполняется"} \quad .$$

Подбираем крышку согласно [37] с параметрами:

Таблица 8 – Эллиптическая крышка

размеры в миллиметрах

D	h_1	h_b	s
400	25	100	6

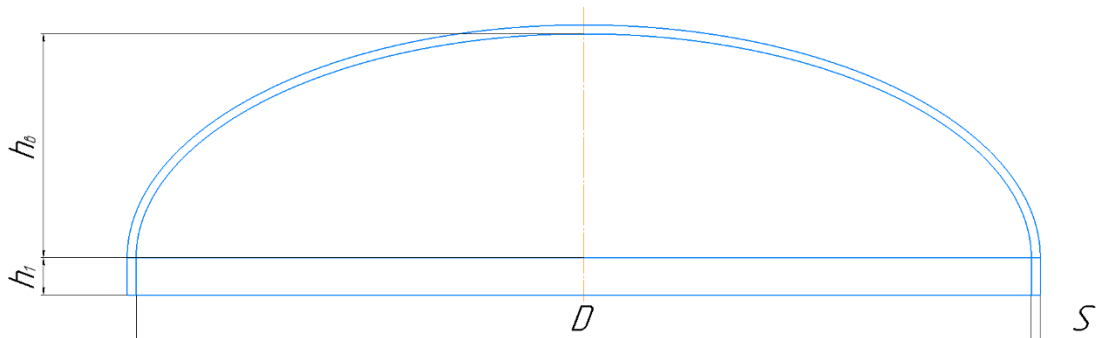


Рисунок 12 – Эллиптическая крышка

4.1.4.5 Расчет толщины трубной решетки

Внутренний диаметр аппарата: $D_{вн.з.к.} = 0.4$ м.

Внешний диаметр аппарата: $D_{н.з.к.} = 0.412$ м.

Площадь поперечного сечения труб определим согласно формуле:

$$F_{т.м.р.} = n_{тр.} \cdot \left(\frac{\pi \cdot d_p^2}{4} - \frac{\pi \cdot d_v^2}{4} \right) = 45 \cdot \left(\frac{\pi \cdot 0.038^2}{4} - \frac{\pi \cdot 0.032^2}{4} \right) = 0.0148 = 0.0148 \text{ м}^2. \quad (74)$$

Согласно [32] расчетное значение коэффициента линейного расширения $\alpha_{т.р.} = 16.6 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

Площадь поперечного сечения корпуса:

$$F_{к.м.р.} = \left(\frac{\pi \cdot D_{н.з.к.}^2}{4} - \frac{\pi \cdot D_{вн.з.к.}^2}{4} \right) = \frac{\pi \cdot 0.412^2}{4} - \frac{\pi \cdot 0.4^2}{4} = 0.00765 = 0.00765 \text{ м}^2. \quad (75)$$

Температурные напряжения в трубах:

$$\sigma_{т.м.р.} = \frac{\alpha_{т.р.} \cdot (t_p - t_k) \cdot E \cdot F_{к.м.р.}}{F_{т.м.р.} + F_{к.м.р.}} = \frac{16.6 \cdot 10^{-6} \cdot (99.1 - 60) \cdot (2 \cdot 10^5) \cdot 0.00765}{(0.0462 + 0.00765)} = 18.4 = 18.4 \text{ МПа}. \quad (76)$$

Температурные напряжения корпуса:

$$\sigma_{к.м.р.} = \frac{\alpha_{т.р.} \cdot (t_p - t_k) \cdot E \cdot F_{т.м.р.}}{F_{т.м.р.} + F_{к.м.р.}} = \frac{16.6 \cdot 10^{-6} \cdot (99.1 - 60) \cdot (2 \cdot 10^5) \cdot 0.0148}{(0.0148 + 0.00765)} = 85.6 = 85.6 \text{ МПа}. \quad (77)$$

Примем максимально возможное температурное усилие:

$$Q_{т.м.р.} = \max(F_{т.м.р.} \cdot \sigma_{т.м.р.}, F_{к.м.р.} \cdot \sigma_{к.м.р.}) = \max(0.0148 \cdot 18.4, 0.00765 \cdot 85.6) = 0.655 = 0.655 \text{ МПа}. \quad (78)$$

Суммарная нагрузка на площадь трубной решетки:

$$Q_{р.т.р.} = P_{в.расч.} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_{вн.з.к.}^2 + P_{н.расч.} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot [(-D_{вн.з.к.})^2] + Q_{т.м.р.} = 0.67 = 0.67 \text{ МПа}. \quad (79)$$

Расчетное давление на трубную решетку определим по формуле:

$$P_{р.т.р.} = \frac{4 \cdot Q_{р.т.р.}}{\pi \cdot D_{вн.з.к.}^2} = \frac{4 \cdot 0.67}{(\pi \cdot 0.4^2)} = 5.33 = 5.33 \text{ МПа}. \quad (80)$$

Толщина трубной решетки определяется уравнением:

$$S_{т.р.} = \frac{D_{з.к.}}{4.7} \cdot \sqrt{\frac{P_{р.т.р.}}{\sigma_{Д \cdot \phi_p}}} + c = \frac{400}{4.7} \cdot \sqrt{\frac{5.33}{(174.0 \cdot 1)}} + 1.5 = 16.4 = 16.4 \text{ мм}. \quad (81)$$

Примем толщину трубной решетки равной 20 мм.

4.1.4.6 Расчет развальцовочного соединения

Площадь трубной решетки:

$$f_{m.р\text{ю}} = 0.866 \cdot \left(\frac{t_m}{1000} \right)^2 - \frac{\pi \cdot d_p^2}{4} = 0.000861 = 0.000861 \text{ м}^2. \quad (82)$$

Осевое усилие от давления на крышку теплообменника:

$$Q_1 = P_{в.расч.} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_{вн.г.к.}^2 = 0.02 \cdot \left(\frac{\pi}{4} \right) \cdot 0.4^2 = 0.00251 = 0.00251 \text{ МПа}. \quad (83)$$

Осевое усилие от давления на трубную решетку со стороны трубного пространства:

$$Q_2 = P_{в.расч.} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \left(D_{вн.г.к.}^2 - n_{тр.} \cdot d_{\text{с}}^2 \right) = 0.00179 = 0.00179 \text{ МПа}. \quad (84)$$

Осевое усилие от распорной силы от давления со стороны межтрубного пространства на трубную решетку:

$$Q_3 = P_{н.расч.} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \left(D_{вн.г.к.}^2 - n_{тр.} \cdot d_p^2 \right) = 0.00746 = 0.00746 \text{ МПа}. \quad (85)$$

Осевое усилие на стенку линзы компенсатора $Q_4 = 0 \text{ МПа}$.

Осевое усилие от давлений в трубном и межтрубном пространствах:

$$Q_{o.y.} = Q_1 - Q_2 + Q_3 + Q_4 = 0.00251 - 0.00179 + 0.00746 + 0 = 0.00818 = 0.00818 \text{ МПа}. \quad (86)$$

Усилие на одну трубу при условии равномерного распределения нагрузки на трубы:

$$q_{p.m} = \frac{Q_{o.y.}}{n_{тр.}} = \frac{0.00818}{45} = 0.000182 = 0.000182 \text{ МПа}. \quad (87)$$

Площадь поперечного сечения стенки трубки:

$$f_m = \frac{\pi}{4} \cdot \left(d_p^2 - d_{\text{с}}^2 \right) = \frac{\pi}{4} \cdot \left(0.038^2 - 0.032^2 \right) = 0.00033 = 0.00033 \text{ мм}. \quad (89)$$

Температурное усилие, приходящееся на одну трубку:

$$q_{m.m} = \sigma_{m.m.p.} \cdot f_m = 18.4 \cdot 0.00033 = 0.00607 = 0.00607 \text{ МПа}. \quad (90)$$

Суммарное усилие:

$$q_c = q_{p.m} + q_{m.m} = 0.000182 + 0.00607 = 0.00625 = 0.00625 \text{ МН}. \quad (91)$$

Допустимая нагрузка от давления на единицу длины окружности $\sigma_{o.д} = 0.04 \text{ МПа}$.

Удельная нагрузка от давления на единицу длины окружности:

$$\sigma_o = \frac{q_{p.m}}{\pi \cdot d_p} = \frac{0.000182}{(\pi \cdot 0.038)} = 0.00152 = 0.00152 \text{ МПа.} \quad (92)$$

Проверим выполнения условия прочности развальцовки:

$$Usl_7 = \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } \sigma_o \leq \sigma_{o,Д} \\ \text{"Условие прочности не выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_7 = \text{"Условие прочности выполняется"} .$$

Удельная нагрузка на развальцовку от действия суммарного усилия с учетом давления и температурных напряжений:

$$\sigma_c = \frac{q_c}{\pi \cdot d_p} = \frac{0.00625}{(\pi \cdot 0.038)} = 0.0524 = 0.0524 \text{ МПа.} \quad (93)$$

Допускаемая удельная нагрузка на развальцовку в 2 раза выше допускаемой удельной нагрузки от давления [38, с. 31] $\sigma_{c,Д} = 0.08$. Тогда условие:

$$Usl_8 = \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } \sigma_c \leq \sigma_{c,Д} \\ \text{"Условие прочности не выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_8 = \text{"Условие прочности выполняется"} .$$

4.1.4.7 Расчет сопряжения цилиндрической и конической обечайки

Расчет ведем согласно [39].

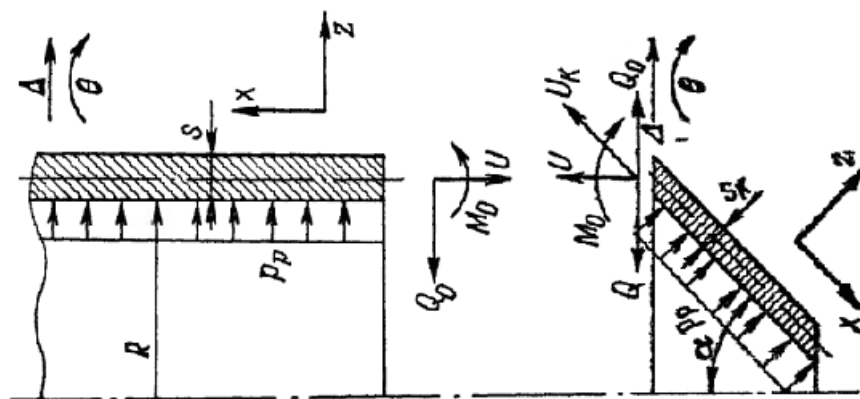


Рисунок 13 – Соединение цилиндрической обечайки с конической обечайкой

Внутренний диаметр низа аппарата $D_0 := 0.1 \text{ м.}$

Внутренний диаметр верха аппарата $D := 0.6 \text{ м.}$

Угол конуса $\alpha := 60 \cdot \text{deg.}$

Толщина стенки $s := 0.006$ м.

Внутреннее давление $P := 0.02 \cdot 10^6$ Па.

Температура стенки, $t := 60$ °С.

Прибавка к расчетной толщине стенки $c := 0.0015$ м.

Марка стали 12X18H10T.

Определяем допускаемые напряжения и другие величины, необходимые для расчета:

- коэффициент, учитывающий вид заготовки, т.к. материал изготовлен из листового проката $\eta := 1$;

- значение модуля продольной упругости для стали 12X18H10T при температуре 600С $E := 2 \cdot 10^{11}$ Па.

- нормативное допускаемое напряжение для стали 12X18H10T при температуре 600С:

$$\sigma := \text{lininterp} \left[\begin{pmatrix} 20 \\ 100 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 184 \cdot 10^6 \\ 174 \cdot 10^6 \end{pmatrix}, t \right] = 1.79 \times 10^8 \text{ Па.}$$

- допускаемое напряжение $\sigma_d := \eta \cdot \sigma$.

$$\sigma_d = 1.79 \times 10^8 \text{ Па.}$$

Увеличиваем допускаемое напряжение для краевой зоны на 30% $\sigma_{kp} := \sigma_d \cdot 1.3$.

$$\sigma_{kp} = 2.327 \times 10^8 \text{ Па.}$$

Радиус цилиндра верха аппарата $R := \frac{D}{2} = 0.3$ м.

Радиус цилиндра низа аппарата $R_0 := \frac{D_0}{2} = 0.05$ м.

Коэффициент Пуассона для стали $\mu := 0.3$.

Коэффициент затухания деформации вдоль образующей оболочки:

- для цилиндрической обечайки аппарата

$$\beta_c := \frac{\sqrt[4]{3 \cdot (1 - \mu^2)}}{\sqrt{R \cdot (s - c)}}. \quad (94)$$

$$\beta_c = 34.984.$$

- для конической обечайки аппарата

$$\beta_k := \frac{\sqrt[4]{3 \cdot (1 - \mu^2)}}{\sqrt{R \cdot \frac{(s - c)}{\cos(\alpha)}}} \quad (95)$$

$$\beta_k = 24.738 \text{ .}$$

Составляем систему уравнений совместности деформаций для соединения цилиндрической обечайки верха аппарата с коническим переходом:

- радиальное перемещение от краевой нагрузки для цилиндрической обечайки

$$\Delta_{cQ_0}(Q_0, M_0) := \frac{2 \cdot \beta_c \cdot R^2}{E \cdot (s - c)} \cdot Q_0 \quad (96)$$

- радиальное перемещение от краевого момента для цилиндрической обечайки

$$\Delta_{cM_0}(M_0) := \frac{2 \cdot \beta_c^2 \cdot R^2}{E \cdot (s - c)} \cdot M_0 \quad (97)$$

- радиальное перемещение от внутреннего давления для цилиндрической обечайки

$$\Delta_{cP} := \frac{(2 - \mu) \cdot R^2}{2 \cdot E \cdot (s - c)} \cdot P \quad (98)$$

- распорная сила для конической обечайки

$$Q := \frac{P \cdot R}{2} \cdot \tan(\alpha) \quad (99)$$

$$Q = 5.196 \times 10^3 \text{ Па.}$$

- радиальное перемещение от краевой нагрузки для конической обечайки

$$\Delta_{kQ_0}(Q_0) := \frac{2 \cdot \beta_k \cdot R^2 \cdot (Q_0 - Q)}{E \cdot (s - c)} \quad (100)$$

- радиальное перемещение от краевого момента для конической обечайки

$$\Delta_{kM_0}(M_0) := \frac{2 \cdot \beta_k^2 \cdot R^2}{E \cdot (s - c) \cdot \cos(\alpha)} \cdot M_0 \quad (101)$$

- радиальное перемещение от внутреннего давления для конической обечайки

$$\Delta_{kP} := \frac{(2 - \mu) \cdot R^2 \cdot P}{2 \cdot E \cdot (s - c) \cdot \cos(\alpha)} \quad (102)$$

- угловое перемещение от краевой нагрузки для цилиндрической обечайки

$$\theta_{cQ_0}(Q_0) := \frac{2 \cdot \beta_c^2 \cdot R^2}{E \cdot (s - c)} \cdot Q_0. \quad (103)$$

- угловое перемещение от краевого момента для цилиндрической обечайки

$$\theta_{cM_0}(M_0) := \frac{4 \cdot \beta_c^3 \cdot R^2}{E \cdot (s - c)} \cdot M_0. \quad (104)$$

- угловое перемещение от внутреннего давления для цилиндрической обечайки
- $\theta_{cP} := 0.$

- угловое перемещение от краевой нагрузки для конической обечайки

$$\theta_{kQ_0}(Q_0) := \frac{2 \cdot \beta_k^2 \cdot R^2 \cdot (Q_0 - Q)}{E \cdot (s - c) \cdot \cos(\alpha)}. \quad (105)$$

- угловое перемещение от краевого момента для конической обечайки

$$\theta_{kM_0}(M_0) := \frac{4 \cdot \beta_k^3 \cdot R^2}{E \cdot (s - c) \cdot (\cos(\alpha))^2} \cdot M_0 \quad (106)$$

- угловое перемещение от внутреннего давления для конической обечайки

$$\theta_{kP} := \frac{3 \cdot R \cdot \sin(\alpha)}{2 \cdot E \cdot (s - c) \cdot (\cos(\alpha))^2} \cdot P. \quad (107)$$

Уравнение совместности радиальных деформаций

$$EI(Q_0, M_0) := \frac{-2 \cdot \beta_c \cdot R^2}{E \cdot (s - c)} \cdot Q_0 + \frac{(2 - \mu) \cdot R^2}{2 \cdot E \cdot (s - c)} \cdot P + \frac{2 \cdot \beta_c^2 \cdot R^2}{E \cdot (s - c)} \cdot M_0 - \frac{2 \cdot \beta_k^2 \cdot R^2 \cdot (Q_0 - Q)}{E \cdot (s - c)} - \frac{2 \cdot \beta_k^2 \cdot R^2}{E \cdot (s - c) \cdot \cos(\alpha)}. \quad (108)$$

$$f(Q_0, M_0) := EI(Q_0, M_0) - E(M_0).$$

Уравнение совместности угловых деформаций

$$CI(M_0, Q_0) := 0 - \frac{4 \cdot \beta_c^3 \cdot R^2}{E \cdot (s - c)} \cdot M_0 + \frac{2 \cdot \beta_c^2 \cdot R^2}{E \cdot (s - c)} \cdot Q_0 - \frac{2 \cdot \beta_k^2 \cdot R^2 \cdot (Q_0 - Q)}{E \cdot (s - c) \cdot \cos(\alpha)} - \frac{3 \cdot R \cdot \sin(\alpha) \cdot P}{2 \cdot E \cdot (s - c) \cdot (\cos(\alpha))^2}. \quad (109)$$

$$C(M_0) := \frac{4 \cdot \beta_k^3 \cdot R^2}{E \cdot (s - c) \cdot (\cos(\alpha))^2} \cdot M_0$$

$$g(Q_0, M_0) := CI(M_0, Q_0) - C(M_0).$$

Решение уравнений совместности деформаций

$$\underline{TOL} := 10^{-25};$$

$$Q_0 := 1;$$

$$M_0 := 1;$$

Given

$$f(Q_0, M_0) = 0;$$

$$g(Q_0, M_0) = 0;$$

$$v := Find(Q_0, M_0);$$

$$v = \begin{pmatrix} 2.6027 \times 10^3 \\ 29.9234 \end{pmatrix};$$

$$Q_o := v_0;$$

$$M_o := v_1.$$

Определяем напряжения на наружной и внутренней поверхностях края оболочки:

- Известные краевая нагрузка и краевой момент:

$$Q_o = 2.603 \times 10^3 \text{ МН/м};$$

$$M_o = 29.923 \text{ МН·м/м}.$$

Меридиональные напряжения для цилиндрической обечайки:

- от краевой нагрузки $\sigma_{mcQo} := 0$.
- от внутреннего давления

$$\sigma_{mcP} := \frac{P \cdot R}{2 \cdot (s - c)}. \quad (110)$$

- от краевого момента

$$\sigma_{mcMo1} := 6 \cdot \frac{M_o}{(s - c)^2}. \quad (111)$$

- от краевого момента с обратным знаком

$$\sigma_{mcMo2} := -6 \cdot \frac{M_o}{(s - c)^2}. \quad (112)$$

Меридиональное напряжение на краю цилиндрической обечайки:

$$\sigma_{mc01} := -\sigma_{mcQo} + \sigma_{mcP} + \sigma_{mcMo1}. \quad (113)$$

$$\sigma_{mc01} = 9.533 \times 10^6 \text{ Па.}$$

$$\sigma_{mc02} := -\sigma_{mcQo} + \sigma_{mcP} + \sigma_{mcMo2} \quad (114)$$

$$\sigma_{mc02} = -8.2 \times 10^6 \text{ Па.}$$

Меридиональные напряжения для конической обечайки:

- от краевой силы

$$\sigma_{mkQo} := \frac{\sin(\alpha) \cdot (Q_o - Q)}{s - c} \quad (116)$$

- от внутреннего давления

$$\sigma_{mkP} := \frac{P \cdot R}{2 \cdot (s - c) \cdot \cos(\alpha)} \quad (117)$$

- от краевого момента

$$\sigma_{mkMo1} := \frac{6 \cdot M_o}{(s - c)^2} \quad (118)$$

- от краевого момента с обратным знаком

$$\sigma_{mkMo2} := \frac{6 \cdot M_o}{-(s - c)^2} \quad (119)$$

Меридиональное напряжение на краю конической обечайки:

$$\sigma_{mk01} := \sigma_{mkQo} + \sigma_{mkP} + \sigma_{mkMo1} \quad (120)$$

$$\sigma_{mk01} = 9.7 \times 10^6 \text{ Па.}$$

$$\sigma_{mk02} := \sigma_{mkQo} + \sigma_{mkP} + \sigma_{mkMo2} \quad (121)$$

$$\sigma_{mk02} = -8.032 \times 10^6 \text{ Па.}$$

Кольцевые напряжения для цилиндрической обечайки:

- от краевой нагрузки

$$\sigma_{tcQo} := \frac{2 \cdot \beta_c \cdot R}{s - c} \cdot Q_o \quad (122)$$

- от внутреннего давления

$$\sigma_{tcP} := \frac{P \cdot R}{s - c} \quad (123)$$

- от краевого момента

$$\sigma_{tcMo1} := \frac{2 \cdot \beta_c^2 \cdot R \cdot M_o}{s - c} + \frac{6 \cdot \mu \cdot M_o}{(s - c)^2}. \quad (124)$$

- от краевого момента с обратным знаком

$$\sigma_{tcMo2} := \frac{2 \cdot \beta_c^2 \cdot R \cdot M_o}{s - c} + \frac{-6 \cdot \mu \cdot M_o}{(s - c)^2}. \quad (125)$$

Кольцевое напряжение на краю цилиндрической обечайки:

$$\sigma_{tc01} := -\sigma_{tcQo} + \sigma_{tcP} + \sigma_{tcMo1}. \quad (126)$$

$$\sigma_{tc01} = -3.264 \times 10^6 \text{ Па.}$$

$$\sigma_{tc02} := -\sigma_{tcQo} + \sigma_{tcP} + \sigma_{tcMo2}. \quad (127)$$

$$\sigma_{tc02} = -8.584 \times 10^6 \text{ Па.}$$

Кольцевые напряжения для конической обечайки:

- от краевой нагрузки:

$$\sigma_{tkQo} := \frac{2 \cdot \beta_k \cdot R \cdot (Q_o - Q)}{s - c}. \quad (128)$$

- от внутреннего давления:

$$\sigma_{tkP} := \frac{P \cdot R}{(s - c) \cdot \cos(\alpha)}. \quad (129)$$

- от краевого момента:

$$\sigma_{tkMo1} := \frac{2 \cdot \beta_k \cdot R \cdot M_o}{(s - c) \cdot \cos(\alpha)} + \frac{6 \cdot \mu \cdot M_o}{(s - c)^2}. \quad (130)$$

- от краевого момента с обратным знаком:

$$\sigma_{tkMo2} := \frac{2 \cdot \beta_k \cdot R \cdot M_o}{(s - c) \cdot \cos(\alpha)} + \frac{-6 \cdot \mu \cdot M_o}{(s - c)^2}. \quad (131)$$

Кольцевое напряжение на краю конической обечайки:

$$\sigma_{tk01} := \sigma_{tkQo} + \sigma_{tkP} + \sigma_{tkMo1}. \quad (132)$$

$$\sigma_{tk01} = -1.468 \times 10^6 \text{ Па.}$$

$$\sigma_{tk02} := \sigma_{tkQo} + \sigma_{tkP} + \sigma_{tkMo2}. \quad (133)$$

$$\sigma_{tk02} = -4.323 \times 10^6 \text{ Па.}$$

Условие прочности для края конической обечайки:

$$\sigma_{kmax} := \max\left(\left|\sigma_{tk01}\right|, \left|\sigma_{tk02}\right|, \left|\sigma_{mk01}\right|, \left|\sigma_{mk02}\right|\right).$$

$$\sigma_{kmax} = 5.307 \times 10^6 \text{ Па.}$$

Условие прочности для края цилиндрической обечайки:

$$\sigma_{cmax} := \max\left(\left|\sigma_{tc01}\right|, \left|\sigma_{tc02}\right|, \left|\sigma_{mc01}\right|, \left|\sigma_{mc02}\right|\right).$$

$$\sigma_{cmax} = 5.203 \times 10^6 \text{ Па.}$$

Условие прочности для края конической обечайки:

$$Prov := \begin{cases} \text{"условие прочности выполняется"} & \text{if } (\sigma_{kp}) \geq \sigma_{kmax} \\ \text{"условие прочности НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Prov = \text{"условие прочности выполняется"} \quad .$$

$$\sigma_{kmax} = 5.307 \times 10^6 \text{ Па.}$$

$$\sigma_{kp} = 2.327 \times 10^8 \text{ Па.}$$

Условие прочности для края цилиндрической обечайки

$$Prov1 := \begin{cases} \text{"условие прочности выполняется"} & \text{if } (\sigma_{kp}) \geq \sigma_{cmax} \\ \text{"условие прочности НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Prov1 = \text{"условие прочности выполняется"} \quad .$$

$$\sigma_{cmax} = 5.203 \times 10^6 \text{ Па.}$$

$$\sigma_{kp} = 2.327 \times 10^8 \text{ Па.}$$

4.1.4.8 Расчет сопряжения цилиндрической обечайки и эллиптического днища

Расчет ведем согласно [39].

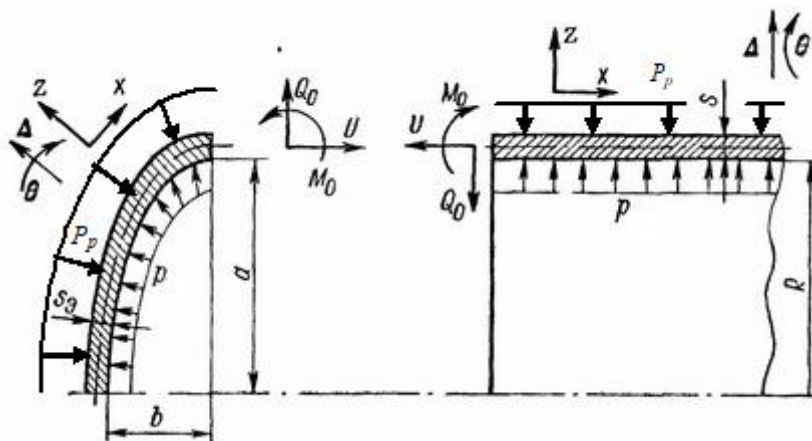


Рисунок 14 – Расчетная схема сопряжения эллиптической крышки и цилиндрической обечайки

Внутренний диаметр аппарата $D = 0.4$ м.

Высота обечайки аппарата $\underline{H} = 0.3$ м.

Толщина стенки обечайки $\underline{s} = 6 \cdot 10^{-3}$ м.

Толщина стенки днища $s_g = 6 \cdot 10^{-3}$ м.

Рабочее избыточное давление в корпусе $P = 0.02 \cdot 10^6$ Па.

Рабочее избыточное давление снаружи аппарата $P_p = 0.1 \cdot 10^6$ Па.

Материал аппарата: 12X18H10T

Рабочая температура среды, $t_c = 60$ °С.

Допускаемое напряжение при температуре 60°С:

$$\sigma_{\partial} = \text{interp} \left[\begin{pmatrix} 20 \\ 100 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 184 \cdot 10^6 \\ 174 \cdot 10^6 \end{pmatrix}, t_c \right] = 1.79 \times 10^8 \text{ Па.}$$

Коэффициент прочности сварных швов $\phi = 1$.

Сумма прибавок к расчетной толщине стенок $\underline{s} = 1.5 \cdot 10^{-3}$ м.

Коэффициент запаса устойчивости для рабочих условий $n_p = 2.4$.

Коэффициент запаса устойчивости для условий испытания $n_u = 1.8$.

Модуль упругости материала аппарата при 60°С $E = 200 \cdot 10^9$ Па.

Коэффициент Пуассона $\mu = 0.3$.

Для определения Q_0 и M_0 составляются уравнения совместности радиальных и угловых деформаций. Сущность этих уравнений в том, что для нормальной работы аппарата в узле сопряжения не должно быть никаких относительных перемещений сопрягаемых деталей.

Уравнения совместности деформаций для места стыка обечайки с эллиптическим днищем:

$$R = \frac{D}{2};$$

$$a = \frac{D}{2};$$

$$b = \frac{D}{4}.$$

Определение коэффициентов уравнений совместности радиальных и угловых деформаций

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{3 \cdot (1 - \mu^2)}{[R \cdot (s - c)]^2}}. \quad (134)$$

$$\beta = 42.847 \text{ 1/м.}$$

$$\beta_{\vartheta} = \sqrt[4]{\frac{3 \cdot (1 - \mu^2)}{[a \cdot (s_{\vartheta} - c)]^2}}. \quad (135)$$

$$\beta_{\vartheta} = 42.847 \text{ 1/м.}$$

$$\Delta_{uPp} = \frac{(2 - \mu) \cdot R^2}{2 \cdot E(s - c)} \cdot P. \quad (136)$$

$$\Delta_{uPp} = 3.778 \times 10^{-6}.$$

$$\Delta_{uP} = \frac{(2 - \mu) \cdot R^2}{2 \cdot E(s - c)} \cdot P. \quad (137)$$

$$\Delta_{uP} = 7.556 \times 10^{-7}.$$

$$\Delta_{uQ0} = 2 \cdot \beta \cdot \frac{R^2}{(s - c) \cdot E}. \quad (138)$$

$$\Delta_{uQ0} = 3.809 \times 10^{-9}.$$

$$\Delta_{uM0} = 2 \cdot \beta^2 \cdot \frac{R^2}{(s - c) \cdot E}. \quad (139)$$

$$\Delta_{uM0} = 1.632 \times 10^{-7}.$$

$$\Delta_{\vartheta Pp} = P_P \cdot \frac{a^2}{[2 \cdot E \cdot (s_{\vartheta} - c)]} \cdot \left(2 - \mu - \frac{a^2}{b^2} \right). \quad (140)$$

$$\Delta_{\vartheta Pp} = -5.111 \times 10^{-6}.$$

$$\Delta_{\vartheta P} = P \cdot \frac{a^2}{[2 \cdot E \cdot (s_{\vartheta} - c)]} \cdot \left(2 - \mu - \frac{a^2}{b^2} \right). \quad (141)$$

$$\Delta_{\vartheta P} = -2.3 \times 10^{-6}.$$

$$\Delta_{\vartheta Q0} = 2 \cdot \beta_{\vartheta} \cdot \frac{a^2}{(s_{\vartheta} - c) \cdot E}. \quad (142)$$

$$\Delta_{\vartheta Q0} = 6.997 \times 10^{-9}$$

$$\Delta_{\vartheta M0} = 2 \cdot \beta_{\vartheta}^2 \cdot \frac{a^2}{(s_{\vartheta} - c) \cdot E}. \quad (143)$$

$$\Delta_{\vartheta M0} = 2.448 \times 10^{-7}.$$

$$\theta_{\vartheta Pp} = 0.$$

$$\theta_{\vartheta P} = 0.$$

$$\theta_{\vartheta Pp} = 0.$$

$$\theta_{\vartheta P} = 0.$$

$$\theta_{\vartheta Q0} = 2 \cdot \beta_{\vartheta}^2 \cdot \frac{R^2}{(s - c) \cdot E}. \quad (144)$$

$$\theta_{\vartheta Q0} = 2.448 \times 10^{-7}.$$

$$\theta_{\vartheta M0} = 4 \cdot \beta_{\vartheta}^3 \cdot \frac{R^2}{(s - c) \cdot E}. \quad (145)$$

$$\theta_{\vartheta M0} = 1.713 \times 10^{-5}.$$

$$\theta_{\vartheta Q0} = 2 \cdot \beta_{\vartheta}^2 \cdot \frac{a^2}{(s_{\vartheta} - c) \cdot E}. \quad (146)$$

$$\theta_{\vartheta Q0} = 2.448 \times 10^{-7}$$

.

$$\theta_{\vartheta M0} = 4 \cdot \beta_{\vartheta}^3 \cdot \frac{a^2}{(s_{\vartheta} - c) \cdot E}. \quad (147)$$

$$\theta_{\vartheta M0} = 1.713 \times 10^{-5}$$

Решение уравнений совместности радиальных и угловых деформаций

$$Q_0 = 0.$$

$$M_0 = 0.$$

Given

$$-\Delta_{\vartheta} u_{Pp} + \Delta_{\vartheta} u_P - \Delta_{\vartheta} u_{Q0} \cdot Q_0 + \Delta_{\vartheta} u_{M0} \cdot M_0 = -\Delta_{\vartheta} P_p + \Delta_{\vartheta} P + \Delta_{\vartheta} Q_0 \cdot Q_0 + \Delta_{\vartheta} M_0 \cdot M_0.$$

$$-\theta_{\vartheta} u_{Pp} + \theta_{\vartheta} u_P - \theta_{\vartheta} u_{Q0} \cdot Q_0 + \theta_{\vartheta} u_{M0} \cdot M_0 = \theta_{\vartheta} P_p - \theta_{\vartheta} P - \theta_{\vartheta} Q_0 \cdot Q_0 - \theta_{\vartheta} M_0 \cdot M_0.$$

$$\underline{V} = \text{Find}(Q_0, M_0).$$

$$\underline{Q_0} = V_0.$$

$$Q_0 = -1.143 \times 10^3 \text{ Н/м.}$$

$$\underline{M_0} = V_1.$$

$$M_0 = 0 \text{ Н·м/м.}$$

Суммарные напряжения на краю эллиптического днища:

- меридиональное:

$$\sigma_{m\vartheta} = -\sigma_{Ppm\vartheta} + \sigma_{Pm\vartheta} + \sigma_{Q0m\vartheta} + \sigma_{M0m\vartheta}. \quad (148)$$

$$\sigma_{m\vartheta 1} = -P_p \cdot \frac{a}{[2 \cdot (s_{\vartheta} - c)]} + P \cdot \frac{a}{[2 \cdot (s_{\vartheta} - c)]} + 0 + 6 \cdot \frac{M_0}{(s_{\vartheta} - c)^2}. \quad (149)$$

$$\sigma_{m\vartheta 1} = -2.667 \times 10^6 \text{ Па.}$$

$$\sigma_{m\vartheta 2} = -P_p \cdot \frac{a}{[2 \cdot (s_{\vartheta} - c)]} + P \cdot \frac{a}{[2 \cdot (s_{\vartheta} - c)]} + 0 - 6 \cdot \frac{M_0}{(s_{\vartheta} - c)^2}. \quad (150)$$

$$\sigma_{m\vartheta 2} = -2.667 \times 10^6 \text{ Па.}$$

$$\sigma_{m\vartheta} = \max(|\sigma_{m\vartheta 1}|, |\sigma_{m\vartheta 2}|).$$

$$\sigma_{m\vartheta} = 2.667 \times 10^6 \text{ Па.}$$

- кольцевое:

$$\sigma_{t\vartheta} = -\sigma_{Ppt\vartheta} + \sigma_{Pt\vartheta} + \sigma_{Q0t\vartheta} + \sigma_{M0t\vartheta} \quad (151)$$

$$\sigma_{t\vartheta 1} = -P_p \cdot a \cdot \frac{\left(2 - \frac{a^2}{b^2}\right)}{[2 \cdot (s_\vartheta - c)]} + P \cdot a \cdot \frac{\left(2 - \frac{a^2}{b^2}\right)}{[2 \cdot (s_\vartheta - c)]} + 2 \cdot Q_0 \cdot \beta_\vartheta \cdot \frac{a}{(s_\vartheta - c)} + 2 \cdot M_0 \cdot \beta_\vartheta^2 \cdot \frac{a}{(s_\vartheta - c)} + 6 \cdot \mu \cdot \frac{M_0}{(s_\vartheta - c)^2} \quad (152)$$

$$\sigma_{t\vartheta 2} = -P_p \cdot a \cdot \frac{\left(2 - \frac{a^2}{b^2}\right)}{[2 \cdot (s_\vartheta - c)]} + P \cdot a \cdot \frac{\left(2 - \frac{a^2}{b^2}\right)}{[2 \cdot (s_\vartheta - c)]} + 2 \cdot Q_0 \cdot \beta_\vartheta \cdot \frac{a}{(s_\vartheta - c)} + 2 \cdot M_0 \cdot \beta_\vartheta^2 \cdot \frac{a}{(s_\vartheta - c)} - 6 \cdot \mu \cdot \frac{M_0}{(s_\vartheta - c)^2} \quad (153)$$

$$\sigma_{t\vartheta 1} = -4.582 \times 10^{-7} \text{ Па.}$$

$$\sigma_{t\vartheta 2} = -4.582 \times 10^{-7} \text{ Па.}$$

$$\sigma_{t\vartheta} = \max\left(\left|\sigma_{t\vartheta 1}\right|, \left|\sigma_{t\vartheta 2}\right|\right).$$

$$\sigma_{t\vartheta} = 4.582 \times 10^{-7} \text{ Па.}$$

Суммарные напряжения на краю цилиндрической обечайки:

- меридиональное:

$$\sigma_{mo} = -\sigma_{Ppmo} + \sigma_{Pmo} - \sigma_{Q0mo} + \sigma_{M0mo} \quad (154)$$

$$\sigma_{mo 1} = -P_p \cdot \frac{R}{[2 \cdot (s - c)]} + P \cdot \frac{R}{[2 \cdot (s - c)]} - 0 + 6 \cdot \frac{M_0}{(s - c)^2} \quad (155)$$

$$\sigma_{mo 2} = -P_p \cdot \frac{R}{[2 \cdot (s - c)]} + P \cdot \frac{R}{[2 \cdot (s - c)]} - 0 - 6 \cdot \frac{M_0}{(s - c)^2} \quad (156)$$

$$\sigma_{mo 1} = -2.667 \times 10^6 \text{ Па.}$$

$$\sigma_{mo 2} = -2.667 \times 10^6 \text{ Па.}$$

$$\sigma_{mo} = \max\left(\left|\sigma_{mo 1}\right|, \left|\sigma_{mo 2}\right|\right).$$

$$\sigma_{mo} = 2.667 \times 10^6 \text{ Па.}$$

- кольцевое:

$$\sigma_{to} = -\sigma_{Ppto} + \sigma_{Pto} - \sigma_{Q0to} + \sigma_{M0to} \quad (157)$$

$$\sigma_{to 1} = -P_p \cdot \frac{R}{(s - c)} + P \cdot \frac{R}{(s - c)} - 2 \cdot Q_0 \cdot \beta \cdot \frac{R}{(s - c)} + 2 \cdot M_0 \cdot \beta^2 \cdot \frac{R}{(s - c)} + 6 \cdot \mu \cdot \frac{M_0}{(s - c)^2} \quad (158)$$

$$\sigma_{to2} = -P \cdot \frac{R}{(s-c)} + P \cdot \frac{R}{(s-c)} - 2 \cdot Q_0 \cdot \beta \cdot \frac{R}{(s-c)} + 2 \cdot M_0 \cdot \beta^2 \cdot \frac{R}{(s-c)} - 6 \cdot \mu \cdot \frac{M_0}{(s-c)^2}. \quad (159)$$

$$\sigma_{to1} = 4.582 \times 10^{-7} \text{ Па.}$$

$$\sigma_{to2} = 4.582 \times 10^{-7} \text{ Па.}$$

$$\sigma_{to} = \max(|\sigma_{to1}|, |\sigma_{to2}|).$$

$$\sigma_{to} = 4.582 \times 10^{-7} \text{ Па.}$$

Допускаемое напряжение на краю элемента:

$$\sigma_{кр.д} = 1.3 \cdot \sigma_{\partial} \quad (160)$$

$$\sigma_{кр.д} = 2.327 \times 10^8 \text{ Па.}$$

Максимальное напряжение на краю:

- эллиптического днища

$$\sigma_{maxэ} = \max(\sigma_{mэ}, \sigma_{tэ}).$$

$$\sigma_{maxэ} = 2.667 \times 10^6 \text{ Па.}$$

- цилиндрической обечайки:

$$\sigma_{maxо} = \max(\sigma_{mо}, \sigma_{tо}).$$

$$\sigma_{maxо} = 2.667 \times 10^6 \text{ Па.}$$

Условие прочности для края эллиптического днища

$$Prov = \begin{cases} \text{"условие прочности выполняется"} & \text{if } (\sigma_{кр.д}) \geq \sigma_{maxэ} \\ \text{"условие прочности НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}.$$

$$Prov = \text{"условие прочности выполняется"}.$$

Условие прочности для края цилиндрической обечайки

$$Prov1 = \begin{cases} \text{"условие прочности выполняется"} & \text{if } (\sigma_{кр.д}) \geq \sigma_{maxо} \\ \text{"условие прочности НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}.$$

$$Prov = \text{"условие прочности выполняется"}.$$

4.1.4.9 Определение необходимости укрепления отверстий в греющей камере

В греющей камере имеются отверстия под штуцера ввода греющего пара, отвода конденсата греющего пара в цилиндрической обечайке, отвода пара из эллиптической крышки и ввода исходного раствора в коническое днище, а также штуцер вывода концентрата из циркуляционной трубы. Проверим необходимость укрепления перечисленных отверстий. Расчет проводим согласно методике, указанной в [40]

4.1.4.9.1 Определение необходимости укрепления отверстий для штуцера ввода греющего пара в греющую камеру

Диаметры укрепляемых элементов $D_{з.к.} = 400$ мм.

Расчетный диаметр отверстия в стенке обечайки:

$$d_{p1} = (d_{н.з.н.} + 2 \cdot c) = 40 + 2 \cdot 1.5 = 43.0 = 43.0 \text{ мм.} \quad (161)$$

Проверка условий применения формул для расчета укрепления отверстий:

$$Usl_9 = \begin{cases} \text{"Отношение диаметров НЕ выполняется"} & \text{if } \left(\frac{d_{p1} - 2 \cdot c}{D_{з.к.}} > 1 \right) \\ \text{"Отношение толщины к диаметру НЕ выполняется"} & \text{if } \left(\frac{S - c}{D_{з.к.}} > 0.1 \right) \\ \text{"Условия применения формул выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_9 = \text{"Условия применения формул выполняются"} .$$

Расчетная толщины стенок укрепляемых элементов:

$$S_{p.y.o.1} = \frac{P_{н.расч.} \cdot D_{з.к.}}{2 \cdot \sigma_{Д \cdot \phi_p} - P_{н.расч.}} = 0.115 \text{ мм.} \quad (162)$$

Расчетную толщину стенки штуцера с круглым поперечным сечением, нагруженного наружным давлением, вычисляют по формуле

$$s_{p1} = \frac{P_{н.расч.} \cdot (d_{н.з.н.} + 2 \cdot c)}{2 \cdot \sigma_{Д \cdot \phi_p} - P_{н.расч.}} = \frac{0.1 \cdot (40 + 2 \cdot 1.5)}{(2 \cdot 174.0 \cdot 1 - 0.1)} = 0.0124 = 0.0124 \text{ мм.} \quad (163)$$

Расчетный диаметр отверстия, не требующего укрепления в стенке цилиндрической обечайки

$$d_{0p.1} = 0.4 \cdot \sqrt{D_{2.к.} \cdot (S - c)} = 16.971 \text{ мм.} \quad (164)$$

Для цилиндрических и конических обечаек по [40] $K_{1.1} = 1$.

Наибольший допустимый диаметр одиночного отверстия, не требующего дополнительного укрепления при наличии избыточной толщины стенки сосуда, вычисляют по формуле:

$$d_{0.1} = \min \left[2 \cdot \left[\left(\frac{S - c}{\frac{P_{\partial} \cdot D_{2.к.}}{2 \cdot K_{1.1} \cdot \sigma_D - P_{\partial}}} \right) - 0.8 \right] \cdot \sqrt{D_{2.к.} \cdot (S - c)}, D_{2.к.} + 2 \cdot c \right] = 327.582 \text{ мм.} \quad (165)$$

$$Usl_{10} = \begin{cases} \text{"необходимо укрепление отверстия"} & \text{if } d_{0.1} < d_{p1} \\ \text{"укрепление отверстия не требуется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_{10} = \text{"укрепление отверстия не требуется"} .$$

4.1.4.9.2 Определение необходимости укрепления отверстий для штуцера вывода конденсата греющего пара из греющей камеры

Диаметры укрепляемых элементов $D_{2.к.} = 400 \text{ мм.}$

Расчетный диаметр отверстия в стенке обечайки по формуле 161:

$$d_{p2} = (d_{н.кон.з.н.} + 2 \cdot c) = 25 + 2 \cdot 1.5 = 28.0 = 28.0 \text{ мм.}$$

Проверка условий применения формул для расчета укрепления отверстий:

$$Usl_{11} = \begin{cases} \text{"Отношение диаметров НЕ выполняется"} & \text{if } \left(\frac{d_{p2} - 2 \cdot c}{D_{2.к.}} > 1 \right) \\ \text{"Отношение толщины к диаметру НЕ выполняется"} & \text{if } \left(\frac{S - c}{D_{2.к.}} > 0.1 \right) \\ \text{"Условия применения формул выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_{11} = \text{"Условия применения формул выполняются"} .$$

Расчетная толщины стенок укрепляемых элементов по формуле 162:

$$S_{p.y.o.2} = \frac{P_{н.расч.} \cdot D_{2.к.}}{2 \cdot \sigma_D \cdot \phi_p - P_{н.расч.}} = 0.115 \text{ мм.}$$

Расчетную толщину стенки штуцера с круглым поперечным сечением, нагруженного наружным давлением, вычисляют по формуле 163

$$s_{p2} = \frac{P_{н.расч.} \cdot (d_{н.кон.г.н.} + 2 \cdot c)}{2 \cdot \sigma_D \cdot \phi_p - P_{н.расч.}} = \frac{0.1 \cdot (25 + 2 \cdot 1.5)}{(2 \cdot 174 \cdot 0.1 - 0.1)} = 0.00805 = 0.00805 \text{ мм.}$$

Расчетный диаметр отверстия, не требующего укрепления в стенке цилиндрической обечайки по формуле 164

$$d_{0p.2} = 0.4 \cdot \sqrt{D_{з.к.} \cdot (S - c)} = 16.971 \text{ мм.}$$

Наибольший допустимый диаметр одиночного отверстия, не требующего дополнительного укрепления при наличии избыточной толщины стенки сосуда, вычисляют по формуле:

Для цилиндрических и конических обечаек по [40] $K_{I.1} = 1$ по формуле 165

$$d_{0.2} = \min \left[2 \cdot \left[\left(\frac{S - c}{\frac{P_{\partial} \cdot D_{з.к.}}{2 \cdot K_{I.1} \cdot \sigma_D - P_{\partial}}} \right) - 0.8 \right] \cdot \sqrt{D_{з.к.} \cdot (S - c)}, D_{з.к.} + 2 \cdot c \right] = 327.582 \text{ мм.}$$

$$Usl_{12} = \begin{cases} \text{"необходимо укрепление отверстия"} & \text{if } d_{0.2} < d_{p2} \\ \text{"укрепление отверстия не требуется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_{12} = \text{"укрепление отверстия не требуется"} .$$

4.1.4.9.3 Определение необходимости укрепления отверстий для штуцера вывода вторичного пара из эллиптической крышки греющей камеры

Расстояние от центра укрепляемого отверстия до эллиптической крышки $x_2 = 0$.

Расчетные диаметры укрепляемых элементов

$$D_{p3} = \frac{D_{з.к.}^2}{2 \cdot H_6} \cdot \sqrt{1 - 4 \cdot \frac{(D_{з.к.}^2 - 4 \cdot H_6^2)}{D_{з.к.}^4}} \cdot x_2^2 = 800.0 = 800.0 \text{ мм.} \quad (166)$$

Расчетный диаметр отверстия соединения штуцера вывода вторичного пара в конической крышке по формуле 161:

$$d_{p3} = (d_{н.втор.н.} + 2 \cdot c) = 100 + 2 \cdot 1.5 = 103.0 = 103.0 \text{ мм.}$$

Проверка условий применения формул для расчета укрепления отверстий:

$$Usl_{13} = \begin{cases} \text{"Отношение диаметров НЕ выполняется"} & \text{if } \left(\frac{d_{p3} - 2 \cdot c}{D_{p3}} > 0.6 \right) \\ \text{"Отношение толщины к диаметру НЕ выполняется"} & \text{if } \left(\frac{S - c}{D_{p3}} > 0.1 \right) \\ \text{"Условия применения формул выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_{13} = \text{"Условия применения формул выполняются"} .$$

Расчетная толщины стенок укрепляемых элементов по формуле 162:

$$S_{p.y.o.3} = \frac{P_{н.расч.} \cdot D_{p3}}{2 \cdot \sigma_{Д \cdot \Phi p} - P_{н.расч.}} = 0.23 \text{ мм.}$$

Расчетную толщину стенки штуцера с круглым поперечным сечением, нагруженного наружным давлением, вычисляют по формуле 163:

$$s_{p3} = \frac{P_{н.расч.} \cdot (d_{н.втор.н.} + 2 \cdot c)}{2 \cdot \sigma_{Д \cdot \Phi p} - P_{н.расч.}} = \frac{0.1 \cdot (100 + 2 \cdot 1.5)}{(2 \cdot 174.0 \cdot 1 - 0.1)} = 0.0296 = 0.0296 \text{ мм.}$$

Коэффициент для выпуклых днищ согласно [40] $K_{1.2} = 2$.

Наибольший допустимый диаметр одиночного отверстия, не требующего дополнительного укрепления при наличии избыточной толщины стенки сосуда, вычисляют по формуле 165:

$$d_{0.3} = \min \left[2 \cdot \left[\left(\frac{S - c}{\frac{P_{\partial} \cdot D_{p3}}{2 \cdot K_{1.2} \cdot \sigma_{Д} - P_{\partial}}} \right) - 0.8 \right] \cdot \sqrt{D_{p3} \cdot (S - c)}, 0.6 D_{p3} + 2 \cdot c \right] = 463.946 \text{ мм.}$$

$$Usl_{14} = \begin{cases} \text{"необходимо укрепление отверстия"} & \text{if } d_{0.3} < d_{p3} \\ \text{"укрепление отверстия не требуется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_{14} = \text{"укрепление отверстия не требуется"} .$$

4.1.4.9.4 Определение необходимости укрепления отверстий для штуцера циркуляционной трубы в коническое днище греющей камеры

Расчетные диаметры укрепляемых элементов:

$$D_{p4} = \frac{D_{2.к.}}{\cos \left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180} \right)} = 461.88 \text{ мм.} \quad (167)$$

Расчетный диаметр отверстия в коническом днище по формуле 161:

$$d_{p4} = (D_{ц.т.вн} + 2 \cdot c) = 100 + 2 \cdot 1.5 = 103.0 = 103.0 \text{ мм.}$$

Проверка условий применения формул для расчета укрепления отверстий:

$$Usl_{15} = \left| \begin{array}{l} \text{"Отношение диаметров НЕ выполняется" if } \left(\frac{d_{p4} - 2 \cdot c}{D_{p4}} > 1 \right) \\ \text{"Отношение толщины к диаметру НЕ выполняется" if } \left(\frac{S - c}{D_{p4}} > \frac{0.1}{\cos\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right)} \right) \\ \text{"Условия применения формул выполняются" otherwise} \end{array} \right|$$

$$Usl_{15} = \text{"Условия применения формул выполняются" .}$$

Расчетная толщины стенок укрепляемых элементов по формуле 162:

$$S_{p.4} = \frac{P_{н.расч.} \cdot D_{p4}}{2 \cdot \sigma_{Д \cdot \phi_p} - P_{н.расч.}} = 0.199 \text{ мм.}$$

Расчетную толщину стенки штуцера с круглым поперечным сечением, нагруженного наружным давлением, вычисляют по формуле 163:

$$s_{p4} = \frac{P_{н.расч.} \cdot (D_{ц.т.вн} + 2 \cdot c)}{2 \cdot \sigma_{Д \cdot \phi_p} - P_{н.расч.}} = \frac{0.1 \cdot (100 + 2 \cdot 1.5)}{(2 \cdot 174 \cdot 0.1 - 0.1)} = 0.0296 = 0.0296 \text{ мм.}$$

Расчетный диаметр отверстия, не требующего укрепления в стенке цилиндрической обечайки по формуле 164

$$d_{0p.4} = 0.4 \cdot \sqrt{D_{p4} \cdot (S - c)} = 18.236 \text{ мм.}$$

Наибольший допустимый диаметр одиночного отверстия, не требующего дополнительного укрепления при наличии избыточной толщины стенки сосуда, вычисляют по формуле 165:

$$d_{0.4} = \min \left[2 \cdot \left[\left(\frac{S - c}{\frac{P_{\partial} \cdot D_{p4}}{2 \cdot K_{L.I} \cdot \sigma_{Д} - P_{\partial}}} \right) - 0.8 \right] \cdot \sqrt{D_{p4} \cdot (S - c)}, D_{з.к.} + 2 \cdot c \right] = 295.076 \text{ мм.}$$

$$Usl_{16} = \left| \begin{array}{l} \text{"необходимо укрепление отверстия" if } d_{0.4} < d_{p4} \\ \text{"укрепление отверстия не требуется" otherwise} \end{array} \right|$$

$$Usl_{16} = \text{"укрепление отверстия не требуется" .}$$

4.1.4.9.5 Определение необходимости укрепления отверстий для штуцера отвода концентрата в циркуляционной трубе

Расчетные диаметры укрепляемых элементов $D_{ц.т.вн} = 100$ мм.

Расчетный диаметр отверстия в циркуляционной трубе по формуле 161:

$$d_{p5} = (d_{н.кон} + 2 \cdot c) = 25 + 2 \cdot 1.5 = 28.0 = 28.0 \text{ мм.}$$

Проверка условий применения формул для расчета укрепления отверстий:

$$Usl_{17} = \begin{cases} \text{"Отношение диаметров НЕ выполняется"} & \text{if } \left(\frac{d_{p5} - 2 \cdot c}{D_{ц.т.вн}} \geq 1 \right) \\ \text{"Отношение толщины к диаметру НЕ выполняется"} & \text{if } \left(\frac{S - c}{D_{ц.т.вн}} \geq 0.3 \right) \\ \text{"Условия применения формул выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_{17} = \text{"Условия применения формул выполняются"} .$$

Расчетная толщины стенок укрепляемых элементов по формуле 162:

$$S_{p5} = \frac{P_{н.расч.} \cdot D_{ц.т.вн}}{2 \cdot \sigma_D \cdot \phi_p - P_{н.расч.}} = 0.029 \text{ мм.}$$

Расчетную толщину стенки штуцера с круглым поперечным сечением, нагруженного наружным давлением, вычисляют по формуле по формуле 163:

$$s_{p5} = \frac{P_{н.расч.} \cdot (d_{p5} + 2 \cdot c)}{2 \cdot \sigma_D \cdot \phi_p - P_{н.расч.}} = \frac{0.1 \cdot (28.0 + 2 \cdot 1.5)}{(2 \cdot 174.0 \cdot 1 - 0.1)} = 0.00891 = 0.00891 \text{ мм.}$$

Расчетный диаметр отверстия, не требующего укрепления в стенке цилиндрической обечайки по формуле 164:

$$d_{0p.5} = 0.4 \cdot \sqrt{D_{ц.т.вн} \cdot (S - c)} = 8.485 \text{ мм.}$$

Наибольший допустимый диаметр одиночного отверстия, не требующего дополнительного укрепления при наличии избыточной толщины стенки сосуда, вычисляют по формуле по формуле 165:

$$d_{0.5} = \min \left[2 \cdot \left[\left(\frac{S - c}{\frac{P_D \cdot D_{ц.т.вн}}{2 \cdot K_{I.I} \cdot \sigma_D - P_D}} \right) - 0.8 \right] \cdot \sqrt{D_{ц.т.вн} \cdot (S - c)}, D_{ц.т.вн} + 2 \cdot c \right] = 103 \text{ мм.}$$

$$Usl_{18} = \begin{cases} \text{"необходимо укрепление отверстия"} & \text{if } d_{0.5} < d_{p5} \\ \text{"укрепление отверстия не требуется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_{18} = \text{"укрепление отверстия не требуется"} .$$

4.1.4.10 Расчет фланцевого соединения для соединения эллиптической крышки и цилиндрической обечайки греющей камеры

Расчет фланцевых соединений проводим согласно методике, изложенной в [41].

Внутренний диаметр фланца $D = 400$ мм.

Толщина тарелки фланца $h = 80$ мм.

Расчетное давление $P = 0,6$ МПа.

Наружный диаметр фланца $D_H = 520$ мм.

Толщина прокладки $h_n = 2$ мм.

Внешний изгибающий момент $M = 0$ Н · мм.

Диаметр окружности расположения болтов $D_{\text{б}} = 480$ мм.

Толщина втулки приварного встык фланца $S_0 = 6$ мм.

Осевая сила $F = 0$ Н.

Расчетный диаметр прокладки $D_{\text{сн}} = 428$ мм.

Наружный диаметр болта $d = 20$ мм.

Сумма прибавок к расчетной толщине стенок $c_0 = 1,5$ мм.

Ширина прокладки $b_n = 30$ мм.

Количество болтов $n = 16$ шт.

Расчетная температура стенки корпуса (штуцера) в месте расположения фланцевого соединения $t = 60$ °С.

Толщина прокладки выбрана согласно рекомендациям [42]. Болты согласно [43]. Материал обечаек и фланцев – сталь 12Х18Н10Т. Материал болтов - сталь 35Х. Материал прокладки - картон КАП по [29]. Фланцы плоские, неизолированные с гладкой уплотнительной поверхностью, которые рекомендуется применять для условных давлений среды до 1,6 МПа, с параметрами согласно [44], приведенными на рисунке 15 и таблице 9.

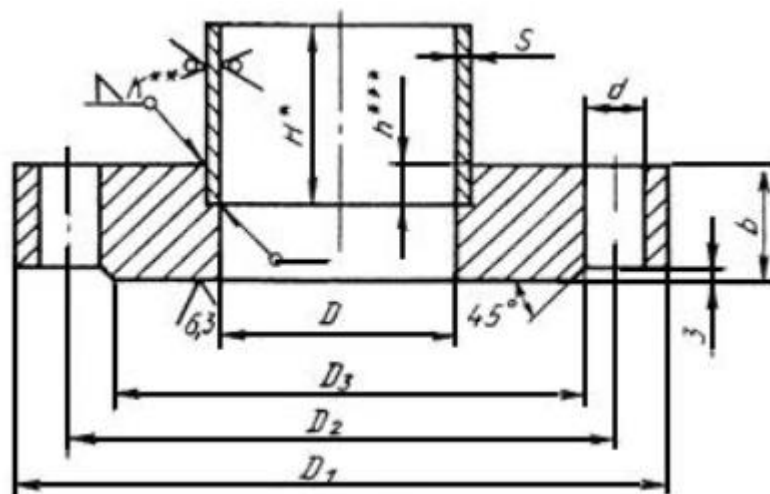


Рисунок 15 – Фланцы с гладкой уплотнительной поверхностью

Таблица 9 – Фланцы с гладкой уплотнительной поверхностью

размеры в мм

D	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	a	D ₅	a ₁	b	S	d	Болты		P _y , МПа
											Диаметр	Количество	
400	520	480	444	452	13,5	443	12	25	6	23	M20	16	0,6

Расчетная температура неизолированных плоских фланцев $t_{\phi} = 0.96 \cdot t$.

$$t_{\phi} = 57.6 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Расчетная температура болтов $t_{\sigma} = 0.85 \cdot t$.

$$t_{\sigma} = 51 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Допускаемые напряжения для болтов из стали 35Х по таблице Г.1 [41]:

- в рабочем состоянии:

$$t = \begin{pmatrix} 20 \\ 100 \end{pmatrix}; \sigma = \begin{pmatrix} 230 \\ 230 \end{pmatrix};$$

$$\sigma_{\partial.\sigma} = \text{Floor}(\text{interp}(t, \sigma, t_{\sigma}), 0.5); \sigma_{\partial.\sigma} = 230 \text{ МПа}.$$

Модуль упругости для болтов из стали 35Х при рабочей температуре согласно ГОСТ [41, таблица Ж.1] $E_{\sigma} = 2.165 \cdot 10^5 \text{ МПа}.$

Допускаемое напряжение для болтов из стали 35Х при 20°С согласно [41, табл. Г.1] $\sigma_{20\sigma} = 230 \text{ МПа}.$

Модуль упругости для болтов из стали 35Х при температуре испытания 20 °С согласно ГОСТ [41, таблица Ж.1] $E_{20\sigma} = 2.18 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Коэффициент линейного расширения стали 35Х при 20-100 °С согласно ГОСТ [41, таблица

$$\text{Ж.2]} \alpha_{\phi} = 13.4 \cdot 10^{-6} \frac{1}{K}.$$

Допускаемые напряжения для фланцев из стали 12Х18Н10Т согласно ГОСТ [32, таблица А.3]

$$t = \left(\frac{20}{100} \right); \sigma = \left(\frac{184}{174} \right); \sigma = \text{Floor}(\text{interp}(t, \sigma, t_{\phi}), 0.5);$$

$$\sigma = 179 \text{ МПа.}$$

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

$$\sigma_{\partial.\phi} = \eta \cdot \sigma; \sigma_{\partial.\phi} = 179 \text{ МПа.}$$

Модуль упругости для стали 12Х18Н10Т при рабочей температуре согласно ГОСТ [32, таблица В.1] $E = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа.}$

Допускаемое напряжение для стали 12Х18Н10Т при $t = 20^\circ \text{C}$ согласно ГОСТ [32, таблица А.3] $\sigma_{20} = 184 \text{ МПа.}$

$$\sigma_{\partial 20} = \eta \cdot \sigma_{20};$$

$$\sigma_{\partial 20} = 184 \text{ МПа.}$$

Модуль упругости для стали 12Х18Н10Т при температуре испытания 20°C согласно ГОСТ [32, таблица В.1] $E_{20} = 1.98 \cdot 10^5 \text{ МПа.}$

Коэффициент линейного расширения стали 12Х18Н10Т при $t = 20 - 100^\circ \text{C}$ согласно ГОСТ [32, таблица Г.1] $\alpha_{\phi} = 16.6 \cdot 10^{-6} \frac{1}{K}.$

Эффективная ширина плоской прокладки $b_n = 15 \text{ мм.}$

Характеристики прокладки согласно таблице И.1 [41] представлена в таблице

Таблица 10 – Характеристики основных типов прокладок

Тип и материал прокладки	Прокладочный коэффициент m	Удельное давление обжатия прокладки $q_{\text{обж}}$, МПа	Допускаемое удельное давление $[q]$, МПа	Коэффициент обжатия $K_{\text{обж}}$	Условный модуль сжатия прокладки $E_n \cdot 10^{-5}$, МПа
Картон асбестового по ГОСТ 2850 при толщине 1–3 мм	2,5	20,0	130,0	0,90	0,02

Усилие, необходимое для смятия прокладки при затяжке:

$$P_{обж} = 0.5\pi \cdot D_{cn} \cdot b_n \cdot m \cdot |P| = 0.5 \cdot \pi \cdot 428 \cdot 30 \cdot 2.5 \cdot |0.6| = 30253.0 = 30253.0 \text{ Н.} \quad (168)$$

Усилие на прокладке в рабочих условиях, необходимое для обеспечения герметичности фланцевого соединения, согласно [41] при действии наружного давления принимается $R_n = 0 \text{ Н}$.

Площадь поперечного сечений для болтов М20 по таблице Д.1 согласно [41]: $f_{\bar{\sigma}} = 225 \text{ мм}^2$.

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

$$A_{\bar{\sigma}} = n \cdot f_{\bar{\sigma}} = 16 \cdot 225 = 3600.0 = 3600.0 \text{ мм}^2. \quad (169)$$

Равнодействующая нагрузка от давления:

$$Q_D = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{cn})^2 \cdot P = \frac{\pi}{4} \cdot 428^2 \cdot 0.6 = 86323.0 = 86323.0 \text{ Н.} \quad (170)$$

Приведенная нагрузка, вызванная воздействием внешней силы и изгибающего момента,

$$Q_{FM} = \max \left(\left| F + \frac{4 \cdot |M|}{D_{cn}} \right|, \left| F - \frac{4 \cdot |M|}{D_{cn}} \right| \right) = \max \left(\left| 0 + \frac{4 \cdot |0|}{428} \right|, \left| 0 - \frac{4 \cdot |0|}{428} \right| \right). \quad (171)$$

$$Q_{FM} = 0 \text{ Н.}$$

Податливость прокладки:

$$y_n = \frac{h_n \cdot K_{обж}}{E_n \cdot \pi \cdot D_{cn} \cdot b_n} = \frac{2 \cdot 0.9}{(200 \cdot \pi \cdot 428 \cdot 30)} = 2.23\text{e-}7 = 2.23\text{e-}7 \cdot \frac{\text{мм}}{\text{Н}} \quad (172)$$

Расстояние между опорными поверхностями гайки и головки болта или опорными поверхностями гаек $L_{\bar{\sigma}0} = 80 \text{ мм}$.

Эффективная длина болта (шпильки) при определении податливости

$$L_{\bar{\sigma}} = L_{\bar{\sigma}0} + 0.28 \cdot d = 80 + 0.28 \cdot 20 = 85.6 = 85.6 \text{ мм} \quad (173)$$

Податливость болтов

$$y_{\bar{\sigma}} = \frac{L_{\bar{\sigma}}}{E_{20\bar{\sigma}} \cdot A_{\bar{\sigma}}} = \frac{85.6}{(2.18 \cdot 10^5 \cdot 3600.0)} = 1.09\text{e-}7 = 1.09\text{e-}7 \cdot \frac{\text{мм}}{\text{Н}} \quad (174)$$

Параметр длины обечайки $l_0 = \sqrt{D \cdot S_0} = \sqrt{400 \cdot 6} = 49.0 = 49.0 \text{ мм}$.

Отношение наружного диаметра тарелки фланца к внутреннему диаметру:

$$K = \frac{D_H}{D} = \frac{520}{400} = 1.3 = 1.3 \cdot \frac{\text{мм}}{\text{Н}} \quad (175)$$

Коэффициенты, зависящие от соотношения размеров тарелки фланца,

$$\begin{aligned}
\beta_T &= \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \log(K)) - 1}{(1.05 + 1.945 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} \\
\beta_U &= \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \log(K)) - 1}{1.36(K^2 - 1) \cdot (K - 1)} \\
\beta_Y &= \frac{1}{(K - 1)} \cdot \left[0.69 + 5.72 \cdot \frac{K^2 \cdot \log(K)}{(K^2 - 1)} \right] \\
\beta_Z &= \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} \\
\beta_T &= 1.796 \text{ .} \\
\beta_U &= 8.299 \text{ .} \\
\beta_Y &= 7.621 \text{ .} \\
\beta_Z &= 3.899 \text{ .}
\end{aligned} \tag{176}$$

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

$$\beta_F = 0.91; \beta_V = 0.55; f = 1.$$

Коэффициент

$$\lambda = \frac{\beta_F \cdot h + l_0}{\beta_T \cdot l_0} + \frac{\beta_V \cdot h^3}{\beta_U \cdot l_0 \cdot (S_0)^2} = 20.6 = 20.6 \text{ .} \tag{177}$$

Угловая податливость фланца при затяжке

$$y_\phi = \frac{0.91 \cdot \beta_V}{E_{20} \cdot \lambda \cdot l_0 \cdot (S_0)^2} = \frac{0.91 \cdot 0.55}{(1.98 \cdot 10^5 \cdot 20.6 \cdot 49.0 \cdot 6^2)} = 6.96 \text{e-}11 = 6.96 \text{e-}11 \frac{1}{\text{Н} \cdot \text{мм}} \tag{178}$$

Угловая податливость фланца, нагруженного внешним изгибающим моментом,

$$y_{\phi_H} = \left(\frac{\pi}{4} \right)^3 \cdot \frac{D_0}{E_{20} \cdot h^3 \cdot D_H} = \left(\frac{\pi}{4} \right)^3 \cdot \left[\frac{480}{(1.98 \cdot 10^5 \cdot 80^3 \cdot 520)} \right] = 4.41 \text{e-}12 = 4.41 \text{e-}12 \frac{1}{\text{Н} \cdot \text{мм}} \tag{179}$$

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

$$C_F = \max \left[1, \sqrt{\frac{\pi \cdot D_{\bar{\sigma}}}{n \cdot \left(2 \cdot d + \frac{6 \cdot h}{m + 0.5} \right)}} \right] = \max \left[1, \sqrt{\frac{\pi \cdot 480}{16 \cdot \left[2 \cdot 20 + \frac{6 \cdot 80}{(2.5 + 0.5)} \right]}} \right] = 1.0 = 1.0 \quad (180)$$

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

$$b = 0.5(D_{\bar{\sigma}} - D_{cn}) = 0.5 \cdot (680 - 628) = 26.0 = 26.0 \text{ мм.} \quad (181)$$

Плечо усилия от действия давления на фланец для всех типов фланцев

$$e = 0.5(D_{cn} - D - S_0) = 0.5 \cdot (428 - 400 - 6) = 11.0 = 11.0 \text{ мм.} \quad (182)$$

Эквивалентная толщина плоских фланцев $S_0 = 6$ мм

Коэффициент жесткости фланцевого соединения для приварных встык и плоских фланцев

$$\gamma = \frac{1}{y_n + y_{\bar{\sigma}} \cdot \frac{E_{20\bar{\sigma}}}{E_{\bar{\sigma}}} + 2 \cdot b^2 \cdot y_{\phi} \cdot \frac{E_{20}}{E}} = 2.35e6 = 2.35e6 \quad (183)$$

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

$$\alpha = 1 - \frac{y_n - 2 \cdot e \cdot y_{\phi} \cdot b}{y_n + y_{\bar{\sigma}} + 2 \cdot b^2 \cdot y_{\phi}} = 1 - \frac{(2.23e-7 - 2 \cdot 11.0 \cdot 6.96e-11 \cdot 26.0)}{(2.23e-7 + 1.09e-7 + 2 \cdot 26.0^2 \cdot 6.96e-11)} = 0.57 = 0.57 \quad (184)$$

Коэффициент жесткости фланцевого соединения, нагруженного внешним изгибающим моментом

$$\alpha_M = \frac{y_{\bar{\sigma}} + 2 \cdot y_{\phi n} \cdot b \cdot \left(b + e - \frac{e^2}{D_{cn}} \right)}{y_{\bar{\sigma}} + y_n \cdot \left(\frac{D_{\bar{\sigma}}}{D_{cn}} \right)^2 + 2 \cdot y_{\phi n} \cdot b^2} = 0.297 = 0.297 \quad (185)$$

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

$$Q_t = \gamma \cdot [2\alpha_{\phi} \cdot h \cdot (t_{\phi} - 20) - 2\alpha_{\bar{\sigma}} \cdot h \cdot (t_{\bar{\sigma}} - 20)] \quad (186)$$

$$Q_t = 7.849 \times 10^4 \text{ Н.}$$

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

$$P_{\bar{b}l} = \max \left[\begin{array}{l} \alpha \cdot (Q_{\partial} + F) + R_n + \frac{4 \cdot \alpha_M \cdot |M|}{D_{cn}} \\ \alpha \cdot (Q_{\partial} + F) + R_n + \frac{4 \cdot \alpha_M \cdot |M|}{D_{cn}} - Q_t \end{array} \right] \quad (187)$$

$$P_{\bar{b}l} = 4.92 \times 10^4 \text{ Н.}$$

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

$$P_{\bar{b}2} = \max(P_{обж}, 0.4 \cdot A_{\bar{b}} \cdot \sigma_{20\bar{b}}) \quad (188)$$

$$P_{обж} = 3.025 \times 10^4 \text{ Н.}$$

$$P_{\bar{b}2} = 3.312 \times 10^5 \text{ Н.}$$

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

$$P_{\bar{b}m} = \max(P_{\bar{b}l}, P_{\bar{b}2}).$$

$$P_{\bar{b}m} = 3.312 \times 10^5 \text{ Н.}$$

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

$$P_{\bar{b}p} = P_{\bar{b}m} + (1 - \alpha) \cdot (Q_{\partial} + F) + Q_t + \frac{4 \cdot (1 - \alpha_M) \cdot |M|}{D_{cn}} \quad (189)$$

$$P_{\bar{b}p} = 4.468 \times 10^5 \text{ Н.}$$

Расчетные напряжения в болтах (шпильках)

- при затяжке

$$\sigma_{\bar{b}l} = \frac{P_{\bar{b}m}}{A_{\bar{b}}} \quad (190)$$

$$\sigma_{\bar{b}l} = 92 \text{ МПа.}$$

- в рабочих условиях

$$\sigma_{\bar{b}2} = \frac{P_{\bar{b}p}}{A_{\bar{b}}} \quad (191)$$

$$\sigma_{\bar{b}2} = 124.115 \text{ МПа.}$$

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

$$Usl_1 = \begin{cases} \text{"Условия прочности в при затяжке НЕ выполняются"} & \text{if } \sigma_{\delta 1} > \sigma_{20\delta} \\ \text{"Условия прочности в рабочих условиях НЕ выполняются"} & \text{if } \sigma_{\delta 2} > \sigma_{\delta.\delta} \\ \text{"Условия прочности выполняются"} & otherwise \end{cases}$$

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

$$\sigma_{\delta 1} = 92 \text{ МПа.}$$

$$\sigma_{20\delta} = 230 \text{ МПа.}$$

$$\sigma_{\delta 2} = 124.115 \text{ МПа.}$$

$$\sigma_{\delta.\delta} = 230 \text{ МПа.}$$

Удельное давление на прокладку

$$q = \frac{\max(P_{\delta M}, P_{\delta p})}{\pi \cdot D_{cn} \cdot b_n} \quad (192)$$

$$q = 11.077 \text{ МПа.}$$

Условие прочности прокладки:

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

$$Usl_2 = \text{"Условие прочности прокладки выполняется"} \quad .$$

Расчетный изгибающий момент, действующий на приварной встык фланца или плоский фланец при затяжке,

$$M_M = C_F \cdot P_{\delta M} \cdot b \quad (193)$$

$$M_M = 8.611 \times 10^6 \text{ Н} \cdot \text{мм.}$$

Расчетный изгибающий момент, действующий на фланец в рабочих условиях

$$M_p = C_F \cdot \max[P_{\delta p} \cdot b + (Q_{\delta} + Q_{FM}) \cdot e, |Q_{\delta} + Q_{FM}| \cdot e] \quad (194)$$

$$M_p = 1.257 \times 10^7 \text{ Н} \cdot \text{мм.}$$

Расчетные напряжения во фланце при затяжке:

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

$$\sigma_{\theta M} = \frac{M_M}{\lambda \cdot (S_{\theta} - c_o)^2 \cdot D} \quad (195)$$

$$\sigma_{\theta M} = 51.607 \text{ МПа.}$$

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

- радиальное напряжение

$$\sigma_{R_M} = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + l_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot l_0 \cdot D} \cdot M_M \quad (196)$$

$$\sigma_{R_M} = 0.486 \text{ МПа.}$$

- окружное напряжение

$$\sigma_{T_M} = \frac{\beta_Y \cdot M_M}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_{R_M} \quad (197)$$

$$\sigma_{T_M} = 23.741 \text{ МПа.}$$

Расчетные напряжения во фланце в рабочих условиях:

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

$$\sigma_{\theta p} = \frac{M_p}{\lambda \cdot (S_0 - c_o)^2 \cdot D} \quad (198)$$

$$\sigma_{\theta p} = 75.313 \text{ МПа.}$$

- максимальные меридиональные мембранные напряжения в обечайке плоского фланца

$$\sigma_{\theta_{mp}} = \max \left[\frac{Q_\partial + F + \frac{4|M|}{D_{cn}}}{\pi \cdot (D + S_0) \cdot (S_0 - c_o)}, \frac{Q_\partial + F - \frac{4|M|}{D_{cn}}}{\pi \cdot (D + S_0) \cdot (S_0 - c_o)} \right] \quad (199)$$

$$\sigma_{\theta_{mp}} = 15.04 \text{ МПа.}$$

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

- радиальное напряжение

$$\sigma_{R_p} = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + l_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot l_0 \cdot D} \cdot M_p \quad (200)$$

$$\sigma_{R_p} = 0.709 \text{ МПа.}$$

- окружное напряжение

$$\sigma_{Tp} = \frac{\beta_Y \cdot M_p}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_{Rp} \quad (201)$$

$$\sigma_{Tp} = 34.646 \text{ МПа.}$$

Проверка условий статической прочности фланцев

При расчете с учетом стесненности температурных деформаций $K_T = 1.3$.

$$Usl_3 = \begin{cases} PR_1 & \text{if } \max(|\sigma_{0M} + \sigma_{Rp}|, |\sigma_{0M} + \sigma_{Tp}|) > K_T \cdot \sigma_{20} \\ PR_2 & \text{if } \max \left(\begin{pmatrix} |\sigma_{0p} - \sigma_{0Mp} + \sigma_{Tp}| \\ |\sigma_{0p} - \sigma_{0Mp} + \sigma_{Rp}| \\ |\sigma_{0p} + \sigma_{0Mp}| \end{pmatrix} \right) > K_T \cdot \sigma_{\partial.\phi} \\ PR_3 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_3 = \text{"Условия статической прочности выполняются"}$$

$$\max(|\sigma_{0M} + \sigma_{Rp}|, |\sigma_{0M} + \sigma_{Tp}|) = 75.348 \text{ МПа.}$$

$$K_T \cdot \sigma_{20} = 239.2 \text{ МПа.}$$

$$\max \left(\begin{pmatrix} |\sigma_{0p} - \sigma_{0Mp} + \sigma_{Tp}| \\ |\sigma_{0p} - \sigma_{0Mp} + \sigma_{Rp}| \\ |\sigma_{0p} + \sigma_{0Mp}| \end{pmatrix} \right) = 94.919 \text{ МПа.}$$

$$K_T \cdot \sigma_{\partial.\phi} = 232.7 \text{ МПа.}$$

Угол поворота приварного встык фланца, плоского фланца

$$\Theta = M_p \cdot y_\phi \cdot \frac{E_{20}}{E} \quad (202)$$

$$\Theta = 8.659 \times 10^{-4}.$$

Допустимый угол поворота плоского фланца $\Theta_\partial = 0.013$.

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

$$Usl_P = \text{"Условие поворота плоского фланца выполняется"}$$

В связи с тем, что фланцевое соединение будет испытывать много циклов разборки и сборки, что обусловлено технологической необходимостью, следует провести расчет фланцевого

соединения на малоцикловую усталость и на прочность при малоцикловых нагрузках. Первоначальный расчет проводим согласно требованиям и указаниям раздела 10 [41]:

Размах условных упругих напряжений на наружной и внутренней поверхностях втулки приварных встык фланцев с прямой втулкой, плоских фланцев и бурта свободных фланцев в сечении S_0 в условиях затяжки вычисляют по формулам:

- меридиональное напряжение:

$$\sigma_{01M} = \sigma_{0M} = 51.607 \text{ МПа.}$$

$$\sigma_{02M} = -\sigma_{0M} = -51.607 \text{ МПа.}$$

- окружное напряжение:

$$\sigma_{03M} = \sigma_{TM} = 23.741 \text{ МПа.}$$

- окружное напряжение:

$$\sigma_{05M} = \sigma_{RM} = 0.486 \text{ МПа.}$$

Размах условных упругих напряжений на наружной и внутренней поверхностях втулки приварных встык фланцев с прямой втулкой, плоских фланцев и бурта свободных фланцев в сечении вычисляют по формулам:

- меридиональное напряжение:

$$\sigma_{01p} = \sigma_{0p} + \sigma_{0mp} = 90.352 \text{ МПа} \quad (203)$$

$$\sigma_{02p} = -\sigma_{0p} + \sigma_{0mp} = -60.273 \text{ МПа} \quad (204)$$

- окружное напряжение

$$\sigma_{03p} = \sigma_{Tp} = 34.646 \text{ МПа.}$$

- окружное напряжение

$$\sigma_{05p} = \sigma_{Rp} = 0.709 \text{ МПа.}$$

Расчетные амплитуды приведенных условных упругих напряжений при затяжке

$$\sigma_a = \frac{1.5 \cdot \max(|\sigma_{01M}|, |\sigma_{02M} - \sigma_{03M}|, |\sigma_{02M} - \sigma_{05M}|)}{2} = 56.5 = 56.5 \text{ МПа} \quad (205)$$

Для болтов амплитуду приведенных условных упругих напряжений при затяжке вычисляют по формуле:

$$\sigma_{a.b} = \frac{1.8 \cdot \sigma_{b1}}{2} = 82.8 \text{ МПа} \quad (206)$$

Коэффициент, определенный по рисунку 4 [41] $\alpha_\sigma = 1.5$.

Для плоских фланцев амплитуду приведенных условных упругих напряжений в рабочих условиях вычисляют по формуле:

$$\sigma_{a.p} = \frac{\max(|\sigma_{01p}|, |\sigma_{01p} - \sigma_{03p}|, |\sigma_{01p} - \sigma_{05p}|, |\sigma_{02p}|, |\sigma_{02p} - \sigma_{03p}|, |\sigma_{02p} - \sigma_{05p}|)}{2} = 67.76 \text{ МПа} \quad (207)$$

Коэффициент определяется по [45] в таблице 2 для приварных плоских фланцев к оболочке $\eta_{\sigma} = 3$.

Для болтов амплитуду приведенных условных упругих напряжений в рабочих условиях вычисляют по формуле:

$$\sigma_{a.p.\sigma} = \frac{\eta_{\sigma} \cdot \sigma_{\sigma 2}}{2} = 186.0 = 186.0 \text{ МПа} \quad (208)$$

Расчет на прочность при малоцикловых нагрузках проводим согласно [45] по упрощенной методике, представленной в разделе 6. Коэффициенты из таблицы 3 [45] $A = 0.6 \cdot 10^5$.

Расчетное значение временного сопротивления при расчетной температуре для жаропрочных, жаростойких и коррозионностойких сталей аустенитного класса согласно [32] таблице Б.9 $R_{mt} = 520 \text{ МПа}$.

$$\begin{aligned} B &= 0.4 \cdot R_{mt} = 0.4 \cdot 520 = 208.0 = 208.0 \text{ МПа;} \\ C_t &= \frac{2300 - t}{2300} = \frac{(2300 - 60)}{2300} = 0.974 = 0.974 \end{aligned} \quad (209)$$

Для стальных сосудов коэффициент запаса прочности по числу циклов и коэффициенты запаса прочности по напряжениям должны соответствовать [45]

$$\begin{aligned} n_N &= 10; \\ n_{\sigma} &= 2. \end{aligned}$$

Примем, что в течении всего срока эксплуатации аппаратуры, т.е. 10 лет, ежедневно будет проводиться сборка-разборка фланцевого соединения в начале и в конце смены. Тогда циклов сборки-разборки будет:

$$N_{C.} = 365 \cdot \tau \cdot 2 = 365 \cdot 10 \cdot 2 = 7300.0 = 7300.0 \text{ циклов.} \quad (210)$$

Допускаемую амплитуду напряжений при затяжке вычисляют по формуле:

$$\sigma_{a.\sigma} = C_t \cdot \frac{A}{n_N \cdot N_{C.}} + \frac{B}{n_{\sigma}} = 0.974 \cdot \left[\frac{0.6 \cdot 10^5}{(10 \cdot 7300.0)} \right] + \frac{208.0}{2} = 105.0 = 105.0 \text{ МПа.} \quad (211)$$

Допускаемое число циклов сборок-разборок вычисляют по формуле:

$$N_{\partial} = \frac{1}{n_N} \cdot \left(\frac{A \cdot C_t}{B} \right)^2 = \frac{1}{10} \cdot \left[\frac{0.6 \cdot 10^5 \cdot 0.974}{\left(56.5 - \frac{208.0}{2} \right)} \right]^2 = 151367.0 = 151367.0 \text{ циклов.} \quad (212)$$

Допускаемое число циклов сборок-разборок вычисляют по формуле:

$$N_{\partial.\delta} = \frac{1}{n_N} \cdot \left(\frac{A \cdot C_t}{B} \right)^2 = \frac{1}{10} \cdot \left[\frac{0.6 \cdot 10^5 \cdot 0.974}{\left(82.8 - \frac{208.0}{2} \right)} \right]^2 = 759886.0 = 759886.0 \text{ циклов.} \quad (213)$$

Число циклов изменения режима примем равным $N_P = 10000$ циклов.

Допускаемую амплитуду напряжений в рабочих условиях вычисляют по формуле:

$$\sigma_{a.\partial.p} = C_t \cdot \frac{A}{n_N \cdot N_P} + \frac{B}{n_{\sigma}} = 0.974 \cdot \left[\frac{0.6 \cdot 10^5}{(10 \cdot 10000)} \right] + \frac{208.0}{2} = 105.0 = 105.0 \text{ МПа.} \quad (214)$$

Допускаемое число циклов изменения режима эксплуатации вычисляют по формуле:

$$N_{\partial.p} = \frac{1}{n_N} \cdot \left(\frac{A \cdot C_t}{B} \right)^2 = \frac{1}{10} \cdot \left[\frac{0.6 \cdot 10^5 \cdot 0.974}{\left(105.0 - \frac{208.0}{2} \right)} \right]^2 = 3.42e8 = 3.42e8 \text{ циклов.} \quad (215)$$

Допускаемое число циклов изменения режима эксплуатации вычисляют по формуле:

$$N_{\partial.p.\delta} = \frac{1}{n_N} \cdot \left(\frac{A \cdot C_t}{B} \right)^2 = \frac{1}{10} \cdot \left[\frac{0.6 \cdot 10^5 \cdot 0.974}{\left(186.0 - \frac{208.0}{2} \right)} \right]^2 = 50791.0 = 50791.0 \text{ циклов.} \quad (216)$$

Проверим условие прочности для заданного числа циклов сборок-разборок и изменений режима эксплуатации для фланцевого соединения:

$$Us11 = \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } \frac{N_C}{N_{\partial}} + \frac{N_P}{N_{\partial.p}} \leq 1 \\ \text{"Условие прочности не выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$Us11 = \text{"Условие прочности выполняется"} \quad .$

Проверим условие прочности для заданного числа циклов сборок-разборок и изменений режима эксплуатации для болтов:

$$Us12 = \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } \frac{N_C}{N_{\partial.\delta}} + \frac{N_P}{N_{\partial.p.\delta}} \leq 1 \\ \text{"Условие прочности не выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$Usl2 = \text{"Условие прочности выполняется"} \quad .$

4.1.4.11 Подбор опор для греющей камеры

Наружный диаметр греющей камеры $D_{нар.г.к.} = 0.412 \text{ м.}$

Внутренний диаметр греющей камеры $D_{вн.г.к.} = 0.4 \text{ м.}$

Плотность стали 12X18H10T [46] $\rho_{ст} = 7920 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$

Высота обечайки греющей камеры $H_{к.г.к.} = 0.3 \text{ м.}$

Масса обечайки составит:

$$m_{об} = 0.785 \cdot (D_{нар.г.к.}^2 - D_{вн.г.к.}^2) \cdot H_{к.г.к.} \cdot \rho_{ст} = 18.2 = 18.2 \text{ кг.} \quad (217)$$

Масса конического днища греющей камеры согласно [36] $m_{к.д.г.к.} = 16 \text{ кг.}$

Масса эллиптической крышки греющей камеры согласно [37] $m_{э.к.г.к.} = 10 \text{ кг.}$

Масса аппарата с учетом вспомогательных средств (штуцеров, фланцев) составляет:

$$m_k = (m_{об} + m_{к.д.г.к.} + m_{э.к.г.к.}) \cdot 1.2 = 53.04 \text{ кг.} \quad (218)$$

Масса воды в аппарате:

$$m_в = 0.785 \cdot D_{вн.г.к.}^2 \cdot H_{к.г.к.} \cdot \rho_в = 37.6 = 37.6 \text{ кг.} \quad (219)$$

Общая масса тогда будет составлять:

$$m_{max} = m_k + m_в = 90.64 = 90.64 \text{ кг.} \quad (220)$$

Нагрузка от массы аппарата, воды и вспомогательных средств на 3 опоры типа 2 согласно [47] составляет:

$$G_{г.к.} = \frac{m_{max} \cdot g \cdot 10^{-3}}{3} = 0.296 \text{ кН.} \quad (221)$$

Внешний вид опоры представлен на рисунке 16, размеры приведены в таблице 10.

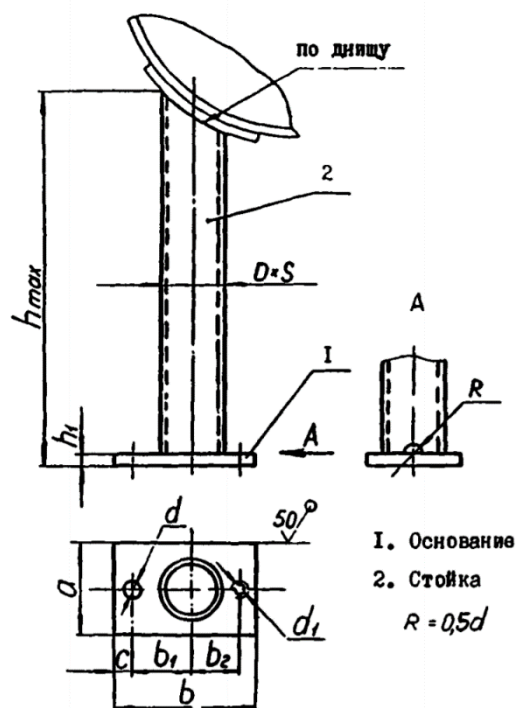


Рисунок 16 – Опора для греющей камеры

Таблица 11 – Размеры опоры

размеры в мм

Нагрузка на опору, кН, не более	$D \times S$	a	b	b_1	b_2	c	h_{max}	h_1	d	d_1
10	57x3,5	110	170	70	50	25	1200	14	19	M16

4.1.5 Механический расчет сепаратора

Исходя из условий эксплуатации аппаратуры следует принять материал для изготовления сепаратора идентичным материалу греющей камеры. Выбор материала для греющей камеры описан в разделе 2.1.4.

4.1.5.1 Определение толщины стенки сепаратора

Диаметр сепаратора $D_{cen} = 600$ мм.

Высота цилиндрической обечайки сепаратора $H_{cen} = 900$ мм.

Расчетное значение внутреннего давления рассчитывается следующим образом по формуле 37:

$$P_{в.расч.цен} = P_в + \frac{\rho_в \cdot g \cdot H_{цен}}{10^9} = 0.02 + \frac{998 \cdot 9.81 \cdot 900}{10^9} = 0.0288 = 0.0288 \text{ МПа.}$$

Расчетное значение наружного давления рассчитывается следующим образом по формуле 38:

$$P_{н.расч.цен} = P_н + \frac{\rho_в \cdot g \cdot H_{цен}}{10^9} = 0.1 + \frac{998 \cdot 9.81 \cdot 900}{10^9} = 0.109 = 0.109 \text{ МПа.}$$

Пробное давление при гидравлических испытаниях внутри аппарата по формуле 39:

$$P_{пр.цен} = 1.25 \cdot P_{в.расч.} \cdot \frac{\sigma_{20}}{\sigma_D} = 1.25 \cdot 0.02 \cdot \left(\frac{184}{174.0} \right) = 0.026 = 0.026 \text{ МПа.}$$

Максимальная исполнительная толщина стенки из условия прочности по формуле 43:

$$s_{p.цен} = \max \left(\frac{P_{в.расч.цен} \cdot D_{цен}}{2 \cdot \sigma_D \cdot \phi_p - P_{в.расч.цен}}, \frac{P_{н.расч.цен} \cdot D_{цен}}{2 \cdot \sigma_D \cdot \phi_p - P_{н.расч.цен}}, \frac{P_{пр.цен} \cdot D_{цен}}{2 \cdot \sigma_D \cdot \phi_p - P_{пр.цен}} \right) = 0.19 = 0.19 \text{ мм.}$$

Исполнительная толщина стенки определяется по формуле 44

$$s_{н.цен} = (s_{p.цен} + c) = 0.19 + 1.5 = 1.69 = 1.69 \text{ мм.}$$

Коэффициент В по формуле 45

$$B_{цен} = \max \left[1, 0.47 \cdot \left(\frac{P_{н.расч.цен}}{10^{-5} \cdot E} \right)^{0.067} \cdot \left(\frac{H_{цен}}{D_{цен}} \right)^{0.4} \right] = 1.0 = 1.0 .$$

Расчетная толщина стенки цилиндрической обечайки, нагруженной наружным давлением, из условий устойчивости в соответствии с [34] по формуле 46:

$$s_{p.y.цен} = \max \left[1.06 \cdot \frac{10^{-2} \cdot D_{цен}}{B_{цен}} \cdot \left(\frac{P_{н.расч.цен}}{10^{-5} \cdot E} \cdot \frac{H_{цен}}{D_{цен}} \right)^{0.4}, \frac{1.2 \cdot P_{н.расч.цен}}{2 \cdot \sigma_D - P_{н.расч.цен}} \right] = 2.34 = 2.34 = 2.34 \text{ мм.}$$

Соответственно, исполнительная толщина стенки по формуле 44:

$$s_{y.цен} = (s_{p.y.цен} + c) = 2.34 + 1.5 = 3.84 = 3.84 \text{ мм.}$$

Выберем максимальную из рассчитанных:

$$s_{цен} = \max(s_{н.цен}, s_{y.цен}) = 3.84 \text{ мм.}$$

Согласно требованиям [35], аппараты диаметром 600 мм должны иметь толщину стенки обечайки не менее 6 мм. Исходя из этого принимаем $S_{цен} = 6 \text{ мм.}$

Проверка условий применимости формул:

$$Usl_{I9} = \begin{cases} \text{"Условие применимости формул выполняется"} & \text{if } \frac{S_{cen} - c}{D_{cen}} \leq 0.1 \\ \text{"Условие применимости формул не выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_{I9} = \text{"Условие применимости формул выполняется"} .$$

4.1.5.2 Расчет цилиндрической обечайки на устойчивость в рабочих условиях

Допускаемое внутреннее избыточное давление вычисляем по формуле 47:

$$P_{\partial n.cen} = 2 \cdot \sigma_{\Phi} \cdot p \cdot \frac{(S_{cen} - c)}{D_{cen} + (S_{cen} - c)} = 2.59 = 2.59 \text{ МПа.}$$

В условиях испытаний по формуле 48:

$$P_{\partial n.u.cen} = 2 \cdot \sigma_{II} \cdot p \cdot \frac{(S_{cen} - c)}{D_{cen} + (S_{cen} - c)} = 3.72 = 3.72 \text{ МПа.}$$

Расчет на устойчивость цилиндрической обечайки в рабочих условиях:

Допускаемое наружное давление из условия прочности по формуле 49:

$$P_{\partial n.cen} = 2 \cdot \sigma_{\Phi} \cdot \frac{(S_{cen} - c)}{D_{cen} \cdot (S_{cen} - c)} = 0.58 = 0.58 \text{ МПа.}$$

Коэффициент вычисляют по формуле 50

$$B_{Icen} = \min \left[1, 9.45 \cdot \frac{D_{cen}}{H_{cen}} \cdot \sqrt{\frac{D_{cen}}{100 \cdot (S_{cen} - c)}} \right] = 1 .$$

Допускаемое наружное давление из условия устойчивости в пределах упругости по формуле 51:

$$P_{\partial E.cen} = \left(\frac{2.08 \cdot E \cdot 10^{-5} \cdot D_{cen}}{n_y \cdot B_{Icen} \cdot H_{cen}} \right) \cdot \left[\frac{100 \cdot (S_{cen} - c)}{D_{cen}} \right]^{2.5} = 0.563 = 0.563 \text{ МПа.}$$

Допускаемое наружное давление по формуле 52:

$$P_{\partial.cen} = \frac{P_{\partial n.cen}}{\sqrt{1 + \left(\frac{P_{\partial n.cen}}{P_{\partial E.cen}} \right)^2}} = \frac{0.58}{\sqrt{1 + \left(\frac{0.58}{0.563} \right)^2}} = 0.404 = 0.404 \text{ МПа.}$$

Осевое сжимающее усилие от давления на днище по формуле 53:

$$F_{o.c.y.cen} = 0.25\pi \cdot 10^{-6} \cdot (D_{cen}^2 - D_0^2) \cdot P_{н.расч.cen} = 0.03 = 0.03 \text{ МН.}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия прочности по формуле 54:

$$F_{\partial.o.c.y.cen} = \pi \cdot (D_{cen} + S_{cen} - c) \cdot (S_{cen} - c) \cdot \sigma_D = 1.49\text{e}6 = 1.49\text{e}6 \text{ МН.}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие в пределах упругости из условия устойчивости по формуле 55:

$$F_{dE.cen} = \frac{31 \cdot 10^{-11} \cdot E}{n_y} \cdot D_{cen}^2 \cdot \left[100 \cdot \frac{(S_{cen} - c)}{D_{cen}} \right]^{2.5} = 4.53 = 4.53 \text{ МН.}$$

$$F_{Д.cen} = \frac{F_{\partial.o.c.y.cen}}{\sqrt{1 + \left(\frac{F_{o.c.y.cen}}{F_{dE.cen}} \right)^2}} = \frac{1.49\text{e}6}{\sqrt{1 + \left(\frac{0.03}{4.53} \right)^2}} = 1.49\text{e}6 = 1.49\text{e}6 \text{ МН.}$$

$$Usl_{20} = \begin{cases} \text{"Условие устойчивости выполняется"} & \text{if } \frac{P_{н}}{P_{\partial.cen}} + \frac{F_{o.c.y.cen}}{F_{Д.cen}} \leq 1 \\ \text{"Условие устойчивости не выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_{20} = \text{"Условие устойчивости выполняется"} .$$

4.1.5.3 Расчет толщины стенки конического днища сепаратора

Эффективная длина конической обечайки $l_{rE.cen} = 450 \text{ мм.}$

Безразмерный коэффициент $B_{l.cen} = 1.$

Расчетный диаметр гладкой конической обечайки по формуле 56:

$$D_{k.cen} = D_{cen} - 1.4 \cdot a_I \cdot \sin\left(\frac{\alpha_I \cdot \pi}{180}\right) = 600 - 1.4 \cdot 200 \cdot \sin\left(\frac{30 \cdot \pi}{180}\right) = 460.0 = 460.0 \text{ мм.}$$

Толщина стенки гладкой конической обечайки, нагруженной внутренним избыточным давлением по формуле 57:

$$s_{к1.v.cen} = \frac{P_{в.расч.cen} \cdot D_{cen}}{2 \cdot \sigma_D \cdot \phi_p - P_{в.расч.cen}} \cdot \left(\frac{1}{\cos\left(\frac{\alpha_I \cdot \pi}{180}\right)} \right) + c = 1.56 = 1.56 \text{ мм.}$$

Толщину стенки, нагруженную наружным давлением, в первом приближении вычисляют по формулам с введением эффективных размеров с последующей проверкой по формуле 58:

$$s_{\kappa l.n.cen} = \max \left[1.06 \cdot \frac{10^{-2} \cdot D_{cen}}{B_{l.cen}} \cdot \left(\frac{P_{n.pacч.cen}}{10^{-5} \cdot E} \cdot \frac{l_{rE.cen}}{D_{cen}} \right)^{0.4}, \frac{1.2 \cdot P_{n.pacч.cen} \cdot D_{cen}}{2 \cdot \sigma_D \cdot \phi_p - P_{n.pacч.cen}} \cdot \left(\frac{1}{\cos \left(\frac{\alpha_I \cdot \pi}{180} \right)} \right) \right] = 1.77 = 1.77 \text{ мм.}$$

Примем толщину стенки гладкой конической обечайки равной толщине стенки цилиндрической обечайки $s_{\kappa l.cen.} = 6 \text{ мм.}$

Проверка условия применения методики для конической обечайки

$$Usl_{2I} = \begin{cases} \text{"Условия применения формул НЕ выполняются"} & \text{if } \alpha_I > 70 \\ \text{"Условия применения формул НЕ выполняются"} & \text{if } 0.001 \leq \frac{s_{\kappa l.cen.} \cdot \cos \left(\frac{\alpha_I \cdot \pi}{180} \right)}{D_{cen}} \geq 0.05 \\ \text{"Условия применения формул выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_{2I} = \text{"Условия применения формул выполняются"} .$$

Расчетные длины переходных частей обечаек по формуле 59:

$$a_{lp.cen} = 0.7 \cdot \sqrt{\frac{D_{cen}}{\cos \left(\frac{\alpha_I \cdot \pi}{180} \right)} \cdot (s_{\kappa l.cen.} - c)} = 39.085 \text{ мм.}$$

$$a_{2p.cen} = 0.7 \cdot \sqrt{D_{cen} \cdot (s_{\kappa l.cen.} - c)} = 36.373 \text{ мм.}$$

Эффективные размеры конической обечайки вычисляются по формуле 60

$$D_{E.cen} = \max \left[\frac{D_{cen} + D_I}{2 \cdot \cos \left(\frac{\alpha_I \cdot \pi}{180} \right)}, \frac{D_{cen}}{\cos \left(\frac{\alpha_I \cdot \pi}{180} \right)} - 0.3 \cdot (D_{cen} + D_I) \cdot \sqrt{\frac{D_{cen} + D_I}{100 \cdot (s_{\kappa l.cen.} - c)}} \cdot \tan \left(\frac{\alpha_I \cdot \pi}{180} \right) \right] = 542.0 = 542.0 \text{ мм.}$$

$$l_{E.cen} = \frac{D_{cen} - D_I}{2 \cdot \sin \left(\frac{\alpha_I \cdot \pi}{180} \right)} = \frac{(600 - 100)}{\left(2 \cdot \sin \left(\frac{30 \cdot \pi}{180} \right) \right)} = 500.0 = 500.0 \text{ мм.}$$

$$B_{l.k.cen} = \min \left[1, 9.45 \cdot \frac{D_{E.cen}}{l_{E.cen}} \cdot \sqrt{\frac{D_{E.cen}}{100 \cdot (s_{\kappa l.cen.} - c)}} \right] = 1.0 = 1.0 .$$

Допускаемое наружное давление из условия прочности по формуле 61

$$P_{\partial n.\kappa l.n.cen} = \frac{2 \cdot \sigma_D \cdot (s_{\kappa l.cen.} - c)}{\frac{D_{cen}}{\cos \left(\frac{\alpha_I \cdot \pi}{180} \right)} + (s_{\kappa l.cen.} - c)} = \frac{2 \cdot 174.0 \cdot (6 - 1.5)}{\left[\frac{600}{\cos \left(\frac{30 \cdot \pi}{180} \right)} + (6 - 1.5) \right]} = 2.25 = 2.25 \text{ МПа.}$$

Допускаемое наружное давление из условия устойчивости в пределах упругости по формуле 62

$$P_{\partial E.к1.cen} = \left(\frac{2.08 \cdot E \cdot 10^{-5}}{n_y \cdot B_{l.к.cen}} \right) \cdot \frac{D_{E.cen}}{l_{E.cen}} \cdot \left[\frac{100 \cdot (s_{к1.cen} - c)}{D_{E.cen}} \right]^{2.5} = 1.18 = 1.18 \text{ МПа.}$$

Проверим условие прочности:

$$Usl_{22} = \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } P_{в.расч.cen} < P_{\partial n.к1.n.cen} \\ \text{"Условие прочности не выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_{22} = \text{"Условие прочности выполняется"} .$$

Проверим условие устойчивости:

$$Usl_{23} = \begin{cases} \text{"Условие устойчивости выполняется"} & \text{if } P_{н.расч.cen} < P_{\partial E.к1.cen} \\ \text{"Условие устойчивости не выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_{23} = \text{"Условие устойчивости выполняется"} .$$

Проверка условий применимости формул:

$$Usl_{24} = \begin{cases} \text{"Условие применимости формул выполняется"} & \text{if } 0.002 \leq \frac{s_{к1.cen} \cdot \cos\left(\frac{\alpha_1 \cdot \pi}{180}\right)}{D_{cen}} \leq 0.1 \\ \text{"Условие применимости формул не выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_{24} = \text{"Условие применимости формул выполняется"} .$$

Согласно [36] и на основании расчетов подбираем днище с внутренними базовыми размерами:

Таблица 12 – Коническое днище с углом в вершине $\alpha = 60^\circ$

размеры в миллиметрах

D	h	s	α_1	α_2	$\alpha, ^\circ$
600	154	6	40	40	60

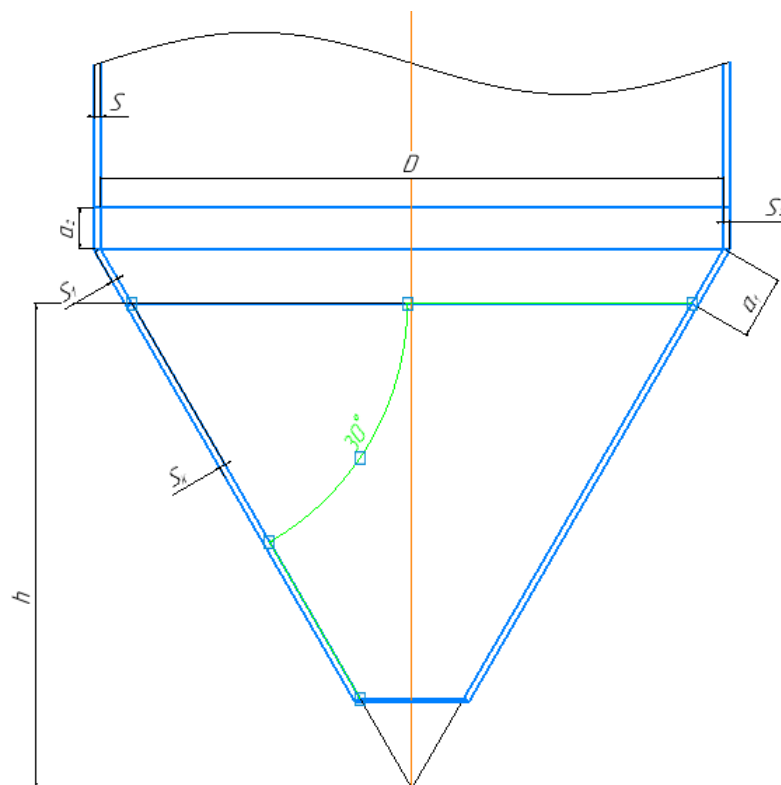


Рисунок 18 – Коническое днище

4.1.5.4 Расчет толщины стенки эллиптической крышки

Расчетная толщина крышки, нагруженные внутренним избыточным давлением, определяется по формуле 65:

$$s_{R2} = \max \left(\frac{P_{в.расч.цен} \cdot D_{цен}}{2 \cdot \sigma_D \cdot \phi_p - 0.5 \cdot P_{в.расч.цен}}, \frac{P_{нр.цен} \cdot D_{цен}}{2 \cdot \sigma_H \cdot \phi_p - 0.5 \cdot P_{нр.цен}} \right) = 0.0497 = 0.0497 \text{ мм.}$$

Исполнительная толщина стенки крышки по формуле 44:

$$s_{K2} = s_{R2} + c = 0.0497 + 1.5 = 1.55 = 1.55 \text{ мм.}$$

Принимаем толщину крышки стандартного значения $s_{kp2} = 6 \text{ мм.}$

Допускаемое внутреннее избыточное давление для крышки по формуле 66:

$$P_{дон.в2} = \frac{2 \cdot \sigma_D \cdot \phi_p \cdot (s_{kp2} - c)}{D_{цен} + 0.5 \cdot (s_{kp2} - c)} = 2.6 \text{ МПа.}$$

Для предварительного расчета коэффициент принимают равным $K_9 = 0.9$.

Значение необходимой толщины стенки крышки, нагруженной наружным давлением, может быть предварительно вычислено по формуле по формуле 67:

$$s_{lp2} = \max \left(\frac{K_{\varepsilon} \cdot D_{cen}}{161} \cdot \sqrt{\frac{n_y \cdot P_{н.расч.цен}}{10^{-5} \cdot E}}, \frac{1.2 \cdot P_{н.расч.цен}}{2 \cdot \sigma_D} \right) = 1.21 = 1.21 \text{ мм.}$$

Исполнительная толщина стенки крышки по формуле 44:

$$s_{к.н2} = s_{lp2} + c = 1.21 + 1.5 = 2.71 = 2.71 \text{ мм.}$$

Принимаем толщину днища стандартного значения $s_{kp2} = 6 \text{ мм.}$

Допускаемое наружное давление из условия прочности по формуле 68

$$p_{p.kp2} = \frac{2 \cdot \sigma_D \cdot (s_{kp2} - c)}{D_{cen} + 0.5 \cdot (s_{kp2} - c)} = \frac{2 \cdot 174.0 \cdot (6 - 1.5)}{[600 + 0.5 \cdot (6 - 1.5)]} = 2.6 = 2.6 \text{ МПа.}$$

Высота выпуклой части крышки по внутренней поверхности без учета цилиндрической части по формуле 69

$$H_{\theta 2} = 0.25 \cdot D_{cen} = 0.25 \cdot 600 = 150.0 = 150.0 \text{ мм.}$$

Коэффициент определяется по формуле 70:

$$x_{kp2} = 10 \cdot \frac{(s_{kp2} - c)}{D_{cen}} \cdot \left(\frac{D_{cen}}{2H_{\theta 2}} - \frac{2H_{\theta 2}}{D_{cen}} \right) = 10 \cdot \left[\frac{(6 - 1.5)}{600} \right] \cdot \left[\frac{600}{(2 \cdot 150.0)} - \frac{2 \cdot 150.0}{600} \right] = 0.112 = 0.112 \text{ мм.}$$

Коэффициент вычисляют по формуле 71:

$$K_{\varepsilon.kp2} = \frac{1 + (2.4 + 8x_{kp2}) \cdot x_{kp2}}{1 + (3.0 + 10x_{kp2}) \cdot x_{kp2}} = \frac{[1 + (2.4 + 8 \cdot 0.112) \cdot 0.112]}{[1 + (3.0 + 10 \cdot 0.112) \cdot 0.112]} = 0.937 = 0.937 .$$

Допускаемое наружное давление из условия устойчивости в пределах упругости по формуле 72

$$p_{E.kp2} = \frac{2.6 \cdot 10^{-5} \cdot E}{n_y} \cdot \left[\frac{100 \cdot (s_{kp2} - c)}{K_{\varepsilon.kp2} \cdot D_{cen}} \right] = \frac{2.6 \cdot 10^{-5} \cdot (2 \cdot 10^5)}{2.4} \cdot \left[\frac{100 \cdot (6 - 1.5)}{(0.937 \cdot 600)} \right] = 1.73 = 1.73 \text{ МПа.}$$

Допускаемое наружное давление определяется формулой 73:

$$P_{доп.н2} = \frac{p_{p.kp2}}{\sqrt{1 + \left(\frac{p_{p.kp2}}{p_{E.kp2}} \right)^2}} = 1.44 \text{ МПа.}$$

Проверим условие прочности:

$$Usl_{34} = \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } P_{в.расч.цен} < p_{p.kp2} \\ \text{"Условие прочности не выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_{34} = \text{"Условие прочности выполняется"} \quad .$$

Проверим условие устойчивости:

$$Usl_{35} = \left| \begin{array}{l} \text{"Условие устойчивости выполняется"} \quad \text{if } P_{н.расч.цен} < P_{E.кр2} \\ \text{"Условие устойчивости не выполняется"} \quad otherwise \end{array} \right.$$

$$Usl_{35} = \text{"Условие устойчивости выполняется"} \quad .$$

Проверка условий применимости формул:

$$Usl_{36} = \left| \begin{array}{l} \text{"Условие применимости формул выполняется"} \quad \text{if } \frac{s_{кр2} - c}{D_{cen}} \leq 0.1 \\ \text{"Условие применимости формул не выполняется"} \quad otherwise \end{array} \right.$$

$$Usl_{36} = \text{"Условие применимости формул выполняется"} \quad .$$

Подбираем крышку согласно [37] с параметрами:

Таблица 13 – Эллиптическая крышка

размеры в миллиметрах

D	h_1	h_b	s
600	25	150	6

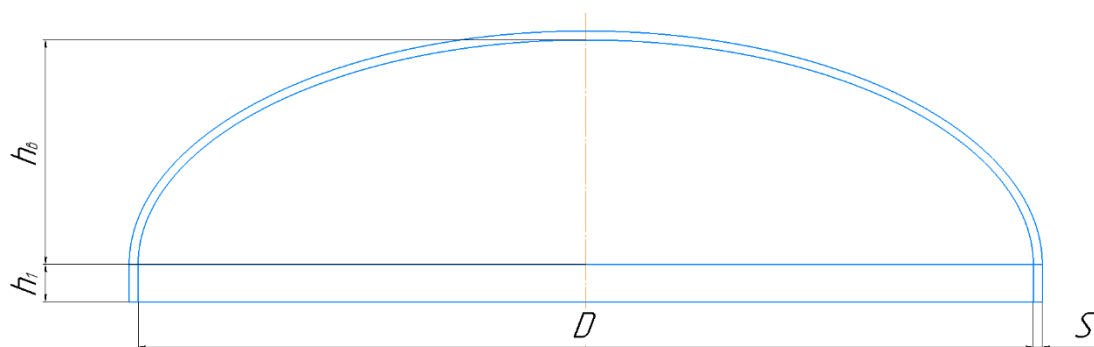


Рисунок 19 – Эллиптическая крышка

4.1.5.5 Расчет сопряжения цилиндрической и конической обечаяек

Расчет сопряжения цилиндрической и конической обечаяек идентичен указанном в разделе 2.1.4.7, поэтому алгоритм расчета вставлять нецелесообразно, однако результаты расчета необходимо привести.

Условие прочности для края конической обечайки

$$Prov := \left| \begin{array}{l} \text{"условие прочности выполняется"} \quad \text{if } (\sigma_{кр}) \geq \sigma_{kmax} \\ \text{"условие прочности НЕ выполняется"} \quad otherwise \end{array} \right.$$

$$Prov = \text{"условие прочности выполняется"} .$$

Приведем полученные результаты расчета:

$$\sigma_{kmax} = 9.7 \times 10^6 \text{ Па};$$

$$\sigma_{kp} = 2.327 \times 10^8 \text{ Па}.$$

Условие прочности для края цилиндрической обечайки

$$ProvI := \begin{cases} \text{"условие прочности выполняется"} & \text{if } (\sigma_{kp}) \geq \sigma_{cmax} \\ \text{"условие прочности НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$ProvI = \text{"условие прочности выполняется"} .$$

Приведем полученные результаты расчета:

$$\sigma_{cmax} = 9.533 \times 10^6 \text{ Па};$$

$$\sigma_{kp} = 2.327 \times 10^8 \text{ Па}.$$

4.1.5.6 Расчет сопряжения цилиндрической обечайки и эллиптического днища

Расчет сопряжения цилиндрической и конической обечаек идентичен указанном в разделе 2.1.4.8, поэтому алгоритм расчета вставлять нецелесообразно, достаточно отразить результаты расчета.

Условие прочности для края эллиптического днища

$$Prov = \begin{cases} \text{"условие прочности выполняется"} & \text{if } (\sigma_{kp.d}) \geq \sigma_{maxэ} \\ \text{"условие прочности НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Prov = \text{"условие прочности выполняется"} .$$

Приведем полученные результаты расчета

$$\sigma_{kp.d} = 2.327 \times 10^8 \text{ Па};$$

$$\sigma_{maxэ} = 2.667 \times 10^6 \text{ Па}.$$

Условие прочности для края цилиндрической обечайки

$$ProvI = \begin{cases} \text{"условие прочности выполняется"} & \text{if } (\sigma_{kp.d}) \geq \sigma_{maxo} \\ \text{"условие прочности НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Prov = \text{"условие прочности выполняется"} .$$

$$\sigma_{кр.д} = 2.327 \times 10^8 \text{ Па};$$

$$\sigma_{maxэ} = 2.667 \times 10^6 \text{ Па}.$$

4.1.5.7 Определение необходимости укрепления отверстий в сепараторе

В сепараторе имеются отверстия под штуцера ввода упаренной воды из греющей камеры в цилиндрической обечайке и эллиптической крышке, отвода раствора в коническое днище, ввода раствора в цилиндрическую обечайку. Проверим необходимость укрепления перечисленных отверстий. Расчет проводим согласно методике, указанной в [40]

4.1.5.7.1 Определение необходимости укрепления отверстий для штуцера ввода пара из греющей камеры в сепаратор

Диаметры укрепляемых элементов $D_{cen} = 600 \text{ мм}$.

Расчетный диаметр отверстия в стенке обечайки по формуле 161:

$$d_{p6} = (d_{н.втор.н.} + 2 \cdot c) = 100 + 2 \cdot 1.5 = 103.0 = 103.0 \text{ мм}.$$

Проверка условий применения формул для расчета укрепления отверстий:

$$Usl_{25} = \begin{cases} \text{"Отношение диаметров НЕ выполняется"} & \text{if } \left(\frac{d_{p6} - 2 \cdot c}{D_{cen}} > 0.6 \right) \\ \text{"Отношение толщины к диаметру НЕ выполняется"} & \text{if } \left(\frac{S_{cen} - c}{D_{cen}} > 0.1 \right) \\ \text{"Условия применения формул выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_{25} = \text{"Условия применения формул выполняются"} .$$

Расчетная толщины стенок укрепляемых элементов по формуле 162:

$$S_{p6} = \frac{P_{н.расч.цен} \cdot D_{cen}}{2 \cdot \sigma_{Д \cdot \phi_p} - P_{н.расч.цен}} = 0.188 \text{ мм}.$$

Расчетную толщину стенки штуцера с круглым поперечным сечением, нагруженного наружным давлением, вычисляют по формуле по формуле 163

$$s_{p6} = \frac{P_{н.расч.цен} \cdot (d_{н.втор.н.} + 2 \cdot c)}{2 \cdot \sigma_{Д \cdot \phi_p} - P_{н.расч.цен}} = \frac{0.109 \cdot (100 + 2 \cdot 1.5)}{(2 \cdot 174.0 \cdot 1 - 0.109)} = 0.0323 = 0.0323 \text{ мм}.$$

Расчетный диаметр отверстия, не требующего укрепления в стенке цилиндрической обечайки по формуле 164

$$d_{0p.6} = 0.4 \cdot \sqrt{D_{cen} \cdot (S_{cen} - c)} = 20.785 \text{ мм.}$$

Наибольший допустимый диаметр одиночного отверстия, не требующего дополнительного укрепления при наличии избыточной толщины стенки сосуда, вычисляют по формуле 165:

$$d_{0.6} = \min \left[2 \cdot \left[\left(\frac{S_{cen} - c}{\frac{P_{\partial} \cdot D_{cen}}{2 \cdot K_{l.l} \cdot \sigma_D - P_{\partial}}} \right) - 0.8 \right] \cdot \sqrt{D_{cen} \cdot (S_{cen} - c)}, D_{cen} + 2 \cdot c \right] = 239.757 \text{ мм.}$$

Проверим условие необходимости укрепления отверстий:

$$Usl_{26} = \begin{cases} \text{"необходимо укрепление отверстия"} & \text{if } d_{0.6} < d_{p6} \\ \text{"укрепление отверстия не требуется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_{26} = \text{"укрепление отверстия не требуется"} .$$

4.1.5.7.2 Определение необходимости укрепления отверстий для штуцера вывода пара из сепаратора

Диаметры укрепляемых элементов по формуле 166:

$$D_{p7} = \frac{D_{cen}^2}{2 \cdot H_{62}} \cdot \sqrt{1 - 4 \cdot \frac{(D_{cen}^2 - 4 \cdot H_{62}^2)}{D_{cen}^4} \cdot x_2^2} = 1200.0 = 1200.0 \text{ мм.}$$

Расчетный диаметр отверстия в стенке обечайки по формуле 161:

$$d_{p7} = (d_{н.вмop.n.} + 2 \cdot c) = 100 + 2 \cdot 1.5 = 103.0 = 103.0 \text{ мм.}$$

Проверка условий применения формул для расчета укрепления отверстий:

$$Usl_{27} = \begin{cases} \text{"Отношение диаметров НЕ выполняется"} & \text{if } \left(\frac{d_{p7} - 2 \cdot c}{D_{p7}} > 1 \right) \\ \text{"Отношение толщины к диаметру НЕ выполняется"} & \text{if } \left(\frac{S_{cen} - c}{D_{p7}} > 0.1 \right) \\ \text{"Условия применения формул выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_{27} = \text{"Условия применения формул выполняются"} .$$

Расчетная толщины стенок укрепляемых элементов по формуле 162:

$$S_{p7} = \frac{P_{н.расч.цен} \cdot D_{p7}}{2 \cdot \sigma_{Д \cdot \phi p} - P_{н.расч.цен}} = 0.376 \text{ мм.}$$

Расчетную толщину стенки штуцера с круглым поперечным сечением, нагруженного наружным давлением, вычисляют по формуле 163

$$s_{p7} = \frac{P_{н.расч.цен} \cdot (d_{н.втор.н.} + 2 \cdot c)}{2 \cdot \sigma_{Д \cdot \phi p} - P_{н.расч.цен}} = \frac{0.109 \cdot (100 + 2 \cdot 1.5)}{(2 \cdot 174.0 \cdot 1 - 0.109)} = 0.0323 = 0.0323 \text{ мм.}$$

Расчетный диаметр отверстия, не требующего укрепления в стенке цилиндрической обечайки по формуле 164

$$d_{0p.7} = 0.4 \cdot \sqrt{D_{p7} \cdot (S_{цен} - c)} = 29.394 \text{ мм.}$$

Коэффициент для выпуклых днищ согласно [40] $K_{1.2} = 2$.

Наибольший допустимый диаметр одиночного отверстия, не требующего дополнительного укрепления при наличии избыточной толщины стенки сосуда, вычисляют по формуле 165:

$$d_{0.7} = \min \left[2 \cdot \left[\left(\frac{S_{цен} - c}{\frac{P_{\partial} \cdot D_{p7}}{2 \cdot K_{1.2} \cdot \sigma_{Д} - P_{\partial}}} \right) - 0.8 \right] \cdot \sqrt{D_{p7} \cdot (S_{цен} - c)}, 0.6 D_{цен} + 2 \cdot c \right] = 339.62 = 339.62 \text{ мм.}$$

$$Usl_{28} = \begin{cases} \text{"необходимо укрепление отверстия"} & \text{if } d_{0.7} < d_{p7} \\ \text{"укрепление отверстия не требуется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_{28} = \text{"укрепление отверстия не требуется"}.$$

4.1.5.7.3 Определение необходимости укрепления отверстий для штуцера ввода раствора из экстрактора в сепаратор-брызгоуловитель

Угол наклона штуцера $\gamma_I = 45^\circ$.

Что согласно [40] не превышает предельных значений и расчет укрепления отверстий для данного случая по изложенной методике применим.

Расчетные диаметры укрепляемых элементов $D_{цен} = 600$ мм.

Расчетный диаметр отверстия в стенке обечайки для цилиндрической обечайки, когда ось наклонного штуцера лежит в плоскости продольного сечения обечайки по формуле 161:

$$d_{p8} = \left(\frac{d_{n.n.} + 2 \cdot c}{\cos\left(\frac{\gamma \cdot I \cdot \pi}{180}\right)^2} \right) = \frac{(25 + 2 \cdot 1.5)}{\cos\left(\frac{45 \cdot \pi}{180}\right)^2} = 56.0 = 56.0 \text{ мм.}$$

Проверка условий применения формул для расчета укрепления отверстий:

$$Usl_{29} = \begin{cases} \text{"Отношение диаметров НЕ выполняется"} & \text{if } \left(\frac{d_{p8} - 2 \cdot c}{D_{cen}} > 1 \right) \\ \text{"Отношение толщины к диаметру НЕ выполняется"} & \text{if } \left(\frac{S_{cen} - c}{D_{cen}} > 0.1 \right) \\ \text{"Условия применения формул выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_{29} = \text{"Условия применения формул выполняются"} .$$

Расчетная толщины стенок укрепляемых элементов по формуле 162:

$$S_{p8} = \frac{P_{н.расч.цен} \cdot D_{cen}}{2 \cdot \sigma_{Д \cdot \phi_p} - P_{н.расч.цен}} = 0.188 \text{ мм.}$$

Расчетную толщину стенки штуцера с круглым поперечным сечением, нагруженного наружным давлением, вычисляют по формуле по формуле 163

$$s_{p8} = \frac{P_{н.расч.цен} \cdot (d_{n.n.} + 2 \cdot c)}{2 \cdot \sigma_{Д \cdot \phi_p} - P_{н.расч.цен}} = \frac{0.109 \cdot (25 + 2 \cdot 1.5)}{(2 \cdot 174.0 \cdot 1 - 0.109)} = 0.00877 = 0.00877 \text{ мм.}$$

Расчетный диаметр отверстия, не требующего укрепления в стенке цилиндрической обечайки по формуле 164

$$d_{0p.8} = 0.4 \cdot \sqrt{D_{cen} \cdot (S_{cen} - c)} = 20.785 \text{ мм.}$$

Наибольший допустимый диаметр одиночного отверстия, не требующего дополнительного укрепления при наличии избыточной толщины стенки сосуда, вычисляют по формуле 165:

$$d_{0.8} = \min \left[2 \cdot \left[\left(\frac{S_{cen} - c}{P_{\partial} \cdot D_{p7}} \right) - 0.8 \right] \cdot \sqrt{D_{p7} \cdot (S_{cen} - c)}, D_{p7} + 2 \cdot c \right] = 110.746 \text{ мм.}$$

$$Usl_{30} = \begin{cases} \text{"необходимо укрепление отверстия"} & \text{if } d_{0.8} < d_{p8} \\ \text{"укрепление отверстия не требуется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_{30} = \text{"укрепление отверстия не требуется"} .$$

4.1.5.7.4 Определение необходимости укрепления отверстий для отвода раствора из конического днища сепаратора в циркуляционную трубу

Расчетные диаметры укрепляемых элементов 167

$$D_{p9} = \frac{D_{cen}}{\cos\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right)} = 692.82 \text{ мм.}$$

Расчетный диаметр отверстия в коническом днище по формуле 161:

$$d_{p9} = (D_{ц.т.вн} + 2 \cdot c) = 100 + 2 \cdot 1.5 = 103.0 = 103.0 \text{ мм.}$$

Проверка условий применения формул для расчета укрепления отверстий:

$$Usl_{47} = \begin{cases} \text{"Отношение диаметров НЕ выполняется"} & \text{if } \left(\frac{d_{p9} - 2 \cdot c}{D_{p9}} > 1 \right) \\ \text{"Отношение толщины к диаметру НЕ выполняется"} & \text{if } \left(\frac{S_{cen} - c}{D_{p9}} > \frac{0.1}{\cos\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right)} \right) \\ \text{"Условия применения формул выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_{15} = \text{"Условия применения формул выполняются"} .$$

Расчетная толщины стенок укрепляемых элементов по формуле 162:

$$S_{p.9} = \frac{P_{н.расч.цен} \cdot D_{p9}}{2 \cdot \sigma_{Д \cdot \phi p} - P_{н.расч.цен}} = 0.217 \text{ мм.}$$

Расчетную толщину стенки штуцера с круглым поперечным сечением, нагруженного наружным давлением, вычисляют по формуле 163

$$s_{p9} = \frac{P_{н.расч.цен} \cdot (D_{ц.т.вн} + 2 \cdot c)}{2 \cdot \sigma_{Д \cdot \phi p} - P_{н.расч.цен}} = \frac{0.109 \cdot (100 + 2 \cdot 1.5)}{(2 \cdot 174.0 \cdot 1 - 0.109)} = 0.0323 = 0.0323 \text{ мм.}$$

Расчетный диаметр отверстия, не требующего укрепления в стенке цилиндрической обечайки по формуле 164

$$d_{0p.9} = 0.4 \cdot \sqrt{D_{p9} \cdot (S_{cen} - c)} = 22.335 \text{ мм.}$$

Наибольший допустимый диаметр одиночного отверстия, не требующего дополнительного укрепления при наличии избыточной толщины стенки сосуда, вычисляют по формуле 165:

$$d_{0.9} = \min \left[2 \cdot \left[\left(\frac{S_{cen} - c}{P_{\partial} \cdot D_{p9}} \right) - 0.8 \right] \cdot \sqrt{D_{p9} \cdot (S_{cen} - c)}, D_{cen} + 2 \cdot c \right] = 211.15 \text{ мм.}$$

$$Usl_{48} = \begin{cases} \text{"необходимо укрепление отверстия"} & \text{if } d_{0.9} < d_{p9} \\ \text{"укрепление отверстия не требуется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_{48} = \text{"укрепление отверстия не требуется"} .$$

4.1.5.8 Расчет фланцевого соединения для соединения эллиптической крышки и цилиндрической обечайки экстрактора

Данный расчет полностью повторяет алгоритм действий, представленный в разделе 2.1.4.10, следовательно, не имеет никакого смысла приводить расчет еще раз. Однако, необходимо указать результаты расчетов.

Внутренний диаметр фланца $D = 600$ мм.

Толщина тарелки фланца $h = 80$ мм.

Расчетное давление $P = 0.6$ МПа.

Наружный диаметр фланца $D_H = 720$ мм.

Толщина прокладки $h_n = 2$ мм.

Внешний изгибающий момент $M = 0$ Н · мм.

Диаметр окружности расположения болтов $D_{\text{б}} = 680$ мм.

Толщина втулки приварного встык фланца $S_0 = 6$ мм.

Осевая сила $F = 0$ Н.

Расчетный диаметр прокладки $D_{cn} = 678$ мм.

Наружный диаметр болта $d = 20$ мм.

Сумма прибавок к расчетной толщине стенок $c_o = 1.5$ мм.

Ширина прокладки $b_n = 30$ мм.

Количество болтов $n = 20$ шт.

Расчетная температура стенки корпуса (штуцера) в месте расположения фланцевого соединения $t = 60$ °С.

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

$$Usl_1 = \begin{cases} \text{"Условия прочности в при затяжке НЕ выполняются"} & \text{if } \sigma_{\bar{6}1} > \sigma_{20\bar{6}} \\ \text{"Условия прочности в рабочих условиях НЕ выполняются"} & \text{if } \sigma_{\bar{6}2} > \sigma_{\partial.\bar{6}} \\ \text{"Условия прочности выполняются"} & otherwise \end{cases}$$

$$\sigma_{\bar{6}1} = 92 \text{ МПа}; \sigma_{20\bar{6}} = 230 \text{ МПа}; \sigma_{\bar{6}2} = 152.694 \text{ МПа}; \sigma_{\partial.\bar{6}} = 230 \text{ МПа}.$$

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

Условие прочности прокладки:

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

$$q_d = 130 \text{ МПа}; q = 10.753 \text{ МПа}.$$

$$Usl_2 = \text{"Условие прочности прокладки выполняется"} \quad .$$

Проверка условий статической прочности фланцев

$$Usl_3 = \begin{cases} PR_1 & \text{if } \max(|\sigma_{0M} + \sigma_{RM}|, |\sigma_{0M} + \sigma_{TM}|) > K_T \cdot \sigma_{20} \\ PR_2 & \text{if } \max \left(\left(\begin{array}{c} |\sigma_{0p} - \sigma_{0mp} + \sigma_{Tp}| \\ |\sigma_{0p} - \sigma_{0mp} + \sigma_{Rp}| \\ |\sigma_{0p} + \sigma_{0mp}| \end{array} \right) \right) > K_T \cdot \sigma_{\partial.\phi} \\ PR_3 & otherwise \end{cases}$$

$$\max(|\sigma_{0M} + \sigma_{RM}|, |\sigma_{0M} + \sigma_{TM}|) = 3.836 \text{ МПа};$$

$$\max \left(\left(\begin{array}{c} |\sigma_{0p} - \sigma_{0mp} + \sigma_{Tp}| \\ |\sigma_{0p} - \sigma_{0mp} + \sigma_{Rp}| \\ |\sigma_{0p} + \sigma_{0mp}| \end{array} \right) \right) = 82.53 \text{ МПа}.$$

$$K_T \cdot \sigma_{20} = 239.2 \text{ МПа}; K_T \cdot \sigma_{\partial.\phi} = 232.7 \text{ МПа}.$$

$$Usl_3 = \text{"Условия статической прочности выполняются"} \quad .$$

Проверка углов поворота фланцев

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

$$\text{Угол поворота приварного встык фланца, плоского фланца } \Theta = 8.056 \times 10^{-4} \quad .$$

$$\text{Допустимый угол поворота плоского фланца } \Theta_{\partial} = 0.013.$$

$$Usl_P = \text{"Условие поворота плоского фланца выполняется"} .$$

Проверим условие прочности для заданного числа циклов сборки-разборок и изменений режима эксплуатации для фланцевого соединения:

$$Usl1 = \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } \frac{N_C}{N_{\partial}} + \frac{N_P}{N_{\partial.p}} \leq 1 \\ \text{"Условие прочности не выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl1 = \text{"Условие прочности выполняется"} .$$

Проверим условие прочности для заданного числа циклов сборки-разборок и изменений режима эксплуатации для болтов:

$$Usl2 = \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } \frac{N_C}{N_{\partial.b}} + \frac{N_P}{N_{\partial.p.b}} \leq 1 \\ \text{"Условие прочности не выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl2 = \text{"Условие прочности выполняется"} .$$

Численные значения для проверки:

$$N_C = 7.3 \times 10^3 \text{ циклов.}$$

$$N_{\partial} = 3.34 \times 10^4 \text{ циклов.}$$

$$N_P = 1 \times 10^4 \text{ циклов.}$$

$$N_{\partial.p} = 3.42 \times 10^8 \text{ циклов.}$$

$$N_{\partial.b} = 7.599 \times 10^5 \text{ циклов.}$$

$$N_{\partial.p.b} = 2.186 \times 10^4 \text{ циклов.}$$

4.1.5.9 Подбор опор для сепаратора

Наружный диаметр сепаратора $D_{нар.с.} = 0.612 \text{ м.}$

Внутренний диаметр сепаратора $D_{вн.с.} = 0.6 \text{ м.}$

Плотность стали 12X18H10T [46] $\rho_{ст} = 7920 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$

Высота обечайки сепаратора $H_{к.с.} = 0.9 \text{ м.}$

Масса обечайки составит по формуле 217:

$$m_{об.с} = 0.785 \cdot (D_{нар.с.}^2 - D_{вн.с.}^2) \cdot H_{к.с.} \cdot \rho_{ст} = 81.4 = 81.4 \text{ кг.}$$

Масса конического днища греющей камеры согласно [36] $m_{к.д.с.} = 32 \text{ кг.}$

Масса эллиптической крышки греющей камеры согласно [37] $m_{э.к.с.} = 29 \text{ кг.}$

Масса аппарата с учетом вспомогательных средств (штуцеров, фланцев) составляет по формуле 218:

$$m_{к.с} = (m_{об.с} + m_{к.д.с.} + m_{э.к.с.}) \cdot 1.2 = 170.88 \text{ кг.}$$

Масса воды в аппарате по формуле 219:

$$m_{в.с} = 0.785 \cdot D_{вн.с.}^2 \cdot H_{к.с.} \cdot \rho_{в} = 254.0 = 254.0 \text{ кг.}$$

Общая масса тогда будет составлять по формуле 220:

$$m_{max.с} = m_{к.с} + m_{в.с} = 425.0 = 425.0 \text{ кг.}$$

Нагрузка от массы аппарата, воды и вспомогательных средств на 3 опоры типа 2 согласно [47] составляет по формуле 221:

$$G_{с.} = \frac{m_{max.с} \cdot g \cdot 10^{-3}}{3} = 1.39 \text{ кН.}$$

Внешний вид опоры представлен на рисунке, размеры приведены в таблице.

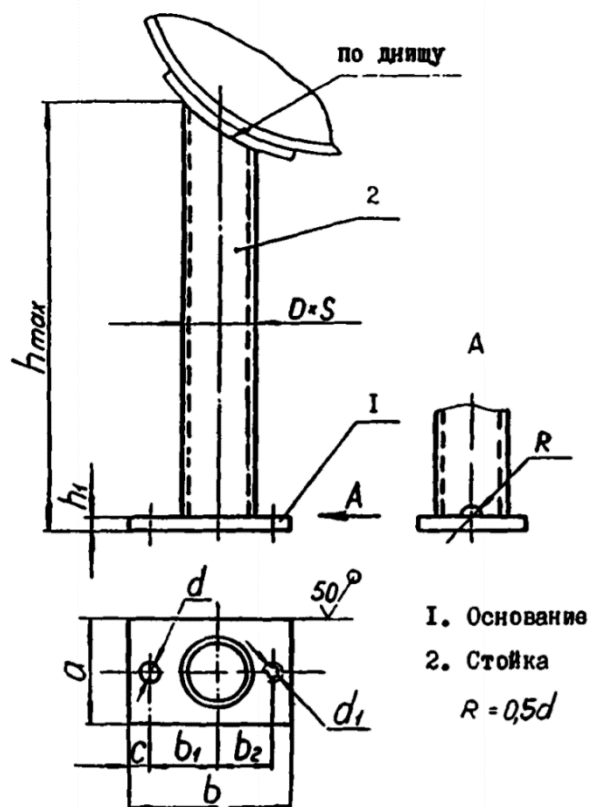


Рисунок 20 – Опора для греющей камеры

Таблица 14 – Размеры опоры

размеры в мм

Нагрузка на опору, кН, не более	$D \times S$	a	b	b_1	b_2	c	h_{max}	h_1	d	d_1
10	57x3,5	110	170	70	50	25	1200	14	19	M16

4.1.6 Механический расчет экстрактора

Исходя из условий эксплуатации аппаратуры следует принять материал для изготовления сепаратора идентичным материалу греющей камеры и сепаратора. Выбор материала для греющей камеры и сепаратора описан в разделах 2.1.4 и 2.1.5.

4.1.6.1 Определение толщины стенки сепаратора

Диаметр экстрактора $D_э = 400$ мм.

Высота цилиндрической обечайки экстрактора $H_э = 500$ мм.

Расчетное значение внутреннего давления рассчитывается следующим образом по формуле 37:

$$P_{в.расч.э} = P_в + \frac{\rho_в \cdot g \cdot H_{cen}}{10^9} = 0.02 + \frac{1.293 \cdot 9.81 \cdot 400}{10^9} = 0.02 = 0.02 \text{ МПа.}$$

Расчетное значение наружного давления рассчитывается следующим образом по формуле 38:

$$P_{н.расч.э} = P_н + \frac{\rho_г \cdot g \cdot H_э}{10^9} = 0.1 + \frac{998 \cdot 9.81 \cdot 500}{10^9} = 0.105 = 0.105 \text{ МПа.}$$

Пробное давления при гидравлических испытаниях внутри аппарата по формуле 39:

$$P_{пр.э} = 1.25 \cdot P_{в.расч.э} \cdot \frac{\sigma_{20}}{\sigma_D} = 1.25 \cdot 0.02 \cdot \left(\frac{184}{174.0} \right) = 0.026 = 0.026 \text{ МПа.}$$

Максимальная расчетная толщина стенки из условия прочности по формуле 43:

$$s_{p.э} = \max \left(\frac{P_{в.расч.цен} \cdot D_{cen}}{2 \cdot \sigma_D \cdot \phi_p - P_{в.расч.цен}}, \frac{P_{н.расч.цен} \cdot D_{cen}}{2 \cdot \sigma_D \cdot \phi_p - P_{н.расч.цен}}, \frac{P_{пр.цен} \cdot D_{cen}}{2 \cdot \sigma_D \cdot \phi_p - P_{пр.цен}} \right) = 0.19 = 0.19 \text{ мм.}$$

Максимальная исполнительная толщина стенки из условия прочности по формуле 44:

$$s_{н.э} = (s_{p.цен} + c) = 0.19 + 1.5 = 1.69 = 1.69 \text{ мм.}$$

Коэффициент В по формуле 45

$$B_{\vartheta} = \max \left[1, 0.47 \cdot \left(\frac{P_{н.расч.цен}}{10^{-5} \cdot E} \right)^{0.067} \cdot \left(\frac{H_{цен}}{D_{цен}} \right)^{0.4} \right] = 1.0 = 1.0 .$$

Расчетная толщина стенки цилиндрической обечайки, нагруженной наружным давлением, из условий устойчивости в соответствии с [34] по формуле 46:

$$s_{p.y.\vartheta} = \max \left[1.06 \cdot \frac{10^{-2} \cdot D_{цен}}{B_{цен}} \cdot \left(\frac{P_{н.расч.цен}}{10^{-5} \cdot E} \cdot \frac{H_{цен}}{D_{цен}} \right)^{0.4}, \frac{1.2 \cdot P_{н.расч.цен}}{2 \cdot \sigma_D - P_{н.расч.цен}} \right] = 2.34 = 2.34 = 2.34 \text{ мм.}$$

Соответственно, исполнительная толщина стенки по формуле 44:

$$s_{y.\vartheta} = (s_{p.y.цен} + c) = 2.34 + 1.5 = 3.84 = 3.84 \text{ мм.}$$

$$s_{\vartheta} = \max(s_{н.цен}, s_{y.цен}) = 3.84 \text{ мм.}$$

Согласно требованиям [35], аппараты диаметром 400 мм должны иметь толщину стенки обечайки не менее 4 мм. Исходя из этого принимаем и по конструктивным соображениям: $S_{\vartheta} = 6$ мм.

Проверка условий применимости формул:

$$Usl_{37} = \begin{cases} \text{"Условие применимости формул выполняется"} & \text{if } \frac{S_{\vartheta} - c}{D_{\vartheta}} \leq 0.1 \\ \text{"Условие применимости формул не выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_{37} = \text{"Условие применимости формул выполняется"} .$$

4.1.6.2 Расчет цилиндрической обечайки на устойчивость в рабочих условиях

Допускаемое внутреннее избыточное давление вычисляем по формуле 47:

$$P_{дон.\vartheta} = 2 \cdot \sigma_D \cdot \phi_p \cdot \frac{(S_{\vartheta} - c)}{D_{\vartheta} + (S_{\vartheta} - c)} = 3.87 = 3.87 \text{ МПа.}$$

В условиях испытаний по формуле 48:

$$P_{дон.и.\vartheta} = 2 \cdot \sigma_{II} \cdot \phi_p \cdot \frac{(S_{\vartheta} - c)}{D_{\vartheta} + (S_{\vartheta} - c)} = 5.56 = 5.56 \text{ МПа.}$$

Допускаемое наружное давление из условия прочности по формуле 49:

$$P_{\partial n.э} = 2 \cdot \sigma_D \cdot \frac{(S_э - c)}{D_э \cdot (S_э - c)} = 0.87 = 0.87 \text{ МПа.}$$

Коэффициент вычисляют по формуле по формуле 50

$$B_{Iэ} = \min \left[1, 9.45 \cdot \frac{D_э}{H_э} \cdot \sqrt{\frac{D_э}{100 \cdot (S_э - c)}} \right] = 1 .$$

Допускаемое наружное давление из условия устойчивости в пределах упругости по формуле 51:

$$P_{\partial E.э} = \left(\frac{2.08 \cdot E \cdot 10^{-5} \cdot D_э}{n_y \cdot B_{Iэ} \cdot H_э} \right) \cdot \left[\frac{100 \cdot (S_э - c)}{D_э} \right]^{2.5} = 1.86 = 1.86 \text{ МПа.}$$

Допускаемое наружное давление по формуле 52:

$$P_{\partial.э} = \frac{P_{\partial n.э}}{\sqrt{1 + \left(\frac{P_{\partial n.э}}{P_{\partial E.э}} \right)^2}} = \frac{0.87}{\sqrt{1 + \left(\frac{0.87}{1.86} \right)^2}} = 0.788 = 0.788 \text{ МПа.}$$

Осевое сжимающее усилие от давления на днище по формуле 53:

$$F_{o.c.y.э} = 0.25\pi \cdot 10^{-6} \cdot (D_э^2 - D_0^2) \cdot P_{н.расч.э} = 0.0124 = 0.0124 \text{ МН.}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия прочности по формуле 54:

$$F_{\partial.o.c.y.э} = \pi \cdot (D_э + S_э - c) \cdot (S_э - c) \cdot \sigma_D = 995016.0 = 995016.0 \text{ МН.}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие в пределах упругости из условия устойчивости по формуле 55:

$$F_{dE.э} = \frac{31 \cdot 10^{-11} \cdot E}{n_y} \cdot D_э^2 \cdot \left[100 \cdot \frac{(S_э - c)}{D_э} \right]^{2.5} = 5.55 = 5.55 \text{ МН}$$

$$F_{Д.э} = \frac{F_{\partial.o.c.y.э}}{\sqrt{1 + \left(\frac{F_{o.c.y.э}}{F_{dE.э}} \right)^2}} = \frac{995016.0}{\sqrt{1 + \left(\frac{0.0124}{5.55} \right)^2}} = 995013.0 = 995013.0 \text{ МН.}$$

$$Usl_{38} = \begin{cases} \text{"Условие устойчивости выполняется"} & \text{if } \frac{P_n}{P_{\partial.э}} + \frac{F_{o.c.y.э}}{F_{Д.э}} \leq 1 \\ \text{"Условие устойчивости не выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_{38} = \text{"Условие устойчивости выполняется"} .$$

4.1.6.3 Расчет толщины стенки конического днища сепаратора

Половина угла раствора при вершине конической обечайки $\alpha_I = 30^\circ$.

Фактические длины переходных частей $a_I = 200$ мм.

Расчетный диаметр гладкой конической обечайки по формуле 56:

$$D_{k.э} = D_э - 1.4 \cdot a_I \cdot \sin\left(\frac{\alpha_I \cdot \pi}{180}\right) = 400 - 1.4 \cdot 200 \cdot \sin\left(\frac{30 \cdot \pi}{180}\right) = 260.0 = 260.0 \text{ мм.}$$

Внутренний диаметр меньшего основания конической обечайки $D_I = 100$ мм.

Толщина стенки гладкой конической обечайки, нагруженной внутренним избыточным давлением по формуле 57:

$$s_{kl.в.э} = \frac{P_{в.расч.э} \cdot D_э}{2 \cdot \sigma_{Д \cdot \phi_p} - P_{в.расч.э}} \cdot \left(\frac{1}{\cos\left(\frac{\alpha_I \cdot \pi}{180}\right)} \right) + c = 1.53 = 1.53 \text{ мм.}$$

Эффективная длина конической обечайки составляет $l_{rE} = 450$ мм.

Безразмерный коэффициент $B_{Ir} = 1$.

Толщину стенки, нагруженной наружным давлением, в первом приближении вычисляют по формулам с введением эффективных размеров с последующей проверкой по формуле по формуле 58:

$$s_{kl.н.э} = \max \left[1.06 \cdot \frac{10^{-2} \cdot D_э}{B_{I.э}} \cdot \left(\frac{P_{н.расч.э}}{10^{-5} \cdot E} \cdot \frac{l_{rE.э}}{D_э} \right)^{0.4}, \frac{1.2 \cdot P_{н.расч.э} \cdot D_э}{2 \cdot \sigma_{Д \cdot \phi_p} - P_{н.расч.э}} \cdot \left(\frac{1}{\cos\left(\frac{\alpha_I \cdot \pi}{180}\right)} \right) \right] = 1.36 = 1.36 \text{ мм.}$$

Примем толщину стенки гладкой конической обечайки равной толщине стенки цилиндрической обечайки: $s_{kl.э} = 6$ мм.

Проверка условия применения методики для конической обечайки

$$Usl_{39} = \begin{cases} \text{"Условия применения формул НЕ выполняются"} & \text{if } \alpha_I > 70 \\ \text{"Условия применения формул НЕ выполняются"} & \text{if } 0.001 \leq \frac{s_{kl.cen.} \cdot \cos\left(\frac{\alpha_I \cdot \pi}{180}\right)}{D_{cen}} \geq 0.05 \\ \text{"Условия применения формул выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_{39} = \text{"Условия применения формул выполняются"} .$$

Расчетные длины переходных частей обечаек по формуле 59:

$$a_{lp.э} = 0.7 \cdot \sqrt{\frac{D_э}{\cos\left(\frac{\alpha_I \cdot \pi}{180}\right)}} \cdot (s_{kl.э} - c) = 31.913 \text{ мм.}$$

$$a_{2p.э} = 0.7 \cdot \sqrt{D_э \cdot (s_{kl.э} - c)} = 29.698 \text{ мм.}$$

Эффективные размеры конической обечайки вычисляют по формуле 60

$$D_{E.э} = \max \left[\frac{D_э + D_I}{2 \cdot \cos\left(\frac{\alpha_I \cdot \pi}{180}\right)}, \frac{D_э}{\cos\left(\frac{\alpha_I \cdot \pi}{180}\right)} - 0.3 \cdot (D_э + D_I) \cdot \sqrt{\frac{D_э + D_I}{100 \cdot (s_{kl.э} - c)}} \cdot \tan\left(\frac{\alpha_I \cdot \pi}{180}\right) \right] = 371.0 = 371.0 \text{ мм.}$$

$$l_{E.э} = \frac{D_э - D_I}{2 \cdot \sin\left(\frac{\alpha_I \cdot \pi}{180}\right)} = \frac{(400 - 100)}{\left(2 \cdot \sin\left(\frac{30 \cdot \pi}{180}\right)\right)} = 300.0 = 300.0 \text{ мм.}$$

Коэффициент вычисляют по формуле 61:

$$B_{l.k.э} = \min \left[1, 9.45 \cdot \frac{D_{E.э}}{l_{E.э}} \cdot \sqrt{\frac{D_{E.э}}{100(s_{kl.э} - c)}} \right] = 1.0 = 1.0 .$$

Допускаемое наружное давление из условия прочности по формуле 62

$$P_{\partial n.kl.n.э} = \frac{2 \cdot \sigma_D \cdot (s_{kl.э} - c)}{\frac{D_э}{\cos\left(\frac{\alpha_I \cdot \pi}{180}\right)} + (s_{kl.э} - c)} = \frac{2 \cdot 174.0 \cdot (6 - 1.5)}{\left[\frac{400}{\cos\left(\frac{30 \cdot \pi}{180}\right)} + (6 - 1.5) \right]} = 3.36 = 3.36 \text{ МПа.}$$

Допускаемое наружное давление из условия устойчивости в пределах упругости по формуле 63:

$$P_{\partial E.kl.э} = \left(\frac{2.08 \cdot E \cdot 10^{-5}}{n_y \cdot B_{l.k.э}} \right) \cdot \frac{D_{E.э}}{l_{E.э}} \cdot \left[\frac{100 \cdot (s_{kl.э} - c)}{D_{E.э}} \right]^{2.5} = 3.47 = 3.47 \text{ МПа.}$$

Проверим условие прочности и устойчивости для конического днища:

$$Usl_{40} = \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } P_{в.расч.цен} < P_{\partial n.kl.n.цен} \\ \text{"Условие прочности не выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_{40} = \text{"Условие прочности выполняется"} .$$

$$Usl_{41} = \begin{cases} \text{"Условие устойчивости выполняется"} & \text{if } P_{н.расч.цен} < P_{\partial E.kl.цен} \\ \text{"Условие устойчивости не выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_{41} = \text{"Условие устойчивости выполняется"} .$$

Проверка условий применимости формул:

$$Usl_{42} = \begin{cases} \text{"Условие применимости формул выполняется"} & \text{if } 0.002 \leq \frac{s_{kl.cen.} \cdot \cos\left(\frac{\alpha \cdot l \cdot \pi}{180}\right)}{D_{cen}} \leq 0.1 \\ \text{"Условие применимости формул не выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_{42} = \text{"Условие применимости формул выполняется"} .$$

Согласно [36] и на основании расчетов подбираем днище с внутренними базовыми размерами:

Таблица 21 – Коническое днище с углом в вершине $\alpha = 60^\circ$

размеры в миллиметрах

D	h	s	a_1	a_2	$\alpha, ^\circ$
400	105	6	35	30	60

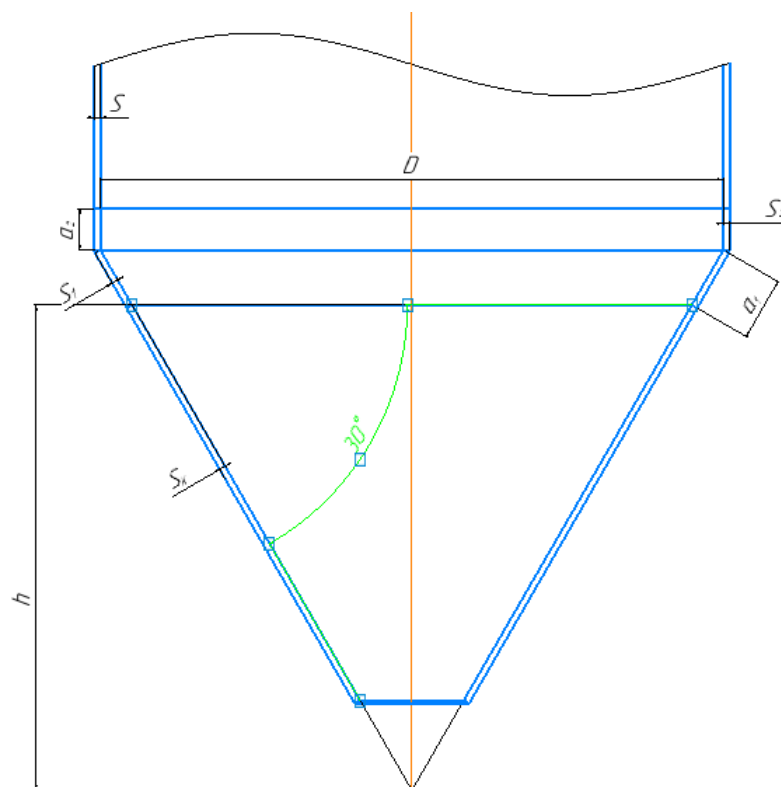


Рисунок 15 – Коническое днище

4.1.6.4 Расчет толщины стенки эллиптической крышки

Расчетная толщина крышки, нагруженные внутренним избыточным давлением, определяется по формуле 65:

$$s_{R2.э} = \max \left(\frac{P_{в.расч.э} \cdot D_э}{2 \cdot \sigma_{Д \cdot \phi_p} - 0.5 \cdot P_{в.расч.э}}, \frac{P_{нр.э} \cdot D_э}{2 \cdot \sigma_{H \cdot \phi_p} - 0.5 \cdot P_{нр.э}} \right) = 0.023 = 0.023 \text{ мм.}$$

Исполнительная толщина стенки крышки по формуле 44:

$$s_{к2.э} = s_{R2.э} + c = 0.023 + 1.5 = 1.523 = 1.523 \text{ мм.}$$

Принимаем толщину крышки стандартного значения $s_{кр.э} = 6 \text{ мм.}$

Допускаемое внутреннее избыточное давление для крышки по формуле 66:

$$P_{дон.в.э} = \frac{2 \cdot \sigma_{Д \cdot \phi_p} \cdot (s_{кр.э} - c)}{D_э + 0.5 \cdot (s_{кр.э} - c)} = 3.893 \text{ МПа.}$$

Для предварительного расчета коэффициент принимают равным $K_э = 0.9$.

Значение необходимой толщины стенки крышки, нагруженной наружным давлением, может быть предварительно вычислено по формуле по формуле 67:

$$s_{lp.э} = \max \left(\frac{K_э \cdot D_э}{161} \cdot \sqrt{\frac{n_y \cdot P_{н.расч.э}}{10^{-5} \cdot E}}, \frac{1.2 \cdot P_{н.расч.э}}{2 \cdot \sigma_{Д}} \right) = 0.79 = 0.79 \text{ мм.}$$

Исполнительная толщина стенки крышки по формуле 44:

$$s_{к.н.э} = s_{lp.э} + c = 0.79 + 1.5 = 2.29 = 2.29 \text{ мм.}$$

Принимаем толщину днища стандартного значения $s_{кр.э} = 6 \text{ мм.}$

Допускаемое наружное давление из условия прочности по формуле 68

$$P_{р.кр.э} = \frac{2 \cdot \sigma_{Д} \cdot (s_{кр.э} - c)}{D_э + 0.5 \cdot (s_{кр.э} - c)} = \frac{2 \cdot 174.0 \cdot (6 - 1.5)}{[400 + 0.5 \cdot (6 - 1.5)]} = 3.89 = 3.89 \text{ МПа.}$$

Высота выпуклой части крышки по внутренней поверхности без учета цилиндрической части по формуле 69

$$H_{в.э} = 0.25 \cdot D_э = 0.25 \cdot 400 = 100.0 = 100.0 \text{ мм.}$$

Коэффициент определяется по формуле по формуле 70:

$$x_{кр.э} = 10 \cdot \frac{(s_{кр.э} - c)}{D_э} \cdot \left(\frac{D_э}{2H_{в.э}} - \frac{2H_{в.э}}{D_э} \right) = 10 \cdot \left[\frac{(6 - 1.5)}{400} \right] \cdot \left[\frac{400}{(2 \cdot 100.0)} - \frac{2 \cdot 100.0}{400} \right] = 0.169 = 0.169 \text{ мм.}$$

Коэффициент вычисляют по формуле по формуле 71:

$$K_{э.э} = \frac{1 + (2.4 + 8x_{кр.э}) \cdot x_{кр.э}}{1 + (3.0 + 10x_{кр.э}) \cdot x_{кр.э}} = \frac{[1 + (2.4 + 8 \cdot 0.169) \cdot 0.169]}{[1 + (3.0 + 10 \cdot 0.169) \cdot 0.169]} = 0.912 = 0.912.$$

Допускаемое наружное давление из условия устойчивости в пределах упругости по формуле 72

$$p_{E.э} = \frac{2.6 \cdot 10^{-5} \cdot E}{n_y} \cdot \left[\frac{100 \cdot (s_{кр.э} - c)}{K_{э.э} \cdot D_э} \right] = \frac{2.6 \cdot 10^{-5} \cdot (2 \cdot 10^5)}{2.4} \cdot \left[\frac{100 \cdot (6 - 1.5)}{(0.912 \cdot 400)} \right] = 2.67 = 2.67 \text{ МПа.}$$

Допускаемое наружное давление определяется формулой по формуле 73:

$$P_{дон.н.э} = \frac{p_{р.кр.э}}{\sqrt{1 + \left(\frac{p_{р.кр.э}}{p_{E.э}} \right)^2}} = 2.201 \text{ МПа.}$$

Проверим условие прочности:

$$Usl_{43} = \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } P_{в.расч.э} < p_{р.кр.э} \\ \text{"Условие прочности не выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_{43} = \text{"Условие прочности выполняется"} \quad .$$

Проверим условие устойчивости:

$$Usl_{44} = \begin{cases} \text{"Условие устойчивости выполняется"} & \text{if } P_{н.расч.э} < p_{E.э} \\ \text{"Условие устойчивости не выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_{44} = \text{"Условие устойчивости выполняется"} \quad .$$

Проверка условий применимости формул:

$$Usl_{45} = \begin{cases} \text{"Условие применимости формул выполняется"} & \text{if } \frac{s_{кр.э} - c}{D_э} \leq 0.1 \\ \text{"Условие применимости формул не выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_{45} = \text{"Условие применимости формул выполняется"} \quad .$$

Подбираем крышку согласно [37] с параметрами:

Таблица 15 – Эллиптическая крышка

размеры в миллиметрах

D	h_1	h_B	s
400	25	100	6

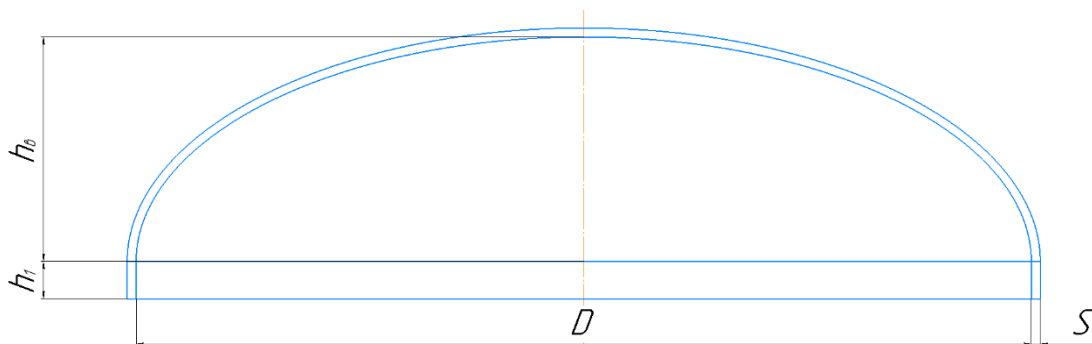


Рисунок 22 – Эллиптическая крышка

4.1.6.5 Расчет сопряжения цилиндрической и конической обечаек

Расчет сопряжения цилиндрической и конической обечаек идентичен указанном в разделе 2.1.4.7, поэтому алгоритм расчета вставлять нецелесообразно, однако результаты расчета необходимо привести.

Условие прочности для края конической обечайки

$$Prov := \begin{cases} \text{"условие прочности выполняется"} & \text{if } (\sigma_{kp}) \geq \sigma_{kmax} \\ \text{"условие прочности НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Prov = \text{"условие прочности выполняется"} .$$

Приведем полученные результаты расчета:

$$\sigma_{kmax} = 5.307 \times 10^6 \text{ Па};$$

$$\sigma_{kp} = 2.327 \times 10^8 \text{ Па}.$$

Условие прочности для края цилиндрической обечайки

$$Prov1 := \begin{cases} \text{"условие прочности выполняется"} & \text{if } (\sigma_{kp}) \geq \sigma_{cmax} \\ \text{"условие прочности НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Prov1 = \text{"условие прочности выполняется"} .$$

Приведем полученные результаты расчета:

$$\sigma_{cmax} = 5.203 \times 10^6 \text{ Па};$$

$$\sigma_{kp} = 2.327 \times 10^8 \text{ Па}.$$

4.1.6.6 Расчет сопряжения цилиндрической обечайки и эллиптического

днища

Расчет сопряжения цилиндрической и конической обечаек идентичен указанном в разделе 2.1.4.8, поэтому алгоритм расчета вставлять нецелесообразно, достаточно отразить результаты расчета.

Условие прочности для края эллиптического днища

$$Prov = \begin{cases} \text{"условие прочности выполняется"} & \text{if } (\sigma_{кр.д}) \geq \sigma_{maxэ} \\ \text{"условие прочности НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Prov = \text{"условие прочности выполняется"} .$$

Приведем полученные результаты расчета

$$\sigma_{кр.д} = 2.327 \times 10^8 \text{ Па};$$

$$\sigma_{maxэ} = 1.778 \times 10^6 \text{ Па}.$$

Условие прочности для края цилиндрической обечайки

$$Prov1 = \begin{cases} \text{"условие прочности выполняется"} & \text{if } (\sigma_{кр.д}) \geq \sigma_{maxо} \\ \text{"условие прочности НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Prov = \text{"условие прочности выполняется"} .$$

$$\sigma_{кр.д} = 2.327 \times 10^8 \text{ Па};$$

$$\sigma_{maxо} = 1.778 \times 10^6 \text{ Па}.$$

4.1.6.7 Определение необходимости укрепления отверстий в экстракторе

В экстракторе имеются отверстия под штуцера ввода конденсата упаренной воды из греющей камеры в эллиптическую крышку, отвода раствора в коническое днище. Проверим необходимость укрепления перечисленных отверстий. Расчет проводим согласно методике, указанной в [40].

4.1.6.7.1 Определение необходимости отверстий для штуцера ввода конденсата упаренной воды из греющей камеры в эллиптическую крышку

Расчетные диаметры укрепляемых элементов

$$D_{p10} = \frac{D_9^2}{2 \cdot H_9} \cdot \sqrt{1 - 4 \cdot \frac{(D_9^2 - 4 \cdot H_9^2)}{D_9^4} \cdot x_2^2} = 160.0 = 160.0 \text{ мм.}$$

Расчетный диаметр отверстия в коническом днище:

$$d_{p10} = (d_{н.втор.н.} + 2 \cdot c) = 100 + 2 \cdot 1.5 = 103.0 = 103.0 \text{ мм.}$$

Проверка условий применения формул для расчета укрепления отверстий:

$$Usl_{46} = \begin{cases} \text{"Отношение диаметров НЕ выполняется"} & \text{if } \left(\frac{d_{p10} - 2 \cdot c}{D_9} > 0.6 \right) \\ \text{"Отношение толщины к диаметру НЕ выполняется"} & \text{if } \left(\frac{s_{кр.э} - c}{D_9} > 0.1 \right) \\ \text{"Условия применения формул выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_{46} = \text{"Условия применения формул выполняются"} .$$

Расчетная толщины стенок укрепляемых элементов:

$$S_{p10} = \frac{P_{н.расч.э} \cdot D_{p10}}{2 \cdot \sigma_D \cdot \phi_p - P_{н.расч.э}} = 0.048 \text{ мм.}$$

Расчетную толщину стенки штуцера с круглым поперечным сечением, нагруженного наружным давлением, вычисляют по формуле

$$s_{p10} = \frac{P_{н.расч.э} \cdot (d_{н.втор.н.} + 2 \cdot c)}{2 \cdot \sigma_D \cdot \phi_p - P_{н.расч.э}} = \frac{0.104 \cdot (100 + 2 \cdot 1.5)}{(2 \cdot 174.0 \cdot 1 - 0.104)} = 0.0308 = 0.0308 \text{ мм.}$$

Расчетный диаметр отверстия, не требующего укрепления в стенке цилиндрической обечайки

$$d_{0p.10} = 0.4 \cdot \sqrt{D_9 \cdot (S - c)} = 16.971 \text{ мм.}$$

Наибольший допустимый диаметр одиночного отверстия, не требующего дополнительного укрепления при наличии избыточной толщины стенки сосуда, вычисляют по формуле:

$$d_{0.10} = \min \left[2 \cdot \left[\left(\frac{s_{кр.э} - c}{\frac{P_0 \cdot D_{p10}}{2 \cdot K_{1.2} \cdot \sigma_D - P_0}} \right) - 0.8 \right] \cdot \sqrt{D_{p10} \cdot (s_{кр.э} - c)}, 0.6 D_9 + 2 \cdot c \right] = 243 \text{ мм.}$$

$$Usl_{49} = \begin{cases} \text{"необходимо укрепление отверстия"} & \text{if } d_{0.10} < d_{p10} \\ \text{"укрепление отверстия не требуется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_{49} = \text{"укрепление отверстия не требуется"} .$$

4.1.6.7.2 Определение необходимости отверстий для штуцера вывода жидкости из экстрактора в переливную трубу

Расчетные диаметры укрепляемых элементов

$$D_{p11} = \frac{D_9}{\cos\left(\frac{\alpha_1 \cdot \pi}{180}\right)} = 462.0 = 462.0 \text{ мм.}$$

Расчетный диаметр отверстия в коническом днище:

$$d_{p11} = (d_{н.н.} + 2 \cdot c) = 25 + 2 \cdot 1.5 = 28.0 = 28.0 \text{ мм.}$$

Проверка условий применения формул для расчета укрепления отверстий:

$$Usl_{50} = \begin{cases} \text{"Отношение диаметров НЕ выполняется"} & \text{if } \left(\frac{d_{p11} - 2 \cdot c}{D_9} > 0.6 \right) \\ \text{"Отношение толщины к диаметру НЕ выполняется"} & \text{if } \left(\frac{s_{кр.э} - c}{D_9} > 0.1 \right) \\ \text{"Условия применения формул выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_{46} = \text{"Условия применения формул выполняются"} .$$

Расчетная толщины стенок укрепляемых элементов:

$$S_{p11} = \frac{P_{н.расч.э} \cdot D_{p11}}{2 \cdot \sigma_{Д \cdot \Phi_p} - P_{н.расч.э}} = 0.138 \text{ мм.}$$

Расчетную толщину стенки штуцера с круглым поперечным сечением, нагруженного наружным давлением, вычисляют по формуле

$$s_{p11} = \frac{P_{н.расч.э} \cdot (d_{н.н.} + 2 \cdot c)}{2 \cdot \sigma_{Д \cdot \Phi_p} - P_{н.расч.э}} = \frac{0.104 \cdot (25 + 2 \cdot 1.5)}{(2 \cdot 174.0 \cdot 1 - 0.104)} = 0.00837 = 0.00837 \text{ мм.}$$

Расчетный диаметр отверстия, не требующего укрепления в стенке цилиндрической обечайки

$$d_{0p.11} = 0.4 \cdot \sqrt{D_9 \cdot (S - c)} = 16.971 \text{ мм.}$$

Наибольший допустимый диаметр одиночного отверстия, не требующего дополнительного укрепления при наличии избыточной толщины стенки сосуда, вычисляют по формуле:

$$d_{0.11} = \min \left[2 \cdot \left[\left(\frac{s_{кр.э} - c}{\frac{P_{\partial} \cdot D_{p10}}{2 \cdot K_{1.1} \cdot \sigma_{Д} - P_{\partial}}} \right) - 0.8 \right] \cdot \sqrt{D_{p10} \cdot (s_{кр.э} - c)}, 0.6 D_9 + 2 \cdot c \right] = 243 \text{ мм.}$$

$$Usl_{51} = \begin{cases} \text{"необходимо укрепление отверстия"} & \text{if } d_{0.11} < d_{p11} \\ \text{"укрепление отверстия не требуется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_{51} = \text{"укрепление отверстия не требуется"} .$$

4.1.6.8 Расчет решетки для сырья на механическую прочность и жесткость

Масса сырья в ходе процесса увеличивается, т.к. сырье пропитывается и увеличивает свой объем и массу. В ходе проведенных экспериментов был выяснен коэффициент, равный $K_{у.м.} = 3$. Его введем для уточнения массы загруженного сырья.

Насыпная плотность сырья согласно проведенным исследованиям $\rho_{нас} = 380 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

Так как сырье имеет свойство набухать при пропитке, вычислен коэффициент набухания по экспериментальным данным, равный $K_{наб} = 3.15$.

По конструктивным соображениям примем высоту загрузки сырья в аппарат, равную $H_3 = 0.355 \text{ м}$.

Объем цилиндрической части экстрактора:

$$V_3 = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{D_3}{1000} \cdot H_3 = \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{400}{1000} \right) \cdot 0.355 = 0.112 = 0.112 \text{ м}^3.$$

Объем загрузки будет равен:

$$V_3 = \frac{V_3}{K_{наб}} = \frac{0.112}{3.15} = 0.0356 = 0.0356 \text{ м}^3.$$

Масса загружаемого сырья:

$$m_c = \rho_{нас} \cdot V_3 \cdot K_{у.м.} = 380 \cdot 0.0356 \cdot 3 = 40.6 = 40.6 \text{ кг}.$$

Вода так же будет создавать нагрузку на решетку, поэтому следует привести и её массу.

Примем плотность воды равной [20, с. 537] $\rho_{в.э} = 983 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

Масса воды $m_в = \rho_{в.э} \cdot V_3 = 983 \cdot 0.112 = 110.0 = 110.0 \text{ кг}$.

Тогда общая масса будет равна сумме $m_o = m_в + m_c = 150.6 = 150.6 \text{ кг}$.

Вес сырья и воды в таком случае $F_в = m_o \cdot g = 150.6 \cdot 9.81 = 1477.4 = 1477.4 \text{ Н}$.

Площадь решетки:

$$S_{resh} = \frac{\pi \cdot \left(\frac{D_9}{1000}\right)^2}{4} = \frac{\pi \cdot \left(\frac{400}{1000}\right)^2}{4} = 0.126 = 0.126 \text{ м}^2.$$

Давление на решетку тогда:

$$P_{resh} = \frac{F_6}{S_{resh}} \cdot 10^{-6} = \frac{1477.4}{0.126} \cdot 10^{-6} = 0.0117 = 0.0117 \text{ МПа}.$$

Расчетная толщина решетки:

$$S_p = 0.56 \cdot D_9 \cdot \sqrt{\frac{P_{resh}}{\sigma_D}} = 0.56 \cdot 400 \cdot \sqrt{\frac{0.0117}{174.0}} = 1.84 = 1.84 \text{ мм}.$$

Исполнительная толщина решетки в таком случае:

$$S_{p.u.} = (S_p + c) = 2.07 + 1.5 = 3.57 = 3.57 \text{ мм}.$$

Толщину решетки примем равной $S_{p.u.} = 4 \text{ мм}$.

Коэффициент Пуассона для стали $\mu = 0.3$.

Цилиндрическая жесткость определяется согласно формуле:

$$N_I = \frac{E \cdot S_{p.u.}^3}{12(1 - 0.3^2)} = \frac{2 \cdot 10^5 \cdot 4^3}{[12 \cdot (1 - 0.3^2)]} = 1.17\text{e}6 = 1.17\text{e}6 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Прогиб в центре тарелки:

$$\omega_I = 4.08 \cdot \frac{P_{resh} \cdot R_9^4}{64 \cdot N_I} = 4.08 \cdot \left[\frac{0.0148 \cdot 200^4}{(64 \cdot 1.17\text{e}6)} \right] = 1.29 = 1.29 \text{ мм}.$$

$$Usl_{52} = \begin{cases} \text{"необходимо увеличить толщину решетки"} & \text{if } \omega_I > \frac{D_9}{2000} \\ \text{"величина прогиба не превышает установленных значений"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_{52} = \text{"необходимо увеличить толщину решетки"}.$$

Согласно проверке условия прочности, необходимо увеличить толщину решетки. Тогда толщину решетки примем равной: $S_{p.u.} = 10 \text{ мм}$.

Цилиндрическая жесткость определяется согласно формуле:

$$N_2 = \frac{E \cdot S_{p.u.}^3}{12(1 - \mu^2)} = \frac{2 \cdot 10^5 \cdot 10^3}{[12 \cdot (1 - 0.3^2)]} = 1.83\text{e}7 = 1.83\text{e}7 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Прогиб в центре тарелки:

$$\omega_2 = 4.08 \cdot \frac{P_{реш} \cdot R_9^4}{64 \cdot N_2} = 4.08 \cdot \left[\frac{0.0148 \cdot 200^4}{(64 \cdot 1.83e7)} \right] = 0.0825 = 0.0825 \text{ мм.}$$

$$Usl_{53} = \begin{cases} \text{"необходимо увеличить толщину решетки" if } \omega_2 > \frac{D_9}{2000} \\ \text{"величина прогиба не превышает установленных значений" otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_{53} = \text{"величина прогиба не превышает установленных значений" .}$$

4.1.6.9 Расчет фланцевого соединения для соединения эллиптической крышки и цилиндрической обечайки греющей камеры

Данный расчет полностью повторяет алгоритм действий, представленный в разделе 2.1.4.10, следовательно, не имеет никакого смысла приводить расчет еще раз. Однако, необходимо указать результаты расчетов.

Внутренний диаметр фланца $D = 400 \text{ мм.}$

Толщина тарелки фланца $h = 80 \text{ мм.}$

Расчетное давление $P = 0.6 \text{ МПа.}$

Наружный диаметр фланца $D_H = 520 \text{ мм.}$

Толщина прокладки $h_n = 2 \text{ мм.}$

Внешний изгибающий момент $M = 0 \text{ Н} \cdot \text{мм.}$

Диаметр окружности расположения болтов $D_{\bar{\sigma}} = 480 \text{ мм.}$

Толщина втулки приварного встык фланца $S_0 = 6 \text{ мм.}$

Осевая сила $F = 0 \text{ Н.}$

Расчетный диаметр прокладки $D_{cn} = 428 \text{ мм.}$

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

Сумма прибавок к расчетной толщине стенок $c_o = 1.5 \text{ мм.}$

Ширина прокладки $b_n = 30 \text{ мм.}$

Количество болтов $n = 16 \text{ шт.}$

Расчетная температура стенки корпуса (штуцера) в месте расположения фланцевого соединения $t = 60^\circ\text{C}$.

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

$$Usl_1 = \begin{cases} \text{"Условия прочности в при затяжке НЕ выполняются"} & \text{if } \sigma_{\bar{b}1} > \sigma_{20\bar{b}} \\ \text{"Условия прочности в рабочих условиях НЕ выполняются"} & \text{if } \sigma_{\bar{b}2} > \sigma_{\bar{d},\bar{b}} \\ \text{"Условия прочности выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\sigma_{\bar{b}1} = 92 \text{ МПа}; \sigma_{20\bar{b}} = 230 \text{ МПа}; \sigma_{\bar{b}2} = 124.115 \text{ МПа}; \sigma_{\bar{d},\bar{b}} = 230 \text{ МПа.}$$

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

Условие прочности прокладки:

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

$$q_d = 130 \text{ МПа}; q = 11.077 \text{ МПа.}$$

$$Usl_2 = \text{"Условие прочности прокладки выполняется"} \quad .$$

Проверка условий статической прочности фланцев

$$Usl_3 = \begin{cases} PR_1 & \text{if } \max\left(\left|\sigma_{0M} + \sigma_{RM}\right|, \left|\sigma_{0M} + \sigma_{TM}\right|\right) > K_T \cdot \sigma_{20} \\ PR_2 & \text{if } \max\left(\left(\left|\sigma_{0p} - \sigma_{0mp} + \sigma_{Tp}\right|\right), \left(\left|\sigma_{0p} - \sigma_{0mp} + \sigma_{Rp}\right|\right), \left|\sigma_{0p} + \sigma_{0mp}\right|\right) > K_T \cdot \sigma_{\bar{d},\bar{\phi}} \\ PR_3 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\max\left(\left|\sigma_{0M} + \sigma_{RM}\right|, \left|\sigma_{0M} + \sigma_{TM}\right|\right) = 75.348 \text{ МПа}; \max\left(\left(\left|\sigma_{0p} - \sigma_{0mp} + \sigma_{Tp}\right|\right), \left(\left|\sigma_{0p} - \sigma_{0mp} + \sigma_{Rp}\right|\right), \left|\sigma_{0p} + \sigma_{0mp}\right|\right) = 94.919 \text{ МПа.}$$

$$K_T \cdot \sigma_{20} = 239.2 \text{ МПа}; K_T \cdot \sigma_{\bar{d},\bar{\phi}} = 232.7 \text{ МПа.}$$

$$Usl_3 = \text{"Условия статической прочности выполняются"} \quad .$$

Проверка углов поворота фланцев

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

$$\text{Угол поворота приварного встык фланца, плоского фланца } \Theta = 8.659 \times 10^{-4} \quad .$$

Допустимый угол поворота плоского фланца $\Theta_{\partial} = 0.013$.

$$Usl_P = \text{"Условие поворота плоского фланца выполняется"} .$$

Проверим условие прочности для заданного числа циклов сборки-разборок и изменений режима эксплуатации для фланцевого соединения:

$$Usl1 = \left| \begin{array}{ll} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } \frac{N_{C.}}{N_{\partial}} + \frac{N_P}{N_{\partial.p}} \leq 1 \\ \text{"Условие прочности не выполняется"} & otherwise \end{array} \right.$$

$$Usl1 = \text{"Условие прочности выполняется"} .$$

Проверим условие прочности для заданного числа циклов сборки-разборок и изменений режима эксплуатации для болтов:

$$Usl2 = \left| \begin{array}{ll} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } \frac{N_{C.}}{N_{\partial.b}} + \frac{N_P}{N_{\partial.p.b}} \leq 1 \\ \text{"Условие прочности не выполняется"} & otherwise \end{array} \right.$$

$$Usl2 = \text{"Условие прочности выполняется"} .$$

Численные значения для проверки:

$$N_{C.} = 7.3 \times 10^3 \text{ циклов.}$$

$$N_{\partial} = 1.514 \times 10^5 \text{ циклов.}$$

$$N_P = 1 \times 10^4 \text{ циклов.}$$

$$N_{\partial.p} = 3.42 \times 10^8 \text{ циклов.}$$

$$N_{\partial.b} = 7.599 \times 10^5 \text{ циклов.}$$

$$N_{\partial.p.b} = 5.079 \times 10^4 \text{ циклов.}$$

4.1.6.10 Подбор опор для экстрактора

Наружный диаметр сепаратора $D_{нар.э.} = 0.412 \text{ м.}$

Внутренний диаметр сепаратора $D_{вн.э.} = 0.4 \text{ м.}$

Плотность стали 12X18H10T [46] $\rho_{ст} = 7920 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$

Высота обечайки сепаратора $H_{к.э.} = 0.5$ м.

Масса обечайки составит:

$$m_{об.э} = 0.785 \cdot (D_{нар.э.}^2 - D_{вн.э.}^2) \cdot H_{к.э.} \cdot \rho_{ст} = 30.3 = 30.3 \text{ кг.}$$

Масса конического днища греющей камеры согласно [36] $m_{к.д.э.} = 16$ кг.

Масса эллиптической крышки греющей камеры согласно [37] $m_{э.к.э.} = 10$ кг.

Масса аппарата с учетом вспомогательных средств (штуцеров, фланцев) составляет:

$$m_{к.э} = (m_{об.э} + m_{к.д.э.} + m_{э.к.э.}) \cdot 1.2 = 67.56 \text{ кг.}$$

Объем конического днища сепаратора [36] $V_{к.д.с.} = 0.02 \text{ м}^3$.

Объем эллиптической крышки сепаратора [37] $V_{э.к.с.} = 0.011 \text{ м}^3$.

Масса воды в аппарате:

$$m_{в.э} = (0.785 \cdot D_{вн.э.}^2 \cdot H_{к.э.} + V_{к.д.с.} + V_{э.к.с.}) \cdot \rho_{в} = 93.6 = 93.6 \text{ кг.}$$

Общая масса тогда будет составлять:

$$m_{max.э} = m_{к.э} + m_{в.э} = 161.0 = 161.0 \text{ кг.}$$

Нагрузка от массы аппарата, воды и вспомогательных средств на 3 опоры типа 2 согласно [47] составляет:

$$G_{э.} = \frac{m_{max.э} \cdot g \cdot 10^{-3}}{3} = 0.526 \text{ кН.}$$

Внешний вид опоры представлен на рисунке, размеры приведены в таблице.

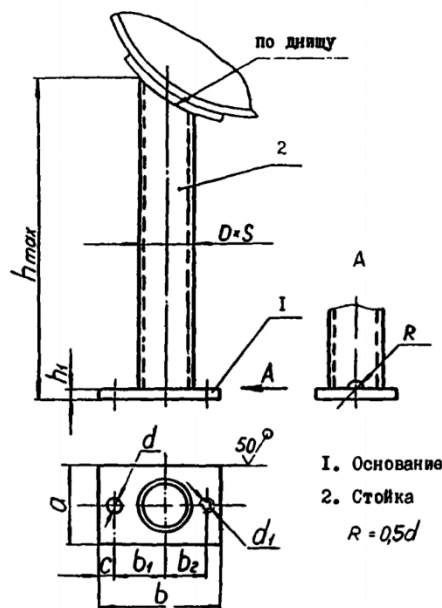


Рисунок – Опора для греющей камеры

Таблица – Размеры опоры

размеры в мм

Нагрузка на опору, кН, не более	$D \times S$	a	b	b_1	b_2	c	h_{max}	h_1	d	d_1
10	57x3,5	110	170	70	50	25	1200	14	19	M16

5 Расчет средств защиты оборудования

Целью данного подраздела выпускной квалификационной работы является расчет предохранительного устройства для защиты от превышения давления и защитного заземления для емкости, в которой при помощи трубчатого электронагревателя подогревается вода для получения греющего водяного пара в греющую камеру. Проведение подобных расчетов при проектировании может существенно сказаться на сроке эксплуатации оборудования, а также на сохранении здоровья обслуживающего данный аппарат персонала.

5.1 Защита от превышения давления

При возможном возникновении аварийного повышения давления в технологическом оборудовании необходимо проводить мероприятия по предотвращению данной опасности и возможности разрушения аппаратуры под действием давления рабочей среды. Для устранения данных ситуаций оборудование снабжается различными предохранительными устройствами, которые сбрасывают из аппарата излишнее количество среды.

К источникам аварийного роста давления в аппаратах можно отнести [48, с. 39]:

- приток в аппарат газа, пара или жидкости при закрытом выходе из него;
- обогрев или нарушение охлаждения аппарата, в результате чего происходит, нагрев газа или пара, испарение жидкости в нем или интенсификация химической реакции;
- взрыв среды в аппарате.

Причинами аварийного повышения давления могут являться [48, с. 39]:

- ошибки обслуживающего персонала;
- отказ запорно-регулирующей арматуры;
- нарушение функционирования системы автоматического управления;
- внезапное разрушение внутренних устройств аппарата: труб, змеевиков, рубашек и др.
- замерзание охлаждающей воды;
- выход из-под контроля химических реакций;
- интенсивный нагрев поверхности аппарата от внешнего источника, например, в результате пожара, солнечной радиации и т. п.

Расчеты и выбор предохранительных устройств следует проводить для самых экстремальных условий.

5.1.1 Расчет предохранительного клапана

Рабочей средой является водяной пар с температурой 99,1 °С. Для данной температуры давление насыщенного водяного пара соответствует значению [20, с. 549, табл. LVI] $6,303 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$.

Производим пересчет из $\frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$ в МПа согласно соотношению: $1 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2} = 9,81 \cdot 10^4 \text{ Па}$ и получаем:

$$P_p = 0.618 \text{ МПа.}$$

Примем давление сброса равным $P_2 = 0 \text{ МПа}$.

Молярная масса водяного пара согласно [20, с. 519, табл. XI] $M = 18 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$.

Температуре в емкости с трубчатым электронагревателем составляет:

$$T = 99.1 + 273 = 372.0 = 372.0 \text{ К}$$

Массовый расход пара на обогрев кипятильника

$$m_{\text{в}} = 20.8 \frac{\text{кг}}{\text{час}}$$

Коэффициент сжимаемости $z = 1$.

Параметры критической точки:

Критическая температура водяного пара [20, с. 519, табл. XI]: $T_{\text{кр.т.}} = 647 \text{ К}$.

Согласно [49] критическое давление водяного пара составляет 218,5 атм. Пользуясь соотношением $1 \text{ атм} \approx 0,1 \text{ МПа}$ произведем пересчет: $p_{\text{кр.т.}} = 21.85 \text{ МПа}$.

Расчет проводим согласно [50].

Определим максимально допустимое давление в аппарате при срабатывании предохранительного устройства, согласно правилам, предоставляемым Ростехнадзором по формуле:

$$P_{2a} = 1.15 \cdot P_p = 1.15 \cdot 0.618 = 0.711 = 0.711 \text{ МПа.} \quad (222)$$

Показатель изоэнтропы для нормальных условий согласно [51] равен: $k_H = 1.33$.

Температура водяного пара при давлении P_{2a} определим согласно формуле:

$$T_I = \left(T \cdot \frac{P_{2a} + 0.1}{P_p + 0.1} \right)^{\frac{k_H - 1}{k_H}} = 372.0 \cdot \left[\frac{(0.711 + 0.1)}{(0.618 + 0.1)} \right]^{\frac{(1.33 - 1)}{1.33}} = 104.0 = 104.0 \text{ К.} \quad (223)$$

Далее следует провести определение приведённых параметров. Согласно [52] приведённое давление:

$$\pi_I = \frac{P_{2a} + 0.1}{p_{\text{кр.т.}}} = \frac{(0.711 + 0.1)}{21.85} = 0.0371 = 0.0371 \text{ МПа.} \quad (223)$$

Приведённая температура [52]:

$$\tau_I = \frac{T_I}{T_{кр.т.}} = \frac{104.0}{647} = 0.161 = 0.161 \text{ К.} \quad (224)$$

Исходя из этих значений можно определить отношение приведённого давления к приведённой температуре:

$$\frac{\pi_I}{\tau_I} = \frac{0.0371}{0.161} = 0.23 = 0.23 . \quad (225)$$

Так как отношение $\frac{\pi_I}{\tau_I} < 0.5$, то, следовательно: $k = 1.33$.

В таком случае, критическое отношение давлений можно определить по формуле:

$$\beta_a = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} = \left[\frac{2}{(1.33+1)} \right]^{\left[\frac{1.33}{(1.33-1)} \right]} = 0.54 = 0.54 . \quad (226)$$

Максимальный расход устанавливается при меньшем отношении давлений, что для предохранительных клапанов составляет:

$$\beta_{кл} = 0.57\beta_a = 0.57 \cdot 0.54 = 0.308 = 0.308 . \quad (227)$$

Критическое истечение с постоянным максимальным расходом происходит при отношении давлений за и перед предохранительным устройством, определяемого уравнением:

$$\beta = \frac{P_2 + 0.1}{P_{2a} + 0.1} = \frac{(0 + 0.1)}{(0.711 + 0.1)} = 0.123 = 0.123 . \quad (228)$$

Коэффициент докритического расхода B_2 , который учитывает соотношение давлений за и перед предохранительным устройством, при максимальном критическом расходе среды будет равен 1, согласно [50] по условию $\beta < \beta_{кл}$.

$$B_2 = 1$$

Коэффициент B_3 определим согласно формуле [48, с. 49, фор. 3.17], так как она удовлетворяет условию $\beta < \beta_{кл}$:

$$B_3 = 1.59 \cdot \sqrt{\frac{k}{k+1}} \cdot \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}} = 1.59 \cdot \sqrt{\frac{1.33}{(1.33+1)}} \cdot \left[\frac{2}{(1.33+1)} \right]^{\left[\frac{1}{(1.33-1)} \right]} = 0.756 = 0.756 . \quad (229)$$

Следующим шагом определим коэффициент, который учитывает физико-химические свойства газов и паров при температуре и коэффициенте сжимаемости, равном 1:

$$B_{Iz} = 5.46 \cdot B_3 \cdot \sqrt[3]{\frac{M}{T_I}} = 5.46 \cdot 0.756 \cdot \sqrt[3]{\frac{18}{104.0}} = 2.3 = 2.3 . \quad (230)$$

Тогда коэффициент, учитывающий физико-химические свойства газов и паров:

$$B_{Ia} = \frac{B_{Iz}}{\sqrt{z}} = \frac{2.3}{\sqrt{1}} = 2.3 = 2.3 . \quad (231)$$

При массовом расходе m_g определяем расчетную величину эквивалентной площади:

$$\alpha_{IF.r} = \frac{m_g}{10 \cdot B_{Ia} \cdot B_2 \cdot (P_{2a} + 0.1)} = \frac{20.8}{[10 \cdot 2.3 \cdot 1 \cdot (0.711 + 0.1)]} = 1.12 = 1.12 . \quad (232)$$

Согласно таблице П22 [48, с. 177] примем малоподъемный предохранительный клапан прямого действия со значением коэффициента $\alpha_I = 0.5$.

Расчетная площадь узкого сечения седла предохранительного клапана будет равна:

$$F_{c.R} = \frac{\alpha_{IF.r}}{\alpha_I} = \frac{1.12}{0.5} = 2.24 = 2.24 . \text{ мм}^2 \quad (233)$$

Расчетный диаметр узкого сечения седла:

$$d_{c.R} = \sqrt{\frac{F_{c.R}}{0.785}} = \sqrt{\frac{2.24}{0.785}} = 1.69 = 1.69 . \text{ мм} \quad (234)$$

Для полученных значений диаметра узкого сечения седла и рабочего давления подбираем предохранительный клапан пружинный полноподъемный [48, с. 165, табл. П5] типа СППК4-16 с условным обозначением 17нж13ст, максимальной рабочей температурой 600, условным давлением 1,6 МПа, рабочим давлением при максимальной температуре 0,66 МПа, условным диаметром 80 мм и диаметром седла 40 мм.

Для проверки выбранного клапана определяем при $k_{zv} = 1.33$ и $\beta = 0.123$ по таблице П11 [48, с. 170] коэффициент $B = 0.508$.

Плотность водяного пара $\rho = 3.25 \text{ кг/м}^3$

Площадь седла:

$$F_r = \frac{m_g}{5.03 \cdot \alpha_I \cdot B \cdot \sqrt{(P_{2a} - P_2) \cdot \rho}} = \frac{20.8}{[5.03 \cdot 0.5 \cdot 0.508 \cdot \sqrt{(0.711 - 0) \cdot 3.25}]} = 10.7 = 10.7 . \text{ мм}^2. \quad (235)$$

Диаметр предохранительного клапана:

$$d_r = \sqrt{\frac{F_r}{0.785}} = \sqrt{\frac{10.7}{0.785}} = 3.692 = 3.692 \text{ . мм.} \quad (235)$$

$$Usl = \begin{cases} Usl = \text{"Клапан выбран верно и соответствует формуле Ростехнадзора"} & \text{if } d_{c.R} \leq d_r \\ Usl = \text{"Клапан выбран неверно"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$Usl = \text{"Клапан выбран верно и соответствует формуле Ростехнадзора"} \text{ .}$

В результате проведенных расчетов получаем, что клапан рассчитан, подобран верно и удовлетворяет необходимым для безопасного ведения процесса критериям.

5.2 Расчет защитного заземления

Защитное заземление предназначено для защиты людей от поражения электрическим поражающим током при косвенном прикосновении с открытыми проводящими частями электроустановки и сторонними проводящими частями, не являющимися частями электроустановки (например, металлоконструкции здания, металлические газовые сети, водопровод, трубы отопления и т.п. и неэлектрические аппараты, полы и стены из неизоляционного материала), которые могут оказаться под напряжением в случае повреждения.

Основными причинами воздействия тока на человека являются:

- случайное прикосновение или приближение на опасное расстояние к токоведущим частям;
- шаговое напряжение на поверхности земли в результате замыкания провода;
- прикосновение к нетоковедущим, но токопроводящим частям, оказавшимся под напряжением из-за неисправности изоляции или защитных устройств;
- нарушение правил технической эксплуатации электроустановок;
- механическое повреждение, старение, износ изоляции;
- преднамеренная порча изоляции;
- отсутствие или нарушение заземления, зануления;
- невыполнение организационных мероприятий, низкая квалификация, необученность персонала;
- отсутствие блокировок, ограждающих устройств, предупредительной сигнализации, надписей, плакатов, знаков безопасности;
- отсутствие или неправильное применение средств индивидуальной защиты (СИЗ).

5.2.1 Расчет защитного заземления для трубчатого электронагревателя

Удельное сопротивление грунта по таблице [53] равно $\rho_{изм} = 100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Значение коэффициентов сезонности в климатической зоне II определяются при помощи [53, с. 40, табл. А.2]:

- для вертикальных: $k_{с.в} = 1.75$.
- для горизонтальных: $k_{с.г} = 4$.

Определим величину наибольшего допустимого сопротивления заземляющего устройства, которое определяется по характеристикам заземляемого оборудования и мощности питающего трансформатора согласно [53, с. 41, табл. А3] $R_3 = 10 \text{ Ом}$.

Расчетное удельное сопротивление грунта определяется по формуле:

$$\rho_{зр} = \rho_{изм} \cdot k_c \quad (236)$$

Тогда для вертикальных заземлителей:

$$\rho_{зр.в} = \rho_{изм} \cdot k_{с.в} = 100 \cdot 1.75 = 175.0 = 175.0 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

Для горизонтальных заземлителей:

$$\rho_{зр.г} = \rho_{изм} \cdot k_{с.г} = 100 \cdot 4 = 400.0 = 400.0 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

Длина вертикальных электродов из труб $l = 3 \text{ м}$.

Диаметр вертикальных электродов из труб $d = 0.06 \text{ м}$.

Глубина заложения полосы $h = 0.5 \text{ м}$.

Глубина заложения вертикального заземлителя:

$$t = \frac{l}{2} + h = \frac{3}{2} + 0.5 = 2.0 = 2.0 \text{ м} \quad (237)$$

Сопротивление одиночного вертикального заземлителя можно вычислить по формуле:

$$R_0 = 0.366 \cdot \frac{\rho_{зр.в}}{l} \cdot \left(\left(\log \left(\frac{2 \cdot l}{d} \right) + \frac{1}{2} \cdot \log \left(\frac{4t + l}{4 \cdot t - l} \right) \right) \right) = 46.4 = 46.4 \text{ Ом} \cdot \text{м} \quad (238)$$

Необходимое количество вертикальных электродов определим методом последовательных приближений:

$$n = \frac{R_0}{R_3 \cdot \eta_0} \text{ Ом} \cdot \text{м} \quad (239)$$

где η_0 — коэффициент использования заземлителя согласно [53, с. 41, табл. А.4].

Исходное количество труб находим при $\eta_0 = 1$:

$$n_1 = \frac{R_0}{R_3 \cdot \eta_0} = \frac{46.4}{(10 \cdot 1)} = 4.64 = 4.64 \quad (240)$$

Примем соотношение $\frac{a}{l} = 2$.

Согласно таблице А.4 [53, с. 41] и при помощи линейной интерполяции найдем $\eta_{01} = 0.81$.

Уточним число труб:

$$n_2 = \frac{R_0}{R_3 \cdot \eta_{01}} = \frac{46.4}{(10 \cdot 0.81)} = 5.73 = 5.73 \text{ шт.} \quad (241)$$

Проверим условие, при котором расчет количества вертикальных электродов прекращается:

$$Us11 = \begin{cases} \text{"Расчет можно прекращать" if } n_2 - n_1 \leq 1 \\ \text{"Условие не выполняется, продолжайте расчет" otherwise} \end{cases}$$

$$Us11 = \text{"Условие не выполняется, продолжайте расчет" } .$$

Согласно таблице А.4 [53, с. 41] и при помощи линейной интерполяции найдем $\eta_{02} = 0.77$.

Уточним число труб:

$$n_3 = \frac{R_0}{R_3 \cdot \eta_{02}} = \frac{46.4}{(10 \cdot 0.77)} = 6.03 = 6.03 \text{ шт.} \quad (242)$$

Проверим условие, при котором расчет количества вертикальных электродов прекращается:

$$Us12 = \begin{cases} \text{"Расчет можно прекращать" if } n_3 - n_2 \leq 1 \\ \text{"Условие не выполняется, продолжайте расчет" otherwise} \end{cases}$$

$$Us12 = \text{"Расчет можно прекращать" } .$$

Полученное значение количества заземлителей отличается от предыдущего, менее чем на 1, условие выполняется. Округляем число вертикальных электродов до ближайшего

целого значения и примем равным $n = 6$, при значении коэффициента использования заземлителей $\eta_{02} = 0.77$.

Расстояние между электродами $a = 6$ м.

Расчет длины полосы для заземлителей, расположенных по контуру:

$$L_n = 1.05 \cdot a \cdot (n - 1) = 1.05 \cdot 6 \cdot (6 - 1) = 31.5 = 31.5 \text{ м.} \quad (243)$$

Ширина стальной горизонтальной соединительной полосы $b = 0.04$ м.

Сопротивление растеканию горизонтально соединительной полосы, расположенной в земле:

$$R_n = 0.366 \cdot \frac{\rho_{zp.z}}{L_n} \cdot \log \left(\frac{2 \cdot L_n^2}{b \cdot h} \right) = 0.366 \cdot \left(\frac{400.0}{31.5} \right) \cdot \log \left[\frac{2 \cdot 31.5^2}{(0.04 \cdot 0.5)} \right] = 23.2 = 23.2 \text{ Ом.} \quad (243)$$

Коэффициент экранирования полосы согласно [53, с. 41, табл. А.4] $\eta_n = 0.84$.

$$R_{zp} = \frac{R_0 \cdot R_n}{R_0 \cdot \eta_n + n \cdot R_n \cdot \eta_{02}} = \frac{46.4 \cdot 23.2}{(46.4 \cdot 0.84 + 6 \cdot 23.2 \cdot 0.77)} = 7.37 = 7.37 \text{ Ом.} \quad (244)$$

Проверим условие:

$$Usl3 = \begin{cases} \text{"Расчет проведен верно"} & \text{if } R_{zp} < R_3 \\ \text{"Необходимо провести пересчет"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl3 = \text{"Расчет проведен верно"} .$$

Для эффективного заземления принимаем количество труб равное 6 шт., длину соединительной полосы 31,5 м.

6 Механо-технологический раздел

Так как разработанное оборудование является малогабаритным, оно поставляется по железной дороге, шоссейным дорогам или по воде на монтажную площадку в собранном виде, где специализированная бригада проводит операции по монтажу аппаратуры.

Проект организации строительства и проект производства работ, разработанные на основе строительных норм и правил (СНиП), включают в себя [54, с.3] календарный план строительства, генеральный план объекта, ведомости объемов работ график потребности в кадрах.

Проект производства работ состоит из ведомости монтажного оборудования, пояснительной записки, монтажного генплана, графиков монтажных работ и т.д.

На монтажной площадке, оснащенной комплексом производственных и бытовых зданий с дорогами, коммуникациями (вода, электроэнергия, канализация и т.д.), изготовленным фундаментом и т.д., организуются требования к технике безопасности – опасные зоны должны быть ограждены, освещение площадки должно осуществляться должным образом, на площадке должны быть предусмотрены пожарный инвентарь и аптечки.

В качестве оборудования, применяемого для монтажа оборудования будем использовать манипулятор, ввиду того, что аппаратура является малогабаритной. Высота подъема крюка при установке оборудования на фундамент:

$$h_k = h_{\phi} + h_s + h_o + h_c = 5.5 \text{ м.} \quad (245)$$

где h_{ϕ} – высота фундамента, м; h_s – запас высоты оборудования над землей, м; h_o – высота оборудования до места строповки, м; h_c – высота стропы, м.

Для выполнения грузозахватных работ будем использовать строп из стального каната.

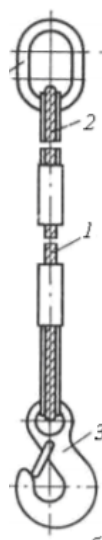


Рисунок 23 – Расчетная схема стропы

Усилие в стропе при числе ветвей n вычисляется по формуле:

$$S_{zp} = \frac{1.35 \cdot G_{zp}}{2 \cdot \cos\left(\frac{\alpha_{zp} \cdot \pi}{180}\right)} = 4.773 \times 10^3 . \quad (246)$$

где $G_{гр}$ – вес груза, 5000 Н; α – угол наклона ветви стропа к вертикали.

Тогда в качестве стропа будет использован строп 4СК-5 с учетом запаса по прочности.

Оборудование следует располагать на фундаменте по истечении 7 дней после его сооружения. Монтаж аппаратуры осуществляется в собранном виде. Строповку проводят на участке, обеспечивающем близкое к вертикальному положению оборудования. Для проверки уравновешенности оборудования следует поднимать аппаратуру на небольшое расстояние над землей (в среднем до 0,3 м) и выдержать небольшое количество времени в данном положении. При помещении оборудования на фундамент следует соблюдать особую осторожность, производить процесс опускания аппаратуры медленно, чтобы не повредить опорную поверхность фундамента и фундаментные болты.

Следующим этапом установки оборудования является выверка фундаментными болтами. Для успешной фиксации аппаратуры на фундаменте и исключения случайных смещений используются конструктивные болты, для нагружения – расчетные. В качестве фундаментных болтов будем использовать болты с отгибом, так как их конструкция проста, а установка производится в массив фундамента.

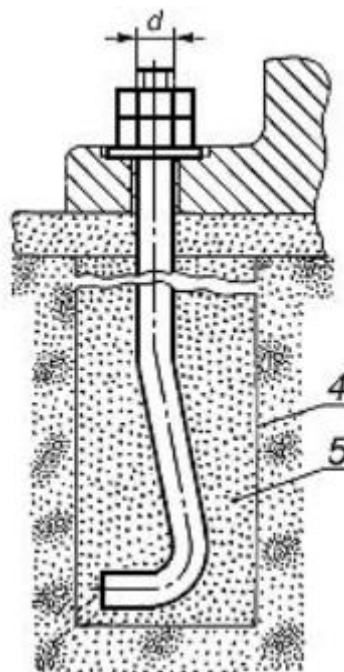


Рисунок 24 – Фундаментные болты с отгибом

Не позднее 48 часов после проведения выверки и закрепления аппаратуры, бетонной смесью проводят подливку, чтобы ликвидировать зазор между опорной частью оборудования и фундаментом. Далее осуществляется затяжка фундаментных болтов в шахматном порядке, начиная с бол-

тов, расположенных симметрично относительно осей. Контроль положения оборудования на фундаменте по высоте осуществляется нивелирами и теодолитами. Для определения пространственного положения аппаратуры на фундаменте наносятся продольные и поперечные оси, высотные метки. Составляется ведомость монтажных механизмов и инструментов, приведена в таблице 16.

Таблица 16 – Ведомость монтажных механизмов и инструментов

№ п/п	Наименование	Количество
1	Строп четырехветвевой 4СК-5	1
2	Набор слесарных инструментов	1
3	Манипулятор с длиной стрелы не менее 6 м	1
4	Фундаментные болты	
	Гайка М16 ГОСТ 5915-70	18
	Шайба М12 ГОСТ 24379.1-2012	18
	Болт 1.1М16 х 800. ГОСТ 24379.1-2012	18
5	Приспособления для выверки	
	Теодолит	1
	Нивелир	1

7 Автоматизация и контроль производства

Для технологического процесса экстракции используем приборы и средства автоматизации, контролирующие и регулирующие уровень, давление и температуру. При существенных отклонениях от заданных значений, при резком увеличении давления, уровня и температуры, предусмотрена сигнализация.

По уровню в структуре предприятия, данная система занимает нижний уровень АСУТП, так как управление происходит установками, в составе которых нет других АСУТП. Характер протекания процесса – периодический. Информационная мощность объекта низкая, так как количество измеряемых и контролируемых технологических параметров крайне мало. Схема имеет средний уровень функциональной надежности так как отказы в АСУТП не будут приводить к остановам технологического объекта управления. Имеет локально-автоматический тип функционирования – решения по управлению технологическим процессом принимает оператор, регулирование проводится согласно параметрам, заданным при пуске.

Одним из самых простых и распространенных вариантов архитектуры автоматизированной системы управления является архитектура, представленная на рисунке 25.

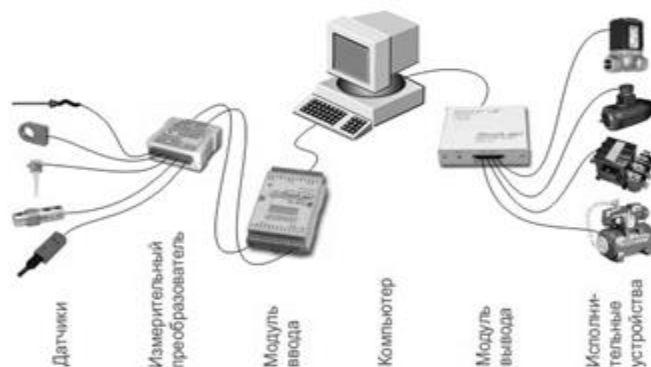


Рисунок 25 – Архитектура АСУ с одним ЭВМ и одним устройством ввода-вывода

В разрабатываемой АСУ необходимо контролировать температуру раствора, вторичного пара и греющего пара. В качестве датчиков температуры подойдут термопреобразователи на основе металлических термопар типа ТПП10 или ТПП13. Для решения данной задачи был выбран аналоговый преобразователь температуры с унифицированным выходным сигналом ТП Метран-2000 [55]. Чувствительный элемент первичного преобразователя и встроенный в головку датчика микропроцессорный преобразователь преобразуют измеряемую температуру в унифицированный выходной сигнал постоянного тока. Внешний вид датчика представлен на рисунке 26.



Рисунок 26 – Термопреобразователя ТП Метран-2000

Технические параметры данного преобразователя представлены в таблице 17.

Таблица 17 – Технические параметры термопреобразователя ТП Метран-2000

Характеристики	Значения
Тип и исполнение термопреобразователя	ТП Метран-2000
НСХ	ТПП(S)
Выходной сигнал, мА	4-20, 20-4
Диапазоны преобразуемых температур, °С	-50 - +1300
Зависимость выходного сигнала от температуры	линейная
Характеристики	Значения

В качестве уровнемера был выбран радарный уровнемер УЛМ-11 [56], который предназначен для высокой точности бесконтактного измерения уровня жидкости в сосудах. Внешний вид датчика представлен на рисунке 27.



Рисунок 27 – Уровнемер УЛМ-11

Технические параметры данного преобразователя представлены в таблице 18.

Таблица 18 – Технические параметры уровнемера УЛМ-11

Характеристики	Значения
Максимальная абсолютная погрешность	± 1 мм
Ширина измерительного луча	40
Температура контролируемого продукта	не ограничена
Напряжение питания	24В постоянного тока, либо 220В 50Гц
Аналоговый выход	4-20 мА

Для разрабатываемой АСУ требуются датчики давления, способные отслеживать давление греющего пара в диапазоне 0,1-0,3 МПа и контроль вакуума в системе.

Для измерения давления греющего пара следует принять интеллектуальный датчик давления Метран-150ТА2 [57]. Датчик способен измерять давление и непрерывно преобразовывать в унифицированный аналоговый или цифровой сигнал в стандарте протокола HART или на базе интерфейса RS-485. Внешний вид датчика представлен на рисунке 28.



Рисунок 28 – Датчик давления Метран-150ТА2

Технические параметры данного датчика представлены в таблице 19.

Таблица 19 – Технические параметры датчика давления Метран 150ТА2

Характеристики	Значения
Диапазоны измеряемых давлений датчика давления:	
- минимальный, кПа	0-0,025
- максимальный, МПа	0-68
напряжение питания	24В постоянного тока
аналоговый выход	4-20 mA/HART, 0-5 mA

Для контроля вакуума в системе предусмотрим интеллектуальный датчик давления Метран-75G. Способен передавать унифицированный токовый сигнал, а также цифровой в стандарте протокола HART [58]. Внешний вид датчика давления на рисунке 29.



Рисунок 29 – Датчик давления Метран 75G

Технические параметры данного датчика представлены в таблице

Таблица 20 – Технические параметры датчика давления Метран 75G

Характеристики	Значения
Диапазоны измеряемых давлений датчика давления:	
- минимальный, кПа	0-0,06
- максимальный, МПа	0-100
напряжение питания	24В постоянного тока
аналоговый выход	A/HART, 0-5 mA

Для преобразования аналоговых сигналов выбранных датчиков в сигнал для передачи по сети RS-485 необходим модуль ввода-вывода. В качестве модуля ввода-вывода принимаем ОВЕН MB110-8A [59]. Внешний вид модуля ввода-вывода на рисунке 30.



Рисунок 30 – Модуль ввода-вывода ОВЕН MB110-8A

Технические параметры данного модуля представлены

Таблица 21 – Технические параметры модуля ввода-вывода ОВЕН MB110-8A

Наименование	Значение
Напряжение питания	от 90 до 264 В переменного тока (номинальное напряжение 220 В) частотой от 47 до 63 Гц или от 20 до 375 В постоянного тока (номинальное напряжение 24 В)
Потребляемая мощность, ВА, не более	6
Количество аналоговых входов	8
Интерфейс связи с компьютером	RS-485
Максимальная скорость обмена по интерфейсу RS-485, бит/сек	115200
Протокол связи, используемый для передачи информации	ОВЕН, ModBus-RTU, ModBu-ASCII, DCON
Степень защиты корпуса	IP20 со стороны передней панели,
Габаритные размеры прибора, мм, не	63x110x73

В качестве блока питания для датчиков выбираем БП Карат-22 [60] с техническими характеристиками:

- количество каналов – 8;
- каналы гальванически развязаны;
- защита от короткого замыкания и перегрузок по каждому каналу;
- светодиодная индикация включения по каждому каналу;
- выходное напряжение – 24 В;
- класс стабилизации – 0.2;
- ток нагрузки - 8А и – 50 мА;
- ток срабатывания защиты от перегрузки – не более 90 мА;
- ток короткого замыкания – не более 23 мА;
- питание – 220 В (50±1) Гц;
- потребляемая мощность – 60 ВА;
- масса – не более 3.5 кг;
- варианты монтажа: щитовой, навесной, крепление к горизонтальной поверхности,

крепление непосредственно на трубопроводе.

Внешний вид представлен на рисунке 31.



Рисунок 31 – Блок питания Карат-22

В качестве программируемого логического контроллера необходимо выбрать такое средство автоматизации, которое будет отвечать следующим требованиям:

- точное назначение (работа с данными, аварийная блокировка и защита);
- фиксация и хранение данных;
- интерфейс и применяемый язык программирования;
- высокая скорость передачи информации, количество входов и выходов различных типов сигналов.

В качестве контроллера наиболее подходящим вариантом является ОВЕН ПЛК 154 [61]. Внешний вид ПЛК представлен на рисунке 32.



Рисунок 32 – Программируемый логический контроллер ОВЕН ПЛК 154

Техническая характеристика представлена в таблице 22.

Таблица 22 – Техническая характеристика ОВЕН ПЛК 154

Наименование	Значение
Интерфейсы	Ethernet 100 Base-T, RS-232, RS-485, USB 2.0
Протоколы	ОВЕН, ModBus-RTU, ModBus-ASCII, DCON, ModBus-TCP, GateWay
Среда программирования	CoDeSys 2.3.8.1 (и старше)
Скорость обмена по интерфейсам RS	От 4800 до 115200 bps
Количество дискретных входов	8
Максимальная частота сигнала, подаваемого на дискретный вход	10 кГц при применении аппаратного счетчика и обработчика энкодера
Конструктивное исполнение	Унифицированный корпус для крепления на DIN-рейку (ширина 35 мм), длина 105 мм (6U), шаг клемм 7,5 мм
Степень защиты корпуса	IP20
Напряжение питания: ПЛК154-24, ПЛК 154-220	18...29 В постоянного тока (номинальное напряжение 24 В) 90...264 В переменного тока (номинальное напряжение 220 В) частотой 47...63 Гц;
Потребляемая мощность, не более ПЛК154-24, ПЛК154-220	6 Вт 10 Вт
Индикация передней панели	1 индикатор питания, 8 индикаторов входов, 12 индикаторов выходов

В результате выполнения раздела выбрана схема автоматического контроля и регулирования технологического процесса и подобраны датчики и другие вспомогательные устройства для контроля и регулирования выбранных параметров.

8 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

В данном разделе выпускной квалификационной работы рассмотрены оценка перспективности разработки и планирование финансовой и коммерческой ценности конечного продукта, предлагаемого в рамках НИ. Следует учитывать, что коммерческая ценность научного исследования складывается из таких факторов, как:

- востребованность на рынке;
- цена продукта;
- бюджет научных исследований;
- время продвижения продукта на рынок.

В данном разделе представлены следующие подразделы:

- Оценка коммерческого потенциала разработки;
- Планирование научно-исследовательских работ;
- Расчет материальных затрат научно-технического исследования;
- Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.

Целью работы является разработка аппаратуры для проведения процесса экстракции березового гриба чаги. В качестве исследуемого прототипа выступает экстрактор Сокслета. На основе данного аппарата разрабатывается высокоэффективный и экономичный вариант оборудования для проведения процесса.

Расчеты проведены согласно рекомендациям, указанным в [62].

8.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

В данном пункте проведем анализ потенциальных потребителей результатов исследования, анализ конкурентных технических решений, а также проведем SWOT-анализ.

8.1.1 Анализ конкурентных технических решений

Используя анализ конкурентных технических решений можно дать оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить направление её будущего повышения с точки зрения ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

В процессе исследований рассматривались три варианта реализации данного аппарата:

- разрабатываемый аппарат на основе экстрактора Сокслета;
- экстрактор DEVEX [63];
- вертикальный экстрактор-перколятор [64].

Анализ конкурентных технических решений производится с применением оценочной карты, приведенной в таблице 1. Экспертная оценка производится по техническим характеристикам и экономическим показателям по 5 бальной шкале, где 1 – наиболее низкая оценка, а 5 – наиболее сильная. Общий вес всех показателей в сумме должен составлять 1.

Конкурентоспособность рассчитывается по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot \text{Б}_i,$$

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента; B_i – вес показателя (в долях единицы); Б_i – балл i -го показателя.

Таблица 23 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Вар.1	Вар. 2	Вар. 3	Вар.1	Вар. 2	Вар. 3
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Производительность	0,12	4	4	4	0,48	0,48	0,48
2. Удобство в эксплуатации	0,1	5	4	5	0,5	0,4	0,5
3. Надежность	0,1	5	4	5	0,5	0,4	0,5
4. Безопасность	0,08	4	3	4	0,32	0,24	0,32
5. Ремонтопригодность	0,1	5	4	5	0,5	0,4	0,5
6. Уровень шума	0,08	4	3	4	0,32	0,24	0,32
7. Доступность запасных частей	0,1	5	3	3	0,5	0,3	0,3
9. Габариты	0,12	4	2	5	0,48	0,24	0,6
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Предполагаемый срок эксплуатации	0,1	5	5	4	0,5	0,5	0,4
2. Цена	0,1	5	2	3	0,5	0,2	0,3
Итого	1	46	34	42	4,6	3,4	4,22

Исходя из проведенного анализа можно сделать вывод, что наиболее подходящим исполнением является разрабатываемый аппарат. Следующим этапом необходимо провести SWOT-анализ.

8.1.2 SWOT-анализ

SWOT-анализ проводится в три этапа:

- описание сильных, слабых сторон, возможностей и угроз, которые могут проявиться во внешней среде;
- выявление соответствия сильных и слабых сторон научного исследования внешним условиям окружающей среды;
- итоговая матрица SWOT.

Для организации первого этапа анализа составим матрицу SWOT, представленную в таблице 24.

Таблица 24 – Матрица SWOT

	Сильные стороны научно-исследовательского проекта: С1. Наличие квалифицированного персонала, имеющего опыт работы в данной области. С2. Экологичность технологии. С3. Более низкая стоимость производства по сравнению с другими технологиями. С4. Актуальность проекта. С5. Высокое качество продукции, соответствующее мировым стандартам.	Слабые стороны научно-исследовательского проекта: Сл1. Отсутствие инжиниринговой компании, способной построить производство под ключ. Сл2. Не проработаны вопросы выхода на рынок. Сл3. Отсутствие бизнес-плана коммерциализации.
Возможности: В1. Постоянное повышение квалификации персонала. В2. Дополнительный спрос на результаты расчетов. В3. Выход на всероссийский и международный рынок.		
Угрозы: У1. Появление новых конкурентов У2. Риск невозможности импорта товаров из-за введения секторальных санкций У3. Отсутствие спроса на технологию.		

Построим интерактивную матрицы проекта.

Таблица 25 – Связь сильных сторон с возможностями

Сильные стороны проекта						
Возможности проекта		C1	C2	C3	C4	C5
	B1	+	0	-	-	-
	B2	-	+	+	+	+
	B3	-	+	+	+	+
Слабые стороны проекта						
Возможности проекта		Сл1		Сл2		Сл3
	B1	-		-		-
	B2	0		+		0
	B3	+		+		+
Сильные стороны проекта						
Угрозы проекта		C1	C2	C3	C4	C5
	У1	0	-	0	+	0
	У2	-	-	-	0	+
	У3	-	-	-	0	0
Слабые стороны проекта						
Угрозы проекта		Сл1		Сл2		Сл3
	У1	+		+		0
	У2	-		+		-
	У3	+		0		+

В таблице 26 представлен итоговый SWOT-анализ научного исследования.

Таблица 26 –Итоговый SWOT-анализ

	<p>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>C1. Наличие квалифицированного персонала, имеющего опыт работы в данной области.</p> <p>C2. Экологичность технологии.</p> <p>C3. Более низкая стоимость производства по сравнению с другими технологиями.</p> <p>C4. Актуальность проекта.</p> <p>C5. Высокое качество продукции, соответствующее мировым стандартам.</p>	<p>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>Сл1. Отсутствие инжиниринговой компании, способной построить производство под ключ.</p> <p>Сл2. Не проработаны вопросы выхода на рынок.</p> <p>Сл3. Отсутствие бизнес-плана коммерциализации.</p>
--	---	--

Возможности: В1. Постоянное повышение квалификации персонала. В2. Дополнительный спрос на результаты расчетов. В3. Выход на всероссийский и международный рынок.	Постоянное повышение квалификации персонала положительно скажется на эксплуатации аппарата персоналом, внедрении возможных модификаций в конструкцию, получение продукта высокого качества, привлечение более экономичных и энергоэффективных решений.	Выход на всероссийский и международный рынок повлечет за собой необходимость развития бизнес-плана коммерциализации, так же, в результате выхода на мировую арену вырастет спрос на результаты расчетов.
Угрозы: У1. Появление новых конкурентов У2. Риск невозможности импорта товаров из-за введения секторальных санкций У3. Отсутствие спроса на технологию.	Появление новых конкурентов и риск невозможности импорта товаров из-за введения секторальных санкций может негативно сказаться на желании квалифицированного специалиста работать на предприятии, а также модификация уже существующих технологий может подорвать компетентность некоторых специалистов	Риск невозможности импорта товаров из-за введения секторальных санкций может отбросить необходимость поиска высококвалифицированной инженеринговой компании, а также снизить спрос на технологию.

SWOT-анализ показывает, что для увеличения конкурентоспособности научного исследования необходимо проработать вопросы выхода на рынок и бизнес-план коммерциализации. Постоянное повышение квалификации сотрудников будет поддерживать планку качества выпускаемой продукции, что вкупе с экологичностью технологии даст способность привлекать зарубежных покупателей как продукции, так и пакета научных исследований.

8.2 Планирование научно-исследовательских работ

В этом подразделе будут разобраны структура работ в рамках научного исследования, определены трудоемкости выполнения работ, разработан график проведения и определен бюджет научного исследования.

8.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Для выполнения научного исследования была сформирована рабочая группа, в состав которой входят научный руководитель и инженер. Первичная последовательность составления этапов и работ, распределение имеющихся исполнителей по видам работ, необходимых к выполнению, представлен в таблице 5.

Таблица 27 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Научный руководитель
Выбор направления исследований	2	Выбор направления исследований	Научный руководитель, инженер
	3	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер
	4	Календарное планирование работ по теме	Инженер
Теоретические и экспериментальные исследования	5	Проведение экспериментов	Инженер
	6	Утверждение лучшего результата	Научный руководитель
Обобщение и оценка результатов	7	Оценка эффективности полученных результатов	Научный руководитель, инженер
	8	Контроль качества выполнения проекта и консультирование исполнителя	Научный руководитель
Проведение ВКР			
Разработка технической документации и проектирование	9	Разработка технологической схемы	Инженер
	10	Проведение технологических, механических и экономических расчетов аппаратуры	Инженер
	11	Разработка чертежей	Инженер
	12	Составление пояснительно записки	Инженер

Следующим этапом необходимо установить трудоёмкость для выполнения поставленных работ.

8.2.2 Определение трудоёмкости выполнения работ

Трудоёмкость выполнения научного исследования носит вероятностный характер в связи с зависимостью от различных факторов и оценивается исключительно экспертным путем. Формула определения ожидаемого значения трудоёмкости выглядит следующим образом:

$$t_{ож_i} = \frac{3t_{min_i} + 2t_{max_i}}{5},$$

где $t_{ож_i}$ – ожидаемая трудоёмкость выполнения i -ой работы чел.-дн.; t_{min_i} – минимально возможная трудоёмкость выполнения заданной i -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наибо-

лее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.; t_{max_i} – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

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

$$T_p = \frac{t_{ож_i}}{Ч_i}$$

где T_p – продолжительность одной работы, раб.дн.; $t_{ож_i}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн; $Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

Результаты расчетов ожидаемой трудоемкости представлены в таблице 6.

8.2.3 Разработка графика проведения научного исследования

Диаграмма Ганта является самой подходящим, удобным и наглядным инструментом для построения ленточного графика проведения научных исследований. Диаграмма Ганта – это горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ. Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться формулой:

$$T_{k_i} = T_{p_i} \cdot k_{\text{кал}},$$

где T_{k_i} – продолжительность выполнения i – й работы в календарных днях; T_{p_i} – продолжительность выполнения i – й работы в рабочих днях; $k_{\text{кал}}$, – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}},$$

где $T_{\text{кал}}$ - количество календарных дней в году; $T_{\text{вых}}$ - количество выходных дней в году; $T_{\text{пр}}$ - количество праздничных дней в году.

На выполнение данного научного исследования выделено 4 месяца (февраль-май), что в календарных днях по шестидневной рабочей неделе с учетом всех праздников составляет 100 дней. Кратчайший срок выполнения проекта 60 дней.

Определим ожидаемое значение трудоемкости на примере Календарного планирования работ по теме (п. 4, табл. 27):

$$t_{ож_i} = \frac{3t_{min_i} + 2t_{max_i}}{5} = \frac{3 \cdot 5 + 2 \cdot 8}{5} = 6,2 \text{ чел. - дн.}$$

Тогда продолжительность работы в рабочих днях:

$$T_p = \frac{t_{ож_i}}{Ч_i} = \frac{6,2}{1} = 6,2 \text{ раб. дн.}$$

Рассчитаем коэффициент календарности для шестидневной рабочей недели:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} = \frac{366}{366 - 49 - 19} = 1,23.$$

Рассчитаем календарную продолжительность выполнения работы на примере Составления и утверждения технического задания (п. 1, табл. 27) для научного руководителя:

$$T_{k_1} = T_{p_1} \cdot k_{\text{кал}} = 1 \cdot 1,23 \approx 1.$$

Для инженера на примере Разработки чертежей (п. 11, табл. 27):

$$T_{k_{11}} = T_{p_{11}} \cdot k_{\text{кал}} = 16,8 \cdot 1,23 = 20,664 \approx 10.$$

Таблица 28 – Временные показатели проведения научного исследования

Номер работы	Трудоёмкость работ						Длительность работ в рабочих днях T_{pi}		Длительность работ в календарных днях T_{ki}	
	, чел-дни		t_{max} , чел-дни		$t_{\text{ож}i}$, чел-дни					
	Науч- ный ру- ководи- тель	Инже- нер	Науч- ный ру- ководи- тель	Инже- нер	Науч- ный ру- ководи- тель	Инже- нер	Науч- ный ру- ководи- тель	Инже- нер	Науч- ный ру- ководи- тель	Инже- нер
1	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-
2	1	1	1	1	1	1	0,5	0,5	1	1
3	-	5	-	8	-	6,2	-	6,2	-	8
4	-	5	-	8	-	6,2	-	6,2	-	8
5	-	12	-	22	-	16	-	16	-	20
6	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-
7	1	1	1	1	1	1	0,5	0,5	1	1
8	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-
9	-	8	-	12	-	9,6	-	9,6	-	12
10	-	8	-	12	-	9,6	-	9,6	-	12
11	-	12	-	24	-	16,8	-	16,8	-	21
12	-	8	-	12	-	9,6	-	9,6	-	12
Итого	5	60	5	100		76	4	75	5	95

Следующим этапом необходимо построить план-график проведения научного исследования согласно данным в таблице 29.

Таблица 29 – Календарный план-график проведения научного исследования

№ работ	Вид работ	Исполнители	T_{ki} , кал. дн.	Продолжительность выполнения работ											
				февр.			март			апрель			май		
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	Составление и утверждение технического задания	Научный руководитель	1												
2	Выбор направления исследований	Научный руководитель, инженер	1												
3	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер	8												
4	Календарное планирование работ по теме	Инженер	8												
5	Проведение экспериментов	Инженер	20												
6	Утверждение лучшего результата	Научный руководитель	1												
7	Оценка эффективности полученных результатов	Научный руководитель, инженер	1												
8	Контроль качества выполнения проекта и консультирование исполнителя	Научный руководитель	1												
9	Разработка технологической схемы	Инженер	12												

10	Проведение технологических, механических и экономических расчетов аппаратуры	Инженер	12												
11	Разработка чертежей	Инженер	21												
12	Составление пояснительно записки	Инженер	12												

■ – инженер; ● – научный руководитель.

Таким образом, мы наглядно видим в каком темпе и в какие сроки будут выполняться работы.

8.3 Бюджет научно- исследования

Планирование научного исследования должно обеспечивать полное и достоверное отражение всех видов расходов, используемых для его выполнения.

8.3.1 Расчет материальных затрат НИ

В данной статье расходов отобразим затраты на приобретение сырья, материалов, необходимых для ведения научного исследования. Результаты внесем в таблицу 8.

Таблица 30 – Материальные затраты на сырье

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Сумма, руб.
Березовый гриб чага	кг.	100	180	18 000
Итого		18 000		

8.3.2 Расчет затрат на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ

В данной статье распишем затраты на специальное оборудование, необходимое для ведения научных исследований.

Таблица 31 – Материальные затраты на специальное оборудование

Наименование оборудования	Количество единиц оборудования	Цена за ед., руб.	Сумма, руб.
Экстрактор Сокслета	1	3 337	3 337
Электрическая плита IRIT IR-8004	1	1 714	1 714
Весы ВСТ-150/5-0	1	5 800	5 800
Итого	10 851		

8.3.3 Основная заработная плата исполнителей темы

В данном подразделе произведем расчет основной заработной платы научного руководителя и инженера. В зависимости от трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок определяется величина расходов по заработной плате.

Основная заработная плата одного работника рассчитывается по следующей формуле:

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

где $З_{\text{осн}}$ – основная заработная плата одного работника; T_p – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.; $З_{\text{дн}}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработную плату рассчитываем по формуле:

$$З_{\text{дн}} = \frac{З_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}},$$

где $З_{\text{м}}$ – месячный должностной оклад работника, руб.; $F_{\text{д}}$ – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн., M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

- при отпуске в 24 раб. дня $M=11,2$ месяца, 5-дневная неделя;
- при отпуске в 48 раб. дней $M=10,4$ месяца, 6-дневная неделя.

Таблица 32 – Баланс рабочего времени исполнителей

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	366	366
Количество нерабочих дней		
- выходные дни	49/19	49/19
- праздничные дни		
Потери рабочего времени		
- отпуск	48/5	24/10
- невыходы по болезни		
Действительный годовой фонд рабочего времени	245	264

Таким образом для научного руководителя:

$$З_{\text{дн}} = \frac{51285 \cdot 10,4}{245} = 2176,99 \text{ руб.}$$

Для инженера:

$$З_{\text{дн}} = \frac{33150 \cdot 10,4}{264} = 1305,91 \text{ руб.}$$

Месячный должностной оклад исполняющего работу рассчитывается по формуле:

$$З_{\text{м}} = З_{\text{тс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) \cdot k_{\text{р}},$$

где $З_{\text{ок}}$ – оклад, руб.; $k_{\text{пр}}$ – премиальный коэффициент, равный 0,3 (т.е. 30% от $З_{\text{тс}}$); $k_{\text{д}}$ – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2 – 0,5 (в НИИ и на промышленных предприятиях – за расширение сфер обслуживания, за профессиональное мастерство, за вредные условия: 15-20 % от $З_{\text{тс}}$); $k_{\text{р}}$ – районный коэффициент города Томска, равный 1,3.

Тогда должностной оклад научного руководителя:

$$З_{\text{м}} = 26300 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 51285 \text{ руб.}$$

Инженера:

$$З_{\text{м}} = 17000 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 33150 \text{ руб.}$$

Результаты расчета приводятся в таблице 10.

Таблица 33 – Расчет основной заработной платы

Исполнители НИ	$З_{\text{тс}}$, руб.	$k_{\text{пр}}$	$k_{\text{д}}$	$k_{\text{р}}$	$З_{\text{м}}$, руб.	$З_{\text{дн}}$, руб.	$T_{\text{р}}$, раб. дн.	$З_{\text{осн}}$, руб.
Научный руко- водитель	26300	0,3	0,2	1,3	51285	2176,99	4	8707,96
Инженер	17000	0,3	0,2	1,3	33150	1305,91	75	97943,25
Итого:								106651,21

8.3.4 Дополнительная заработная плата исполнителей темы

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$З_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot З_{\text{осн}},$$

где $k_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,15).

Для научного руководителя:

$$З_{\text{доп}} = 0,15 \cdot 8707,96 = 1306,19 \text{ руб.}$$

Для инженера:

$$З_{\text{доп}} = 0,15 \cdot 97943,25 = 14691,49 \text{ руб.}$$

8.3.4 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$З_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}),$$

где $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

Для научного руководителя:

$$З_{\text{внеб}} = 0,3 \cdot (8707,96 + 1306,19) = 3004,25 \text{ руб.}$$

Для инженера:

$$З_{\text{внеб}} = 0,3 \cdot (97943,25 + 14691,49) = 33790,42 \text{ руб.}$$

Таблица 34 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, руб.	Дополнительная заработная плата, руб.
Научный руководитель	8707,96	1306,19
Инженер	97943,25	14691,49
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	30 %	
Итого	Научный руководитель	3004,25
	Инженер	33790,42
Суммарно	36794,67	

8.3.5 Накладные расходы

Данная статья учитывает затраты организации на остальные, не попавшие в предыдущие статьи расходы. Определить величину накладных расходов можно по формуле:

$$З_{\text{накл}} = k_{\text{нр}} \cdot \left(\sum Z_{1-4} \right),$$

где $k_{\text{нр}}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы; Z_{1-4} – сумма затрат в предыдущих статьях.

Принимаем $k_{\text{нр}} = 0,16$.

Тогда:

$$З_{\text{накл}} = 0,16 \cdot (18000 + 10851 + 15997,68 + 106651,21 + 36794,67) = 30127,13 \text{ руб.}$$

8.3.6 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

На основании полученных данных составляется таблица бюджетных затрат научного исследования.

Таблица 35 – Расчет бюджета затрат НИ

Наименование статьи	Сумма, руб.	Примечание
Расчет материальных затраты НИ	18000	Пункт 8.3.1
Затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	10851	Пункт 8.3.2
Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	106651,21	Пункт 8.3.3
Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	15997,68	Пункт 8.3.4
Отчисления во внебюджетные фонды	36794,67	Пункт 8.3.5
Накладные расходы	30127,13	16 % от суммы ст. 1-5
Бюджет затрат НИ	218421,69	Сумма ст. 1- 8

8.4 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Определение эффективности проводят на основании расчет интегрального показателя эффективности научного исследования.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется по формуле:

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

где $I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i}$ – интегральный финансовый показатель разработки; Φ_{pi} – стоимость каждого варианта исполнения; Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения проекта.

$$I_{\text{финр}}^{\text{вар.1}} = \frac{218421,69}{350000} = 0,62;$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{вар.2}} = \frac{295000}{350000} = 0,84;$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{вар.3}} = \frac{350000}{350000} = 1.$$

Расставляем оценки и весовые коэффициенты, на основе которых определяем конечный интегральный коэффициент.

Таблица 36 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Объект исследования Критерии	Весовой коэффициент параметра	Вар.1	Вар.2	Вар.3
Производительность	0,2	4	5	5
Доступность запчастей	0,1	5	3	3
Помехоустойчивость	0,2	5	4	5
Конкурентоспособность	0,15	4	4	5
Надежность	0,25	5	4	4
Цена	0,1	5	4	3
Итого	1			

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

$$I_{p.i.} = \sum a_i \cdot b_i,$$

где $I_{p.i.}$ – интегральный показатель ресурсоэффективности для i -го варианта исполнения разработки; a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки; b_i – балльная оценка i -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания.

Рассчитаем интегральный показатель для научного исследования:

$$I_{p.\text{Вар.1}} = \sum 0,2 \cdot 4 + 0,1 \cdot 5 + 0,2 \cdot 5 + 0,15 \cdot 4 + 0,25 \cdot 5 + 0,1 \cdot 5 = 4,65.$$

$$I_{p.\text{Вар.2}} = \sum 0,2 \cdot 5 + 0,1 \cdot 3 + 0,2 \cdot 4 + 0,15 \cdot 4 + 0,25 \cdot 4 + 0,1 \cdot 4 = 4,1.$$

$$I_{p.Вар.3} = \sum 0,2 \cdot 5 + 0,1 \cdot 3 + 0,2 \cdot 5 + 0,15 \cdot 5 + 0,25 \cdot 4 + 0,1 \cdot 3 = 4,35.$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_p = \frac{I_{p.i.}}{I_{\text{исп.}i.}^{\text{финр}}}.$$

Тогда для рассматриваемых вариантов:

$$I_p = \frac{I_{p.Вар.1}}{I_{\text{вар.}1}^{\text{финр}}} = \frac{4,65}{0,62} = 7,5;$$

$$I_p = \frac{I_{p.Вар.2}}{I_{\text{вар.}2}^{\text{финр}}} = \frac{4,1}{0,84} = 4,88;$$

$$I_p = \frac{I_{p.Вар.3}}{I_{\text{вар.}3}^{\text{финр}}} = \frac{4,35}{1} = 4,35.$$

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

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{p.Вар.2}}{I_{p.Вар.1}}$$

Тогда:

$$\mathcal{E}_{\text{ср}_2} = \frac{I_{p.Вар.2}}{I_{p.Вар.1}} = \frac{4,88}{7,5} = 0,65;$$

$$\mathcal{E}_{\text{ср}_2} = \frac{I_{p.Вар.3}}{I_{p.Вар.1}} = \frac{4,35}{7,5} = 0,58.$$

Таблица 37 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,62	0,84	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,65	4,1	4,35
3	Интегральный показатель эффективности	7,5	4,88	4,35
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1	0,65	0,58

Заключение

Анализируя проделанную в данном разделе работу можно сделать следующие выводы:

- результатом проведенного анализа конкурентных технических решений является выбор наиболее подходящего под необходимые требования варианта;
- разработан план-график проведения научного исследования для научного руководителя и инженера, с помощью которого можно оценить и спланировать рабочее время исполнителей. Общее количество календарных дней для выполнения работы – 100 дней, из которых 95 дней работал инженер, оставшиеся 5 – научный руководитель;
- бюджет научного исследования составляет 218421,69 руб.;
- интегральный финансовый показатель разработки для разрабатываемого научного исследования составляет 0,62, что является свидетельством того, что данный вариант исполнения является финансово выгодным в сравнении с остальными рассматриваемыми решениями;
- интегральный показатель ресурсоэффективности разработки научного исследования составляет 4,65 против 4,1 и 4,35 у конкурентов;
- интегральный показатель эффективности научного исследования составляет 7,5 против 4,88 и 4,35 у конкурентов, что свидетельствует об эффективности рассматриваемого технического решения.

9 Социальная ответственность

Введение

В выпускной квалификационной работе магистра разрабатывается технологическая линия для получения экстракта из березового гриба чага, который успешно применяется при профилактике онкологических заболеваний различной этиологии.

Областью применения для данной разработки является фармацевтическая промышленность. Реальными или потенциальными пользователями разрабатываемого решения являются компании, занимающиеся получением различных экстрактов из лекарственного растительного сырья. На территории Томской области примером такого предприятия является ООО НПП ЭТАЛОН, которое уже проявляет интерес к разработке.

Клинические испытания [5] препаратов из чаги, проведенные при раке IV степени показывают, что у больных без кахексии уменьшается боль, повышается аппетит, увеличивается масса тела и т.д. За счет этого чага и препараты из нее являются довольно перспективными для применения в профилактической онкологии.

Рабочее место представляет собой производственный цех с различным промышленным оборудованием: инспекционный стол, моечная машина, роликовая сушилка, щековая дробилка, просеиватель, экстрактор, холодильник-конденсатор, сепаратор-брызгоуловитель, кипятильник, бункеры для хранения сырья и продукта.

9.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

9.1.1 Правовые нормы трудового законодательства

В целях получения наивысшей эффективности производства установлен режим рабочего времени с предоставлением выходных дней по скользящему графику согласно ТК РФ.

При эксплуатации данной производственной линии ограничивается применение труда женщин на работах с вредными и (или) опасными условиями труда, за исключением нефизических работ или работ по санитарному и бытовому обслуживанию, а также лиц в возрасте до восемнадцати лет на работах, выполнение которых может причинить вред их здоровью и нравственному развитию.

Предприятие работает 10 часов в сутки, столько и составляет продолжительность одной ежедневной смены. После 4 часов работы с начала смены каждому работнику предоставляется часовой обеденный перерыв.

Машины, механизмы и другое производственное оборудование, средства индивидуальной и коллективной защиты работников, должны соответствовать государственным нормативным требованиям охраны труда и иметь декларацию о соответствии или сертификат соответствия.

Рабочие и служащие, занятые на тяжелых и вредных работах, а также на работах, связанных с движением транспорта, проходят обязательные предварительные при поступлении и периодические медицинские осмотры для определения пригодности их к поручаемой работе и предупреждения профессиональных заболеваний. Все работники должны быть обеспечены средствами индивидуальной защиты.

Каждый работник имеет право на рабочее место, соответствующее требованиям охраны труда, обязательное социальное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний в соответствии с федеральным законом, получение достоверной информации от работодателя, соответствующих государственных органов и общественных организаций об условиях и охране труда на рабочем месте, о существующем риске повреждения здоровья, а также о мерах по защите от воздействия вредных и (или) опасных производственных факторов, отказ от выполнения работ в случае возникновения опасности для его жизни и здоровья вследствие нарушения требований охраны труда, за исключением случаев, предусмотренных федеральными законами, до устранения такой опасности, обеспечение средствами индивидуальной и коллективной защиты в соответствии с требованиями охраны труда за счет средств работодателя, обучение безопасным методам и приемам труда за счет средств работодателя, личное участие или участие через своих представителей в рассмотрении вопросов, связанных с обеспечением безопасных условий труда на

его рабочем месте, и в расследовании происшедшего с ним несчастного случая на производстве или профессионального заболевания, внеочередной медицинский осмотр в соответствии с медицинскими рекомендациями с сохранением за ним места работы (должности) и среднего заработка во время прохождения указанного медицинского осмотра, гарантии и компенсации, установленные в соответствии с настоящим Кодексом, коллективным договором, соглашением, локальным нормативным актом, трудовым договором, если он занят на работах с вредными и (или) опасными условиями труда, повышенные или дополнительные гарантии и компенсации за работу на работах с вредными и (или) опасными условиями труда могут устанавливаться коллективным договором, локальным нормативным актом с учетом финансово-экономического положения работодателя.

9.1.2 Эргономические требования к правильному расположению и компоновке рабочей зоны

Перед запуском в работу проводится осмотр основного оборудования с целью устранения возможных проблем и неполадок.

Уровни физических, химических и биологических опасных и вредных производственных факторов, генерируемых производственным оборудованием в рабочую зону, а также воздействующих на работающего при непосредственном контакте с элементами конструкции, должны соответствовать требованиям безопасности, установленным нормативно-технической документацией, утвержденной в установленном порядке.

Рабочее место должно обеспечивать возможность удобного выполнения работ в положении стоя. При выборе положения работающего необходимо учитывать:

- физическую тяжесть работ;
- размеры рабочей зоны и необходимость передвижения в ней работающего в процессе выполнения работ;
- технологические особенности процесса выполнения работ (требуемая точность действий, характер чередования по времени пассивного наблюдения и физических действий, необходимость ведения записей и др.).

9.2 Производственная безопасность

Рассмотрим основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы при работе с технологической линией по производству экстракта чаги в таблице 38.

Таблица 38 – Возможные опасные и вредные факторы

Наименование видов работ	Факторы [83]		Нормативные доку- менты
	Вредные	Опасные	
	Физические		
		Движущиеся машины и механизмы производственного оборудования.	[65]; [66].
		Оборудование, работающее под вакуумом.	[67].
		Пожарная и взрывная безопасность	[68].
		Статическое электричество	[69]; [70].
		Повышенная температура рабочих поверхностей	[71].
		Электробезопасность	[72].
	Отклонение показателей микроклимата рабочей зоны		[73]; [74].
	Превышение уровня шума		[75]; [76].
	Превышение уровня вибрации		[77].
	Химические		
	Повышенная запылённость рабочей зоны		[74].

	Психофизиологические		
	Физическая нагрузка		[78]; [79].
	Монотонная работа		[78].

9.2.1 Анализ выявленных опасных производственных факторов

В данном разделе рассмотрим подробно все выявленные опасные факторы.

9.2.1.1 Движущиеся машины и механизмы производственного оборудования

Движущийся транспорт на производстве можно встретить при завозе сырья и отгрузке готового продукта. Основополагающими причинами опасностей, связанных с движением транспорта является нарушение требований правил дорожного движения.

При эксплуатации производственного оборудования возникает опасность получения травм, а также возможны случаи с летальным исходом. Для предотвращения подобных ситуаций персонал обязан соблюдать технику безопасности при работе с машинами и механизмами, используемыми в технологической линии. К эксплуатации данного оборудования должны привлекаться только лица, имеющие соответствующую квалификацию и прошедшие инструктаж по технике безопасности при использовании оборудования. Также оборудование следует оснащать знаками безопасности согласно [80].

9.2.1.2 Оборудование, работающее под вакуумом

При эксплуатации экстрактора, работающего под вакуумом, основной опасностью является вероятность схлапывания оборудования, что может привести к травмам и летальным исходам. Для предотвращения таких ситуаций необходимо регулярно проводить техническое диагностирование оборудования. В обязательном порядке необходимо проверять исправность всех манометров и предохранительных клапанов. Персонал обязан проходить первичный, а также периодический (повторный) инструктаж по технике безопасности при эксплуатации оборудования. Всему персоналу в обязательном порядке выдаётся спецодежда и спецобувь. предохранительные устройства должны соответствовать следующим требованиям согласно [67]:

- иметь устойчивую конструкцию;
- не вызывать дополнительного риска получения травмы;
- не быть легко проигнорированными или устраненными обслуживающим персоналом;
- быть расположенными на достаточном расстоянии от опасной зоны;
- представлять собой минимальные препятствия для наблюдения за работой вакуумной системы.

В случае возникновения аварии необходимо остановить аппаратуру действием персонала или защит при ситуациях, предусмотренных инструкцией по эксплуатации.

9.2.1.3 Пожарная и взрывная безопасность

Обеспечение пожарной безопасности и пожаротушения возлагается на руководителя предприятия. Оснащение производственных зданий и территории промышленной площадки первичными средствами пожаротушения и мероприятия по пожарной безопасности должны производиться в соответствии с правилами пожарной безопасности.

Местоположение первичных средств пожаротушения и пожарного инвентаря должно быть согласовано с органами пожарного надзора. Пожарные щиты с набором инвентаря (огнетушителями ОП-10, ОУ-5 для тушения электрооборудования, ведра, лопаты, топор), и ящиками для песка $V=1,0$ м³ предусматриваются на выходе из помещений и здания цеха таким образом, чтобы не препятствовать вынужденной эвакуации людей.

Возникновение взрывоопасной ситуации связано с применением оборудования, работающего под вакуумом. Рекомендации по устранению аварийных ситуаций указаны в разделе 2.1.2.

9.2.1.4 Статическое электричество

Для предупреждения возникновения опасных искровых разрядов с поверхности оборудования, а также с тела человека необходимо предусматривать меры, уменьшающие величину заряда. Для обеспечения стекания возникшего электростатического заряда все металлические части аппаратуры, насосов и трубопроводных коммуникаций должны быть заземлены, а также должен осуществляться постоянный электрический контакт тела человека с заземлителем. Средства защиты от статического электричества должны соответствовать [81].

9.2.1.5 Повышенная температура рабочих поверхностей

В результате работы оборудования может возникнуть нагревание рабочих поверхностей. Поэтому, персонал должен быть оснащён перчатками для избежания термических ожогов, а также аппаратура подверженная чрезмерному нагреву должна оснащаться тепловой изоляцией в соответствии с [71]. Необходимо предусмотреть защитные ограждения согласно [82] для создания физической преграды, которая будет предотвращать приближение человека к источнику опасности и устанавливать соответствующие предупреждающие вывески (плакаты) согласно [80].

9.2.1.6 Электробезопасность

Действие электрического тока на организм человека носит многообразный характер. Проходя через организм человека, электрический ток вызывает термическое, электролитическое и биологическое действие. Термическое действие тока проявляется в ожогах тела, нагреве до высокой температуры внутренних органов человека (кровеносных сосудов, сердца, мозга). Электролитическое действие тока проявляется в разложении органических жидкостей тела (воды, крови) и нарушении их физико-химического состава. Биологическое действие тока проявляется в раздражении и возбуждении живых тканей организма и сопровождается непроизвольными судорожными сокращениями мышц (сердца, лёгких)

Исследуемое рабочее место относится к помещениям без повышенной электроопасности, которое характеризуется отсутствием условий, создающих повышенную или особую опасность.

Основные способы и средства электрозащиты в соответствии с [72]: изоляция токопроводящих частей и ее непрерывный контроль; установка оградительных устройств; предупредительная сигнализация и блокировки; использование знаков безопасности и предупреждающих плакатов; ис-

пользование малых напряжений; электрическое разделение сетей; защитное заземление; выравнивание потенциалов; зануление; защитное отключение; средства индивидуальной электрозащиты; первичные и повторные инструктажи персонала по электробезопасности.

9.2.2 Анализ выявленных вредных производственных факторов

В данном разделе подробно рассмотрим выявленные вредные производственные факторы.

9.2.2.1 Отклонение показателей микроклимата рабочей зоны

Постоянное отклонение метеоусловий на рабочем месте от нормальных параметров приводит к перегреву или переохлаждению человеческого организма и связанным с ними негативным последствиям:

- при перегреве – к обильному потоотделению, учащению пульса и дыхания, резкой слабости, головокружению, появлению судорог, а в тяжелых случаях – возникновению теплового удара;
- при переохлаждении возникают простудные заболевания, хронические воспаления суставов, мышц и др.

Профилактика перегревания осуществляется организацией рационального режима труда и отдыха путем сокращения рабочего времени для введения перерывов для отдыха в зонах с нормальным микроклиматом.

Согласно [74] при определенной температуре воздуха и скорости ветра работы приостанавливаются.

При работе в зимнее время года весь персонал должен быть оснащен спецодеждой с теплозащитными свойствами.

Измерение температуры воздуха в производственном цеху проводится ртутными термометрами.

9.2.2.2 Превышение уровня шума

Шум, в общем случае, можно разделить на внешний и внутренний. Источниками внутреннего шума могут являться насосы, технологическое оборудование, вентиляционные установки и т.д. Источниками внешнего шума могут являться люди, автомобили, животный мир, погодные условия.

Нормальным уровнем шума при работе в помещении считается 60 дБ. Под воздействием шума, превышающего 80-90 дБ, снижается слуховая чувствительность. Сильный шум вредно отражается на здоровье и работоспособности людей. Человек, работая при шуме, привыкает к нему, но продолжительное действие сильного шума вызывает общее утомление, может привести к ухудшению слуха.

Для снижения шума можно использовать следующие методы в соответствии с [75, 76]:

- уменьшение шума в источнике;
- изменение направленности излучения;
- рациональная планировка предприятий и цехов;
- акустическая обработка помещений;
- уменьшение шума на пути его распространения;
- применение глушителей, экранов, звукопоглощающих строительных материалов;
- применение дистанционного управления при эксплуатации шумящего оборудования.

Персонал оснастить защитными противoshумными наушниками и проводить периодические медицинские осмотры с прохождением аудиометрии.

9.2.2.3 Превышение уровня вибрации

Вибрация, создаваемая машинами, механизированным инструментом и оборудованием, способна привести к нарушениям в работе и выходу из строя самих машин. Это может повлечь за собой возникновение аварийных ситуаций и, в конечном счете, неблагоприятных воздействий на человека, получение им травм. Допустимые значения параметров транспортной, транспортнотехнологической и технологической вибрации устанавливаются [77]. Методы виброзащиты в основном организационные – использование средств индивидуальной защиты для защиты рук, ног, тела работника и установление внутрисменного режима труда. При превышении локальной вибрации на рабочем месте установленного уровня вводится ограничение времени ее воздействия:

- при превышении предельно допустимого уровня (ПДУ) до 3 дБ длительность воздействия ограничивается 120-160 минутами;
- до 6 дБ – 60-80 мин;
- до 9 дБ – 30-40 мин;
- до 12 дБ – 15-40 мин;
- при превышении более 12 дБ запрещается проводить работы и применять оборудование, генерирующее такую вибрацию.

9.2.2.4 Повышенная запылённость рабочей зоны

Повышенная запыленность рабочей зоны связана с процессом измельчения сырья, при котором образуется много мелкой пыли.

Для предотвращения вредного влияния на здоровье человека следует установить средства коллективной защиты (система вентиляции) и предусмотреть средства индивидуальной защиты (респираторы).

9.2.2.5 Физическая нагрузка

Физическая нагрузка может быть связана с перемещением сырья, работой с оборудованием, погрузкой готовой продукции и т.п. и обуславливать динамическую перегрузку.

Для предотвращения возникновения данного фактора следует применить следующие меры:

- провести автоматизацию оборудования и линии для минимального задействования прямого человеческого труда;
- разработать нормы и правила с целью уменьшить мощность и время действия физических нагрузок;
- проводить отбор наиболее приспособленных к физическим нагрузкам;
- проведение инструктажей и тренингов с целью изучения снижения физических нагрузок;
- выделять средства для поддержания персоналом физической формы (абонементы в спортивные залы);
- проводить спортивные мероприятия среди работников производства.

9.2.2.6 Монотонная работа

Монотонная работа отрицательно сказывается на эффективности производства: ухудшаются экономические показатели, повышается аварийность, травматизм, растет текучесть кадров.

Основные меры по уменьшению влияния монотонности на человека:

- делать каждую операцию более содержательной, объединять малосодержательные операции в более сложные, содержательные и разнообразные;
- осуществлять перевод работающих с одной на другую производственную операцию;

- применять оптимальные режимы труда и отдыха в течение рабочего дня (рабочей смены): назначать короткие дополнительные перерывы для отдыха всей смены или отдельного работающего в удобное для него время.

9.3 Экологическая безопасность

В данном разделе рассмотрим правила утилизации отработанного сырья и сырья, не прошедшего инспекционный осмотр, утилизация ТБО, люминесцентных ламп.

При разработке технологической линии возникает необходимость утилизировать производственные отходы, в качестве которых в данном случае выступают бумажные отходы (макулатура), люминесцентные лампы и сырье различного вида.

Бумажные отходы следует передавать в соответствующие организации для дальнейшей переработки во вторичные бумажные изделия. Отработанные люминесцентные лампы должны передаваться либо государственным организациям, осуществляющим вывоз и уничтожение бытовых и производственных отходов, либо организациям, занимающимся переработкой отходов. Второй вариант является более предпочтительным, так как переработка отходов является перспективным направлением развития технологии. Утилизация лекарственного растительного сырья как на фармацевтических предприятиях, так и вне осуществляется специализированными компаниями. После проведенной процедуры составляется акт утилизации, а до нее – договор об утилизации, который должен быть предоставлен при проведении проверок службами Роспотребнадзора.

9.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Наиболее опасной чрезвычайной ситуацией на данном производстве следует принять возникновение пожара. Причинами возникновения данной ЧС могут являться:

- технические неполадки, в результате которых происходит отклонение технологических параметров, с последующим разрушением оборудования;
- неосторожное обращение с огнем при производстве ремонтных работ;
- события, связанные с человеческим фактором;
- внешнее воздействие техногенного или природного характера;
- повышенная температура воздуха и предметов.

Мероприятия, которые должны проводиться для обеспечения пожаробезопасности:

- предотвращение распространения пожара за пределы очага;
- применение конструкций производственных объектов с регламентированным пределом их огнестойкости и горючести;
- эвакуацию людей в случае пожара;
- применение средств индивидуальных и коллективных средств защиты от огня;
- применение средств пожарной сигнализации и средств извещения о пожаре;
- организацию пожарной охраны объекта;
- проведение инструктажа персонала;
- разработка и размещение плана эвакуации по периметру производственного помещения.

Необходимо, чтобы на блочном щите управления находили пенные, порошковые и водные огнетушители.

Все проходы должны быть свободными и иметь хотя бы два выхода, необходимо избегать длинных тупиковых проходов.

Средства тушения применять с учетом того, что является источником пожара. Для тушения горячей одежды использовать воду, для горящих электроустановок – углекислые огнетушители.

Заключение

В результате выполнения данного раздела были рассмотрены правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности, которые включали в себя анализ нормативных документов регламентирующих производственную деятельность проектировщика, рассмотрены законодательные стороны вопроса. Выявлены вредные и опасные производственные факторы, приведены нормативные документы и варианты устранения или минимизации негативного влияния данных факторов на здоровье человека. Также был рассмотрен вопрос экологической безопасности, в котором приведены производимые технологией отходы и способы их утилизации. Заключительной частью данного раздела является вопрос безопасности в чрезвычайных ситуациях, который был полностью рассмотрен и описан ряд мер для минимизации происхождения подобных ситуаций.

Согласно проработанной документации, все объекты, исследованные в данном разделе, соответствуют нормам и являются безопасными для эксплуатации.

Заключение

Результатом выполненной работы является спроектированная технологическая линия по экстракции лекарственного растительного сырья – березового гриба чага.

Во введении кратко описана актуальность использования данного гриба в виде сырья для проведения процесса экстракции, а также приведены различные исследования по положительному влиянию на организмы, пораженные злокачественными опухолями.

В литературном обзоре затронут вопрос истории использования данного сырья, в том числе и современного – рассмотрены технологии производства различных компаний.

В разделе Теоретические и экспериментальные исследования приводятся методики проведения над сырьем опытов и их результаты.

В разделе Описание технологической схемы представлено краткое пояснение работы производственной линии экстракции чаги.

В разделе Конструирование и расчет оборудования приведены:

- технологические расчеты с определением материального и теплового баланса;
- конструктивные расчеты с определением размеров основных узлов аппаратуры;
- механические расчеты включали в себя: определен материал изготовления оборудования – сталь 12X18H10T; определены толщин стенок оборудования – 6 мм по рекомендациям нормативно-технической документации; определено, что укреплять отверстия в аппарате нет необходимости так как все возникающие нагрузки компенсируются избыточной толщиной стенки оборудования; рассчитаны сопряжение конических днищ и эллиптических крышек с цилиндрическими обечайками с целью определения усилий, моментов и напряжений, вызванных действием краевых сил и моментов, определена прочность и устойчивость данных сопряжений; фланцевые соединения рассчитаны на статическую прочность, проверен угол поворота фланцев, элементы фланцевого соединения рассчитаны на малоцикловую усталость; подобраны опоры для аппаратуры; все узлы и элементы проверены на условия прочности, жесткости, устойчивости и герметичности.

В разделе Расчет средств защиты оборудования рассчитаны предохранительный клапан для защиты от превышения давления в подогревателе греющего пара и защитное заземление.

В Механо-технологическом разделе приведены рекомендации по монтажу оборудования, составлена ведомость монтажных механизмов и инструментов.

В разделе Автоматизация и контроль производства выбрана схема автоматизации и подобраны датчики, модули и программируемые логические контроллеры для контроля и регулирования проводимыми процессами.

Раздел Финансовый Менеджмент включает в себя определение ресурсоэффективности производимого оборудования.

В разделе социальной ответственности определены возможные опасные и вредные факторы, которые могут влиять на здоровье обслуживающего персонала. Приведены необходимые мероприятия по минимизации воздействия факторов на персонал и окружающую среду, рассмотрены законодательные стороны вопроса.

Список публикаций студента

№ п/п	Наименование работы, ее вид	Форма работы	Выходные данные	Объем работы, с.	Соавторы
а) научные работы					
1	Метафора как основной способ образования терминов в сфере нефтегазового дела	электронный ресурс	Томск : Изд-во ТПУ, 2016	1	-
2	Исследование золы текущего потока золошлаковых отходов Северской ТЭС	электронный ресурс	Томск : Изд-во ТПУ, 2017.	1	Белкин С.А.
3	Разработка оборудования для проведения процесса экстракции чаги	электронный ресурс	Томск : Изд-во ТПУ, 2020.		-

Список использованных источников

1. РИА Новости: [Электронный ресурс] / Томская фармацевтическая компания будет закупать у населения чагу – Электрон. ст. – режим доступа к ст.: <https://ria.ru/20140515/1007856104.html>
2. Лекарственные растения, сырье и фитопрепараты: учебное пособие для студентов очного и заочного отделений фармацевтического факультета: в 2 частях / В.Н. Тихонов, Г.И. Калинина, Е.Н. Сальникова. – Томск — 2004. — Часть 2. - 136 с.
3. Государственная Фармакопея Российской Федерации / МЗ РФ. — XIV изд. — Т.4. — Москва, 2018. — 1844 с.
4. Ивойлов А. В. Чага [Текст] / А.В. Ивойлов // Мордовский заповедник. — 2012. - №3. — С. 28-29
5. Шашкина М. Я. Чага в онкологии [Текст] / Шашкина М. Я., Шашкин П. Н., Сергеев А. В. // Российский биотерапевтический журнал. — 2005. – Том 4. — С. 59-72
6. Кобиашвили Г. А., Савушкина С. И. Применение экстракта чаги (*Inonotus obliquus*) в период инкубации икры золотой рыбки (*Carassius auratus*) // Символ науки. 2016. №4-3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-ekstrakta-chagi-inonotus-obliquus-v-period-inkubatsii-ikry-zolotoy-rybki-carassius-auratus> (дата обращения: 29.02.2020).
7. Шашкина М. Я. Химические и медико-биологические свойства чаги (обзор) [Текст] / Шашкина М. Я., Шашкин П. Н., Сергеев А.В. // Химико-фармацевтический журнал – 2006. – Том 40, №10. – с. 37-44.
8. Кузнецова О. Ю. Обзор современных препаратов с биологически активными композициями березового гриба чага [Текст] / Кузнецова О. Ю. // Разработка и регистрация лекарственных средств – 2016. – Выпуск №1. – с. 128-141.
9. Комиссаров Ю.А. Процессы и аппараты химической технологии. В 5 ч. Часть 5 : учебник для академического бакалавриата / Ю. А. Комиссаров, Л. С. Гордеев, Д. П. Вент ; под ред. Ю. А. Комиссарова. — 2-е изд., перераб. И доп. — М. : Издательство Юрайт, 2018. — 219 с. — (Серия : Бакалавр. Академический курс).
10. Магазин химических реактивов и лабораторного оборудования: [Электронный ресурс] / Экстрактор Сокслета– Электрон. ст. – режим доступа к ст.: <https://pcgroup.ru/blog/ekstraktor-soksleta-effektivnyj-pribor-dlya-polucheniya-ekstraktov/>
11. А. В. Каукин, Древо-целительство, Сов. Спорт, Москва (2002), сс. 251-253.
12. А. Артемова, Береза исцеляющая и омолаживающая, Диля, Москва, Санкт-Петербург (2001), сс. 29-39.

13. ИноСМИ - Все, что достойно перевода: [Электронный ресурс] / Удивительный гриб из России. Исследуем тайны сибирской чаги – Электрон. ст. – режим доступа к ст.: <https://inosmi.ru/social/20190810/245574126.html>
14. ФИМИП - Форум инвесторов и международных инвестиционных проектов: [Электронный ресурс] / Технология производства противоракового препарата на основе гриба чаги – Электрон. ст. – режим доступа к ст.: <http://www.fimip.ru/project/857>
15. Сублимированный экстракт березовой чаги от компании "CHAGAFOOD": [Электронный ресурс] / 10 преимуществ экстракта чаги – Электрон. ст. – режим доступа к ст.: <https://chagafood.ru/a220247-preimuschestv-ekstrakta-chagi.html>
16. Экстракт чаги с доставкой по РФ: [Электронный ресурс] / Экстракт чаги – Электрон. ст. – режим доступа к ст.: <http://artlife-trade.ru/katalog/ekstrakt-chagi/>
17. Официальный сайт администрации Байкальского муниципального образования: [Электронный ресурс] / Делаем экологически чистый продукт– Электрон. ст. – режим доступа к ст.: http://www.gorod-baikalsk.ru/newsabout_967.html
18. ГОСТ 166-89 (СТ СЭВ 704-77 - СТ СЭВ 707-77; СТ СЭВ 1309-78, ИСО 3599-76) Штангенциркули. Технические условия
19. ГОСТ 30046-93 (ИСО 7971-86) Зерновые. Определение насыпной плотности зерна, называемой "масса гектолитра"
20. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. Уч. пособие для вузов / Под ред. чл.-кор. АН СССР П.Г. Романкова. 10-е изд. перераб. и доп., - Л.:Химия, 1987.-576с.
21. ГОСТ 28742-90. Вакуум-выпарные аппараты периодического действия для пищевых продуктов. Типы и основные параметры. – М.: Стандартиформ, 2005. – 3 с.
22. ГОСТ 11987-81 Аппараты выпарные трубчатые стальные. Типы, основные параметры и размеры. – М., 1981 год
23. ГОСТ 9617-76 Сосуды и аппараты. Ряды диаметров. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2002
24. .Г. Касаткин Основные процессы и аппараты химической технологии: учебник для вузов. — 10-е изд. Стереотипное, доработанное. Перепеч. изд. 1973 г. — М: ООО ТИД «Альянс», 2004. — 753 с.
25. Никольский Б.П. Справочник химика. Том 5. Сырые продукты промышленности неорганических веществ, процессы и аппараты, коррозия, гальванотехника, химические источники тока. – Химия, Москва-Ленинград, 1968 г., 973 стр.

26. ГОСТ 9940-81. Трубы бесшовные горячедеформированные из коррозионностойкой стали. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2007
27. АТК 24.218.06-90 Штуцера для сосудов и аппаратов стальных сварных, 1990. — 102 с.
28. ГОСТ 12820-80 Фланцы стальные плоские приварные на $P(y)$ от 0,1 до 2,5 МПа (от 1 до 25 кгс/кв. см). Конструкция и размеры. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2003
29. ГОСТ 2850-95 Картон асбестовый. Технические условия. – М: ИПК Издательство стандартов, 1996
30. ГОСТ 15180-86 Прокладки плоские эластичные. Основные параметры и размеры. – М.: Издательство стандартов, 1993
31. Основы конструирования и расчета химической аппаратуры Лашинский А.А., Толчинский А. Р., Л., «Машиностроение», 1970. — 752 с.
32. ГОСТ 34233.1-2017 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Общие требования — М.: Стандартинформ, 2019. — 56 с.
33. ГОСТ 19903-2015 Прокат листовой горячекатаный. Сортамент. – М.: Стандартинформ, 2016
34. ГОСТ 34233.2-2017 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет цилиндрических и конических обечаек, выпуклых и плоских днищ и крышек — М.: Стандартинформ, 2019. — 89 с.
35. ГОСТ 31842-2012 (ИСО 16812:2007) Нефтяная и газовая промышленность. Теплообменники кожухотрубчатые. Технические требования. – М.: Стандартинформ, 2013
36. ГОСТ 12619-78 Днища конические отбортованные с углами при вершине 60° и 90°. – М.: Издательство стандартов, 1992.
37. ГОСТ 6533-78 Днища эллиптические отбортованные стальные для сосудов, аппаратов и котлов — М.: Издательство стандартов, 1985. — 73 с.
38. Семакина О.К. Машины и аппараты химических производств. Ч. I. Учеб. пособие /Том. Политехн. Ун-т – Томск, 2003. – 118 с.
39. Расчет и конструирование основного оборудования отрасли: учебное пособие / В.М. Беляев, В.М. Миронов. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 288 с.
40. ГОСТ 34233.3-2017 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Укрепление отверстий в обечайках и днищах при внутреннем и наружном давлениях. Расчет на прочность обечаек и днищ при внешних статических нагрузках на штуцер. – М.: Стандартинформ, 2019

41. ГОСТ 34233.4-2017 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет на прочность и герметичность фланцевых соединений. – М.: Стандартинформ, 2019.
42. ГОСТ 28759.6-90 Прокладки из неметаллических материалов. Конструкция и размеры. Технические требования. – М.: Стандартинформ, 2005
43. ОСТ 26-2037-96 Болты с шестигранной головкой для фланцевых соединений. Конструкция и размеры
44. ГОСТ 28759.2-90 Фланцы сосудов и аппаратов стальные плоские приварные. Конструкция и размеры. – М.: Стандартинформ, 2005
45. ГОСТ 34233.6-2017 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет на прочность при малоцикловых нагрузках. – М.: Стандартинформ, 2019.
46. Центральный металлический портал РФ: [Электронный ресурс] / Сталь марки 12X18H10T – Электрон. ст. – режим доступа к ст.: http://metallcheckiy-portal.ru/marki_metallov/stk/12X18H10T
47. АТК 24.200.03-90 Опоры-стойки вертикальных аппаратов. Типы, конструкция и размеры
48. 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.
49. Научная библиотека: [Электронный ресурс] / Критическая температура — Электрон. ст. — режим доступа к ст.: http://scask.ru/a_book_phis_t1.php?id=306
50. ГОСТ 12.2.085-2017 Арматура трубопроводная. Клапаны предохранительные. Выбор и расчет пропускной способности
51. Техническая информация - таблицы Tehtab.ru: [Электронный ресурс] / Коэффициенты (показатели) адиабаты для газов в зависимости от температуры при 1 бар. Табличка. - таблицы Tehtab.ru — Электрон. ст. — режим доступа к ст.: <https://tehtab.ru/Guide/GuidePhysics/GuidePhysicsHeatAndTemperature/SpecificHeat/SpecificHeatRatio/>
52. Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением (ПБ 03-576-03 взамен ПБ 10-115-96, РД 10-209-98, РД 10-290-99, РД 10-333-99)]
53. Охрана труда. Исследование, расчет и проектирование защитного заземления: учеб.-метод. пособие / С. Н. Шатило [и др.] ; М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2015. – 48 с., с. 40, табл. А.1

54. Семакина О.К. Монтаж, эксплуатация и ремонт оборудования отрасли: учебное пособие / О.К. Семакина; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015. – 177 с.

55. Термоэлектрические преобразователи Метран-2000 [Электронный ресурс] – Электронные текстовые данные – ГК «Новые технологии», 2013 – Режим доступа: <http://mtn.nt-rt.ru/images/manuals/2000.pdf>

56. Радарные уровнемеры, каталог [Электронный ресурс] – Электронные текстовые данные – Тула: [б.и.], 2011 – Режим доступа: <http://www.limaco.ru/ru/production/101/119/>

57. Интеллектуальные датчики давления Метран-150 [Электронный ресурс] – Электронные текстовые данные – ГК «Новые технологии», 2013 – Режим доступа: http://mtn.nt-rt.ru/images/manuals/Metran_150.pdf

58. Датчики давления Метран-75 [Электронный ресурс] – Электронные текстовые данные – ГК «Новые технологии», 2013 – Режим доступа: http://mtn.nt-rt.ru/images/manuals/Metran_75.pdf

59. Модуль ввода аналоговых сигналов ОВЕН МВ110-8А [Электронный ресурс] – Электронные текстовые данные – Москва: [б.и.], 2009 – Режим доступа: http://www.owen.ru/catalog/modul_vvoda_analogovih_signalov_owen_mv110_8a/opisanie

60. Блок питания «БП Карат-22» [Электронный ресурс] – Электронные текстовые данные – Смоленск: [б.и.], 2009 – Режим доступа: http://td-automatika.ru/upload/iblock/6c3/db43f7b7-ce40-4787-9867-c5956705f508_73873adf-ad2b-11e4-9cec-0030486527a0.pdf

61. Программируемый логический контроллер ОВЕН ПЛК 154 [Электронный ресурс] – Электронные текстовые данные – Москва: [б.и.], 2009 – Режим доступа: http://www.owen.ru/catalog/programmiruemij_logicheskij_kontroller_oven_plk_154/opisanie

62. Видяев И.Г, Серикова Г.Н., Гаврикова Н.А. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие / Видяев И.Г, Серикова Г.Н., Гаврикова Н.А.; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2019. – 35 с.

63. DEVEX Verfahrenstechnik GmbH: [Электронный ресурс] / Extraction Plants — Электрон. ст. — режим доступа к ст.: <https://www.devex-gmbh.de/devex-extraction-plants.html>

64. Able Engineering: [Электронный ресурс] / Percolator Vertical Extractor (Bottom Opening type) — Электрон. ст. — режим доступа к ст.: <http://ableengineering.in/percolator-vertical-extractor-bottom-opening-type-for-herbal-solvent-extraction-plant-and-phytoscience-phytochemical-plants/>

65. ГОСТ 12.2.003-91 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Оборудование производственное. Общие требования безопасности. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2001
66. ГОСТ 12.2.061-81 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Оборудование производственное. Общие требования безопасности к рабочим местам. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2002
67. РУА-93 Руководящие указания по эксплуатации и ремонту сосудов и аппаратов, работающих под давлением ниже 0,07 МПа (0,7 кгс/кв. см) вакуумом
68. ГОСТ 12.1.010-76 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Взрывобезопасность. Общие требования. – Сб. ГОСТов. - М.: ИПК Издательство стандартов, 2002
69. ГОСТ 12.1.019-2017 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты. – М.: Стандартинформ, 2019.
70. ГОСТ 12.1.030-81 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Защитное заземление. Зануление. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2001
71. СП 61.13330.2012 Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов. Актуализированная редакция СНиП 41-03-2003. – М.: Минрегион России, 2012
72. ГОСТ ИЕС 61140-2012 Защита от поражения электрическим током. Общие положения безопасности установок и оборудования. – М.: Стандартинформ, 2014
73. СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений
74. ГОСТ 12.1.005-88 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны
75. ГОСТ 12.1.003-2014 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Шум. Общие требования безопасности. – М.: Стандартинформ, 2019
76. СНиП 23-03-2003 Защита от шума. – М.: Госстрой России, ФГУП ЦПП, 2004
77. ГОСТ 12.1.012-2004 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Вибрационная безопасность. Общие требования. – М.: Стандартинформ, 2010
78. Р 2.2.2006-05 Гигиена труда. Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда
79. ГОСТ 12.3.009-76 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Работы погрузочно-разгрузочные. Общие требования безопасности. – М.: Стандартинформ, 2008
80. ГОСТ 12.4.026-2015 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Цвета сигнальные, знаки безопасности и разметка сигнальная. Назначение и правила применения. Общие технические требования и характеристики. Методы испытаний

81. ГОСТ 12.4.124-83 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Средства защиты от статического электричества. Общие технические требования

82. ГОСТ Р 51342-99 Безопасность машин. Съёмные защитные устройства. Общие требования по конструированию и изготовлению неподвижных и перемещаемых съёмных защитных устройств

83. ГОСТ 12.0.003-2015 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Опасные и вредные производственные факторы. Классификация

84.

Приложение I
(справочное)

Social responsibility

Development of technological equipment for the production of chaga extract

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4KM81	Нутфуллин Рустам Радифович		

Руководитель ВКР:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Тихонов Виктор Владимирович	к.т.н.		

Консультант-лингвист отделения иностранных языков ШБИП:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Диденко Анастасия Владимировна	к.ф.н.		

Introduction

In the final qualification work, a technological line is developed for obtaining extract from the birch fungus of the chaga. This extract is successfully used in the prevention of oncological diseases of various etiologies.

The field of use includes pharmaceutical industry. Potential users of the developed solution are companies engaged in obtaining various extracts from medicinal herbal materials. In the Tomsk region, an example is NPP ETALON LLC, which is already showing interest in the development.

Clinical trials of extracts show that patients have reduced pain, increased appetite, increased body weight, etc. Medicines made from chaga are promising for application in preventive oncology.

The workplace is a production workshop with various modern industrial equipment: an inspection table, a washing machine, a roller dryer, a jaw crusher, a sifter, an extractor, a condenser, a separator, a boiler, bunkers for storing raw materials and product.

1 Legal and institutional security issues

1.1 Legal standards of labor law

In order to obtain the highest production efficiency, a working time regime was established with days off according to the Labor Code of the Russian Federation. The employment of women's labor in work with harmful and (or) hazardous working conditions is limited, except for non-physical work or health-related and community services.

Workplace shifts of 10 hours each have been created. Each worker is given an hour-long lunch break after 4 hours of work from the start of the shift. Machines, mechanisms and other production equipment, individual and collective protection of workers must comply with state regulations for labor protection and have a declaration or certificate of conformity.

For staff members in special occupational categories that require high health standards, medical examinations will be made mandatory. Workers must be provided with every means necessary for their personal safety. The workplace must meet the requirements of labor protection, and the employee is entitled to mandatory social insurance.

Each worker also has the right to refuse to work if there is a danger to his life and health due to a violation of labor protection requirements, with the exception of cases provided for by federal laws. All employees must be provided with personal and collective protective equipment in accordance with labor protection requirements at the expense of the employer.

1.2 Ergonomic requirements for the correct location and layout of the working area

Before starting work, basic equipment is checked to eliminate problems and malfunctions.

The levels of physical, chemical and biological hazardous and harmful production factors generated by the production equipment in the work area must comply with the safety requirements established by the regulatory and technical standards documents.

The workplace should provide the possibility of convenient performance of work in a standing position. When choosing a working position, it is necessary to consider:

- labor-intensity of the work;
- the size of the working area and the need for movement in it working in the process of performing work;

- technological process peculiarities (the required accuracy of actions, the alternation in time of passive observation and physical actions, the need for records, etc.).

2 Production Safety

Table 1 describes the main elements of the production process that form hazardous and dangerous factors when working with the production line.

Table 39 – Basic hazardous and dangerous factors

Kind of work	Factors (GOST 12.0.003-2015)		Normative documents
	Hazardous	Dangerous	
	Physical		
		Moving machines and mechanisms.	GOST 12.2.003-91; GOST 12.2.061-81.
		Vacuum equipment.	RUA-93.
		Fire and explosion safety	GOST 12.1.010-76.
		Static electricity	GOST 12.1.019-2017; GOST 12.1.030-81.
		Increased temperature of the working surface	SP 61.13330.2012.
		Electrical safety	GOST IEC 61140-2012.
	Microclimate		SanPin 2.2.4.548-96; GOST 12.1.005-88.
	Exceeding the noise level		GOST 12.1.003-2014; SNiP 23-03-2003.
	Exceeding the vibration level		GOST 12.1.012-2004.
	Chemical		
	Dust pollution in the work area		GOST 12.1.005-88.
	Psychophysiological		
	Physical effort		R 2.2.2006-05; GOST 12.3.009-76.
	Monotonous work		R 2.2.2006-05.

2.1 Analysis of identified hazardous production factors

In this section, we consider in detail all the identified hazardous factors.

2.1.1 Moving transport and equipment

Moving transport in production deliver raw materials and ship the finished product. The main reasons for the dangers associated with the moving transport is a violation of the requirements of the traffic laws.

During the operation of production equipment, there is a danger of serious injury and fatal cases. To prevent such situations, staff must comply with safety precautions, have the appropriate qualifications and have been instructed in safety procedures working with machines and mechanisms used in the production line. Equipment should be fitted with safety signs in accordance with GOST 12.4.026-2015 SSBT.

2.1.2 Vacuum equipment

Equipment collapse is the main hazard in the operation of vacuum evaporators, which can lead to injury and death. To prevent such a situation, it is necessary to conduct technical diagnostics of equipment, to check the serviceability of all pressure measurements and safety valves. Staff need to undergo initial and repeated briefing on safety equipment and to wear protective clothes and footwear. Safety devices must comply with the following requirements according to RUA-93:

- stable and safe construction;
- located at a sufficient distance from the danger zone;
- represent minimal obstacles for observing the operation of the vacuum system.

In case of an accident, it is necessary to stop the equipment following the instruction manual.

2.1.3 Fire and explosion safety

Ensuring fire safety is the responsibility of the head of a company. The emergency equipment and fire safety measures should be implemented in accordance with fire safety rules.

The location of the emergency fire-fighting equipment should be agreed with the fire supervision authorities. Fire panels with a set of equipment and sandboxes should be installed at the exits in such a way that they do not interfere with the urgent evacuation of people.

The occurrence of an explosive situation is associated with the use of equipment operating under vacuum. Recommendations for dealing with emergencies are given in section 2.1.2.

2.1.4 Static electricity

To prevent the occurrence of dangerous spark discharges from the surface of the equipment and from the human body, it is necessary to reduce the amount of charge. All metal parts of equipment, pumps and pipelines must be grounded. Static protection equipment against static electricity must comply with GOST 12.4.124.

2.1.5 Increased temperature of the working surface

Heating of the working surfaces may occur because of the operation of the equipment. Therefore, staff should be equipped with gloves to avoid thermal burns. Heated equipment should be thermally insulated in accordance with SP 61.13330.2012. It is necessary to provide protective fences in accordance with GOST R 51342- and install appropriate warning signs according to GOST 12.4.026-2015.

2.1.6 Electrical safety

The effect of electric current on the human body is diverse. Passing through the human body, an electric current causes a thermal, electrolytic and biological effect. The thermal effect of the current is burns of the body, heating the internal organs of a person. The electrolytic effect of the current is decomposition of organic body fluids and damage to their physico-chemical composition. The biological effect of the current is irritation of the body tissues and involuntary contractions of the muscles.

The working area is the place without increased electrical hazard. Basic ways and means of electrical protection in accordance with GOST IEC 61140-2012:

- conductive parts isolation;
- security fences;
- warning and lock systems;
- safety and warning signs;
- protective earthing;
- zeroing;
- safety switch;
- personal electroprotective equipment;

- safety briefings.

2.2 Analysis of identified harmful production factors

In this section, we consider in detail the identified harmful production factors.

2.2.1 Deviation of the microclimate of the working area

A constant deviation of weather conditions from normal parameters at the workplace leads to overheating or hypothermia of the human body and the associated negative consequences. In case of overheating, there are symptoms such as profuse sweating, acceleration, severe weakness and dizziness, heat stroke. When hypothermia occurs, there are symptoms such as colds, chronic inflammation of the joints, muscles, etc.

Prevention of overheating is implemented by rational regime of work and rest by reducing working time for breaks in areas with normal microclimate. At a certain air temperature and wind speed, work is suspended according to GOST 12.1.005-88. In the winter season, all staff must be equipped with protective clothes with protective properties. Mercury thermometers measure the air temperature in the production a.

2.2.2 Exceeding the noise level

Noise, in general, can be divided into external and internal. Sources of internal noise can be pumps, process equipment, ventilation units, etc. Sources of external noise can be people, cars, wildlife, weather conditions, etc.

Under normal operating conditions, the sound-pressure level shall not exceed 60 dB. The hearing sensitivity is getting worse with sound-pressure level higher than the 80-90 dB. A person working with noise gets used to it, but the prolonged action of loud noise causes general fatigue, and can lead to hearing impairment.

In accordance with SNiP 23-03-2003 and GOST 12.1.003-2014 the following methods to reduce noise can be used at the factory:

- reduction of noise at the source;
- change in radiation direction;
- rational layout of enterprises and workshops;
- acoustic processing of premises;
- reduction of noise in the way of its distribution;

- using of silencers, screens, sound-absorbing building materials;
- using of remote control during operation of noisy equipment.

Workers should be equipped with ear defenders and it is recommended to undergo regular medical check-ups.

2.2.3 Exceeding the vibration level

The vibration created by equipment can lead to disturbances in the operation and failure of the machines themselves. This can lead to emergencies and, ultimately, adverse effects on the person. Permissible values of the parameters of transport and technological vibration are established by GOST 12.1.012-2004. Methods of vibration protection are mainly organizational:

- personal protective equipment;
- optimal working time.

If the local vibration is exceeded at the workplace, a time limit for its exposure is introduced:

- when the permissible level up to 3 dB, the duration of work is limited to 120-160 min;
- up to 6 dB – up to 60-80 min;
- up to 9 dB – up to 30-40 min;
- up to 12 dB – up to 15-40 min;
- when the permissible level exceeds 12 dB the operation stops.

2.2.4 Increased dustiness of the working area

The process of grinding raw materials increases dustiness of the working area, a lot of fine dust is formed. The ventilation systems should be installed and personal protective equipment such as respirators should be provided to staff to prevent harmful effects on human health.

2.2.5 Physical effort

Physical activity can be associated with moving raw materials, work with equipment, loading of finished products, etc. and cause dynamic overload.

To prevent the occurrence of this factor, the following measures should be applied:

- automation of equipment and lines to minimize the involvement of direct human labor;
- develop rules and regulations in order to reduce the power and duration of physical activity;
- briefings and trainings in order to study the reduction of physical activity;

- sporting events among workers.

2.2.6 Monotonous work

Monotonous work negatively affects the efficiency of production: economic indicators are deteriorating, such as staff turnover, accident rate and injuries are increasing.

The main measures to reduce the effect of monotony on humans:

- to combine simple operations in more complex, meaningful and diverse;
- to transfer workers from one to another production operation;
- to apply optimal working time: assign short additional breaks for the entire shift for an individual worker at a convenient time for him.

3 Environmental safety

In this section, we consider the rules for the disposal of waste raw materials and raw materials that have not passed an inspection, disposal of solid waste, fluorescent lamps. When developing a production line, it becomes necessary to dispose of industrial waste such as paper, fluorescent lamps and various types of raw materials.

Waste paper should be transferred to the organizations for further processing into recycled paper products. Waste fluorescent lamps must be transferred either to state organizations engaged in the removal of household and industrial waste, or to organizations engaged in waste processing. The second option is more preferable, as waste processing is a promising area of technology development.

Utilization of medicinal plant materials both at pharmaceutical enterprises and outside is carried out by specialized companies. After the procedure, a disposal certificate is drawn up.

4 Safety in emergency situations

The occurrence of a fire is the most dangerous emergency in this production. The causes of this emergency can be:

- technical issues;
- careless handling of fire during repair work;
- human factor;
- external impact of anthropogenic or natural disasters;
- increased air and objects temperatures.

Measures that can be taken to ensure fire safety should be:

- preventing the spread of fire beyond the outbreak;
- using structures of production facilities with a regulated limit of their fire resistance and combustibility;
- evacuation of people in case of fire;
- using personal and collective fire protection equipment;
- using fire alarms;
- organization of fire protection of the plant;
- staff training;
- development and placement of an evacuation plan around the perimeter of the production building.

Foam, powder and water extinguishers must be on the block control panel. All passages must be free and have at least two exits without dead ends. The use of extinguishing agents depends on the source of the fire. If clothes burn, it is necessary to use water, if any electrical installations burn, it is necessary to use carbon dioxide fire extinguishers.

Conclusion

In this section, legal and organizational issues of ensuring safety were considered. An analysis of the regulatory documents governing the production activities of the constructor was also given. Harmful and hazardous production factors were identified, regulatory documents and options for eliminating or minimizing the negative impact of these factors on human health are presented. The issue of environmental safety was also considered, wastes produced by the technology and methods for their disposal were presented. The final part of this section is the issue of safety in emergencies, which has been fully considered and measures were described to minimize the origin of such situations.

According to the technical documents, all the objects investigated in this section comply with the standards and are safe for operation.