

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Институт физики высоких технологий

Направление подготовки 18.04.02 «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии»

Кафедра общей химии и химической технологии

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Тема работы
<b>Разработка процесса переработки органического сырья в греющих камерах электродного типа</b>

УДК 663/664:661.666

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4КМ51	Рассанова Карина Александровна		

Руководитель

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

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

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

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Раденков Т.А.			

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ОХХТ	Ан В.В.	к.т.н.		

Томск – 2017 г.

*Планируемые результаты освоения образовательной программы*

Код результата	Результат освоения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС ВПО, критериев и/или заинтересованны х сторон
<b><i>Профессиональные компетенции</i></b>		
Р1	Применять глубокие, математические, естественнонаучные, социально-экономические и профессиональные знания в области энерго-и ресурсосберегающих процессов химической технологии, нефтехимии и биотехнологии в профессиональной деятельности	Требования ФГОС (ПК-1,3,14,17,18,26,27 ОК-1,3), Критерий 5 АИОР (п.1.1)
Р2	Ставить и решать инновационные задачи производственного анализа, связанные с созданием и переработкой материалов с использованием моделирования объектов и процессов химической технологии, нефтехимии и биотехнологии с учетом минимизации антропогенного воздействия на окружающую среду.	Требования ФГОС (ПК-6,12,13 ОК-2), Критерий 5 АИОР (пп.1.2)
Р3	Разрабатывать новые технологические процессы на основе математического моделирования, проектировать и использовать энерго-и ресурсосберегающее оборудование химической технологии, нефтехимии и биотехнологии	Требования ФГОС (ПК-8,11,19-25 ОК-4), Критерий 5 АИОР (п.1.3)
Р4	Проводить теоретические и экспериментальные исследования в области разработки и оптимизации технологических процессов и систем с позиций энерго- и ресурсосбережения	Требования ФГОС (4,5,7,8,9 ОК-4), Критерий 5 АИОР (п.1.4)

P5	Внедрять и эксплуатировать современное высокотехнологичное оборудование, обеспечивать его высокую эффективность, соблюдать правила охраны здоровья и безопасности труда на производстве, выполнять требования по защите окружающей среды.	Требования ФГОС (ПК-2,9,10,15,16, ОК-4,5), Критерий 5 АИОР (п.1.5)
P6	Демонстрировать глубокие знания социальных, этических и культурных аспектов инновационной профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-1,2,3), Критерий 5 АИОР (пп.2.4,2.5)
P7	Самостоятельно учиться и непрерывно повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-2,4), Критерий 5 АИОР (2.6)
P8	Активно владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в иноязычной среде, разрабатывать документацию, презентовать результаты профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-3), Критерий 5 АИОР (п.2.2)
P9	Эффективно работать индивидуально и в коллективе, демонстрировать ответственность за результаты работы и готовность следовать корпоративной культуре организации.	Требования ФГОС (ПК-26,27, ОК-4,5), Критерий 5 АИОР (пп.1.6, 2.3)

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Институт физики высоких технологий

Направление подготовки 18.04.02 «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии»

Кафедра общей химии и химической технологии

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой

\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_  
(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

### ЗАДАНИЕ

#### на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

**Магистерская диссертация**

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

Студенту:

Группа	ФИО
4KM51	Рассанова Карина Александровна

Тема работы:

**Разработка процесса переработки органического сырья в греющих камерах  
электродного типа**

Утверждена приказом директора (дата, номер)

08.12.2016 г., № 10497/С

Срок сдачи студентом выполненной работы:

### ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

#### **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.).*

Разработать процесс переработки органического сырья в греющих камерах электродного типа.

1. Режим работы: непрерывный.
2. Производительность:  
по выпаренной воде 25кг\ч.
3. Среда в аппарате: плодово-ягодное сырьё.

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b> (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).</p>	<p>Оформить пояснительную записку со следующими разделами: Глава 1. Литературный обзор Глава 2. Разработка и оптимизация аппарата для омического нагрева органического сырья Глава 3. Расчет вакуум-выпарной греющей камеры электродного типа Глава 4. Расчет теплообменного аппарата типа холодильник конденсатор Глава 5. Социальная ответственность Глава 6. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение Заключение Список использованных источников</p>
--	---

<p><b>Перечень графического материала</b> (с точным указанием обязательных чертежей)</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Технологическая схема – 1 лист;</li> <li>2. Вид общий выпарного аппарата - 1 лист;</li> <li>3. Выносные элементы выпарного аппарата – 1 лист;</li> <li>4. Вид общий теплообменного аппарата – 1 лист;</li> <li>5. Экономические данные – 1 лист.</li> </ol>
--	---

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

Консультант	Раздел
Криницына З.В	«Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»
Раденков Т.А.	«Социальная ответственность»
Игна О.Н.	«Иностранный язык»

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

Глава 1. Литературный обзор

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

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Тихонов Н.В.	К.Т.Н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4КМ51	Рассанова Карина Александровна		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

<b>Группа</b> 4KM51	<b>ФИО</b> Рассанова Карина Александровна
------------------------	--

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

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

<p>1. Описание рабочего места (рабочей зоны, технологического процесса, механического оборудования) на предмет возникновения:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– вредных проявлений факторов производственной среды (метеоусловия, вредные вещества, освещение, шумы, вибрации, электромагнитные поля, ионизирующие излучения)</li> <li>– опасных проявлений факторов производственной среды (механической природы, термического характера, электрической, пожарной и взрывной природы)</li> <li>– негативного воздействия на окружающую природную среду (атмосферу, гидросферу, литосферу)</li> <li>– чрезвычайных ситуаций (техногенного, стихийного, экологического и социального характера)</li> </ul>	<p>К основным элементам производственного процесса на вакуум-выпарной установке омического нагрева растительного сырья непрерывного действия, формирующим вредные факторы можно отнести:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– превышение уровня шума и вибрации</li> <li>– недостаточная освещённость рабочей зоны</li> <li>– производственные метеоусловия: повышенная температура</li> </ul> <p>Формирующим опасные факторы:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– электрический ток</li> <li>– нагретые поверхности</li> <li>– движущиеся части машин и механизмов</li> <li>– давление (разрушение аппарата, работающего под давлением)</li> </ul>
<p>2. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме</p>	<p>Федеральный закон № 426-ФЗ от 28 декабря 2013 года «О специальной оценке условий труда» Федеральный закон N 421-ФЗ от 28.12.2013 «О внесении изменений в отдельные законодательные акты российской федерации в связи с принятием федерального закона «о специальной оценке условий труда».</p> <p>Федеральный закон N 123-ФЗ от 22.07.2008 «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности».</p> <p>Федеральный закон N 68-ФЗ от 21.12.1994 «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера (с изменениями на 23 июня 2016 года)».</p>

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

<p>1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой;</li> <li>– действие фактора на организм человека;</li> <li>– приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ);</li> <li>– предлагаемые средства защиты (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства)</li> </ul>	<p>Вредные факторы проектируемой установки:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– производственные метеоусловия: нормализация воздушной среды в соответствии с допустимыми нормами.</li> <li>– недостаточная освещённость рабочей зоны: рациональное освещение искусственным, естественным или совмещённым освещением.</li> <li>– превышение уровня шума и вибрации: нормирование уровня звука, размещать шумные машины, так чтобы минимизировать воздействие шума средства индивидуальной защиты для работающих, обозначить соответствующую зону знаками безопасности.</li> </ul>
<p>2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– механические опасности (источники, средства защиты);</li> <li>– термические опасности (источники, средства защиты);</li> <li>– электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты);</li> <li>– пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения)</li> </ul>	<p>Опасные факторы проектируемой установки:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– движущиеся части машин и механизмов: установка предупреждающих знаков и ограждений, соблюдение правил техники безопасности, инструктаж рабочего персонала, использование СИЗ.</li> <li>– электрический ток: укомплектовать электроустановки защитными средствами и изделиями медицинского назначения для оказания первой помощи работникам, проверять техническое состояние оборудования, работники обязаны проходить обучение по безопасной эксплуатации электроустановок и иметь соответствующую группу по электробезопасности.</li> </ul>

	<p>применять коллективные и индивидуальные средства защиты.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– нагретые поверхности: соблюдать правила охраны труда, проводить осмотр оборудования перед началом работы, своевременно устранять дефекты оборудования и восстанавливать тепловую изоляцию, применять воздушное душирование, использовать СИЗ.</li> </ul> <p>Для осуществления противопожарной защиты необходимо:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– применять средства пожаротушения и соответствующих видов пожарной техники;</li> <li>– использовать автоматические установки пожарной сигнализации и пожаротушения;</li> <li>– использовать основные строительные конструкции и материалы с нормированными показателями пожарной опасности;</li> <li>– устанавливать устройства, обеспечивающие ограничение распространения пожара;</li> <li>– иметь в наличии средства коллективной и индивидуальной защиты, которые должны обеспечивать безопасность людей в пожароопасной ситуации</li> </ul>
<p>3. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны</li> </ul>	<p>Производственное оборудование, применяемое на предприятии должно соответствовать требованиям безопасности. Расстояние между оборудованием относительно друг друга, от стен и колонн здания, зоны обслуживания аппаратов, ширина проездов следует принимать по нормам технологического проектирования предприятий. Здания, сооружения, конструкции и коммуникации следует окрашивать в цвета в соответствии с нормами. Для восстановления физиологических показателей рабочих в цехах с повышенной температурой устраивают специально оборудованные стационарные комнаты отдыха.</p>
<p>4. Охрана окружающей среды:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы);</li> <li>– анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы);</li> <li>– анализ воздействия объекта на литосферу (отходы);</li> <li>– разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды.</li> </ul>	<p>Данное производство не оказывает негативного влияния на экологию окружающей среды. Сырьем производства являются натуральные качественные фрукты и ягоды. В процессе создания готовой продукции не используются искусственные красители, ароматизаторы, консерванты и другие химические соединения. Поэтому установка является экологически безопасной.</p>
<p>5. Защита в чрезвычайных ситуациях:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– перечень возможных ЧС на объекте;</li> <li>– выбор наиболее типичной ЧС;</li> <li>– разработка превентивных мер по предупреждению ЧС;</li> <li>– разработка мер по повышению устойчивости объекта к данной ЧС;</li> <li>– разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий</li> </ul>	<p>К чрезвычайной ситуации в данной установке может привести аппарат, работающий под разряжением. Источниками аварийного роста давления в аппаратах могут являться внезапные, не предусмотренные рабочим процессом случаи. Для исключения роста давления по правилам эксплуатации тепловые установки должны иметь предохранительные клапаны, которые работают по принципу сброса из аппарата излишнего количества среды.</p> <p>При поступлении сигнала об угрозе ЧС все работники предприятия должны надеть средства индивидуальной защиты, после чего удалиться в убежище согласно плану эвакуации из помещения.</p>
<p><b>Перечень графического материала:</b></p>	
<p>При необходимости представить эскизные графические материалы к расчётному заданию (обязательно для специалистов и магистров)</p>	<p>Таблицы.</p>

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	
---	--

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент каф. ЭБЖ	Раденков Тимофей Александрович			

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4КМ51	Рассанова Карина Александровна		

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

Студенту:

Группа	ФИО
4КМ51	Рассанова Карина Александровна

Институт	ИФВТ	Кафедра	ОХХТ
Уровень образования	Магистр	Направление/специальность	Машины и аппараты химических и нефтехимических производств

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

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Стоимость оборудования для научных работ 9730 руб.; Размер оклада руководителя проекта 23264,86 руб.; Размер оклада исполнителя 14874,45 руб.; Размер оклада эксперта 29744,67 руб.
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	Число календарных дней в году – 365; Продолжительность выполнения проекта – 24 месяца; Дополнительная заработная плата – 15 % от основной; Накладные расходы - 10% от суммы всех расходов.
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Отчисления на социальные нужды во внебюджетные фонды – 27,1 %

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

1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	Потенциальные потребители результатов исследования. Анализ конкурентных технических решений. SWOT-анализ. Оценка готовности проекта к коммерциализации. Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования.
2. <i>Разработка устава научно-технического проекта</i>	Инициация проекта: цели и результат проекта, организационная структура проекта, ограничения и допущения проекта.
3. <i>Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	Иерархическая структура работ проекта. План проекта. Контрольные события проекта. Бюджет научного исследования. Организационная структура проекта. Матрица ответственности.
4. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	Оценка сравнительной эффективности исследования .

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

<ol style="list-style-type: none"> <li>1. <i>Оценка конкурентоспособности технических решений</i></li> <li>2. <i>Матрица SWOT</i></li> <li>3. <i>Оценка степени готовности научного проекта к коммерциализации</i></li> <li>4. <i>График проведения и бюджет НТИ</i></li> <li>5. <i>Календарный план проекта</i></li> <li>6. <i>Матрица ответственности</i></li> <li>7. <i>Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НТИ</i></li> </ol>
--

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

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Креницына Зоя Васильевна	к.т.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4КМ51	Рассанова Карина Александровна		

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа состоит из 266 с., 40 рис., 68 табл., 544 формул, 96 источников, 2 приложений, 5 листов графического материала.

Ключевые слова: выпарной аппарат, омический нагрев, электрод, греющая камера.

---

Объектом исследования является греющая камера электродного типа для переработки органического сырья.

---

Цель работы – исследование особенностей процесса переработки органического сырья в греющих камерах электродного типа. Расчет оборудования процесса переработки органического сырья с участием греющей камеры электродного типа.

---

В процессе исследования проводились литературный обзор; механический и технологический расчеты выпарного и теплообменного аппаратов; описание социальной ответственности и финансового менеджмента, ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

---

В результате исследования в главах 3 и 4 в разделах «Технологический расчет» произведен расчет материального и теплового балансов, расчет основных размеров аппарата.

---

В разделах «Механический расчет»: произведены расчеты толщины стенок обечайки, плоской крышки и стандартных эллиптических днищ, расчет укреплений отверстий, расчет фланцевых соединений и опор.

---

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: производительность выпарного аппарата по выпаренной воде 25 кг/ч; используемый ток: переменный, промышленный, частота 50 Гц.

Производительность теплообменного аппарата по выпариваемой воде 0,0694 кг/с. Пары поступают в аппарат при температуре конденсации и  $P=0,02$  МПа, конденсат отводится при температуре 40 °С.

---

Степень внедрения: не внедрен.

---

Область применения: пищевая промышленность.

---

Экономическая эффективность/значимость работы расчёт греющей камеры электродного типа, исследования влияния материала электродов для концентрирования органических жидкостей, разработка оптимальных режимов эксплуатации является актуальной задачей в связи с отсутствием единой системы расчетов подобных аппаратов, отсутствия на рынке малогабаритных аппаратов серийного отечественного производства для обработки пищевых продуктов.

---

## Оглавление

Глава 1. Литературный обзор .....	7
Введение .....	7
1.1 Влияние различных параметров продукта на скорость нагрева омического процесса .....	16
1.2 Типы перерабатываемого органического сырья .....	18
1.3 Методы концентрирования органического сырья .....	19
1.3.1 Концентрирование выпариванием .....	20
1.3.2 Концентрирование омическим нагревом .....	21
1.4 Электроды в омическом нагреве .....	23
1.5 Омическое нагревание в применении к определенным продуктам .....	28
1.5.1 Обработка мясных продуктов .....	28
1.5.2 Обработка молочных и яичных продуктов .....	29
1.5.3 Обработка фруктовой и овощной продукции .....	32
1.6 Пастеризация органического сырья омическим нагревом .....	38
1.7 Технологические решения для реализации омического нагрева на производстве .....	44
1.8 Вывод из литературного обзора .....	51
Глава 2. Разработка и оптимизация аппарата для омического нагрева органического сырья .....	53
2.1 Разработка электродной группы .....	53
2.2 Исследование коррозионной стойкости углеграфитовых материалов в кислотных растворах .....	59
2.3 Разработка греющей камеры .....	62
2.4 Применение постоянного или переменного тока .....	64

2.5 Оптимизация .....	65
Глава 3. Расчет вакуум-выпарной греющей камеры электродного типа (выпарного аппарата) .....	67
3.1 Технологический расчёт выпарного аппарата .....	67
3.2 Расчет мощности системы электродов .....	71
3.3 Механический расчет выпарного аппарата .....	74
3.3.1 Расчёт цилиндрической обечайки выпарного аппарата .....	74
3.3.2 Расчет выпуклого днища выпарного аппарата .....	86
3.3.3 Расчёт плоской отбортованной крышки выпарного аппарата .....	89
3.3.4 Расчет укрепления отверстий на крышке, днище и обечайке выпарного аппарата .....	91
3.3.5 Расчет фланцевых соединений выпарного аппарата .....	102
3.3.6 Расчёт веса выпарного аппарата .....	119
3.3.7 Расчёт опор выпарного аппарата .....	122
Глава 4. Расчет теплообменного аппарата типа холодильник конденсатор .....	127
4.1 Тепловой и материальный расчеты теплообменного аппарата .....	127
4.2 Механический расчет теплообменного аппарата .....	135
4.2.1 Расчёт цилиндрической обечайки теплообменного аппарата .....	135
4.2.2 Расчет выпуклого днища и крышки теплообменного аппарата .....	146
4.2.3 Подбор штуцеров теплообменного аппарата .....	149
4.2.4 Расчет укрепления отверстий на обечайке, крышке и днище теплообменного аппарата .....	151
4.2.5 Подбор фланцевых соединений теплообменного аппарата .....	163
4.2.6 Расчет фланцевых соединений теплообменного аппарата .....	165
4.2.7 Расчет трубной решетки теплообменного аппарата .....	181

4.2.8	Расчёт веса теплообменного аппарата .....	199
Глава 5. Социальная ответственность .....		202
5.1	Техногенная безопасность .....	204
5.2	Организационные мероприятия обеспечения безопасности .....	213
5.3	Региональная безопасность .....	214
5.4	Пожаро- и взрывобезопасность .....	214
5.4.1	Первичные средства пожаротушения .....	215
5.5	Безопасность при чрезвычайных ситуациях .....	216
Глава 6. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение .....		218
6.1	Оценка коммерческого и инновационного потенциала инженерных решений .....	218
6.1.1	Потенциальные потребители результатов исследования .....	218
6.1.2	Анализ конкурентных технических решений .....	221
6.1.3	SWOT-анализ .....	224
6.1.4	Оценка готовности проекта к коммерциализации .....	226
6.1.5	Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования .....	228
6.2	Инициация проекта .....	229
6.3	Планирование управления научно-техническим проектом .....	231
6.3.1	Иерархическая структура работ проекта .....	231
6.3.2	План проекта .....	232
6.3.3	Контрольные события проекта .....	232
6.3.4	Бюджет научного исследования .....	233
6.3.5	Организационная структура проекта .....	235

6.3.6 Матрица ответственности .....	236
6.4 Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования .....	237
6.4.1 Оценка сравнительной эффективности исследования .....	237
Заключение .....	240
Список использованных источников .....	241
Список публикаций .....	252
Приложение А. Раздел на английском языке .....	253
Приложение Б. График Ганта .....	254
Спецификация .....	264

## Глава 1. Литературный обзор

### Введение

Электрический ток способен создавать тепло. Это происходит потому что он является потоком электронов через вещество. Вещество называют проводником. Проводники с разной степенью легкости пропускают поток электронов, но в каждом проводнике есть некоторая степень сопротивления потоку. В процессе того, как электроны «проталкиваются» через проводник, происходит их нагрев. Часть энергии в электронах преобразуется в тепловую энергию.

Всегда идут поиски новых способов обработки продуктов. За прошедшие 200 лет технологии, от простого нагрева продуктов в металлической посуде, продвинулись к использованию намного более сложных методов.

Обработка высоким давлением избавила от необходимости чрезмерного нагревания и разрушения на молекулярном уровне полезных микроорганизмов, присутствующих в еде. Микроволновое излучение подвергает продукт колеблющемуся электромагнитному полю и создает тепло под действием трения полярных молекул воды. Другой весьма интересный процесс, происходит за счет пропуска электрического тока непосредственно через пищевой материал, чтобы нагреть и уничтожить нежелательные микроорганизмы, которые могут присутствовать.

Большинство из нас знакомо с принципом работы тостера или нагревательных элементов в таких устройствах как фены. Во время передачи электрического тока через металлический провод, возникает сопротивление, и провод нагревается часто до пылающего красного цвета. Этот принцип может быть применен к нагреванию пищевого продукта. Процесс известен под термином «омический нагрев», так как он основан на сопротивлении, измеряемом в омах. Данная концепция возникла еще в 1840-х годах, когда

Джеймс Прескотт Джоуль показал, что вода будет нагреваться, при прохождении через неё электрического тока [72].

Закон Джоуля-Ленца является теоретической основой применения электрического тока для процесса нагревания. Согласно закону, тепловой эффект вычисляется по формуле:

$$Q = R \times I^2 \times \tau = (U^2 / R) \cdot \tau \quad (1)$$

где Q – количество выделившейся теплоты, Дж;

R – электрическое сопротивление проводника, Ом;

I – сила тока, А;

U – напряжение, Вт;

$\tau$  – продолжительность прохождения тока через проводник, с.

Омический нагрев не является новой технологией. Он использовался в качестве коммерческого процесса в начале двадцатого века для пастеризации молока. Однако использование данного процесса было прекращено между концом 1930-ых и 1960-ых, якобы из-за слишком высокой стоимости электричества и нехватки подходящих материалов электрода. Интерес к омическому нагреву был возобновлен в 1980-х годах, когда исследователи искали жизнеспособные методы для эффективной стерилизации смесей жидких и крупных частиц, для которых использование только асептической обработки было неудовлетворительным [72].

В Европе наиболее распространен процесс омического нагрева с использованием пластмассовой трубки, через которую в восходящем потоке подается пищевой продукт (рис. 1). Это позволяет сохранить трубку в равномерно заполненном состоянии, исключая воздушные зазоры, которые могли возникнуть при нисходящем потоке. Фигуры разной формы на рисунке 1 помогают представить различные твердые частицы, что могут присутствовать в смеси продукта.

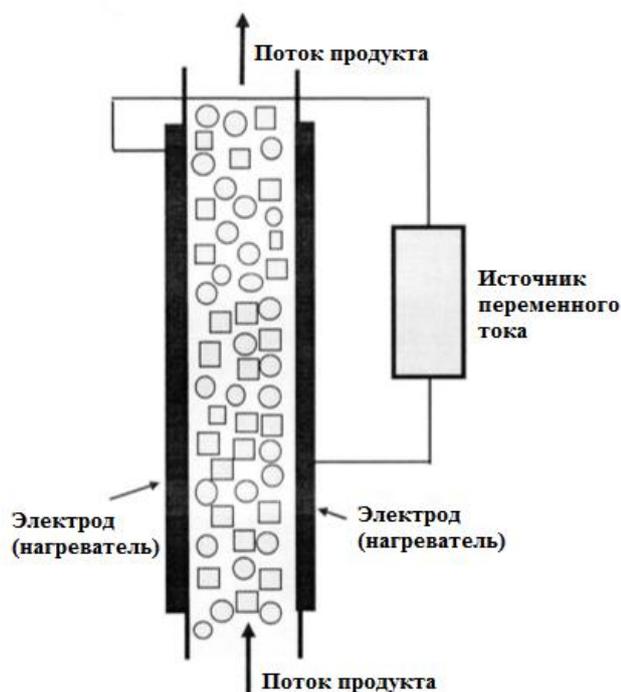


Рисунок 1. Схема нагревательного узла в процессе омического нагрева

Электроды – металлические пластины, расположенные вдоль противоположных сторон пластмассовой трубки. Электрический ток проходит от одной пластины к другой через продукт, нагревая его. При помощи высокого напряжения с соответствующим числом пар электродов, регулируя подачу продукта насосом, можно нагреть продукт до желаемой конечной температуры [65].

Омический нагрев происходит как при постоянном, так и при переменном токе. Тем не менее в пищевой промышленности предпочитают применение переменного тока. Это продиктовано возникновением электролиза в пищевых продуктах.

Скорость выделения тепла в материале характеризуется следующим уравнением:

$$u''' = E^2 * \sigma \quad (2)$$

где  $u'''$  – скорость выработки тепла на единицу объема, В/м<sup>3</sup>;

$E$  – напряженность электрического поля, В/м;

$\sigma$  – электропроводность материала, См/м.

Вышеприведенное выражение является основой для проектирования устройств и переработки продуктов путем омического нагрева. Напряженность электрического поля ( $E = U / l$ ) может варьироваться проектировщиком путем изменения либо приложенного напряжения  $U$ , либо межэлектродного зазора  $l$ . Эффективная электропроводность  $\sigma$ , является функцией температуры, частоты и состава продукта и может быть увеличена путем добавления ионных соединений, таких как соли или кислоты, или уменьшена путем добавления неполярных компонентов, таких как эмульгированные липиды. Это говорит о том, что для продукта с известным диапазоном электропроводности можно спроектировать нагреватель, так чтобы успешно нагревать его омически. И, наоборот, для данной конструкции нагревателя и рабочих параметров, можно модифицировать продукт, так чтобы обеспечить его нагрев.

Важным моментом является то, что для омического нагрева электропроводность продукта должна быть отличной от нуля. Это означает, что совершенно неполярные материалы, такие как масла, которые не проводят электричество, не могут быть нагреты омически. Однако большинство пищевых материалов являются водными и обладают некоторой электропроводностью (хотя и низкой), и поэтому их можно нагревать. Водные материалы с низкой электропроводностью возможно нагревать, используя устройства с маленькими электродными зазорами, увеличивая напряженность электрического поля [65].

Другая важная особенность омического нагрева заключается в том, что электрическая проводимость пищевых продуктов обычно увеличивается с повышением температуры, так как с повышением температуры уменьшается вязкость, и поэтому сопротивление движущимся ионам при высоких температурах снижается.

Электрическая проводимость для жидкостей чаще всего является линейной функцией температуры и может быть записана уравнением:

$$\sigma = \sigma_0 * (1 + m * T) \quad (3)$$

где  $\sigma_0$  – электропроводность материала при 0 °С, См/м.

$m$  – температурный коэффициент электропроводности, см/мКСм;

$T$  – температура, °С.

Для твердых материалов, особенно тех, в которых нет ячеистой структуры, электрическая проводимость не обязательно линейна, она зависит также от напряженности электрического поля. Это происходит из-за разрушения клеток электропереносом.

Общие результаты многочисленных исследований электропроводности заключаются в следующем. Электропроводность является функцией пищевых компонентов: ионные компоненты (соль), кислота и содержание влаги увеличивают электропроводность, в то время как жиры, липиды и спирт уменьшают ее. Электропроводность линейно коррелирует с температурой, когда электрическое поле достаточно высокое (не менее 60 В/см) [72]. Электропроводность возрастает по мере увеличения температуры и приложенного напряжения, а уменьшается по мере увеличения содержания твердых веществ; Снижение частоты переменного тока во время омического нагрева увеличивает электропроводность. Электропроводность возрастает за счет нагрева: предварительно нагретые образцы показывают повышенную электрическую проводимость по сравнению с необработанными образцами.

Особенности и преимущества омического нагрева:

1. *Однородность нагрева.* Поскольку омический нагрев основывается на внутренней выработке энергии, твердые частицы в смеси твердое тело-жидкость могут быть нагреты с той же скоростью, что и текучая среда. Это является существенным преимуществом по сравнению с традиционным нагревом, при котором тепло передается от внешней среды через стенки теплообмена и жидкости-носителю, прежде чем достигнуть твердой фазы. Омический нагрев также имеет значительные преимущества в равномерности нагревания по сравнению с микроволновым и радиочастотным нагревом, так как оба эти метода связаны с применением сложных электрических полей, которые

трудно локализовать в многокомпонентном материале. Таким образом, эти способы приводят к неравномерному нагреванию, в которых холодные пятна меняют местоположения и их трудно охарактеризовать.

2. *Нет теоретического верхнего предела температуры.* В отличие от обычных способов теплообмена, где температура среды является наивысшей, которую можно достичь, омический (а также микроволновый и радиочастотный) нагрев включает в себя внутреннюю выработку энергии и может достигать температур, намного превышающих обычные процессы. Хотя теоретического предела температуры не существует, на практике потери тепла увеличиваются по мере повышения температуры до достижения устойчивого состояния.

Эта функция имеет как положительные, так и отрицательные последствия. С положительной стороны омический нагрев может быть использован для быстрого нагревания в температурных пределах, исключающих нежелательные реакции, что невозможно при обычном нагреве. Однако, если процесс не контролируется должным образом, температура может повышаться до уровня кипения, который не может удерживаться противодействием системы.

3. *Регулируемая скорость нагрева.* Как представлено в формуле 2, скорость генерации тепла регулировать путем изменения напряженности электрического поля. Обычно это осуществляется путем управления приложенным напряжением. Также возможно реализовать непрерывное регулирование мощности или постоянного тока. Один из способов регулирования заключается в определении того, являются ли температуры, измеренные на выходах омического нагревателя точными: измеренную мощность нужно сравнить с той, которая требуется для нагрева продукта, чтобы определить, достигнуто ли соответствующее повышение температуры. Другой вариант управления: использование тока для мониторинга температуры. Как показано в уравнении 3, электропроводность обычно имеет линейную зависимость от температуры. Таким образом, для данного продукта и геометрии, ток (прямо пропорциональный электропроводности) может использоваться для контроля температуры продукта без использования температурных датчиков.

Измеренная таким образом температура характеризует среднюю температуру продукта.

4. *Стоимость.* Когда в 80-х годах стали использовать омический нагрев, стоимость была проблемой для многих потенциальных покупателей. Для работы на частотах питающей сети, необходимы были большие блоки питания, имеющие относительно малую мощность. Эти устройства имели большие размеры и низкую пропускную способность, делая выбор менее привлекательным.

За последние 10 лет стоимость омических нагревателей значительно снизилась. Это отчасти связано с появлением менее дорогих твердотельных источников питания и увеличением числа производителей в этой отрасли.

5. *Энергоэффективность.* Основным преимуществом омического нагрева является то, что почти вся энергия, передаваемая в пищу, используется. Общая эффективность омического нагрева составляет 90% и выше. Для сравнения: микроволновый нагрев имеет около 50% эффективности. Таким образом, в долгосрочной перспективе, использование омического нагрева, вероятно, будет привлекательным вариантом в промышленных условиях.

6. *Широкий выбор конструкций и размеров нагревателей.* Омические нагреватели могут быть сконструированы различными способами. Кроме того, размеры могут варьироваться в широких пределах - от крупных до микромасштабных размеров. Для пищевых продуктов предельные значения обычно устанавливаются с помощью эксплуатационных ограничений. На самом высоком уровне основным фактором является доступность мощности; На нижнем конце основным препятствием является диэлектрическая прочность водных растворов и загрязнение электродов.

7. *Нетепловые эффекты электрического поля.* Электротермические методы нагрева привлекают большое внимание благодаря их способности нагревать продукты в объеме. Анализ растущего количества данных показывает, что споры бактерий демонстрируют повышенную инактивацию при омическом нагревании по сравнению с обычными методами термической обработки при той

же температуре. Продукты, подвергнутые прямому электронагреву, имеют срок годности сравнимый с законсервированными, стерильно и асептически обработанными [72].

*Актуальность темы исследования.* В последние годы активно развивается применение в пищевых технологиях электрического тока непосредственно для обработки сырья и продуктов, а именно: электрогидравлический шок, электропорация (разрушение клеточных мембран) и нагрев за счет джоулевой теплоты – прямой электронагрев (омический нагрев).

Омический нагрев используется для термической консервации пищевых продуктов, который использует прохождение переменного электрического тока через пищевой материал, где последний служит в качестве электрического резистора, и это приводит к высвобождению тепла. Инструментальная конструкция состоит из электродов, контактирующих с пищевым материалом, где электроды пропускают электричество через пищевой материал, используя различные комбинации напряжения и тока. Электрическая энергия рассеивается в тепло, что приводит к быстрому и равномерному нагреву без использования горячих поверхностей теплопередачи.

Данные способы переработки пищевого сырья, когда энергоносителем выступает электроэнергия, могут заменить традиционный нагрев за счет теплопроводности, конвекции и излучения. Так как генерирование теплоты в таком процессе происходит в самом продукте, что существенно повышает энергоэффективность производственных процессов.

Электронагрев обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционными методами нагрева, а именно: однородный и быстрый нагрев, увеличение степени стерилизации при более низких температурах обработки, высокое качество продукции, возможность обработки продуктов с высоким содержанием крупных и твердых частиц, непрерывность производственного процесса, возможность контроля параметров протекания процесса.

расчёт греющей камеры электродного типа, исследования влияния материала электродов для концентрирования органических жидкостей, разработка оптимальных режимов эксплуатации является актуальной задачей в связи с отсутствием единой системы расчетов подобных аппаратов, отсутствия на рынке малогабаритных аппаратов серийного отечественного производства для обработки пищевых продуктов.

*Цель работы.* Исследование особенностей процесса переработки органического сырья в греющих камерах электродного типа. Расчет оборудования процесса переработки органического сырья с участием греющей камеры электродного типа.

*Публикации.* По теме диссертации опубликовано 3 статьи. Магистерская диссертация состоит из шести глав, основных расчетов и выводов, списка литературы и приложений. Основной текст изложен на 247 страницах машинописного текста, имеются приложения, 5 листов графического материала. Список литературы включает 96 наименований.

## **1.1 Влияние различных параметров продукта на скорость нагрева омического процесса**

Скорость омического нагрева может значительно варьироваться в зависимости от размера частиц и формы даже для изотропных продуктов с небольшими изменениями проводимости (de Alwis и Fryer, 1988) [73].

Известно, что содержание твердых веществ, в частности, оказывает существенное влияние на электрические свойства суспензии и может оказывать решающее влияние на характеристики процесса термической обработки (Sastry и Salengke, 1998) [74]. Таким образом для данного твердого содержимого ожидается, что размер и форма твердых частиц будут вызывать существенные изменения в электропроводности смеси. Что касается омического нагрева твердых пищевых материалов, то размер и форма образцов пищевых продуктов являются параметрами, которые могут влиять на электропроводность системы. Тем не менее, очень ограниченные исследования уделили внимание этому вопросу. Для томатов и апельсиновых соков, Sastry и Palaniappan (1991) сообщили, что уменьшение размера частиц твердого содержимого сока увеличило эффективность электропроводности соков [75]. Используя смесь частиц моркови, диспергированной в растворе крахмала, Zareifard и др. (2003) изучали влияние размера частиц в диапазоне от очень мелкого размера частицы, как в пюре, до 6 и 13 мм кубических частиц моркови [76]. Они обнаружили, что электропроводность пищевой системы уменьшается с увеличением размера частиц в смеси морковь-крахмал. Однако влияние размера частиц было усилено при более высоких температурах. Castro и др. (2004) рассмотрели влияние размера частиц на электропроводность клубеньковых продуктов, содержащих различные твердые частицы [77]. Сообщалось о значительном влиянии размера частиц. Для равного содержания твердых веществ они обнаружили, что с увеличением размеров частиц электропроводность может уменьшаться до 30%. Они предположили, что, увеличивая размер частиц, сопротивление ионного

движения может быть увеличено, что приводит к уменьшению электропроводности.

Сельскохозяйственные продукты, включая фрукты и овощи, а также мясо и молочные продукты, как правило, подвергаются старению в период хранения с момента сбора или убоя до момента обработки. В некоторых случаях время и условия хранения измеряются от часов до дней и даже месяцев, в то время как температура и другие параметры, такие как влажность и свет могут изменяться. Поэтому старение влияет на внешний вид, химический состав и, в конечном счете, на текстуру биологических материалов. Следовательно, будут затронуты термофизические свойства этих материалов. Halden и др. (1990) сообщили, что на электропроводность пищевых продуктов повлияли клейстеризация крахмала, сжижение жиров и изменение структуры клеток пищевого материала. Они использовали ломтик баклажана в омическом нагреве и наблюдали заметное изменение скорости нагрева между 80 и 95 °C [78]. Они также отметили, что структура разрушается почти полностью, и образуются большие отверстия, которые, вероятно, обеспечивают альтернативный путь для тока. Аналогичные, но менее сильные физические изменения отмечались при омическом приготовлении земляники. Значительное увеличение проводимости было отмечено при температуре около 65 °C, которая сопровождалась заметным размягчением фруктов, предположительно из-за разрушения клеточных стенок. Увеличение проводимости клубники является следствием распада пектиновых веществ и, как следствие, увеличения ионной подвижности.

Твердая пища, такая как растительная ткань, состоит из отдельных клеточных единиц и окружена клеточной мембраной и клеточной стенкой. Основным компонентом клеточной мембраны является фосфолипид, и можно предположить, что он ведет себя электрически как конденсатор (Sensoy и Sastry, 2004) [75].

В работе [63] для эксперимента были взяты размороженные ягоды черной смородины, добавленные в чистую питьевую воду. Омический нагрев протекал без видимых эффектов с низкой силой тока около 90 минут. Затем кожура целых

ягод начала активно лопаться. Начался бурный процесс кипения, резко возросла сила тока, процесс концентрирования ускорился. Это говорит о том, что текстура пищевого продукта имеет сильное влияние на интенсивность процесса омического нагрева.

Для интенсификации омического нагрева органическое сырье необходимо механически обработать. Ягодное сырье, фрукты и овощи с большим содержанием влаги необходимо пропустить через пресс или отжим, для разрыва клеток оболочки. Семечковые и косточковые плоды необходимо отделить от кожицы и семечек. Клубневые овощи и корнеплоды должны быть отчищены и порезаны.

## **1.2 Типы перерабатываемого органического сырья**

Омический нагрев применяют для множества пищевых продуктов различного состава, свойств и структур. Данный вид нагрева широко развит в Европе, Японии, Мексике, Южной Америке.

В Финляндии успешно работают установки по омическому нагреву сырой мясной эмульсии и сосисок (Piette и др. 2003). Согласно Piette и Brodeur (2003), была разработана пакетная процедура для приготовления 2 кг паштета из печени и ветчины [79]. Позднее Özkan и др. (2004) сравнили качество жареных гамбургеров с мясом с приготовленными омически. Паштеты были приготовлены из замороженного состояния, и коллеги пришли к выводу, что омический нагрев способен производить пирожки сопоставимого качества с традиционно приготовленными продуктами [80]. В последние годы были проведены более глубокие исследования по омической варке мяса и мясных продуктов.

По сравнению с мясом и мясными продуктами было проведено значительно меньше исследований по омическому нагреву рыбы. Однако Matsubara (2007) рассмотрел омический нагрев как метод улучшения качества соленой-высушенной семги [81]. Омический нагрев был включен в традиционный процесс засолки и сушки. Работники установили, что, нагрев

лосося до 45 °С в течение 5 мин до соления оказывает значительное воздействие на текстуру. Соленый и высушенный лосось стал более хрупким, уменьшилось количество растворимого в соли белка. Университет штата Орегон в 1992 был очень активен в отношении исследований по омическому нагреву рыбных продуктов, в том числе пасты суrimi и фарша из тихоокеанской Путассу.

Омический нагрев можно использовать для быстрого и равномерного нагревания пищевых продуктов, что ведет к менее агрессивной термической обработке и может вызвать пастеризацию белковых продуктов без коагуляции, таких как жидкое яйцо и сыворотка (Bozkurt и Icier, 2010) [82]. Продукты с высокой теплопроводностью, такие как заварные кремы, мороженное, молочные продукты, десерты и фрукты являются очень хорошими кандидатами для омического нагрева.

Целые консервированные фрукты и овощи, йогурты с кусочками фруктов, фруктовое и овощное пюре и паста, фрукты в соусах, ломтиках и кубиках – ряд продуктов, перерабатываемых омически.

Омический нагрев имеет ограниченное коммерческое применение во всем мире. Некоторые примеры переработки: целые плоды (Япония); жидкое яйцо (США); японские сухари (Великобритания); тофу (Япония); низкокислотное мясо и овощи в мешках (Великобритания); детское питание, арт-дроссели, морковь, грибы, кетчуп, фруктовые нектары, фруктовые соки, перец, цветная капуста, томатная паста, колбасы и фруктовое пюре; супы и тушеные продукты; кусочки фруктов и крупные кусочки фруктов в сиропе (Европа, Япония, Мексика, Южная Америка и др.).

### **1.3 Методы концентрирования органического сырья**

Переработка пищевых продуктов заключается в превращении исходных ингредиентов, с помощью физических или химических средств в пищу, или пищевого материала в другие формы. Пищевая промышленность перерабатывает сырые пищевые ингредиенты для производства товарной

продукции питания, которая может быть легко приготовлена и подана потребителем.

Ряд пищевых инновации привел к появлению новых продуктов, таких как сублимированное кофе, продукты быстрого приготовления, концентрированные соки.

В настоящее время самым распространенным методом получения концентратов является выпаривание. Но в Европе активно развивается метод получения концентратов омическим нагревом сырья.

### 1.3.1 Концентрирование выпариванием

Концентрирование выпариванием воды из пищевого материала является наиболее распространённым способом. При температуре, соответствующей точке кипения при данном давлении, часть воды из сока переходит в пар. Тем самым происходит процесс концентрирования сока. Теплоносителем в выпарных аппаратах чаще всего является насыщенный пар.

Движущей силой процесса выпаривания является температурная депрессия. Температурная депрессия  $\Delta'$  – это разность между температурой кипения раствора и температурой кипения чистого растворителя при одинаковом давлении [1]. Определяется температурная депрессия опытным путем. Если известна температурная депрессия при атмосферном давлении, депрессию при других давлениях можно определить по приближенной формуле Тищенко:

$$\Delta' = 16,2 \frac{T^2}{r} \Delta'_{\text{АТМ}} \quad (4)$$

где  $\Delta'_{\text{АТМ}}$  — температурная депрессия при атмосферном давлении, °С;

$T, r$  — температура, кипения чистого растворителя (в °К) и его теплота испарения (в Дж/кг) при данном давлении.

Количество тепла, передаваемое от греющего теплоносителя нагреваемой среде в единицу времени через поверхность  $F$ , определяется соотношением:

$$Q = K * F * \Delta t \quad (5)$$

где  $Q$  — тепловая нагрузка аппарата;

$K$  — коэффициент теплопередачи;

$F$  — поверхность нагрева;

$\Delta t$  — полезная разность температур.

Выпаривание является эффективным процессом, но несет ряд сложностей. Для сохранения ценных термочувствительных веществ нужно использовать наиболее возможную низкую температуру за более короткий срок. В выпарных аппаратах у стенок наблюдаются зоны перегрева, в которых возникают пригорание продукта и карамелизация сахаров. В кипящей жидкости возникает процесс пенообразования [1].

Термический процесс несет химическое и биохимическое разложение продукта, потерю легколетучих и ароматических веществ. Для предупреждения потери данных веществ необходимо устанавливать дополнительные аппараты для улавливания: конденсаторы-холодильники и перегонные аппараты, что существенно влияет на стоимость выпарной установки.

### **1.3.2 Концентрирование омическим нагревом**

Омический нагрев, известный также как нагрев Джоуля, нагрев с электрическим сопротивлением, прямое электрическое сопротивление нагрева, электронагрев и электропроводящее нагревание, представляет собой процесс, при котором переменный электрический ток пропускают через пищевой материал. Тепло вырабатывается внутри материала из-за его сопротивления к приложенному электрическому току. При обычном нагреве теплопередача происходит от нагретой поверхности до внутренней части продукта посредством

конвекции и проводимости и занимает много времени, особенно при более длительных конвекционных путях, которые могут возникнуть в процессе нагрева. Электрорезистивный или омический нагрев носит объемный характер и, следовательно, имеет потенциал для уменьшения переобработки продукта за счет его внутренней теплопередачи [72].

Для включения пищевого продукта в электрическую цепь используют электроды – пластины, находящиеся под электрическим напряжением, погружаемые в слой продукта (жидкой или твердой консистенции).

Электрическая цепь характеризуется тремя физическими величинами, а именно напряжением, силой тока и сопротивлением. Напряжение (Вольт) - это электрическое давление, подаваемое от основного источника переменного тока, батареи или генератора. Сопротивление (Ом) - это противодействие потоку тока, вызванному цепью (например, провода, электрические компоненты или пищевые продукты [в случае омического нагрева]). В то время как ток (Ампер) представляет собой поток, текущий через провода, электрические компоненты, или пищевые продукты. Поскольку эти физические величины весьма абстрактны, аналогия садового шланга, соединенного с краном, часто используется для оказания помощи в их визуализации. Когда кран открывается полностью, возникает сильное давление воды (электрическое давление [напряжение]) и возрастает расход воды (ток [сила тока]) через шланг (провода, электрические компоненты или пищевые продукты). Сжатие шланга (увеличение сопротивления) уменьшит расход воды (уменьшит электрический ток), но не изменит давление воды (электрическое давление [напряжение]). В обратном случае, вода протекает через шланг нормально, но кран закрыт до половины, давление воды (электрическое давление [напряжение]) в шланге будет уменьшаться, как и расход воды (ток [Сила тока]), хотя изменение сопротивления не произойдет. Математическое соотношение между этими тремя фундаментальными электрическими величинами является одним из важнейших основных законов электричества, известным как закон Ома:

$$U = I \times R \quad (6)$$

где  $U$  - напряжение (Вольт),

$I$  - сила тока (Ампер),

$R$  - сопротивление (Ом).

Количество выделившегося тепла в процессе омического нагрева определяется по закону Джоуля-Ленца и вычисляется по формуле 1.

Омический нагрев может применяться для равномерного нагрева в короткие сроки для однородных и гетерогенных продуктов. Следовательно, имеет много преимуществ: уменьшение теплового повреждения продукта, уменьшение времени пребывания и сохранение характеристик поступающего свежего материала. Таким образом, можно стабилизировать продукт без существенного изменения критериев качества (цвета, потери витаминов, текстуры, аромата) и питательных характеристик, или, другими словами: омический нагрев дает возможность контролировать реакции при низкой энергии активации и реакции при высокой энергии активации.

Преимущества использования омического нагрева перед процессом выпаривания были рассмотрены мной в работе [48]. Было рассмотрено влияние процессов омического нагрева и поверхностного нагрева (выпаривания) на интенсивность экстракции сахарозы из ягодного сырья. По результатам данных содержание сахарозы от объема выпаренной воды при омическом нагреве составляет на 2-3% больше.

#### **1.4 Электроды в омическом нагреве**

Омический нагрев является одной из новых технологий термического процесса, которые включают пастеризацию или стерилизацию пищевых продуктов путем пропускания переменного электрического тока с использованием пищи в качестве среды. Электрическое сопротивление пищи приводит к тому, что мощность непосредственно преобразуется в объемный нагрев. В прошлом технология использовалась для пастеризации молока, но из-

за отсутствия инертных материалов для электродов и высоких затрат на их обработку, её применение и развитие остановилось. Однако в последнее время интерес к омическому нагреву возобновился благодаря наличию достаточного электропитания, коррозионностойких электродов и производству высококачественной продукции по сравнению с продуктами после обычной термической обработки. Развитие технологии производства электродов и электропитания способствует возрождению омической технологии нагрева в областях сохранения пищевых продуктов. Необходимый электрический ток от источника к пище передается электродами, которые предназначены для этой конкретной цели. Инертность и электропроводность электродов являются определяющими факторами для достижения желаемого процесса и производства безопасных пищевых продуктов, свободных от любых форм загрязнений. Поэтому необходимо рассмотреть используемые электроды и связанные с ними эффекты в процессе омического нагрева [72].

Термо-физические и химические свойства, а также стоимость электродов являются очень важными факторами при проектировании, строительстве и применении электродов в омическом нагреве. Материал, используемый при конструировании электрода, должен обладать следующими свойствами:

1. высокая устойчивость к коррозии;
2. высокая электропроводность;
3. высокая устойчивость к кислотным продуктам;
4. благоприятные тепловые свойства;
5. высокая механическая прочность;
6. легко поддается изготовлению и ремонту,
7. низкая стоимость и доступность.

Первые два являются основными свойствами, определяющими соответственно инертность и эффективность электродов в процессе нагрева. Сопротивление коррозии очень важно для пищевой промышленности, поскольку большинство продуктов, связанных с нагревом богаты влажностью. Кроме того, скорость коррозии высока в продуктах с низким рН. Чаще всего точечная

коррозия является наиболее распространенным типом коррозии электродов, что приводит к образованию тонких отверстий на поверхности электрода по сравнению с равномерной коррозией. По этой причине коррозионностойкие материалы используются для минимизации риска загрязнения пищевых продуктов следами электродов. Кроме того, электрические и тепловые свойства играют роль в подключении подаваемого напряжения и увеличении объемной скорости нагрева. Электрический ток, подаваемый электродами, течет в системе питания (в статическом или непрерывном потоке) и поглощается одинаково как жидкостью, так и частицами при условии, что они имеют одинаковую электрическую проводимость, обычно без потерь электрического тока в любой форме. Во время нагревания температура пищи повышается и тем самым увеличивает ее электропроводность. Кроме того, механическая прочность, стоимость и доступность электродов на рынке являются дополнительными факторами, которые позволяют принимать рациональное решение при выборе электродов.

Потребность в быстром нагревании большинства чувствительных к теплу продуктов привела к развитию процесса тепловой генерации, который основан на преобразовании электрической энергии от переменного электрического источника в тепло в пищевых продуктах. Поэтому основная функция электродов в омических нагревательных операциях заключается в пропускании электрического тока в пищевой продукт для процесса объемного нагрева. Нагрев является функцией электрического сопротивления питания и применяемого электрического потенциала. Обычно низкочастотный переменный ток (50-60 Гц) подается на омический нагревательный столбик, который состоит из нескольких пар электродов в зависимости от конструкции нагревателя. Несмотря на то, что омический нагрев может быть использован для различных типов пищевых продуктов, благодаря его равномерному нагреву, омический нагрев очень подходит для нагревания сыпучих продуктов, так, как и жидкость, и частицы могут нагреваться одновременно.

**Электроды из графита.** У углерода существуют две природные кристаллические аллотропные формы: графит и алмаз. Алмаз является одним из самых известных материалов, в то время как графит является достаточно мягким, чтобы образовать полосу на бумаге. Каждый из них имеет свою собственную кристаллическую структуру и свойства. Графит уникален тем, что обладает свойствами как металла, так и неметалла. Он гибкий, но не эластичный, обладает высокой тепловой и электрической проводимостью. Среди аллотропов углерода графит обычно используется для изготовления электродов. Чистый графит является одним из наиболее химически инертных материалов. Он устойчив к большинству кислот, щелочей и коррозионных газов.

Для электродов в переработке пищевого сырья лучше использовать силицированный графит, это графит который насыщен кремнием. Его получают обработкой пористого графита в кремниевой засыпке при 1800—2200 °С. В его состав входят графитовая основа, карбид кремния и свободный кремний. Что придает необходимые свойства материалу: высокая термостойкость и прочность при повышенных температурах, плотность, газонепроницаемость, высокая стойкость к окислению при температурах до 1750 °С, стойкость к многократным теплосменам и агрессивным средам, износостойкость и эрозионная стойкость. Поэтому его можно применять в нагревательных элементах в условиях высоких температур и эрозии.

**Электроды из алюминия.** Это наиболее широко используемый цветной металл в производстве оборудования для пищевой промышленности. Чистый алюминий - серебристо-белый металл со многими желательными характеристиками. Некоторые из его полезных характеристик: он не растворяется в воде при нормальных условиях, высокое отношение прочности к массе, немагнитные свойства и хорошая тепло- и электропроводности. Металл обладает замечательной способностью противостоять коррозии из-за явления пассивации и его низкой плотности. Пассивация - это способность элемента или соединения образовывать непроницаемое поверхностное покрытие, которое ингибирует коррозию. Его коррозионная стойкость превосходна из-за тонкого

поверхностного слоя оксида алюминия, который образуется, когда металл подвергается воздействию воздуха, что эффективно предотвращает дальнейшее окисление. Его электропроводность составляет около двух третей меди, что делает его экономичным для передачи энергии. Этот металл используется для различных функций и также используется в качестве электрода при омическом нагревании. Прочность алюминиевого сплава выше, чем у чистого металла, но его стойкость к коррозии ниже и, следовательно, обычно не используется в оборудовании для пищевой промышленности.

**Электроды из нержавеющей стали.** Нержавеющая сталь - это термин, используемый для описания чрезвычайно разнообразного семейства инженерных материалов на основе железа, которые выбираются прежде всего для их коррозии и термостойкости. Нержавеющая сталь не окрашивается, не корродирует и не ржавеет так легко, как обычная сталь, но это не значит, что она полностью защищена от эрозионных пятен. Нержавеющая сталь отличается от углеродистой стали количеством присутствующего хрома и другими элементами, такими как никель и молибден. Углеродистая сталь ржавеет при воздействии воздуха и влаги по сравнению с нержавеющей сталью.

Высококачественная нержавеющая сталь является наиболее важным типом стали, используемой в непосредственном контакте с пищевыми продуктами и широко используемой при изготовлении оборудования для пищевой промышленности. Все нержавеющие стали содержат главным образом железо и минимум 10,5% хрома. Хром образует пассивирующий слой оксида хрома ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) при контакте с кислородом. Пассивная пленка оксида хрома предотвращает поверхностную коррозию и препятствует распространению коррозии во внутреннюю структуру металла. Это улучшает твердость и абразивную стойкость сплава. Однако коррозионная стойкость может отрицательно сказаться на использовании компонента в неокисленной среде [72].

## **1.5 Омическое нагревание в применении к определенным продуктам**

Для омического нагрева материал должен обладать способностью проводить электрический ток. Проводниками в омическом нагреве могут выступать различные пищевые продукты и напитки.

### **1.5.1 Обработка мясных продуктов**

Сохранение мясных продуктов с помощью термической обработки относится к началу 19-го века, когда в 1810 году Николя Апперт, не зная природы процесса, обнаружил, что мясо останется съедобным, если его разогреть в герметичном контейнере и сохранить закрытую упаковку пока мясо не будет съедено [72]. Термическая обработка по-прежнему рассматривается как один из ключевых методов сохранения мяса, поскольку она убивает болезнетворные микроорганизмы, которые могут расти при хранении продукта, а также убивает инактивирующие ферменты. Процессы обработки мясных продуктов можно классифицировать на стерилизацию или пастеризацию со стерилизацией. Которая обычно рассматривается как процесс нагревания, при котором продукт нагревают до температур, превышающих  $100^{\circ}\text{C}$ . Тогда как пастеризация обычно определяется как способ сохранения пищи путем его нагревания до температур около  $100^{\circ}\text{C}$  (обычно  $66-77^{\circ}\text{C}$ ). Стерилизованные продукты имеют существенно уменьшенную микробную нагрузку и, как результат, устойчивы к хранению даже при температуре окружающей среды.

Пастеризация, в отличие от стерилизации, представляет собой более мягкий тепловой процесс, который убивает патогенные организмы, но оказывает минимальное влияние на вкус или качество пищи. Тепловая пастеризация обычно входит в ряд мероприятий, направленных на сохранение продукта, которые включают хранение в холодильнике, включение антимикробных препаратов в состав продукта (например, соли, нитриты и нитраты) и упаковки в модифицированной атмосфере [72]. В последние годы наблюдается определенный отход от стерилизованных продуктов хранения при температуре

окружающей среды и переход к пастеризованным охлажденным продуктам. Это особенно заметно в области мясных пастеризованных продуктов, которые в настоящее время составляют подавляющую часть рынка. Пастеризация мяса и мясных продуктов - это область, в которой омический нагрев имеет потенциал. Мясные продукты, как правило, упаковываются в пластиковые, стеклянные или металлические тары перед обычной пастеризацией, которая выполняется в периодическом режиме либо в паровых печах, либо в сосудах для погружения в горячую воду. В этих условиях передача тепла осуществляется от внешней поверхности к внутренней части продукта, что приводит к тому, что в начале процесса во внешних областях продукта происходит повышенный нагрев, в то время как в центральных областях продукта температура остается низкой и не достаточна для пастеризации. Это снижает качество и пищевую ценность продукта в этих областях, а также может привести к появлению более темного цвета внешней части продукта. Омический нагрев, напротив, происходит объемно (то есть тепло генерируется в объеме продукта), что в значительной степени позволяет избежать этого температурного отставания между поверхностью продукта и центром. Благодаря равномерному распределению тепла, омический нагрев является более рациональным способом обработки для таких продуктов.

### **1.5.2 Обработка молочных и яичных продуктов**

Жидкие и полужидкие продукты, такие как молоко и яйца, считаются одними из лучших кандидатов на омический нагрев. Молоко состоит из воды (87,3%), молочного жира (3,7%), лактозы (4,6%), белка (3,25%), минеральных веществ (0,65%), органических кислот (0,18%) и прочих веществ (0,14%). Оно обеспечивает значительное количество протеинов и большинства питательных микроэлементов, включая кальций, витамины группы В, витамин А, йод, магний, фосфор, калий и цинк. Питательные преимущества молока делают его важным источником питательных веществ при ежедневном употреблении. Это помогает улучшить здоровье костей и зубов и снизить артериальное давление. Помимо

своих питательных свойств, вкус молока и молочных продуктов пользуется популярностью во всем мире. Вкус молока становится ключевым параметром качества продукта, поскольку восприятие во многом зависит от вкуса. Состав вкуса молока сложный. В молоке зарегистрировано по меньшей мере 400 летучих соединений, охватывающих широкий спектр химических классов, включая лактоны, кислоты, сложные эфиры, кетоны, альдегиды, спирты, фураны, карбонилы, пиразины, соединения серы и алифатические и ароматические углеводороды. Нарушение баланса этих летучих соединений в молоке, а также образование новых «неприятных» соединений могут вызывать неприятный запах в молоке.

Термическая обработка является наиболее распространенным методом достижения микробной безопасности и стабильности при хранении молока. Пастеризация является главным используемым методом обработки, но срок хранения конечного продукта составляет всего 14-20 дней при температуре охлаждения, но она может придать молоку слегка приготовленный и сернистый вкус. Сверхвысокотемпературная обработка (СВТ) - еще один широко используемый метод стерилизации молока. Его используют для нагревания молока до температуры 138-150 °С в течение небольшого периода времени (обычно выдерживают 1-2 с), что является температурой, необходимой для уничтожения спор в молоке. Процесс сверхвысокотемпературной обработки может повлиять на вкус и текстуру благодаря появлению новых летучих соединений [72]. Перспективные нетепловые методы, включая мембранную фильтрацию, обработку высоким давлением, импульсную обработку электрического поля и омического нагрева, используются для достижения микробного срока годности, подобного тому, который используется для молока со СВТ, и для сведения к минимуму образования соединений с неприятным запахом. Омический нагрев является одним из перспективных процессов, так как он вызывает быстрый нагрев без использования горячей поверхности.

Электропроводные жидкие пищевые материалы идеально подходят для омического нагрева. Например, молоко содержит воду и ионные соли и способно

проводить электричество. При прохождении электроэнергии через молоко сопротивление вызывает тепловыделение, которое в конечном итоге вызывает пастеризацию.

Омические системы нагревания могут быть адаптированы к различным асептическим линиям пищевой обработки. Сверхвысокотемпературная обработка может быть легко достигнута с использованием омического нагрева, срок хранения продуктов может быть увеличен и без использования холодильных установок. Для этого требуется точное управление процессом.

Омический нагрев может использоваться для достижения заданной температуры в течение более короткого времени, чем требуется при обычном нагреве. Короткое время обработки уменьшает негативное влияние нагрева на качественные характеристики пищи. Его можно использовать для быстрого и равномерного нагревания пищевых продуктов, что ведет к менее агрессивной термической обработке, можно вызвать пастеризацию белковых продуктов, таких как жидкое яйцо и сыворотка, без коагуляции. Поскольку разложение белков и загрязнение на поверхностях оборудования при омическом нагреве меньше, по сравнению с обычными способами нагрева, затраты на очистку и техническое обслуживание также снижаются. Нет необходимости в смешивании жидких пищевых продуктов для гомогенного нагрева, что важно для продуктов, чувствительных к механическим повреждениям. Эффективность преобразования энергии очень высока. Точное регулирование температуры возможно с помощью мгновенного включения / выключения аппарата.

Омический нагрев может использоваться для переработки продуктов с целью изменения химических свойств молока и других молочных продуктов. Омический нагрев уменьшает проблему загрязнения и термического повреждения продукта. Что приводит к превосходному качеству продукта с минимальными изменениями в питательных, структурных и органолептических свойствах, достигаемому за короткое время. Этот метод может быть использован в бланшировании, испарении, дегидратации и ферментации [72].

Благодаря высокому содержанию воды, молоко служит отличной средой для роста и размножения многих видов микроорганизмов, которые часто загрязняют молочные продукты в антисанитарных условиях производства. Эффективность омического нагрева заключается в быстром и равномерном нагреве продукта, без учета дополнительных нетепловых эффектов электричества. Однако, известно, что и дополнительные нетепловые эффекты очень значительны для летального эффекта на микроорганизмы и дрожжевые клетки. Такой подход к обработке пищевых продуктов дает возможность значительно сократить время процесса, добавляя преимущества омическому нагреву.

### **1.5.3 Обработка фруктовой и овощной продукции**

Омический нагрев успешно может быть реализован в области переработки фруктов и овощей, благодаря их естественному уровню кислотности. Для фруктов и овощей требуется только пастеризационная обработка с использованием температур ниже 100 °С. Это позволяет избежать необходимости работы при давлении выше атмосферного, и, следовательно, упрощает работу. Что уменьшает повреждение плода, вызванное перепадами давления, в частности, снижение давления, чтобы вернуть давление в системе в атмосферное.

Таблица 1 – Рекомендуемое время и температура для достижения процесса пастеризации фруктовых и овощных продуктов в зависимости от pH

<b>pH продукта</b>	<b>Целевые микроорганизмы</b>	<b>Опорная температура (°C)</b>	<b>Рекомендуемое время и температура</b>
< 3.7	Споры дрожжей и плесени и лактобациллы	70	5 мин при 70 °C
> 3.8	Кишечная палочка	70	2 мин при 70 °C
3.7 – 4.0	Спорообразующие бактерии, в основном масляные анаэробы	85	5 мин при 85 °C
4.0 – 4.2	Спорообразующие бактерии, масляные анаэробы	95	5 мин при 95 °C
4.2 – 4.5	Спорообразующие бактерии, масляные анаэробы	95	10 мин при 95 °C
> 4.5	Споры ботулины	121,1	3 мин при 121,1 °C

Выбор уровня пастеризации зависит от pH продукта. Рекомендуемое время термической обработки и температуры, приведенные в таблице 1, разработаны для достижения уменьшения количества микроорганизмов на 6 логарифмов. Фруктовые продукты, пастеризованные в соответствии со временем и температурой в таблице 1, стабильны в условиях окружающей среды и поэтому не требуют охлаждения. Это эквивалентные времена и температуры, и поэтому процесс при более высокой температуре потребует более короткого времени и наоборот. С повышением pH продукта уровни термостойкости микроорганизмов также увеличиваются, поэтому для достижения того же уменьшения в 6 логарифмов требуется более длительное время и/или более высокая температура. Другим фактором является увеличение диапазона микроорганизмов, которые могут терпеть снижение уровня кислотности (с увеличением pH). Например, при pH ниже 3,7 могут выжить только дрожжи, плесень и некоторые молочнокислые бактерии, которые легко убить с помощью мягкого процесса, эквивалентного 5 мин при 70 °C. Однако между pH 4,0 и 4,5 существуют различные бактерии, которые производят термостойкие споры, которые могут выжить и испортить продукты. К счастью, у продуктов с низким pH, имеется очень мало

микроорганизмов, которые необходимо учитывать (кишечная палочка - исключение, но она не термостойкая).

Имеется небольшое количество научных работ, в которых описываются испытания омических нагревов на фруктах и овощах. Доступ к омическому нагревательному оборудованию для исследовательских целей не является прямым, и это один из факторов, который привел к ограниченным исследовательским работам, имеющимся в общественном достоянии.

Castro и другие (2004) исследовали влияние омического нагрева на электропроводность ряда клубничных продуктов [68]. Когда пульпы подвергались множественной термообработке, их электропроводность уменьшалась уже после первой, независимо способа этой обработки. Они также продемонстрировали важность оценки электрических свойств продуктов питания, предназначенных для омического нагрева. Клубничная начинка и клубничная клетчатка показали значительные различия в электропроводности и, следовательно, в разных скоростях нагрева. Было обнаружено, что кинетические параметры разложения аскорбиновой кислоты как при обычном, так и при омическом нагреве идентичны (между 60 и 97 °C), это указывает на то, что присутствие электрического поля, по-видимому, не влияет на разложение аскорбиновой кислоты.

Leizerson и Shimoni (2005) исследовали влияние омического нагрева на срок годности апельсинового сока. Их результаты показали, что срок хранения апельсинового сока может быть увеличен до более чем 100 дней, что удваивает ожидаемый срок хранения при обычной пастеризации [84]. Пастеризованный апельсиновый сок, который нагревали при 90 °C в течение 50 сек, сравнивали с апельсиновым соком, который обрабатывали при 90 °C, 120 °C и 150 °C в течение 1.13, 0.85 и 0.68 секундах соответственно в омической системе нагрева. Сообщалось, что удержание пектина и витамина С было схожим для этих двух технологий. Обе термические обработки предотвращали рост микроорганизмов в течение 105 дней. Однако срок хранения омически нагретого апельсинового

сока (после 100 дней) был почти в два раза дольше, чем у традиционно пастеризованного сока.

Скорость нагрева многофазных систем будет зависеть от электропроводности различных фаз. Была исследована модельная система, имитирующая омический нагрев частиц яблока в жидкости-носителе, чтобы определить влияние добавления соли на электрическую проводимость и скорость нагрева (Wang и Wu, 1999) [85]. Частицы проявляли более низкую электрическую проводимость, чем испытуемые жидкости-носители при температуре окружающей среды, но электрическая проводимость частиц увеличивалась с повышением температуры и, следовательно, частицы быстрее достигали температуры пастеризации. Добавление 0,05% хлорида натрия или 0,31% цитрата калия к жидкости-носителю сахарозы, содержащей 1,0% лимонной кислоты, увеличивало скорости нагревания как частиц, прошедших вакуумную фильтрацию, так и жидкости.

Было исследовано использование омического нагрева для увеличения выхода сока из клеточной ткани при производстве яблочного сока (Wang и Sastry, 2002). Применение тока увеличило выход сока с 596 до 636 мл/кг и уменьшило работу, требуемую для извлечения сока с 0,51 до 0,36 кДж/кг, при этом наблюдалась конечная температура 40 °С [86]. Vikram и другие (2005) сравнили термическую деградацию питательных веществ в апельсиновом соке, обработанном омическим, инфракрасным, микроволновым и обычным нагревом. Из четырех технологий омический нагрев дал максимальное сохранение витамина С [87].

Применение омического нагрева для стерилизации цветной капусты было изучено Eliot и другими (2001) при 130 °С и с минимальным временем выдержки приблизительно 20 секунд. Омически нагретые кусочки цветной капусты ( $\leq 2$  см<sup>3</sup>) сохраняли микробную стерильность в процессе хранения при 25 °С и 37 °С, но не при 55 °С. Некоторый предварительный нагрев цветной капусты при 50 °С в течение 30 мин или при 60 °С в течение 20 мин проводился для сохранения текстуры цветной капусты [88].

Высокотемпературные кратковременные обработки овощей часто требуют предварительной обработки, такой как бланширование, которая направлена на дегазацию, уменьшение объема, инактивацию ферментов и/или улучшение текстуры. Желательно минимизировать потери витаминов и питательных веществ, возникающие в процессе. Sensoy and Sastry (2004) заявили, что омическое бланширование грибов позволило нагревать грибы в гораздо меньшем количестве воды (40-50% от содержания твердых веществ), чем при обычном бланшировании (обычно 400 литров воды на 60 кг грибов). Они пришли к выводу, что омическое бланширование помогло улучшить эффективность процесса обработки грибов [89].

Eliot и Goullieux (2001) заявили, что процесс бланширования часто смягчает овощи. Однако они также ссылались на несколько исследований, которые показали, что обычная бланшировка в низкотемпературном диапазоне (50-70 °C) дает более твердую текстуру, чем обычная бланшировка (93-100 °C). Их исследование показало, что, хотя омический нагрев образцов, обработанных низкотемпературным бланшированием, потерял некоторую твердость, по-прежнему было обнаружено двукратное увеличение твердости по сравнению с обычным бланшированием [83].

Icier и другие (2006) исследовали использование омического нагрева для достижения эффективного бланширования горохового пюре (для детского питания) в качестве альтернативы более обычному бланшированию воды. Омическая бланшировка с градиентами напряжения в диапазоне 20-50 В/см была испытана в сравнении с бланшированием водой при 100 °C для эффективности бланширования. Это определяли путем определения инактивации пероксидазы после бланширования. При градиентах напряжения 30 В/см и выше критическое время инактивации пероксидазы было короче, чем бланширование воды при 100 °C. Также было обнаружено, что качество цвета улучшается с градиентом напряжения [90].

Большая часть достижений в области омического нагрева для фруктов и овощей состоялась с использованием торгового оборудования. Информация из

коммерческих испытаний не часто попадает в общественное достояние. Однако поставщики омического нагревательного оборудования представляют краткую информацию о продуктах, выпускаемых компаниями, которые приобрели их оборудование.

Существуют две компании по оборудованию, ответственные за большинство омических нагревательных устройств в Европе с фруктами и овощами: Emmeriemme (Италия) и SPX (ранее APV Ltd, Великобритания).

APV Ltd была первой компанией в Великобритании, продавшей коммерческую омическую систему нагрева для пищевой промышленности (Skudder, 1988). Одна из их первых омических систем (75 кВт) по переработке фруктовых продуктов была в коммерческом использовании в Соединенном Королевстве более 10 лет. Началось всё с переработки целой клубники для йогурта с перемешиванием, далее перешло на большинство видов фруктов вместе с фруктовыми пюре и желе. Эти фруктовые продукты в основном были меньше pH 4.0, поэтому целевая пастеризация эквивалентна 5 минутам при 85 °C. Что достигалось в удерживающей трубке, которая соединяет выход омической колонны с охлаждающими трубками или оборудованием для горячего розлива.

Система APV состоит из вертикальной нагревательной трубы с восходящим потоком, в которой электроды обеспечивают энергию для повышения температуры продукта. Удерживающие трубки, соединяющие нагреватель с трубчатыми охладителями, короткие (10-20 м) из-за относительно высоких температур, достигаемых на выходе из нагревателя, по сравнению с целевой пастеризационной обработкой в течение 5 мин при 85 °C.

Итальянская компания Emmeriemme имеет ряд омических обработок для фруктов и овощей. Оборудование отличается от системы APV тем, что электрические нагревательные трубки обычно ориентированы горизонтально.

Омический нагрев для переработки фруктовых и овощных продуктов может стать эффективной альтернативой традиционному теплообменнику для термической обработки. Быстрое омическое нагревание позволяет сохранять

отличные свойства фруктов и овощей при обработке. Во время охлаждения продуктов, в котором используются обычные трубчатые теплообменники, часто возникает повреждение частиц продукта. Убирая необходимость охлаждать фрукты и овощи, расфасовывать их в пластиковые упаковки или стеклянные банки, можно минимизировать повреждение продукта. Именно поэтому омический нагрев заслуживает внимание.

## **1.6 Пастеризация органического сырья омическим нагревом**

Пастеризация представляет собой процесс, который предназначен для инактивации микробов (главным образом бактерий) в пищевом и питьевом материале, таком как молоко, сок, консервы и другое.

Разнообразные процессы нагрева применяются к пищевым продуктам в различных направлениях обработки. Сегодня для обработки пищевого сырья обычно используются процессы пастеризации и стерилизации (таблица 2), и их основными задачами являются устранение целевых патогенных микроорганизмов, связанных с продуктом, и продление срока хранения пищевых продуктов путем уменьшения или устранения размножения потенциальных микроорганизмов во время хранения. Сегодня широко распространено применение процессов нагрева, основанных на непрямых механизмах передачи тепла в системы пищевых продуктов. Однако косвенные механизмы нагрева, в которых обычно используются теплообменники, часто ограничены сниженной эффективностью теплопередачи, следовательно, увеличивается время, необходимое для транспортировки достаточного количества тепла в центр пищевого материала, известного как «холодное пятно», для достижения желаемого летального эффекта. В большинстве случаев цена безопасности и долговременной стабильности пищевого материала оплачивается потерей соответствующих физических и химических свойств пищевых продуктов, таких как свежие летучие ароматы и витамины.

Таблица 2 – Основные процессы термообработки, применяемые в пищевой промышленности

Тепловой процесс	Основная задача	Температурный диапазон (°C)
Кулинария (например выпечка, варка, жарка и гриль)	Улучшение усвояемости и вкуса, а также уничтожение патогенных микроорганизмов	$\leq 100$
Бланширование	Вытеснение кислорода из тканей и инактивация ферментов	$< 100$
Сушка / концентрирование	Удаление воды для повышения качества хранения	$< 100$
Пастеризация	Удаление основных патогенных бактерий и микроорганизмов	60-80
Стерилизация	Устранение микроорганизмов для достижения коммерческой стерильности	$\geq 100$

Имея это в виду, развитие технологии омического нагрева для непрерывной термической обработки пищевых систем имеет большой промышленный и научный интерес. Омический нагрев рассматривается как объемная форма нагрева и высокотемпературный кратковременный процесс, в котором тепловая энергия генерируется непосредственно внутри пищевого материала. Такая схема нагревания приводит к более равномерному нагреву, позволяющему снизить время переработки и, как следствие, органолептические изменения в обрабатываемых пищевых продуктах минимальны. В настоящее время обсуждение также сосредоточено на применении омического нагрева для ферментативного и микробного контроля. Инактивация микроорганизмов и ферментов является ключевыми параметрами, подлежащими решению в производственном процессе, и использование новых низкоэнергетических или эффективных методов инактивации продолжает привлекать интерес ученых.

Основной механизм микробной инактивации при омическом нагреве носит термический характер. Однако во время омического нагрева степень термической обработки, требуемой для инактивации микробов в биоматериалах и пищевых продуктах, может быть потенциально снижена, если существует дополнительный летальный эффект из-за электрического тока. Этот дополнительный нетепловой эффект разрушения микроорганизмов при

омическом нагреве, вызванный присутствием электричества, все еще вызывает некоторые противоречия, поскольку в этой области не проводилось много исследований. Большинство опубликованных результатов, касающихся влияния электрических полей при омическом нагреве, почему-то неубедительны. Они либо не относятся к температуре образца, либо не могут исключить температуру в качестве переменной.

Результаты применения омического нагревания к ферментации *Lactobacillus acidophilus* (ацидофильной лактобактерии) (Cho и др., 1996), используемой в молочной промышленности, показали, что фаза ферментационного разрушения при 30 °C была значительно уменьшена (18-кратно) в низковольтных омических условиях по сравнению с обычной ферментацией [92]. Авторы предположили, что этот эффект может быть связан минимизацией ингибирующего действия свежей среды и улучшением поглощения пищи. Это исследование свидетельствует о том, что омическая технология нагрева может быть полезной для молочной промышленности. Например, это сокращает время обработки йогурта и сыра.

Инактивация спор *Bacillus subtilis* (сенной палочки) непрерывным или периодическим омическим и обычным нагреванием изучалась Cho и др. (1999), чтобы определить, оказало ли присутствие электрического поля при нагревании дополнительное влияние на инактивацию этого микроорганизма [91]. Эксперименты проводились в омическом ферментере при температурах от 88 °C до 99 °C. Омически нагретые споры при 92,3 °C имели значительно более низкое время сокращения. Значение времени было уменьшено на 1 мин для омического нагрева по сравнению с обычным нагревом путем циркуляции воды. Таким образом, можно сделать вывод о том, что инактивация микроорганизмов была затронута падающим электрическим полем в среде во время процесса нагрева. Cho и др. (1999) также изучали влияние одно- и двухступенчатого нагрева [93]. После инокуляции образцы нагревали традиционно или омически, используя одностадийную (90 °C в течение 30 мин) или двухступенчатую (90 °C в течение 15 мин) обработку. В случае двухступенчатого нагрева образец нагревали и

выдерживали при 90 °С в течение 15 мин, быстро охлаждали до 37 °С и выдерживали при этой температуре в течение 20 мин, снова нагревали и выдерживали при 90 °С в течение 15 мин, а затем охлаждали до 25 °С. Авторы отметили, что обработка двойным нагревом инактивировала споры более эффективно по сравнению с разовым нагреванием, независимо от способа нагрева. Среднее увеличение инактивации из-за двойного нагрева составляло 1,1 спор/мл, а инактивация спор при двухстадийной обработке была выше для омического, чем для обычного нагрева. Омический нагрев показал больший эффект инактивирования по сравнению с обычным нагревом, что указывает на то, что электрическое поле может влиять на прорастание спор, а также может вызывать повреждение клеток (или спор). Зависимость от времени температурного значения и энергии активации процесса не оказывали существенного влияния, что указывает на то, что электричество влияет на смертность, но не на температурную зависимость процесса инактивации спор. Таким образом, был сделан вывод: хоть и инактивация спор при омическом нагреве была в основном обусловлена тепловым эффектом, был дополнительный эффект уничтожения микроорганизмов, вызванный электрическим током.

Palaniappan и Sastry (1992) не обнаружили различий между эффектами омической и традиционной термообработки на кинетику смерти дрожжей *Zygosaccharomyces bailii* (дрожжеподобный гриб) при одинаковых степенях нагрева [94]. В некоторых случаях, однако, мягкая электрическая предварительная обработка уменьшала последующие требования инактивации для *Escherichia coli* (кишечной палочки). Авторы наблюдали более низкие значения времени для инактивации *Z. bailii*, когда омический нагрев применяли при температурах ниже 56 °С. Однако тепловая потребность в инактивации была снижена при применении сублетальной электронной обработки, что подразумевало, что электрическое поле понижало теплостойкость микроорганизмов. Микробная смерть при омическом нагреве в основном объяснялась тепловыми эффектами, в то время как нетепловые эффекты были незначительными.

Влияние омического нагрева на термическую инактивацию *Byssochlamys fulva* (аскорповоспроизводящего филаментозного гриба) было изучено Castro и др. (2007). Этот гриб очень термостойкий, он может производить важный микотоксин (патулин), он зарегистрирован в процессе порчи консервированных и бутилированных фруктов, особенно клубники. Кинетические параметры смерти для инактивации *B. fulva* определяли в промышленной клубничной пульпе в температурном диапазоне от 85 до 105 °C (таблица 3) и значениях по шкале Брикса 24-37. Значения D, полученные в присутствии электрических полей, были ниже значений, полученных при обычном нагреве [95].

Таблица 3 – Кинетические параметры термической деградации *Brachypsectra fulva* в клубничной пульпе (37,0 °Brix)

Метод нагрева	Значение D (мин)				Значение z (°C)
	85 °C	90 °C	100 °C	105 °C	
Конвекция	12.31 ± 0.10	7.37 ± 0.73	3.73 ± 0.00	3.08 ± 0.29	33.28 ± 0.80
Омический нагрев	6.50 ± 0.22	4.27 ± 0.09	2.41 ± 0.00	1.83 ± 0.01	37.25 ± 0.10

Фактически, эти данные согласуются с гипотезой о том, что электричество при омическом нагреве оказывает дополнительное влияние на инактивацию аскоспор. Статистические результаты показали, что для испытываемых условий обычные значения D (значение D указывает время, необходимое для уменьшения количества микробов в 10 раз для конкретного процесса инактивации) значительно отличаются от результатов, полученных при использовании омического нагрева. Авторы также отметили, что значение z и температурная зависимость были одинаковыми для обоих типов обработок при использовании образцов °Brix 14,5 и 24, но повышение значений °Brix до 30,5 и 37,0 привело к значительным различиям между двумя типами нагрева.

Влияние омического и обычного нагревания на термическую инактивацию *E. coli* (кишечной палочки) изучалось в молоке (Pereira и др., 2007) [90]. *E. coli* часто загрязняет молочные продукты, когда их производственные

условия являются антисанитарными. Результаты показали, что при аналогичных тепловых обработках инактивация происходила быстрее, когда применялся омический нагрев, что указывало на то, что наряду с термическим эффектом присутствие электрического поля обеспечило дополнительный термический эффект нетеплового воздействия на вегетативные клетки кишечной палочки.

Молочные жизнеспособные аэробы и инактивация *Streptococcus thermophilus* (стрептококк термофильный) были определены Sun и др. (2008). Согласно этим авторам, результаты ясно показывают, что как количество микробных частиц, так и рассчитанное время восстановления, полученное в результате омических нагревающих обработок, были значительно ниже, чем при обычном нагревании. Согласно Sun и др. эффект инактивации электричества является значительным по сравнению с воздействием тепла и связан с электрическим напряжением и частотой [96].

Для определения асептического влияния на продукт были проведены опыты на лабораторной установке омического нагрева. Для экспериментов использован мандариновый сок прямого отжима. Характеристики сока представлены в таблице 4. В первом эксперименте мандариновый сок выпаривали при температуре кипения. Для второго эксперимента сок предварительно обработали микроволновым излучением в течении 5 секунд. Затем выпаривали на лабораторной установке. Микробиологические исследования дали сопоставимые результаты по уничтожению плесневых грибов. Однако обработка микроволновым излучением позволяет за более короткое время омического нагрева достичь инактивации всех микроорганизмов.

Таблица 4 – Характеристики исследуемого мандаринового сока

Наименование	Содержание растворимых сухих веществ, %	Плесневые грибы, КОЕ/мл
Мандариновый сок	10	17

Ряд существующих работ свидетельствует о том, что омический нагрев дает большой потенциал для сокращения времени, необходимого для инактивации микроорганизмов и некоторых ферментов, поэтому уменьшает отрицательные тепловые эффекты нагрева и открывает новую перспективу для более короткой, менее агрессивной асептической обработки. С точки зрения развития процесса, омический нагрев представляет собой сложные возможности в обработке/консервировании пищи, в качестве альтернативы традиционным процессам и полной характеристике, моделированию и контролю всех явлений, связанных с применением омического нагрева в пищевой промышленности. Тем не менее исследования необходимы, чтобы понять влияние электрических полей на питательные, органолептические и функциональные свойства продуктов.

### **1.7 Технологические решения для реализации омического нагрева на производстве**

Омическая технология нагрева была впервые предложена Джонсом (1897). В начале двадцатого века Андерсон и Финкельштейн (1919) и Самуэль и др. (1927) продемонстрировали возможность пастеризации молока с помощью непрерывной омической технологии нагрева. Этот процесс, известный как «Electropure», был техническим и коммерческим успехом, и к 1930 году он использовался примерно в 50 молочных пастеризаторах в пяти штатах США и обслуживал около 50 000 потребителей. В период между 1930 и 1970 годами несколько работ были посвящены технологии омического нагрева для быстрого оттаивания замороженных продуктов и быстрого нагрева приготовленных блюд, таких как пицца, соусы и гамбургеры. Несмотря на растущий интерес к этой технологии с конца двадцатого века, омический нагрев не достиг ожидаемого успеха по различным техническим и экономическим причинам, в том числе отсутствие инертных материалов для электродов и контрольного оборудования, достаточно точного, чтобы поддерживать необходимую температуру и быть достаточно устойчивым, чтобы противостоять коммерческим условиям. В течение последнего десятилетия появились новые усовершенствованные

конструкции электродов и оборудования. Самыми последними достижениями в непрерывном омическом нагреве являются разработка трубчатых процессов (APV, Raztek и Emmeriemme) для стерилизации гомогенных и твердых пищевых продуктов, и жидкостной струйной установки (Emmeriemme) для обработки высоковязких жидкостей. Эти омические нагревательные технологии широко различаются (таблица 5). Вероятно, наиболее успешное применение этой технологии относится к области переработки фруктов и овощей и многофазных продуктов [72].

Таблица 5 – Технические параметры омических нагревательных систем

Нагревательные системы	<i>APV Baker</i>	<i>Emmeriemme (Tubular)</i>	<i>Raztek Corp.</i>	<i>Emmeriemme (Fluid Jet)</i>
Тип технологии	Непрерывный процесс	Непрерывный процесс	Непрерывный процесс	Непрерывный процесс
Геометрия	Трубчатая	Трубчатая	Трубчатая	Свободная струя
Тип электрода	- Платиновое покрытие электрода - Интрузивные электроды	- Электроды из нержавеющей стали - Возрастающие электроды	Чистые угольные электроды	Электроды из нержавеющей стали
Источник питания	Частота: 50 Гц	Частота: 25 кГц	Частота: 50 Гц	Частота: 25 кГц
Продукт	Твердо-жидкая суспензия	Твердо-жидкая суспензия	Гомогенная жидкость	Гомогенная жидкость

Было проведено много исследований по применению трубчатого омического нагрева для пищевой промышленности в самых разных целях. Было признано, что трубчатая система может обладать техническими преимуществами по сравнению с другими теплообменниками, если жидкость очень вязкая, термически чувствительна или подвержена загрязнению нагретых поверхностей в оборудовании. Большинство трубчатых омических конфигураций нагревательных систем состоят из трех модулей: нагревательный блок, блок питания и панель управления.

Исследования, проведенные в 1991 году, привели к успешному представлению Британскому консультативному комитету по новым продуктам питания и процессам одобрения системы APV для производства стабильных низкокалорийных готовых к употреблению пищевых продуктов в Соединенном Королевстве.

На рисунке 2 показана схема типичной системы APV. Омическая нагревательная колонка обычно состоит из четырех или более корпусов электродов, обработанных из цельного блока из политетрафторэтилена и заключенных в нержавеющую сталь. Каждый из них содержит один электрод. Колонна установлена в вертикальном или наклонном положении с потоком продукта в восходящем направлении. Вентиляционный клапан в верхней части нагревателя гарантирует, что колонна всегда заполнена. Столбец сконфигурирован так, что каждая секция нагрева имеет одинаковый электрический импеданс, и, следовательно, соединительные трубки, как правило, увеличивают длину в направлении выхода. Это связано с тем, что электропроводность пищевых продуктов обычно увеличивается с повышением температуры.

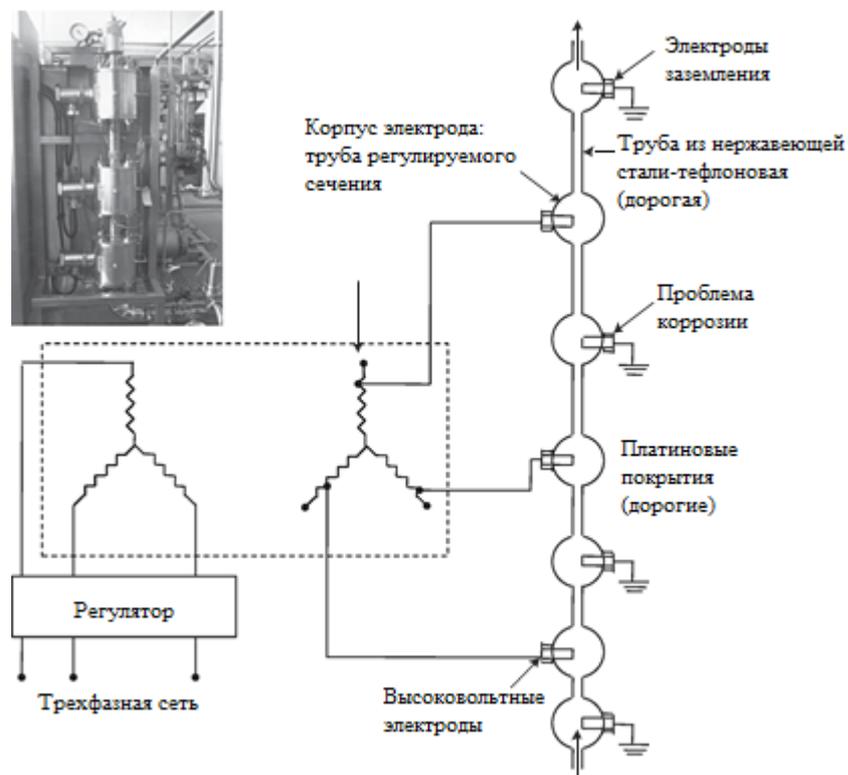


Рисунок 2. Блок-схема промышленного блока «APV»

Пища прокачивается через трубу, содержащую ряд цилиндрических электродов, соединенных с трехфазной подачей 50 Гц. Пищевой материал быстро нагревают до температуры стерилизации, затем пропускают в секцию удержания и, наконец, на асептический упаковочный завод. Чтобы очистить, питание отключается, и установка промывается водой. Затем проводят очистку с использованием 2% раствора каустической соды, рециркулируют при 80 °С в течение 30 минут.

Установки APV поставляются с полностью автоматической системой контроля температуры. Изменениями, которые будут влиять на конечную температуру на выходе продукта, являются температура на входе, массовый расход и удельная теплоемкость продукта. В системе управления микропроцессор сканирует эти переменные и постоянно вычисляет электрическую мощность, необходимую для нагрева продукта, а затем сравнивает это значение с сигналом от преобразователя мощности на выходной стороне трансформатора. Мониторинг обратной связи используется для предотвращения долговременного дрейфа температуры на выходе.

Следует отметить, что электроды APV являются дорогостоящими, поскольку они изготовлены из платинового материала для устранения поляризации и загрязнения. Эта конструкция электрода индуцирует переменную секцию трубы, которая вызывает удержание продукта вблизи электродов и снижает эффективность очистки на месте.

Процесс APV позволяет пищевым продуктам, содержащим частицы до 25 мм, нагреваться до температуры стерилизации до 140 °С менее чем за 90 секунд, после чего их охлаждают до температуры окружающей среды в течение 15 минут. Это время обработки значительно короче, чем типичные 2-часовые циклы процесса стерилизации в банках.

APV выпускает две коммерческие системы с выходной мощностью 75 кВт и 300 кВт, соответственно, с грузоподъемностью 750 кг/ч и 3000 кг/ч, при

повышении температуры на 75 °С в воде. Ориентировочная стоимость этих единиц в асептической системе составляет от 1 461 000 до 2 247 000 евро.

Промышленные установки для систем мощностью 300 кВт, установленные APV, в основном находятся в Соединенных Штатах, Японии и Европе. Для систем мощностью 75 кВт многие компании использовали систему APV, такую как Sous Chef (Великобритания, продукты с низким содержанием кислоты), Nissei (Япония, продукты с высокой кислотностью) и Odin Developments Ltd. (Италия, готовые блюда с высокой и низкой кислотностью).

Система Emmeriemme обеспечивает тихую работу, легкое обслуживание из-за уменьшения движущихся частей и простой процесс управления, который может быть запущен или выключен мгновенно. Пример системы Emmeriemme можно увидеть на рисунке 3. Эта система включает в себя множество новшеств, таких как высокочастотный источник питания (до 30 кГц) с электродами из нержавеющей стали (без коррозии выше 5000 А/м<sup>2</sup>) и трубы из полимерного волокна (дешевые).

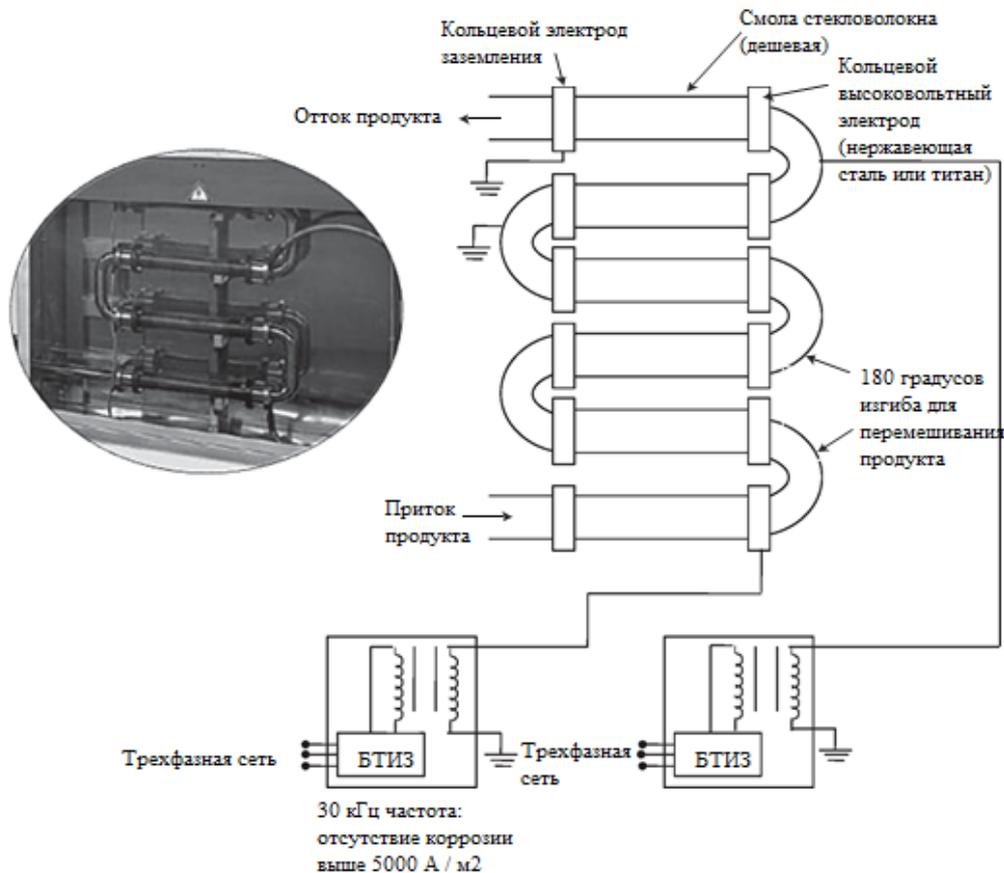


Рисунок 3. Блок-схема промышленного масштаба «Emmeriemme»

Emmeriemme (Пьяченца, Италия) производит системы в диапазоне 60-480 кВт, производительность которых составляет 1000-6500 кг/ч. Смета расходов по состоянию на 2004 год составляла приблизительно от 68 000 евро до 248 000 евро в зависимости от мощности.

На рисунке 4 показано изображение типовой омической отопительной установки, в которой продукт может быть изготовлен и готов для тепловой обработки. Продукт прокачивается через омическую нагревательную колонну, а затем поступает в удерживающую трубку, которая предназначена для обеспечения того, чтобы необходимый минимальный уровень летальности микроорганизмов был достигнут во всем объеме жидкости, исходя из заданной температуры и времени процесса.

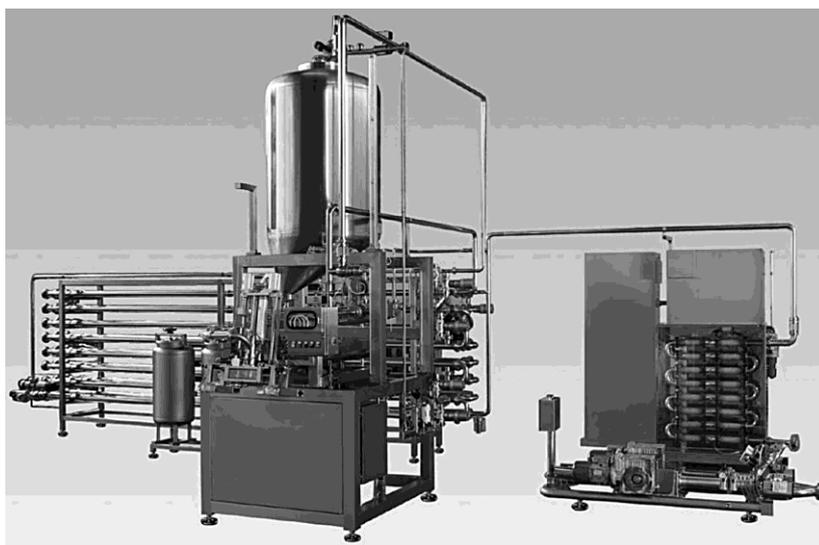


Рисунок 4. Типичный омический нагреватель Emmeriemme Srl

Основные промышленные применения трубчатой системы Emmeriemme в период с 1996 по 2008 год связаны с гетерогенными суспензиями (25 промышленных применений). Немногие промышленные применения касаются гомогенных жидкостей.

Резюме продуктов, обрабатываемых в промышленных установках, установленных Emmeriemme SRL: помидоры до готовых соусов, пюре из манго, томатная паста, кубики помидоров, томатное пюре, персики / абрикосы (кубики,

кусочки), куриный сладкий перец-цуккини, морковные ломтики, низкокислотные овощные пюре, клубника (целая, кубики), лук, мясные соусы.

Хотя трубчатый омический нагреватель кажется простым и выгодным, в его применении встречается несколько трудностей. Загрязнение, возникающее вблизи стенок и электродов, а также частая очистка установленных блоков - важные проблемы, которые еще предстоит решить для обработки высоковязких продуктов. Поэтому для термообработки гомогенных и чувствительных продуктов был предложен новый непрерывный омический нагревательный аппарат, использующий струйную смесь, Emmeriette (Пьяченца, Италия). Новый дизайн основан на устранении интерфейса продукта-стены. Он состоит в применении альтернативного электрического тока непосредственно к падающей струе между двумя электродами из нержавеющей стали.

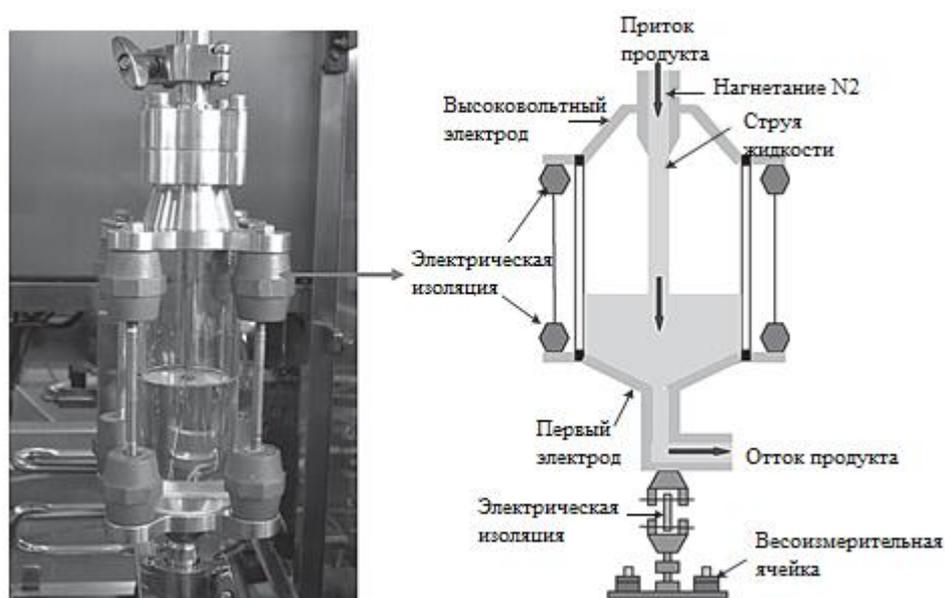


Рисунок 5. Схема непрерывного омического нагрева с использованием струи жидкости

Рисунок 5 представляет собой схему омического нагревателя с непрерывным потоком с использованием струй жидкости. Поточковая область состоит из цилиндрической стеклянной трубки ( $D_t = 50$  мм,  $L = 155$  мм,  $e = 2$  мм), соединенной с электродами, которые плотно удерживаются на месте с помощью резиновых колец и четырех железных стержней с гайками и болтами. Входное

круглое отверстие, через которое жидкость выходит из наконечника сопла ( $D = 13$  мм), подключается к высоковольтному электроду. Выходное коническое отверстие ( $h_c = 45$  мм,  $\alpha = 45^\circ$ ), через которое выводится жидкость, подключается к заземляющему электроду. Поверхностный электрод имеет коническую форму, чтобы обеспечить более легкий отток жидкости и избежать вихрей и стагнации продукта. Конструкция омической ячейки, позволяет легко заменять стеклянный цилиндр другой длиной и, таким образом, приспособлять для продуктов различной электропроводности.

## **1.8 Вывод из литературного обзора**

Омический нагрев является исключительной заменой основным технологиям обработки пищевых продуктов, что демонстрирует определенные перспективы в производстве продуктов питания. Эта технология получила широкое развитие с 1990 года и со временем становится более совершенной и компетентной.

Омический нагрев может применяется к жидким и полужидким продуктам, таким как фрукты и растительные продукты (соки, пюре, клетчатка и т.д.), молоко, смесь мороженого, яйца, сыворотки, супы, рагу, термочувствительные жидкости, соевое молоко и других для различных способов обработки, таких как нагрев, пастеризация и ультрапастеризация. Его можно также использовать для бланширования, оттаивания, приготовления пищи, брожения, очистки фруктов и переработки богатых белками жидких продуктов для образования белковых пленок и гелей.

Настройка омических нагревателей может быть выполнена для различных продуктов питания, в зависимости от их диапазона электропроводности. Кроме того, можно разработать целый ряд новых продуктов, контролируя их изменения электропроводности. Омический нагрев может уменьшать время инактивации ферментативных бактерий и может быть

полезным для ферментированных продуктов, таких как пиво или вино, за счет уменьшения времени обработки.

Дальнейшие исследования необходимы для моделирования, измерения и проверки процесса нагрева смесей твердых и жидких веществ. Коммерциализация омической технологии нагрева также зависит от разработки стандартов в области безопасности и обеспечения качества.

Идеальный электрод при омическом нагревании пищи должен быть устойчивым к коррозии и иметь способность пропускать полный ток в пищу без какого-либо участия в электрохимической реакции.

Есть много преимуществ использования этой технологии в пищевой промышленности. Тем не менее, в омических системах нагрева все еще существуют проблемы. Система требует надлежащей электрической изоляции, точных систем управления процессом и хорошо обученного персонала для непрерывной работы и технического обслуживания. Промышленное применение ограничено из-за потребительских ограничений к электрически обработанным продуктам, следовательно, нет никаких доступных данных по эффектам омического нагревания на формировании некоторых токсикологических и мутагенных веществ и точной информации о гарантии её смертности в различных видах продуктов.

Кроме того, стоимость коммерческих омических систем нагрева является огромным капиталовложением для производственного объекта. Однако его затраты на обработку сопоставимы с традиционными пастеризационными системами. Поэтому актуальным является расчет типовой технологической линии оборудования, способного обеспечивать процесс омического нагрева пищевых продуктов с целью оптимизации технологических показателей процесса.

## Глава 2. Разработка и оптимизация аппарата для омического нагрева органического сырья

### 2.1 Разработка электродной группы

На межфазной границе металлического электрода и органического сырья, в который погружены данные электроды, возникает скачок потенциала, обусловленный обменом заряженными частицами. При протекании переменного электрического тока через раствор поляризация электродов выражена гораздо слабее, чем при постоянном, по следующим причинам [5]. Общий ток, проходящий через электрохимическую систему, представляет сумму емкостного и фарадеевского. Емкостной ток, протекающий в такой системе, равен:

$$I_c = c' + \Delta\varphi * \omega \quad (7)$$

где:  $c'$  - емкость двойного слоя, Ф;

$\Delta\varphi$  - сдвиг потенциала, В;

$\omega$  - частота переменного тока, Гц.

Фарадеевский ток равен:

$$I_\Phi = \frac{\Delta\varphi}{R} \quad (8)$$

где:  $R$  - активное сопротивление цепи, Ом.

Величина фарадеевского тока определяется только кинетическими параметрами соответствующих электрохимических реакций и при отсутствии диффузионных ограничений практически не зависит от частоты переменного тока [5].

Таким образом, поляризуемость электрода под действием переменного тока ( $d_E/d_i n$ ), при прочих равных условиях, всегда меньше поляризуемости при действии постоянного тока ( $d_E/d_i$ ), поскольку в последнем случае через

электрод проходит фарадеевский ток. Электродные реакции на переменном токе могут оставаться такими же, как и на постоянном, но скорость одних реакций может значительно увеличиваться благодаря деполяризации, а других уменьшаться вследствие торможения, обусловленного возникновением и разрушением пассивирующих слоев, рекомбинации и электрокристаллизации на поверхности электрода и т.д. [5]. Влияние переменного тока на скорость растворения металлов неоднократно рассматривалось в литературе [6, 7]. Опубликованные материалы, содержат опытные данные о зависимости скорости растворения металлов от плотности переменного тока или частоты. Большинство исследователей считают, что в общем случае скорость коррозии металлов увеличивается при поляризации переменным током, причем абсолютная величина коррозионного эффекта определяется природой металла или сплава [8, 9], а также электрохимическими свойствами коррозионной среды [5, 10] и зависит от перемешивания растворов [11], вязкости среды [12].

Электрохимические процессы при поляризации электрода переменным током малоизучены, поэтому о пригодности того или другого металла, как электродного материала, можно судить только по результатам экспериментальных исследований.

Анализируя работы предшественников, можно сделать вывод о том, что как растворение материала электродов, так и мощность греющих камер электродного типа, а, следовательно, конструктивное оформление аппаратов будет зависеть от следующих взаимосвязанных величин: частоты переменного тока [13]; тока и распределения плотности тока по поверхности электродов [14]; электрофизических свойств среды [15]; режима движения раствора [11]; электролиза и суммарной газонаполненности электролита [14]; геометрии электродной группы [14, 16]; сопротивления электродов, [14, 16]; материала электродов [14]. Поэтому необходимо рассмотреть современное состояние вопроса о распределении тока по поверхности электродов с различной геометрией электродных групп.

Н.И. Гельпериным, В.П. Пищулиным и др. [17] впервые взявшими на вооружение прямой электрический нагрев, сделан большой вклад в определении удельных граничных сопротивлений, в разработке эмпирических формул для расчета греющих камер с плоскопараллельными и цилиндрическими электродами. Одной из основных характеристик греющих камер электродного типа является ее мощность, которая зависит от величины тока, сопротивления электродной камеры и других параметров.

В.П.Пищулин и др. [18] получили эмпирическое уравнение взаимосвязи расстояний между электродами и длиной меньшего электрода, определяющее сопротивление модели с плоскопараллельными и цилиндрическими электродами разной длины и ширины, используя которое, можно найти эффективную длину электрода.

Надежная работа электродов и всего аппарата в целом, а также получение продуктов нужного качества обеспечивается равномерным распределением тока по поверхности электродов. Известно, что для формирования однородного распределения тока наиболее удобны электродные пары: плоскопараллельные, коаксиальные полусферы и цилиндры [19].

На основании известной зависимости:

$$I = \frac{\epsilon * U}{d \ln D/d} \quad (9)$$

и методов, изложенных в [20], можно графически изобразить распределение тока по поверхности внутреннего электрода коаксиальной системы в идеализированном случае, т.е. без учета реальных условий проведения электролиза - газонаполнения, присутствия в электролите твердой фазы и т.д. Эпюра распределения тока по поверхности внутреннего электрода, с учетом краевого эффекта представлена на рисунке 6. Как видно, в межэлектродном пространстве плотность тока практически не изменяется, резко возрастающая у торца электрода.

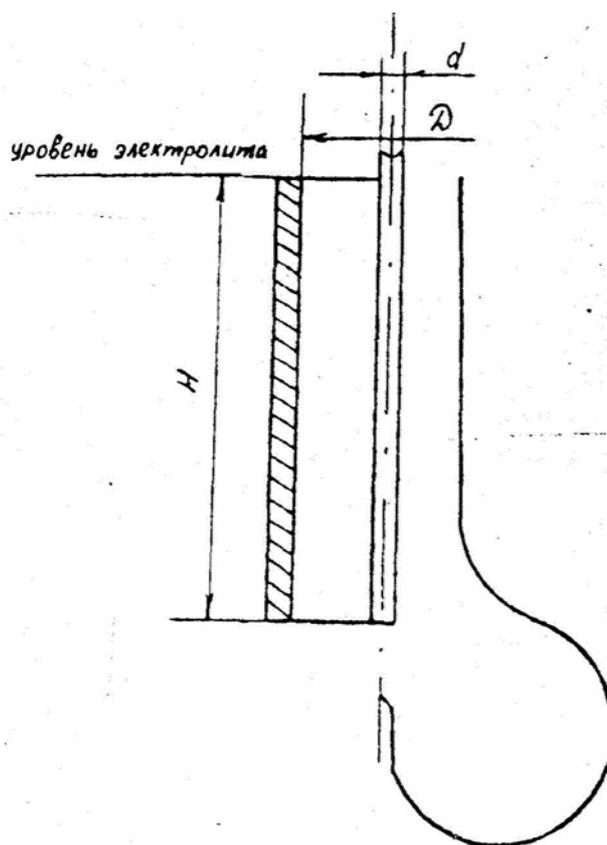


Рисунок 6. Эпюра распределения тока по поверхности внутреннего электрода в коаксиальной системе с открытым торцом

В реальных условиях электролиза распределение заметно отличается от представленного на рисунке 6, поэтому с целью определения равномерности распределения тока по поверхности были проведены опыты с электродами, представляющими собой коаксиально расположенные цилиндры. При этом полагалось, что влияние плотности тока проявляется в потере массы электродами за счет окисленного металла.

В качестве электролита попользовался раствор лимонного сока pH 2,0. Время электролиза - два часа. Формы и размеры внешних электродов соответствуют указанным на рис. 7. Первоначальный диаметр внутреннего цилиндрического электрода был равен 2 мм.

Потеря массы внутренним электродом определяет изменение его диаметра и является функцией плотности тока, поэтому построив кривые изменения диаметра по высоте внутреннего электрода, можно оценить распределение тока по его поверхности. Данная зависимость представлена на

рисунке 7. Измерения диаметра внутреннего электрода по высоте через равные промежутки проводились с помощью микроскопа МБС-2.

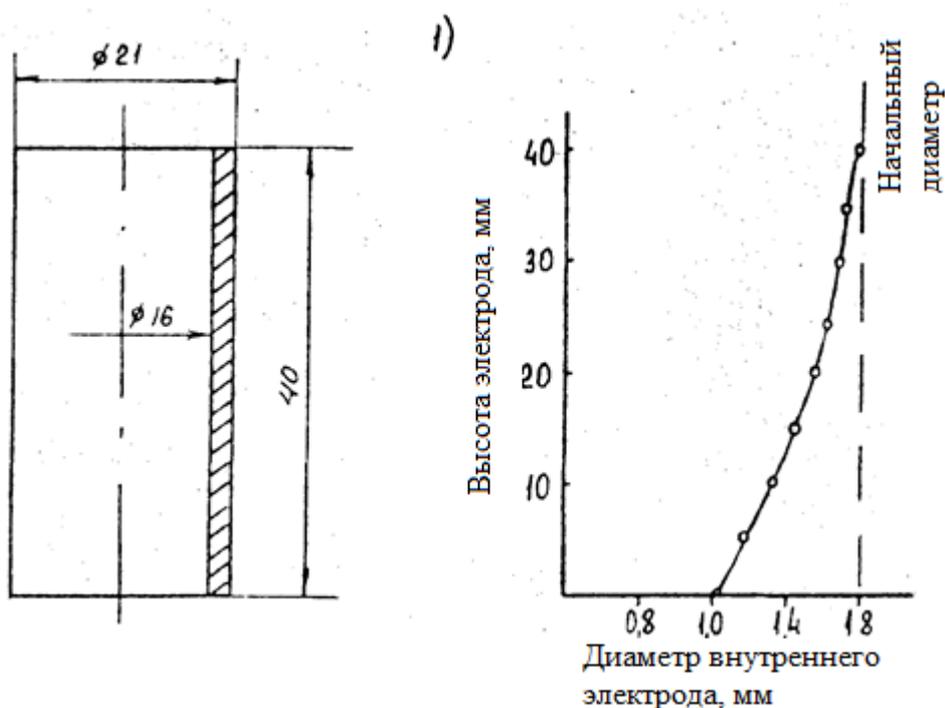


Рисунок 7. Зависимость изменения диаметра внутреннего электрода по высоте от внешнего электрода

Максимальное изменение диаметра внутреннего электрода приходится на участки с большей плотностью тока, обусловленной не только геометрической формой внешнего электрода, но и величиной сопротивления, раствора электролита в данном поперечном сечении, зависящем от газонаполнения.

В тех же условиях, что и с коаксиальными парами были проведены опыты на плоскопараллельных электродах с рабочей поверхностью равной 6 см. Расстояние между электродами соответствовало 1 см. На рис. 8 приведена графическая зависимость изменения толщины электрода по высоте, из которой видно, что зависимость аналогична приведенной на рис. 6.

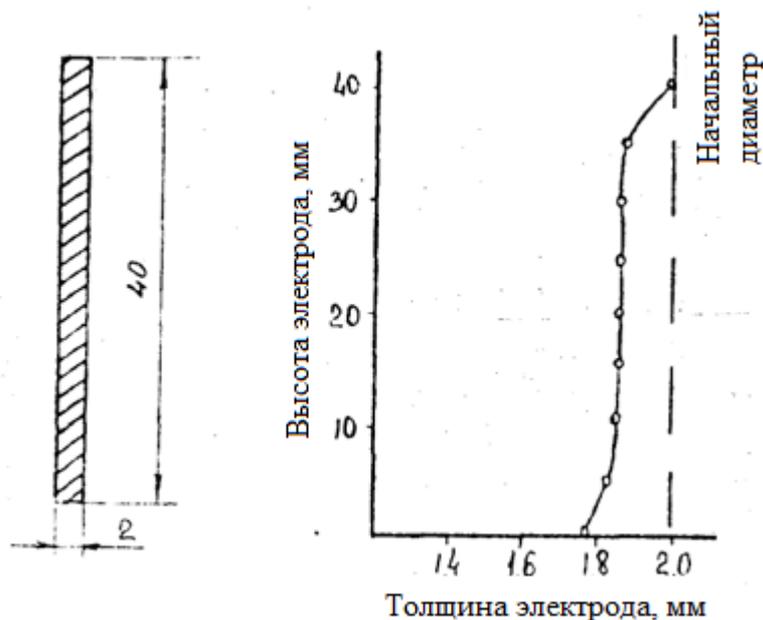


Рисунок 8. Зависимость изменения толщины плоского электрода по высоте

При анализе кривых, приведенных на рис. 7 и 8, можно сделать вывод: в том и другом случае происходит более равномерное распределение тока, однако в коаксиальной паре это достигается сложной формой внешнего электрода, а в плоскопараллельной системе, по-видимому, за счет большего свободного пространства для газовыделения. По моему мнению, следует отдать предпочтение плоскопараллельной паре, так как плоские электроды просты в изготовлении, а самое главное то, что, выражая разрушение или окисление электрода через величину скорости, среднее ее значение всегда будет близко к вычисленному на любом участке поверхности электродов, поскольку оба они работают при одинаковой плотности тока, чего в коаксиальной паре добиться невозможно. С практической точки зрения, при одинаковых энергетических затратах производительность электролизера с плоскими электродами по той же причине всегда будет выше.

## 2.2 Исследование коррозионной стойкости углеграфитовых материалов в кислотных растворах

Обладая достаточно высокими теплотехническими показателями (значения коэффициентов теплопередачи – 500-700 Вт/м<sup>2</sup> °К, а на лучших опытных образцах – до 1163 Вт/м<sup>2</sup> °К) графитовые материалы благодаря антикоррозионным свойствам обеспечивают химическую чистоту перерабатываемых продуктов и позволяют экономить значительное количество цветных металлов, легированных сталей, а также увеличить сроки службы установок и сэкономить значительные средства [21].

В работе [22] авторы исследовали коррозионную стойкость графитов марок АРВ, БГТ, РБМК, электродный графит ЧЭЗ, графитовые аноды марок А и В, силицированные графиты СГТ и СГМ. Материалы были проверены на проницаемость во фторсернокислотных растворах. Оказалось, что, кроме силицированных графитов, все материалы после 3-8 часов испытаний пропускают во внутренний объем раствор и являются проницаемыми для кислых сред. Исходя из этих данных использовать и испытывать электроды в пищевых средах нужно только из силицированных графитов.

Исследования проводились на лабораторной установке (рис. 9). Основная часть установки - греющая камера с двумя плоскопараллельно расположенными электродами. В установке использовали электроды из силицированного графита марки ГАКК 55/40 (алюмокарбидкремниевый графит). При пропускании через электроды переменного электрического тока происходит нагревание растворов до требуемой температуры. Эксперименты проводились на растворах с водородным показателем: лимонный сок рН 2,0 и виноградный сок рН 4,5 в интервале температур 100-120 °С при плотности тока от 0,5 до 1,5 А/см<sup>2</sup>. Глубинный показатель коррозии для силицированного графита составил при испытании в течение 180 часов (температура – 120 °С, плотность тока - 1,5 А/см<sup>2</sup>) 0,012 мм/год. Форма и размеры электрода не изменились, а рабочая поверхность стала более темной. Соотношение компонентов материала электрода, по данным рентгено-фазового анализа, после эксперимента осталось прежним.

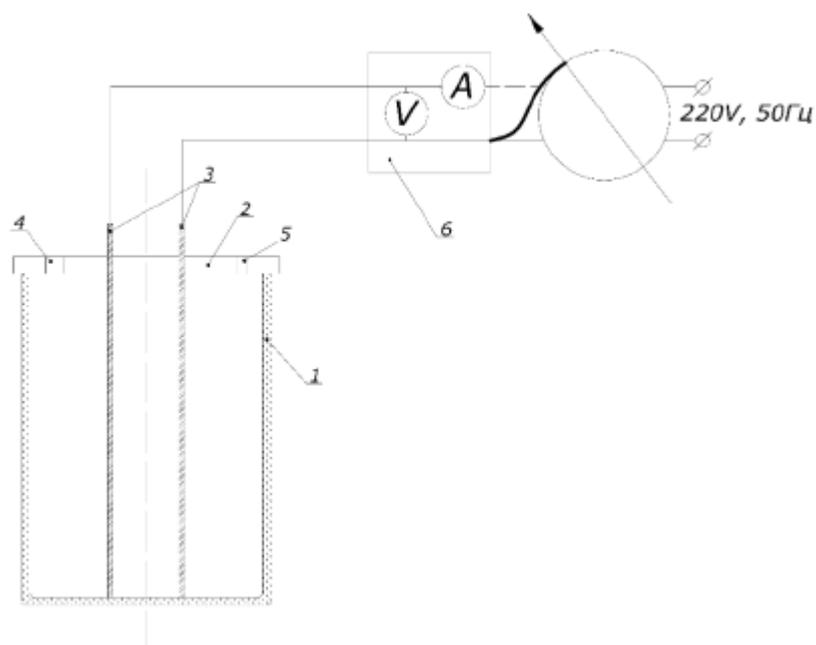
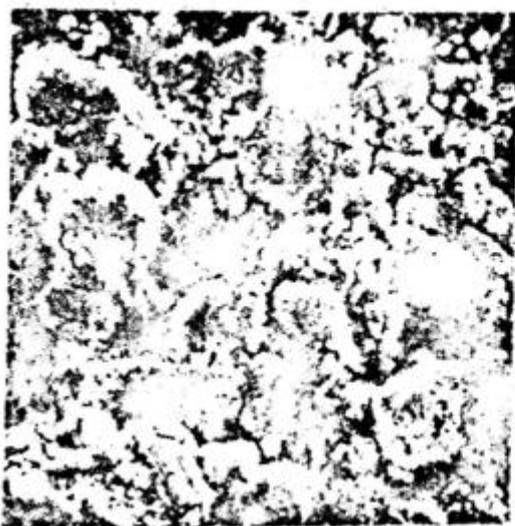


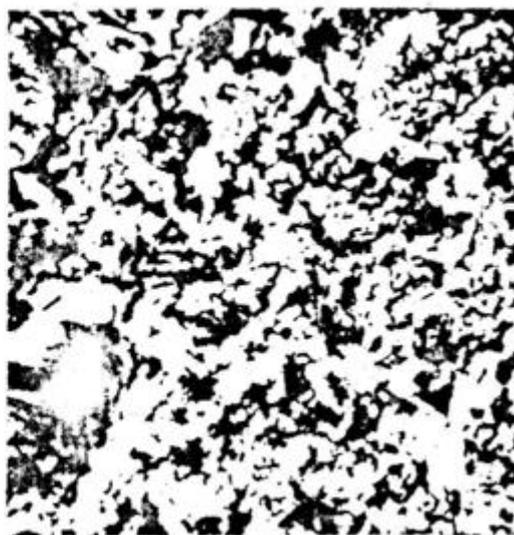
Рисунок 9. Лабораторная установка омического нагрева

1 – емкость, 2 – крышка с уплотнением, 3 – электроды, 4 – клапан для сброса водяного пара, 5 – термометр, 6 – измерительный стенд.

Исследование поверхности электрода на растровом электронном микроскопе при 500-кратном увеличении показало, что во всех растворах разрушается поверхностный слой, и наибольшие разрушения произошли в области наибольшей плотности тока. Так же видно, что рН раствора влияет на степень образования коррозии. В растворе виноградного сока, после эксперимента наблюдается слабая коррозия (рис. 10). В растворе лимонного сока, то есть более кислой среде, видно, что коррозия носит более сильный характер (рис. 11).

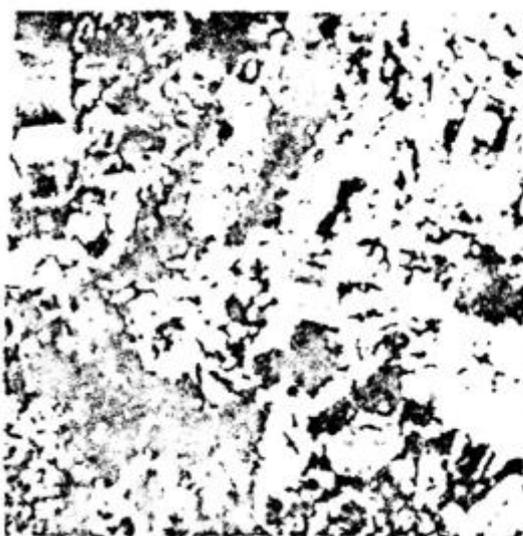


а – исходный



б – после эксперимента

Рисунок 10. Поверхность силицированного графита в эксперименте с виноградным соком.



а – исходный



б – после эксперимента

Рисунок 11. Поверхность силицированного графита в эксперименте с лимонным соком

Таким образом, литературный анализ и проведенные исследования показали, что электроды из силицированного графита по своим конструкционным свойствам, химической стойкости и электрическим параметрам могут быть использованы для прямого электронагрева агрессивных сред. При этом они должны иметь максимально высокое содержание карбида кремния.

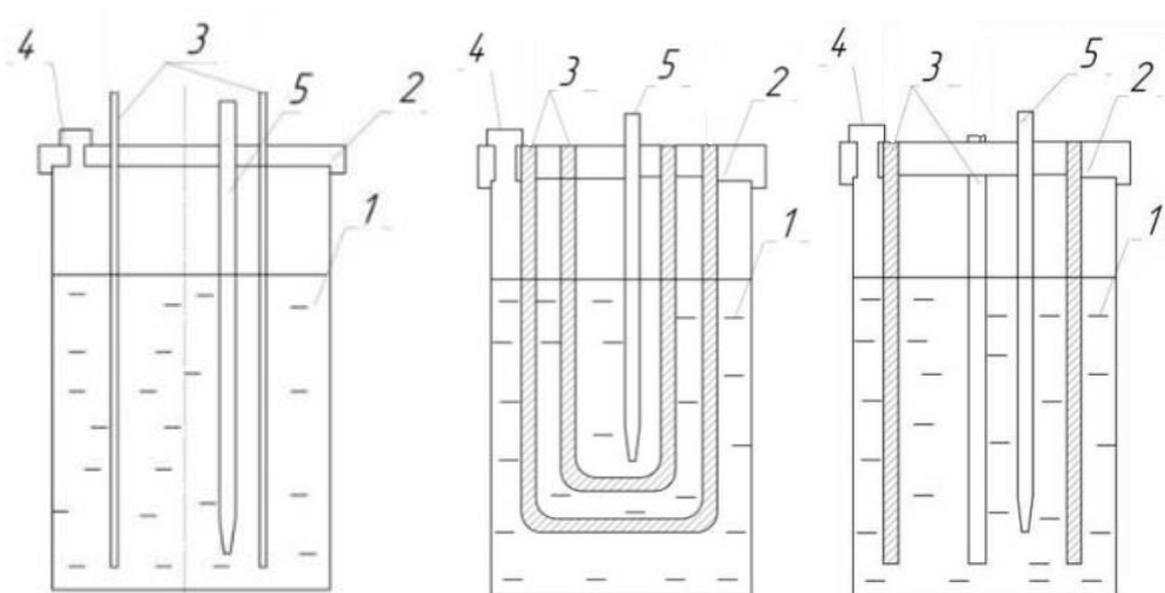
### 2.3 Разработка греющей камеры

Выпарные аппараты электродного типа характеризуются высокой теплопроизводительностью, компактностью установки, простотой конструкции, высокой скоростью циркуляции упариваемого раствора, плавностью регулирования теплового режима и высоким коэффициентом полезного превращения электрической энергии в тепловую (до 95%) [123].

При плотности тока на электродах в 1-2 А/см<sup>2</sup> удельная мощность электродных греющих камер колеблется в широких пределах и может достигать 8000-35000 кВт/м<sup>3</sup>, что важно для интенсификации процессов, связанных с подводом тепла.

Таким образом, малая металлоемкость конструкций, их герметичность, непрерывность процесса выпаривания при гарантированном качестве продукта, удобство в эксплуатации делает эти аппараты перспективными в производстве различных органических и неорганических растворов.

В греющих камерах электродного типа располагаются одна или несколько пар электродов. Электродные пары по расположению различают: плоскопараллельные (рис. 12, а), радиальные (рис. 12, б), коаксиальные (рис. 12, в). Установка состоит из 1 – емкости, 2 – крышки с уплотнением, 3 – электродов, 4 – клапана для сброса водяного пара, 5 – термометра. В пункте 2.2.1 данной работы на основе литературных и опытных данных обосновано применение именно плоскопараллельного расположения электродной пары.



а) плоскопараллельное б) радиальное в) коаксиальное

Рисунок 12. Установки с различным расположением электродов

Расчет греющих камер заключается в определении размера электродов и их конструкции, электрического сопротивления, рабочего напряжения камеры и мощности системы электродов. По значению удельной мощности определяют площадь поверхности испарения. Методика расчета представлена в работе Пищулина В.П. [18].

Греющие камеры должны удовлетворять следующим требованиям: иметь высокий к.п.д., большую удельную мощность (производительность); внешний токоподвод, исключая сальниковые и другие виды уплотнений; малую металлоемкость; быть долговечными и надежными в работе; простыми в конструктивном оформлении; компактными; технологичными в изготовлении; универсальными по использованию и назначению; дешевыми и экономичными; допускающими применение самых современных, прогрессивных, распространенных и новых материалов; гарантировать качество получаемого продукта; обеспечивать безотходную технологию производства; способствовать улучшению условий труда; высота заглубления греющих камер в контуре циркуляции должна исключать процесс парообразования внутри самих камер; количество раствора в контуре циркуляции обеспечивает получение продуктов с

заданной концентрацией; устойчивый гидродинамический режим работы гарантирует в широком регулируемом интервале обеспечение заданной мощности установки; практически одинаковая методика расчета мощности греющей камеры и ее конструктивных размеров; для гарантированной по срокам работы греющей камеры электродного типа необходим материал электродов устойчивый в коррозионном отношении в области высоких концентраций и температур порядка 100-180 °С; создать малоотходные и безотходные производства при экономии энергоресурсов с энергетической точки зрения.

## 2.4 Применение постоянного или переменного тока

Не только выделение тепла, но и различные электрохимические процессы возникают в процессе прохождения электрического тока через раствор электролита. Применение постоянного тока несет перенос зарядов и перенос массы, то есть возникает процесс электролиза, возможно электролитическое осаждение металлов, выделившихся с электродов. Закон Фарадея определяет массу вещества, выделившегося с электродов:

$$m = k_3 * I * \tau \quad (10)$$

где  $m$  – масса вещества, г;

$k_3$  – электрохимический эквивалент вещества, г/Кл или г/А\*ч;

$I$  – сила тока, А;

$\tau$  – время, ч.

Применение переменного тока обеспечивает практически полный расход электрической энергии на нагрев раствора без изменения его состава. Это происходит из-за симметричности переменного тока. То есть количество вещества, образованного в один полупериод на электроде, соответствует количеству вещества, которое разложилось в другой полупериод.

Важным параметром является плотность тока на электродах. Корсак С.П. в своей работе [70] опытным путем доказал, что при плотности выше 2 А/см<sup>2</sup>

возможен электролиз раствора даже при использовании переменного тока, что влечет к образованию гремучего газа. При плотности переменного тока более  $3,5 \text{ A/cm}^2$  возникает электролиз воды, как при использовании постоянного. Опираясь на эти данные можно сделать вывод о том, что плотность тока не должна превышать  $2-2,5 \text{ A/cm}^2$ , это гарантирует безопасное и требуемое протекание процесса.

## **2.5 Оптимизация**

В выпускной бакалаврской работе был произведен расчет вакуум-выпарного аппарата омического нагрева плодово-ягодных соков. Материалом электродной пары была выбрана сталь марки 12Х18Н10Т, так как изготовление электродов из данного материала наиболее просто в реализации.

Анализ литературных источников и проведенные в данной работе исследования показали, что наиболее безопасным и коррозионно-устойчивым материалом является силицированный графит. Химическая стойкость материала является основой для использования его в различных, в том числе агрессивных средах. Что гарантирует отсутствие негативного влияния на пищевой продукт.

В нашей работе [64] были получены данные о характере распределения тепла в объеме растительного сырья в ходе процесса омического нагрева. Для экспериментов были взяты электроды различной длины и различного исполнения. Распространение тепла в пищевом сырье с использованием электродов с полным погружением показало, что спустя 5 минут после начала нагрева основная зона разогрева сырья находится в центре емкости между электродной группой. Зона кипения пищевого сырья находится в центре между электродами, газонаполнение сырья при кипении способствует перемешиванию от центра к периферии. Спустя 50 минут после начала кипения было достигнуто равномерное распределение тепла в объеме.

Распространение тепла в пищевом сырье с использованием электродов из с неполным погружением показало, что спустя 5 минут после начала нагрева и во время начала процесса кипения самая нагретая область так же находится в

центре электродов. Спустя 50 минут после начала кипения область вокруг электродов равномерно прогревается, однако ввиду не полного погружения электродов слой сырья ниже электродов прогревается незначительно, имеется серьезная дифференциация в температурах нижних и верхних слоев сырья. Достижение относительно равномерного распределения тепла в объеме достигается спустя 80 минут, что снижает эффективность процесса и увеличивает время перегрева верхних слоев сырья. Что привело к заключению о том, что при использовании электродов ограниченной длины следует применять механическую мешалку. Для равномерного перемешивания всего объема рекомендуется мешалка лопастного типа, создающая перемешивание среды от верхних слоев к нижним, для распределения более перегретых верхних слоев из области между графитовыми электродами по всему объему аппарата.

В проектируемом аппарате перемешивание объема сырья будет достигнуто путем непрерывной подачи исходного раствора в аппарат тангенциально. Поток исходного раствора через входной патрубок за счет центробежных сил будет приобретать круговое движение вдоль стенок аппарата, осуществляя перемешивание более холодных зон на раннем этапе разогрева исходного раствора, ускоряя наступление момента кипения и стабилизации температурного профиля по всему объему сырья при непрерывности процесса.

Для обеспечения данного решения входной патрубок исходного раствора приваривается к обечайке таким образом, чтобы обеспечить тангенциальный (по касательной) ввод исходного раствора.

### Глава 3. Расчет вакуум-выпарной греющей камеры электродного типа (выпарного аппарата)

#### 3.1 Технологический расчёт выпарного аппарата

Материальный баланс процесса выпаривания.

Данные:

$W_B = 25 \text{ кг/ч} = 0,00694 \text{ кг/с}$  – производительность по выпариваемой воде;

$x_{\text{нач}} = 12 \%$  - массовая доля сухих веществ в начальном растворе;

$x_{\text{кон}} = 70 \%$  - массовая доля сухих веществ в упаренном растворе.

Основные уравнения материального баланса:

$$G_{\text{нач}} = G_{\text{кон}} + W \quad (10)$$

$$G_{\text{нач}} \cdot x_{\text{нач}} = G_{\text{кон}} \cdot x_{\text{кон}} \quad (11)$$

где  $G_{\text{нач}}, G_{\text{кон}}$  – массовые расходы начального и концентрированного раствора, кг/с;

$x_{\text{нач}}, x_{\text{кон}}$  – массовые доли сухого вещества в начальном и концентрированном растворе, %;

$W_B$  – массовый расход выпаренной воды, кг/с:

$$W_B = G_{\text{нач}} \times \left(1 - \frac{x_{\text{нач}}}{x_{\text{кон}}}\right) \quad (12)$$

Откуда:

$$G_{\text{нач}} = \frac{W_B}{1 - \frac{x_{\text{нач}}}{x_{\text{кон}}}} = \frac{0,00694}{1 - \frac{12}{70}} = 0,00838 \text{ кг/с} = 30,2 \text{ кг/ч} \quad (13)$$

$$G_{\text{кон}} = \frac{G_{\text{нач}} \cdot x_{\text{нач}}}{x_{\text{кон}}} = \frac{0,00838 \cdot 12}{70} = 0,00144 \text{ кг/с} = 5,2 \text{ кг/ч} \quad (14)$$

Таблица 6 – Материальный баланс

Поток	Обозначение	Численное значение, кг/с	Содержание сухих веществ, %
Исходный раствор (фруктовый сок)	$G_{\text{нач}}$	0,00838	12
Концентрат (Концентрированный сок)	$G_{\text{кон}}$	0,00144	70
Вторичный пар	$W_{\text{в}}$	0,0694	-

*Определение температур и давлений в узловых точках технологической схемы.*

Определение давления и температуры в выпарном аппарате  $P_1, t_1$ .

Абсолютное давление в сепараторе выпарного аппарата:

$$P_1 = P_{\text{атм}} - P_{\text{вак}} \quad (15)$$

где  $P_{\text{атм}} = 1$  – атмосферное давление, ат;

$P_{\text{вак}} = 0,2$  – вакуум в аппарате, ат.

$$P_1 = 1 - 0,2 = 0,8 \text{ ат} \quad (16)$$

По давлению  $P_1$  найдем температуру вторичного пара в сепараторе  $t_1, ^\circ\text{C}$ ; [12, Табл. LVII]:

$$t_1 = 93,0 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (17)$$

Тепловой баланс выпарного аппарата.

Уравнение теплового баланса выпарного аппарата:

$$Q + G_{\text{нач}} * C_{\text{нач}} * t_{\text{нач}} = G_{\text{кон}} * C_{\text{кон}} * t_{\text{кон}} + W_{\text{в}} * L_{\text{в}} + Q_{\text{пот}} \quad (18)$$

где  $Q$  – расход теплоты на выпаривание, Вт;

$Q_{\text{пот}}$  – расход теплоты на компенсацию потерь в окружающую среду, Вт;

$C_{\text{нач}}, C_{\text{кон}}$  – удельная теплоемкость исходного и конечного раствора, Дж/(кг\*К);

$t_{\text{нач}}, t_{\text{кон}}$  – температура исходного раствора на входе в аппарат и конечного на выходе из аппарата, °С;

$L_{\text{в}}$  – теплота фазового перехода (парообразования) при  $t_{\text{кон}}$  [12, табл.LVI], Дж/кг.

$$L_{\text{в}} = 2356.9 * 10^3 \text{ Дж/кг} \quad (19)$$

*Расход теплоты на компенсацию потерь в окружающую среду.*

Расход теплоты на компенсацию потерь в окружающую среду  $Q_{\text{пот}}$  [12, с 247] при расчёте выпарных аппаратов принимается 3-5% от суммы( $Q_{\text{нагр}} + Q_{\text{исп}}$ ).

Где  $Q_{\text{нагр}}$  – расход теплоты на нагрев раствора до температуры кипения, Вт;

$Q_{\text{исп}}$  – расход теплоты на упаривание раствора до конечной концентрации, Вт;

Следовательно:

$$Q_{\text{пот}} = 0.05 * (Q_{\text{нагр}} + Q_{\text{исп}}) \quad (20)$$

*Расход теплоты на нагрев:*

$$Q_{\text{нагр}} = G_{\text{нач}} * C_{\text{нач}} * (t_{\text{кон}} - t_{\text{нач}}) \quad (21)$$

Температура исходного раствора  $t_{\text{нач}}$ , поступающего в выпарной аппарат:  $t_{\text{нач}} = 15$  °С

Температура конечного раствора  $t_{\text{кон}}$  на выходе из аппарата:  $t_{\text{кон}} = 60$  °С

Удельная теплоемкость исходного и конечного раствора определяется по формуле:

$$C = 0,0419 * (100 - 0,66 * x) \quad (22)$$

где  $x$  – содержание в продукте сухих веществ, %

$$C_{\text{нач}} = 0,0419 * (100 - 0,66 * x_{\text{нач}}) = 0,0419 * (100 - 0,66 * 12) = 3,86 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}) \quad (23)$$

$$C_{\text{кон}} = 0,0419 * (100 - 0,66 * x_{\text{кон}}) = 0,0419 * (100 - 0,66 * 70) = 2,25 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}) \quad (24)$$

$$Q_{\text{нагр}} = 0,00838 * 3,86 * 10^3 * (60 - 15) = 1455,6 \text{ Вт} \quad (25)$$

*Расход теплоты на испарение.*

$$Q_{\text{исп}} = W_{\text{в}} * L_{\text{в}} \quad (26)$$

где  $L_{\text{в}}$  – теплота фазового перехода (парообразования) при  $t_{\text{кон}}$  [12, табл.LVI], Дж/кг.

$$Q_{\text{исп}} = 0,00694 * 2356,9 * 10^3 = 16356,9 \text{ Вт} \quad (27)$$

Расход теплоты на компенсацию потерь в окружающую среду:

$$Q_{\text{пот}} = 0,05 * (1455,6 + 16356,9) = 890,6 \text{ Вт} \quad (28)$$

Выразим из уравнения теплового баланса расход теплоты на выпаривание:

$$Q = G_{\text{кон}} * C_{\text{кон}} * t_{\text{кон}} + W_{\text{в}} * L_{\text{в}} + Q_{\text{пот}} - G_{\text{нач}} * C_{\text{нач}} * t_{\text{нач}} = 0,00144 * 2550 * 60 + 0,00694 * 2356.9 * 10^3 + 890,6 - 0,00838 * 3860 * 15 = 16956,7 \text{ Вт} \approx 17 \text{ кВт} \quad (30)$$

### 3.2 Расчет мощности системы электродов

Расчёт производится по методике расчёта выпарной аппаратуры с прямым электрическим нагревом Пищулина В.П. [4].

Рабочая длина электродов – это оптимальная принимаемая длина электродов для проведения процесса нагревания. Она определяет максимальный и минимальный уровень упариваемого раствора в аппарате.

Исходные данные:

- рабочая длина электродов  $a=0.5 \text{ м}$
- ширина электродов  $b=0.1 \text{ м}$
- толщина электрода  $c=0.01 \text{ м}$
- расстояние между электродами  $\sigma = 0.1 \text{ м}$
- теплота фазового перехода (парообразования и конденсации)  $L_{\text{воды}} = 2356.9 \times 1000 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$
- производительность аппарата  $W=25 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}$
- плотность яблочного сока при температуре  $15^\circ\text{C}$   $\rho_H = 1051 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$
- удельное граничное сопротивление  $R_{\text{удгр}} = 0.124 \text{ Ом} \times \text{м}^2$
- время  $\tau = 3600 \text{ с}$
- коэффициент формы электродов  $K_{\text{ф}} = 20.8$
- удельная электропроводность раствора  $\chi = 2.6 \text{ Ом}^{-1} \times \text{м}^{-1}$
- концентрация сухих веществ в яблочном соке  $\omega_k = 0.7 \%$

Объем газа в смеси:

$$V_r = \frac{W}{1000} \times 0.36 = 9 \times 10^{-3} \text{ м}^3 \quad (29)$$

Объем раствора в смеси:

$$V_p = \frac{W}{\rho_H} = 0.024 \text{ м}^3 \quad (30)$$

Газонаполнение:

$$\Gamma = \frac{V_r}{V_r + V_p} = 0.275 \quad (31)$$

Коэффициент газонаполнения:

$$K_r = \frac{1}{1 - 1.78 \times \Gamma + \Gamma^2} = 1.704 \quad (32)$$

Коэффициент соотношения ширины электрода и расстояния между электродами:

$$n = \frac{b}{\sigma} = 1 \quad (33)$$

Коэффициент соотношения длины электрода и расстояния между электродами:

$$m = \frac{a}{\sigma} = 5 \quad (34)$$

Рабочая поверхность электродов (площадь):

$$F = a \times b = 0.05 \text{ м}^2 \quad (35)$$

Коэффициент пропорциональности:

$$k = \frac{1}{x} = 0.385 \text{ Ом} \times \text{см} \quad (36)$$

Имея заданную производительность выпарного аппарата находится рабочее количество тепла, необходимое для испарения нужного количества влаги  $W$ :

$$Q_{\text{расч}} = L_{\text{воды}} \times W = 5.892 \times 10^7 \text{ Дж} \quad (37)$$

С учетом экспериментально определяемых параметров рассчитывается рабочее сопротивление системы «электрод – раствор – электрод», которое складывается из сопротивления раствора, сопротивления электродов и двух сопротивлений на границе «раствор–электрод»:

$$R = \frac{K_r \times K_\phi}{x^{n \times m \times \sigma}} + 2 \times \frac{R_{\text{удгр}}}{n \times m \times \sigma^2} = 32.229 \text{ Ом} \quad (38)$$

Величина силы тока:

$$I = \sqrt{\frac{Q_{\text{расч}}}{k \times R \times t}} = 36.337 \text{ А} \quad (39)$$

Значение рабочего напряжения:

$$U = \frac{1}{F} \times \left( 2 \times R_{\text{удгр}} + \frac{K_r \times K_\phi \times \sigma}{x} \right) = 1171 \text{ В} \quad (40)$$

Рабочая мощность системы электродов:

$$N = \frac{I^2}{F} \times \left( 2 \times R_{\text{удгр}} + \frac{K_r \times K_\phi \times \sigma}{x} \right) = 42560 \text{ Вт} \quad (41)$$

Значение удельной мощности  $N_y$  в кВт/м<sup>2</sup>, при которой не увеличивается пенообразование:

для яблочного сока:  $a=89.96$   $b=(-)3.42$   $c=(-)0.58$

$$N_y = a \times (\omega_k - b)^c = 91.141 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2} \quad (42)$$

Рассчитывается площадь поверхность испарения  $S_u$  по формуле:

$$S_u = \frac{N}{N_y \times 1000} = 0.467 \text{ м}^2 \quad (43)$$

$$S_u = \pi \times R^2 \Rightarrow r = \sqrt{\frac{S_u}{\pi}} = 0.386 \text{ м} \quad (44)$$

Производится пересчёт площади поверхности  $S_u$  на диаметр круга, имеющего такую площадь, и диаметр округляется до ближайшего диаметра из ряда диаметров, принятых в химическом машиностроении.

### **3.3 Механический расчет выпарного аппарата**

#### **3.3.1 Расчёт цилиндрической обечайки выпарного аппарата**

Исходные данные:

$p = 0.02$  МПа - давление в аппарате;

12Х18Н10Т – марка стали аппарата;

Среда в аппарате – яблочный сок.

В соответствии с ГОСТ 9931-85 «Корпуса цилиндрические стальных сварных сосудов и аппаратов» должны соответствовать таблице 7 [48]:

Таблица 7

Обозначение		Наименование корпусов	Диапазон объемов, м <sup>3</sup>
типа	исполнения		
ВЭП	2	Вертикальный с эллипсоидным днищем и плоской крышкой	0,010-32,0

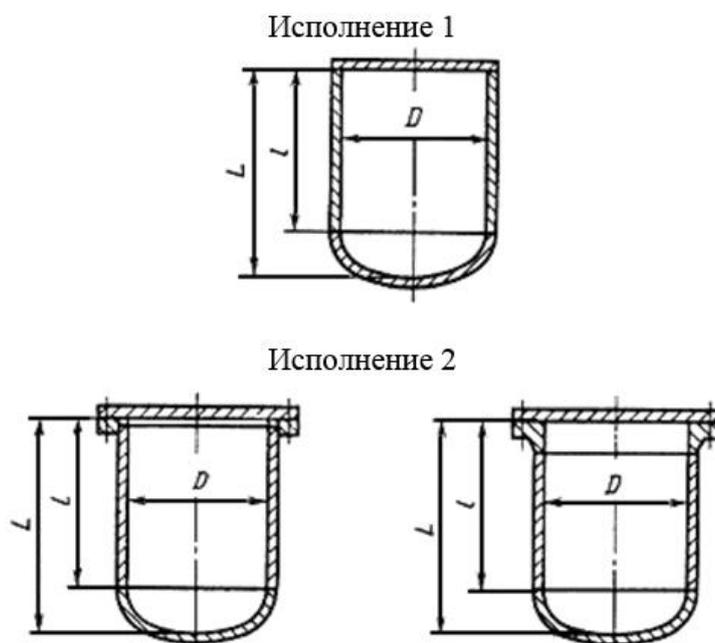


Рисунок 13. Исполнение корпусов типа ВЭП

Таблица 8

Объем номинальный, м <sup>3</sup>	$D$	$L$	$l$	Площадь внутренней поверхности, м <sup>2</sup>
0,400	800	875	650	2,89

Таблица 9

Размеры, мм		
Типы днищ	Диапазон диаметров	Высота цилиндрической части
Эллипсоидные	400-1600	25
	1800-3000	40
	3200-3400	60
	3600	60

Основные размеры крышки и днища по ГОСТ 6533-78 должны соответствовать указанным на рисунке 14 и в таблице 10 [47].

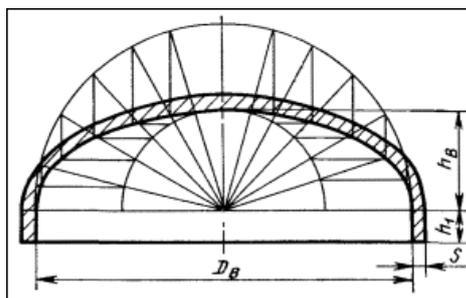


Рисунок 14. Эллиптическое днище

Таблица 10

Размеры в мм							
$D_n$	$h_1$	$h_n$	$s$	$F, м^2$	$V, дм^3$	Масса, кг	Применяемость
800	25	200	4	0,76	79,3	24,0	
			5			30,1	
			6			36,3	
			8			48,6	
			10			61,1	

Расчет производится по ГОСТ Р 52857.2-2007 [57].

$L$  — расчетная длина цилиндрической обечайки, укрепленной кольцами жесткости, мм;

$l$  — расчетная длина гладкой обечайки, мм;  
 $c$  — сумма прибавок к расчетным толщинам стенок, мм;  
 $c_1$  — прибавка для компенсации коррозии и эрозии, мм;  
 $c_2$  — прибавка для компенсации минусового допуска, мм;  
 $c_3$  — технологическая прибавка, мм;  
 $D$  — внутренний диаметр сосуда или аппарата, мм;  
 $\phi_p$  — коэффициент прочности продольного сварного шва;  
 $s$  — исполнительная толщина стенки обечайки, мм;  
 $s_p$  — расчетная толщина стенки обечайки или днища, мм;  
 $p$  — расчетное внутреннее избыточное или наружное давление, МПа;  
 $[\sigma]$  — допускаемое напряжение при расчетной температуре, МПа;  
 Длина обечайки,  $l=650$  мм.

Внутренний диаметр,  $D=800$  мм

Рабочее давление,  $p=0.02$  МПа.

Температура среды в аппарате,  $t_{cp} = 100$  °С.

Материал аппарата - сортовой прокат из стали 12х18н10т.

Скорость коррозии для материала 12х18н10т,  $\Pi=0.1$  мм/год

Срок эксплуатации,  $t_b=5$  лет

Высота цилиндрической части отбортовки днища/крышки,  $h_1 = 25$  мм

Допускаемое напряжение в рабочем состоянии:

Поправочный коэффициент к допускаемым напряжениям ( $\eta=1$ ), так как аппарат изготавливается из сортового проката

$$t = t_{cp} = 100 \text{ °С} \quad (45)$$

$$t_r = \max(20, t) \quad t_r = 100 \text{ °С} \quad (46)$$

$$\sigma_d = \sigma_r = 174 \text{ МПа} \quad (47)$$

Для сортового проката из стали марок 12X18H10T, 10X17H13M2T, 10X17H13M3T допускаемые напряжения, приведенные в настоящей таблице, при температурах до 550 °С умножают на отношение  $\frac{R_{p0.220}}{240}$

$R_{p0.220} = 196$  МПа - предел текучести материала сортового проката.

$$\sigma_d = \eta \times \sigma_d \times \left(\frac{R_{p0.220}}{240}\right) = 142.1 \text{ МПа} \quad (48)$$

Таблица 11

Класс и порядковый номер марки по ГОСТ 5632	Марка стали	Рекомендуемый режим термической обработки заготовок для изготовления образцов	Временное сопротивление $\sigma_t$ , Н/мм <sup>2</sup> (кгс/мм <sup>2</sup> )	Предел текучести $\sigma_s$ , Н/мм <sup>2</sup> (кгс/мм <sup>2</sup> )	не менее		Ударная вязкость, КСЦ, Дж/см <sup>2</sup> (кгс·м/см <sup>2</sup> )
					Относительное удлинение $\delta_5$ , %	Относительное сужение $\psi$ , %	
6—31	12X18H10T	Закалка с 1020—1100 °С, охлаждение на воздухе, в масле или в воде	510 (52)	196 (20)	40	55	—
6—33	03X18H11		440 (45)	155 (16)			
6—37	12X18H12T		540 (55)	196 (20)			
6—38	08X18H12Б		490 (50)	175 (18)			

Коэффициент прочности продольных сварных швов  $\phi_p = 1$ , так как принято, что швы с двухсторонним сплошным проваром выполняются автоматической сваркой.

Прибавки к расчетной толщине стенки:

$C = \Pi \times t_w = 0.5$  - сумма прибавок к расчетной толщине стенки, мм

*Обечайки, нагруженные наружным давлением.*

Толщину стенки предварительно вычисляют по формулам ниже с обязательной последующей проверкой по формуле  $s \geq sp + c$  (52)

Коэффициент В вычисляют по формуле:

$$B = \max \left[ 1.047 \times \left(\frac{p}{10^{-5} \times E}\right)^{0.067} \times \left(\frac{1}{D}\right)^{0.4} \right] = 1 \quad (49)$$

$E=1.94 \times 10^5$  — модуль продольной упругости стали 12х18н10т при расчетной температуре, МПа.

Расчетную толщину стенки вычисляют по формуле:

$$s_p = \max \left[ 1.06 \times \frac{10^{-2} \times D}{B} \times \left( \frac{p \times 1}{10^{-5} \times E \times D} \right), \frac{1.2 \times p \times D}{2 \times \sigma_d - p} \right] = 0.071 \text{ мм} \quad (50)$$

Таблица 12

**Рекомендуемые минимальные толщины (без прибавки на коррозию) стенок цилиндрических вальцованных обечаек, мм**

$D_e$	< 400	≥ 400 до 1000	> 1000 до 2000	> 2000 до 4000
$s$	2	3	4	5

Примечание. Указанные толщины стенок обечаек при возможности коррозии их материала соответственно увеличиваются на коррозионную прибавку  $S_k$ .

Исходя из табличных данных, принимаем  $s_p = 3$  мм.

Максимальная исполнительная толщина стенки из условия прочности:

$$s = \text{ceil}(s_p + c) = 4 \text{ мм} \quad (51)$$

Условия применения расчетных формул:

Расчетные формулы применимы при отношении толщины стенки к диаметру:

$$\frac{(s-c)}{D} \leq 0.1 \text{ для обечаек и труб при } D \geq 200 \text{ мм} \quad (52)$$

$\frac{s-c}{D} = 4.5 \times 10^{-3}$  - условие применения расчетных формул выполняется.

Расчетные формулы для обечаек, работающих под действием осевого сжимающего усилия, применимы при следующем условии:

$$\frac{1}{D} \geq 1.0 \quad (53)$$

$\frac{1}{D} = 0.813$  мм - условие применения расчетных формул выполняется.

Допускаемое наружное давление вычисляют по формуле:

$$p_D = \frac{p_{II}}{\sqrt{1 + \left(\frac{p_{II}}{p_E}\right)^2}} \quad (54)$$

где допускаемое давление из условия прочности вычисляют по формуле:

$$p_{II} = \frac{2 \times \sigma_D \times (s-c)}{(s-c) + D} = 1.238 \text{ МПа} \quad (55)$$

а допускаемое давление из условия устойчивости в пределах упругости вычисляют по формуле:

$n_y = 2.4$  — коэффициент запаса устойчивости.

$$B_1 = \min \left[ 1, 9.45 \times \frac{D}{1} \times \sqrt{\frac{D}{[100 \times (s-c)]}} \right] = 1 \quad (56)$$

$$p_E = \frac{2.08 \times 10^{-5} \times E \times D}{n_y \times B_1 \times 1} \times \left[ \frac{100 \times (s-c)}{D} \right]^{2.5} = 0.262 \text{ МПа} \quad (57)$$

$$p_D = \frac{p_{II}}{\sqrt{1 + \left(\frac{p_{II}}{p_E}\right)^2}} = 0.256 \text{ МПа} \quad (58)$$

При определении расчетной длины обечайки  $l$  или  $L$  длину примыкающего элемента  $l_3$  следует вычислять по формулам для выпуклых днищ:

$H$ — высота выпуклой части днища без учета цилиндрической части, мм;

$$H=0.25 \times D=200 \text{ мм} \quad (59)$$

$$l_3 = \frac{H}{3} = 66.667 \text{ мм} \quad (60)$$

*Обечайки, нагруженные осевым сжимающим усилием.*

Допускаемое осевое сжимающее усилие вычисляют по формуле:

$$F_D = \frac{F_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{F_{\Pi}}{F_E}\right)^2}} \quad (61)$$

где допускаемое осевое сжимающее усилие из условия прочности вычисляют по формуле:

$$F_{\Pi} = \pi \times (D + s - c) \times (s - c) \times \sigma_d = 1.255 \times 10^6 \text{ Н} \quad (62)$$

а допускаемое осевое сжимающее усилие в пределах упругости из условия устойчивости вычисляют по формуле:

$$F_E = \min(F_{E1}, F_{E2}) \quad (63)$$

В случае если  $\frac{1}{D} < 10$  формула (63) принимает вид  $F_E = F_{E1}$

$$F_{E1} = \frac{31.0 \times 10^{-5} \times E \times D^2}{n_y} \left[ \frac{100 \times (s - c)}{D} \right]^{2.5} = 2.03 \times 10^6 \text{ Н} \quad (64)$$

$$F_D = \frac{F_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{F_{\Pi}}{F_E}\right)^2}} = 1.068 \times 10^6 \text{ Н} \quad (65)$$

Гибкость  $\lambda$  вычисляют по формуле:

$$l_{\text{пр}} = 2 \times l = 1.3 \times 10^3 \text{ мм} \quad (66)$$

$$\lambda = \frac{2.83 \times l_{\text{пр}}}{D+s-c} = 4.579 \quad (67)$$

Для рабочих условий допустимое сжимающее усилие можно вычислять по формуле:

$$\varphi_1 = 0.85 \quad \varphi_2 = 1 \quad (68)$$

$$F_{\text{доп}} = \pi \times (D + s - c) \times (s - c) \times \sigma_{\text{д}} \times \min(\varphi_1, \varphi_2) = 1.067 \times 10^6 \text{ Н} \quad (69)$$

Коэффициенты  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  определены по графикам, приведенным на рисунках 7 и 8:

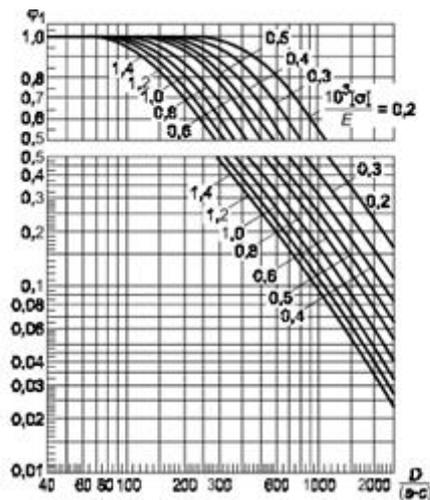


Рисунок 7. График для определения коэффициента  $\varphi_1$

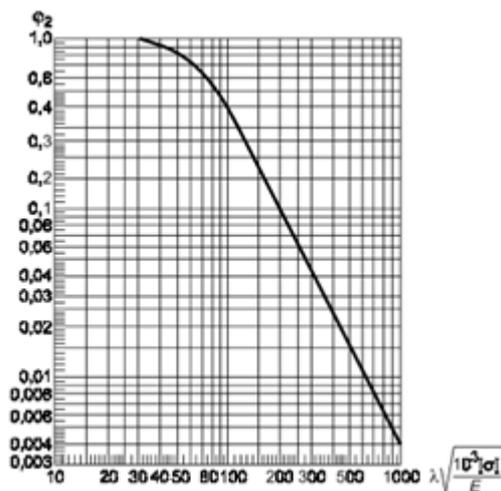


Рисунок 8. График для определения коэффициента  $\phi_2$

$$\frac{D}{(s-c)} = 228.571 \quad (70)$$

$$\frac{10^3 \times \sigma_D}{E} = 0.732 \quad (71)$$

$$\varphi_1 = 0.85 \quad (72)$$

$$\lambda \times \sqrt{\frac{10^3 \times \sigma_D}{E}} = 3.919 \quad (73)$$

$$\varphi_2 = 1 \quad (74)$$

*Обечайки, нагруженные изгибающим моментом.*

Допускаемый изгибающий момент вычисляют по формуле:

$$M_D = \frac{M_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{M_{\Pi}}{M_E}\right)^2}} \quad (75)$$

где допускаемый изгибающий момент из условия прочности вычисляют по формуле:

$$M_{\Pi} = \frac{\pi}{4} \times D \times (D + s - c) \times (s - c) \times \sigma_D = 2.511 \times 10^8 \text{ Н} \times \text{мм} \quad (76)$$

а допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости в пределах упругости вычисляют по формуле:

$$M_E = \frac{8.9 \times 10^{-5} \times E}{n_y} \times D^3 \times \left[ \frac{100 \times (s-c)}{D} \right]^{2.5} = 4.663 \times 10^8 \text{ Н} \times \text{мм} \quad (77)$$

$$M_D = \frac{M_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{M_{\Pi}}{M_E}\right)^2}} = 2.211 \times 10^8 \text{ Н} \times \text{мм} \quad (78)$$

Коэффициент  $\phi_3$  следует определять по графику, приведенному на рисунке 15.

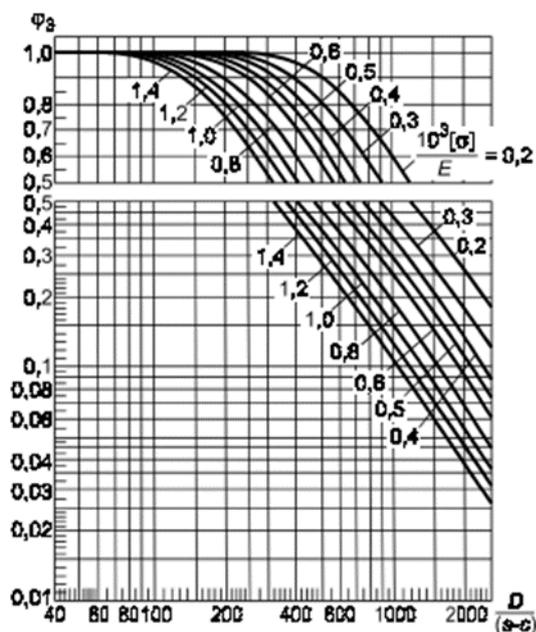


Рисунок 15. График для определения коэффициента  $\phi_3$

$$\frac{10^3 \times \sigma_D}{E} = 0.732 \quad (79)$$

$$\frac{D}{(s-c)} = 228.571 \quad (80)$$

$$\phi_3 = 0.9 \quad (81)$$

Для рабочих условий допускаемый изгибающий момент можно вычислять по формуле:

$$M_{\text{дру}} = \frac{\pi}{4} \times D \times (D + s - c) \times (s - c) \times \sigma_D \times \phi_3 = 2.26 \times 10^8 \text{ Н} \times \text{мм} \quad (82)$$

*Обечайки, нагруженные поперечными усилиями.*

Допускаемое поперечное усилие вычисляют по формуле:

$$Q_D = \frac{Q_{\text{п}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{Q_{\text{п}}}{Q_E}\right)^2}} \quad (83)$$

где допускаемое поперечное усилие из условия прочности вычисляют по формуле:

$$Q_{\pi} = 0.25 \times \sigma_{\text{д}} \times \pi \times D \times (s - c) = 3.125 \times 10^5 \text{ Н} \quad (84)$$

а допускаемое поперечное усилие из условия устойчивости в пределах упругости вычисляют по формуле:

$$Q_{\text{E}} = \frac{2.4 \times E \times (s - c)^2}{n_{\text{y}}} \times \left[ 0.18 + 3.3 \times \frac{D \times (s - c)}{l^2} \right] = 4.797 \times 10^5 \text{ Н} \quad (85)$$

$$Q_{\text{д}} = \frac{Q_{\pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{Q_{\pi}}{Q_{\text{E}}}\right)^2}} = 2.618 \times 10^5 \text{ Н} \quad (86)$$

*Обечайки, работающие под совместным действием наружного давления, осевого сжимающего усилия, изгибающего момента и поперечного усилия.*

Обечайки, работающие под совместным действием нагрузки, проверяют на устойчивость по формуле:

$$\frac{p_{\text{атм}}}{p_{\text{д}}} + \frac{F}{F_{\text{д}}} + \frac{M}{M_{\text{д}}} + \left(\frac{Q}{Q_{\text{д}}}\right)^2 \leq 1 \quad (87)$$

Где  $p$  — расчетное внутреннее избыточное или наружное давление, МПа  
 $p=0.02$  МПа;

$F$  — расчетное осевое растягивающее или сжимающее усилие (без учета нагрузки, возникающей от внутреннего избыточного или наружного давления), Н;

$Q$  — расчетное поперечное усилие,  $Q=0$  Н;

$M$  — расчетный изгибающий момент,  $M=0$  Н · мм;

Равны нулю так как нет аппаратов, которые непосредственно влияют на обечайку и нет ветровой и сейсмической нагрузки.

$G$ — вес сосуда,  $G=4000$  Н;

$$p_{\text{атм}} = (0.01 - p) = 0.08 \text{ МПа} \quad (88)$$

$$S_0 = \pi \times \frac{\left(\frac{D}{10^3}\right)^2}{4} = 0.503 \text{ м}^2 \quad (89)$$

$$F = \frac{p_{\text{атм}} \times 10^6}{s_0} + G = 1.653 \times 10^5 \text{ Н} \quad (90)$$

$$\frac{p_{\text{атм}}}{p_d} + \frac{F}{F_d} + \frac{M}{M_d} + \left(\frac{Q}{Q_d}\right)^2 = 0.467 - \text{условие выполняется.}$$

*Цилиндрические обечайки с кольцами жесткости, нагруженные внутренним избыточным давлением.*

Определение размеров колец жесткости при внутреннем давлении:

Для заданных расчетного давления  $P_{\text{и}}$  толщины стенки  $s$  коэффициент  $K_4$  следует вычислять по формуле:

$\phi$  — коэффициенты прочности сварных швов;  $\phi=1$ ,

$\phi_r$ — коэффициент прочности продольного сварного шва;  $\phi_r=1$ ,

$\phi_t$  — коэффициент прочности кольцевого сварного шва;  $\phi_t=1$ .

$$K_4 = \frac{p \times (D+s-c)}{2 \times \phi \times \sigma_d \times (s-c)} - 1 = -0.984 \quad (91)$$

Если  $K_4 \leq 0$ , то укрепление кольцами жесткости не требуется.

### 3.3.2 Расчет выпуклого днища выпарного аппарата

На рисунке 16 приведена расчетная схема эллиптического днища.

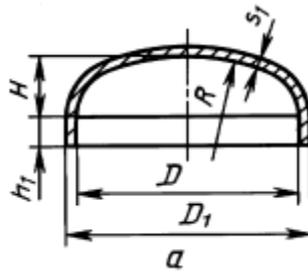


Рисунок 16. Выпуклые днища

Радиус кривизны в вершине днища равен:

$H$  — высота выпуклой части днища (крышки) без учета цилиндрической части, мм,

$R = D$  — для эллиптических днищ с  $H$ , равным  $0,25 D$ .

$R_1 = D = 800$  мм

*Эллиптические днища, нагруженные наружным давлением.*

Толщину стенки предварительно вычисляют по формулам ниже с обязательной последующей проверкой по формуле  $s_1 \geq s_{1p} + c$ .

Для предварительного расчета  $K_3$  принимают равным  $0,9$  для эллиптических днищ  $K_3 = 0,9$ .

$$s_{1p} = \max \left( \frac{K_3 \times R_1}{161} \times \sqrt{\frac{n_y \times p}{10^{-5} \times E}}, \frac{1,2 \times p \times R_1}{2 \times \sigma_d} \right) = 0,703 \text{ мм} \quad (92)$$

Принимаем стандартную толщину для днища исходя из справочных данных  $s_{1p} = 3$  мм.

Максимальная исполнительная толщина стенки из условия прочности:

$$S_1 = \text{ceil}(s_{1p} + c) = 4 \text{ мм} \quad (93)$$

Допускаемое наружное давление вычисляют по формуле:

$$p_{д2} = \frac{p_{п2}}{\sqrt{1 + \left(\frac{p_{п2}}{p_{E2}}\right)^2}} \quad (94)$$

где допускаемое давление из условия прочности:

$$p_{п2} = \frac{2 \times \sigma_d \times (s_1 - c)}{R_1 + 0.5 \times (s_1 - c)} = 1.241 \text{ МПа} \quad (95)$$

а допускаемое давление из условия устойчивости в пределах упругости:

$$p_{E2} = \frac{2.6 \times 10^{-5} \times E}{n_y} \times \left[ \frac{100 \times (s_1 - c)}{K_3 \times R_1} \right]^2 = 0.497 \text{ МПа} \quad (96)$$

$$p_{д2} = \frac{p_{п2}}{\sqrt{1 + \left(\frac{p_{п2}}{p_{E2}}\right)^2}} = 0.461 \text{ МПа} \quad (97)$$

Коэффициент  $K_3$  определяют по графику, приведенному на рисунке 17, или по формулам в зависимости от отношений  $D/s_1 - c$  и  $H/D$ :

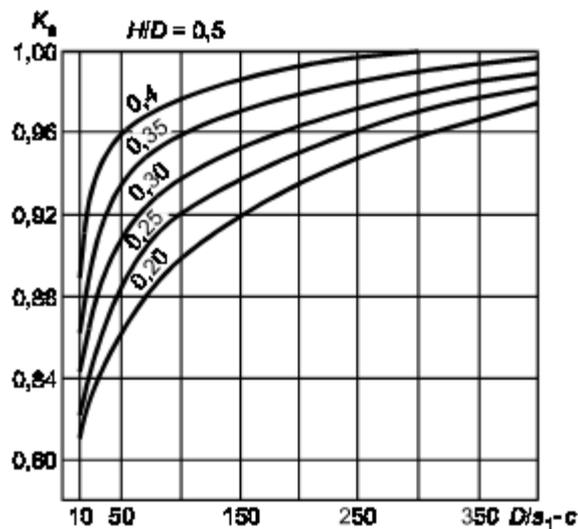


Рисунок 17. График для определения коэффициента  $K_3$

$$\text{По формулам: } x = 10 \times \frac{(s_1 - c)}{D} \times \left( \frac{D}{2 \times H} - \frac{2 \times H}{D} \right) = 0.066 \quad (98)$$

$$K_3 = \frac{1 + (2.5 + 8 \times x) \times x}{1 + (3.0 + 10 \times x) \times x} = 0.961 \quad (99)$$

$$\text{По графику: } \frac{H}{D} = 0.25 \quad (100)$$

$$\frac{D}{s_1} - c = 199.5 \quad K_3 = 0.95 \quad (101)$$

*Условия применения расчетных формул.*

Формулы применимы при выполнении условий для эллиптических днищ:

$$0.002 \leq \frac{s_1 - c}{D} \leq 0.100 \quad \frac{s_1 - c}{D} = 4.375 \times 10^{-3} \quad (102)$$

$$0.2 \leq \frac{H}{D} \leq 0.5 \quad \frac{H}{D} = 0.25 \quad (103)$$

- условия выполняются.

Формулы для не отбортованных днищ и крышек применяют при условии выполнения угловых швов с двусторонним сплошным проваром.

Формулы, применимы при условии, если расчетные температуры не превышают значений, при которых учитывается ползучесть материалов, т. е. при таких температурах, когда допускаемое напряжение определяют только по пределу текучести или временному сопротивлению (пределу прочности).

### 3.3.3 Расчёт плоской отбортованной крышки выпарного аппарата

Расчет производится по ГОСТ 12623-78 [49].

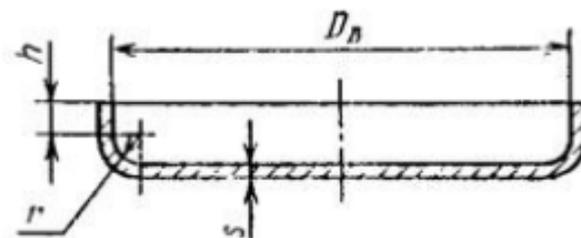


Рисунок 18. Плоская отбортованная крышка

Коэффициент  $K$  в зависимости от конструкции крышек принимают равным  $K=0.35$ .

$K_0$  для крышек, имеющих несколько отверстий, вычисляют по формуле:

где  $d_{вн}=40$  – диаметр отверстия для выхода вторичного пара, мм;

$d_э=60$  – диаметр отверстия электродов, мм.

$$K_0 = \sqrt{\frac{1 - \left(\frac{d_{вн} + 4d_э}{D}\right)^3}{1 - \left(\frac{d_{вн} + 4d_э}{D}\right)}} = 1.146 \quad (104)$$

*Расчёт плоских круглых крышек.*

Толщину плоских круглых днищ и крышек сосудов и аппаратов, работающих под внутренним избыточным или наружным давлением, вычисляют по формулам:

$$S_{1к} = K \times K_0 \times D \times \sqrt{\frac{p}{\phi \times \sigma_d}} = 3.806 \text{ мм} \quad (105)$$

$$S_{ик} = \text{ceil}(S_{1к} + c) = 5 \quad (106)$$

Область применения расчётных формул.

Формулы применимы для расчёта плоских круглых днищ и крышек при условии:

$$\frac{S_{ик} - c}{D} \leq 0.100 \quad \frac{S_{ик} - c}{D} = 5.625 \times 10^{-3} \text{ – условие выполняется} \quad (107)$$

Допускаемое давление на плоское днище или крышку вычисляют по формуле:

$$P_k = \left(\frac{S_{ик} - c}{K \times K_0 \times D}\right)^2 \times (\phi \times \sigma_d) = 0.028 \text{ МПа} \quad (108)$$

Таблица 13 – Размеры плоской отбортованной крышки

Размеры, мм									
$D_E$	$h$	$r$	$s$					$F, \text{ м}^2$	$V, \text{ м}^3$
			4	6	8	10	12		
			Масса, кг						
800	25	30	19.7	29.8	-	-	-	0.62	0.030

### 3.3.4 Расчет укрепления отверстий на крышке, днище и обечайке выпарного аппарата

Расчет по ГОСТ Р 52857.3-2007 «Укрепление отверстий» [58].

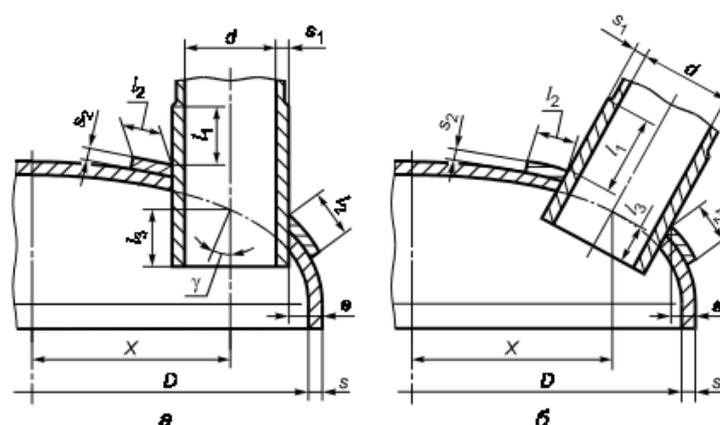


Рисунок 19. Смещённые штуцера на выпуклом днище

При установке наклонных штуцеров с круговым поперечным сечением на цилиндрических обечайках метод расчета укрепления отверстий применим, если угол  $\gamma$  не превышает  $45^\circ$ , а отношение осей овального отверстия  $d_1$  и  $d_2$  удовлетворяет условию.

Для смещенных (нецентральных) штуцеров на эллиптических днищах угол  $\gamma$  не должен превышать  $60^\circ$ .

В краевой зоне эллиптических и полусферических днищ допускается размещение отверстий без ограничений.

Расчет на прочность при внешних статических нагрузках применим для штуцеров, нормально расположенных к поверхности обечаек или днищ.

Внутренний диаметр обечайки,  $D=800$  мм.

Расчетное давление в аппарате,  $p=0.02$  МПа.

Температура среды в аппарате,  $t_c=100$  °С.

Расчетная длина гладкой обечайки,  $l=650$  мм.

Материал аппарата - листовой прокат из стали 12х18н10т.

Срок эксплуатации,  $\tau=5$  лет.

Рабочий объем,  $v_{\text{раб}}=1$  м<sup>3</sup>.

Внутренний диаметр штуцера для входа исходного раствора  $d_{\text{np}}=20$  мм.

Внутренний диаметр штуцера для выхода вторичного пара  $d_{\text{en}}=40$  мм.

Внутренний диаметр штуцера для выхода концентрата  $d_k=20$  мм.

Суммарные прибавки к расчетной толщине стенки обечайки  $c=0.5$  мм.

Исполнительная толщина стенки обечайки  $s=4$  мм.

Модуль продольной упругости стали 12х18н10т при расчетной температуре, МПа;  $E=1.94 \times 10^5$ .

Допускаемое напряжение стали 12Х18Н10Т  $\sigma_d = 142.1$  МПа.

Допускаемое напряжение для материала накладного кольца при расчетной температуре  $\sigma_{\text{д1}} = \sigma_d = 142.1$  МПа.

Допускаемое напряжение для материала внешней части штуцера при расчетной температуре  $\sigma_{\text{д2}} = \sigma_d = 142.1$  МПа.

Допускаемое напряжение для материала внутренней части штуцера при расчетной температуре  $\sigma_{\text{д3}} = \sigma_d = 142.1$  МПа.

Скорость коррозии для материала 12Х18Н10Т,  $P=0.1$  мм/год .

Сумма прибавок к расчетной толщине стенки штуцера:  $c_s=P \cdot \tau =0.5$  мм.

$cs1, cs1', cs1''$ -прибавка на коррозию к расчётной толщине стенке штуцера,  $C_{s1}=0.1$  мм.

*Расчёт укрепления отверстия для входа исходного раствора в цилиндрической обечайке.*

Диаметры укрепляемых элементов вычисляют по формулам для цилиндрической обечайки:  $D_p = D = 800$  мм.

Расчетный диаметр отверстия для штуцера, ось которого лежит в плоскости поперечного сечения цилиндрической или конической обечайки, вычисляют по формуле:

$$d_p = d_{np} + 2 \times c_s = 21 \text{ мм} \quad (109)$$

Коэффициент прочности сварных соединений.

Если ось сварного шва обечайки (днища) удалена от наружной поверхности штуцера на расстояние более чем три толщины укрепляемого элемента  $3s$ , то коэффициент прочности этого сварного соединения при расчете укрепления отверстий следует принимать  $\phi = 1$ .

Если плоскость, проходящая через продольный шов вальцованного штуцера и ось этого штуцера, образует угол  $\psi$  не менее  $60^\circ$  с плоскостью продольного осевого сечения цилиндрической или конической обечайки, то принимают  $\phi_1 = 1$ .

Пределы применения расчетных формул ограничиваются условиями, приведенными в таблице 14.

Таблица 14

Наименование параметра	Условие применения формул для расчета укрепления отверстий в			
	цилиндрических обечайках	конических обечайках, переходах или днищах (крышках)	эллиптических днищах (крышках)	сферических и торо-сферических днищах (крышках)
Отношение диаметров <sup>1)</sup>	$\frac{d_p - 2c_s}{D} \leq 1,0$	$\frac{d_p - 2c_s}{D_k} \leq 1,0$	$\frac{d_p - 2c_s}{D} \leq 0,6$	$\frac{d_p - 2c_s}{D} \leq 0,6$
Отношение толщины стенки обечайки или днища к диаметру	$\frac{s - c}{D} \leq 0,1$	$\frac{s - c}{D_k} \leq \frac{0,1}{\cos \alpha}$	$\frac{s - c}{D} \leq 0,1$	$\frac{s - c}{D} \leq 0,1$
1) При расчете на прочность обечаек и днищ при внешних статических нагрузках на штуцер для цилиндрических и конических обечаек $d/D \leq 0,8$ , для днищ и крышек — $d/D \leq 0,6$ .				

$$\frac{d_{np}}{D} = 0.025 \quad (110)$$

$$\frac{d_p - 2 \times c_s}{D} = 0.025 \quad (111)$$

$$\frac{s-c}{D} = 4.375 \times 10^{-3} \quad (112)$$

– условия применения расчетных формул выполняются.

Расчетную толщину стенки штуцера, нагруженного как внутренним, так и наружным давлением, вычисляют по формуле:

$$s_{p1} = \frac{p \times (d_{np} + 2 \times c_s)}{2 \times \sigma_d \times \phi - p} = 1.478 \times 10^{-3} \text{ мм} \quad (113)$$

Таблица 15

Условный проход (Dy) трубы, в мм	Наружный диаметр (Dh), трубы, в мм
	Бесшовная стальная труба
20	26

Следовательно, исполнительная толщина стенки штуцера  $S_1=3\text{мм}$ .

*Расчетные длины штуцеров.*

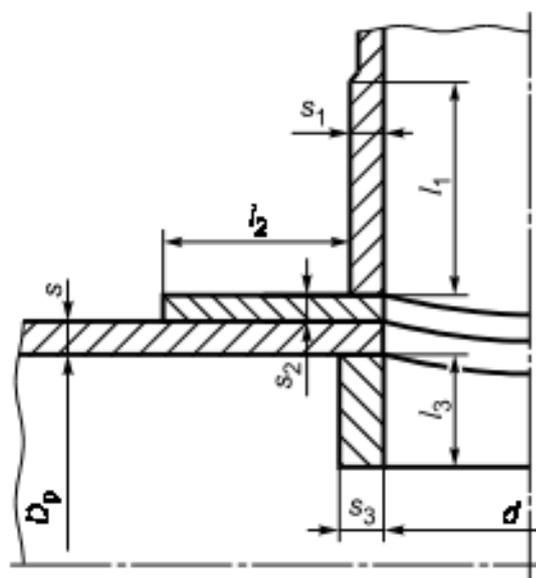


Рисунок 20. Соединение штуцера со стенкой

Расчетные длины внешней и внутренней частей круглого штуцера, участвующие в укреплении отверстий и учитываемые при расчете, вычисляются по формулам:

где  $l_1, l_3$  - исполнительная длина штуцеров, мм;

$l_2$  - исполнительная ширина накладного кольца, мм;

$s_1, s_1', s_1''$  - исполнительные толщины стенок штуцеров, мм;

$s_2, s_2', s_2''$  - исполнительные толщины накладных колец, мм;

$s_3, s_3', s_3''$  - исполнительные толщины внутренних частей штуцеров, мм.

Исполнительная длина внешней части штуцера  $l_1 = 120$  мм.

Исполнительная длина внутренней части штуцера  $l_3 = 2$  мм.

Исполнительную толщину накладного кольца принимаем равной толщине стенки обечайки  $S_2 = s = 4$  мм

Толщина стенки штуцера:

– внешней части  $s_1 = 3$  мм,

– внутренней части  $s_3 = s_1 = 3$  мм.

Расчетная длина внешней части круглого штуцера:

$$l_{1p} = \min \left[ l_1, \sqrt{(d_{\text{ир}} + 2 \times c_s) \times (s_1 - c_s)} \right] = 7.246 \text{ мм} \quad (114)$$

Расчетная длина внутренней части круглого штуцера:

$$l_{3p} = \min \left[ l_3, 0,5 \sqrt{(d_{\text{ир}} + 2 \times c_s) \times (s_3 - c_s)} \right] = 2 \text{ мм} \quad (115)$$

Исполнительная ширина накладного кольца  $l_2 = L_0$  мм:

$$l_{2p} = \min \left[ l_2, \sqrt{D_p \times (s - c)} \right] = 52.915 \text{ мм} \quad (116)$$

Расчетную ширину зоны укрепления в обечайках, переходах и днищах вычисляют по формуле:

$$L_0 = \sqrt{D \times (s - c)} = 52.915 \text{ мм} \quad (117)$$

Отношения допускаемых напряжений:

– для внешней части штуцера

$$x_1 = \min \left( 1, \frac{\sigma_{д1}}{\sigma_d} \right) = 1 \quad (118)$$

– для накладного кольца

$$x_2 = \min \left( 1, \frac{\sigma_{д2}}{\sigma_d} \right) = 1 \quad (119)$$

– для внутренней части штуцера

$$x_3 = \min \left( 1, \frac{\sigma_{д3}}{\sigma_d} \right) = 1 \quad (120)$$

Расчетный диаметр отверстия, не требующий дополнительного укрепления, вычисляют по формуле:

$$d_{op} = 0,4 \times \sqrt{D_p \times (s - c)} = 21.166 \text{ мм} \quad (121)$$

Следовательно, укрепление для данного штуцера не требуется.

Допускаемое внутреннее избыточное давление вычисляют по формуле:

где  $K_2=2$  - для выпуклых днищ

$$p_d = \frac{2 \times K_1 \times (s - c) \times \phi \times \sigma_d}{D_p + (s - c) \times V} \times V \quad (122)$$

$$V = \min \left[ 1, \frac{1 + \frac{l_1 p \times (s_1 - c) \times x_1 + l_2 p \times s_2 \times x_1 + l_3 p \times (s_3 - c_s - c_{s1}) \times x_3}{l p \times (s - c)}}{1 + 0.5 \times \frac{d_p - d_{op}}{l p} + K_1 \times \frac{d_{ип} + 2 \times c_s \times \phi \times l_1 p}{D_p \times \phi_1 \times l p}} \right] = 1 \quad (123)$$

$$p_d = \frac{2 \times K_1 \times (s - c) \times \phi \times \sigma_d}{D_p + (s - c) \times V} \times V = 2.476 \text{ МПа} \quad (124)$$

Укрепление отверстий в сосудах и аппаратах, нагруженных наружным давлением.

Допускаемое наружное давление вычисляют по формуле:

$$p_d = \frac{p_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{p_{\Pi}}{p_E}\right)^2}} \quad (125)$$

где допускаемое давление из условия прочности вычисляют по формуле:

$$p_{\Pi} = \frac{2 \times \sigma_d \times (s - c)}{(s - c) + D} = 1.238 \text{ МПа} \quad (126)$$

а допускаемое давление из условия устойчивости в пределах упругости вычисляют по формуле:

где  $l=850$  - расчетная длина гладкой обечайки, мм;

$E=1,94 \times 10^5$  — модуль продольной упругости стали 12x18н10т при расчетной температуре, МПа;

$$B_1 = \min \left[ 1, 9.45 \times \frac{D}{1} \times \sqrt{\frac{D}{[100 \times (s - c)]}} \right] = 1 \quad (127)$$

$$p_E = \frac{2,08 \times 10^{-5} \times E \times D}{n_y \times B_1 \times 1} \times \left[ \frac{100 \times (s - c)}{D} \right]^{2.5} = 0.262 \text{ МПа} \quad (128)$$

$$p_{\Pi} = \frac{p_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{p_{\Pi}}{p_E}\right)^2}} = 0.256 \text{ МПа} \quad (129)$$

Расчёт укрепления отверстия для выхода вторичного пара в крышке.

Диаметры укрепляемых элементов вычисляют по формулам для эллиптических днищ при  $H = 0,25 D$ :

$x_2 = 0$  - расстояние от центра укрепляемого отверстия до оси эллиптического днища, мм;

$$D_{p2} = 2 \times D \times \sqrt{1 - 3 \times \left(\frac{x_2}{D}\right)^2} = 1.6 \times 10^3 \text{ мм} \quad (130)$$

Расчетный диаметр отверстия для смещенного штуцера на эллиптическом днище вычисляют по формуле:

$$d_{p2} = \frac{d_{вп} + 2 \times c_s}{\sqrt{1 - \left(\frac{2 \times x_2}{D_{p2}}\right)^2}} = 41 \text{ мм} \quad (131)$$

Пределы применения расчетных формул ограничиваются условиями, приведенными в таблице 16.

Таблица 16

Наименование параметра	Условие применения формул для расчета укрепления отверстий в			
	цилиндрических обечайках	конических обечайках, переходах или днищах (крышках)	эллиптических днищах (крышках)	сферических и торо-сферических днищах (крышках)
Отношение диаметров <sup>1)</sup>	$\frac{d_p - 2c_s}{D} \leq 1,0$	$\frac{d_p - 2c_s}{D_k} \leq 1,0$	$\frac{d_p - 2c_s}{D} \leq 0,6$	$\frac{d_p - 2c_s}{D} \leq 0,6$
Отношение толщины стенки обечайки или днища к диаметру	$\frac{s - c}{D} \leq 0,1$	$\frac{s - c}{D_k} \leq \frac{0,1}{\cos \alpha}$	$\frac{s - c}{D} \leq 0,1$	$\frac{s - c}{D} \leq 0,1$
1) При расчете на прочность обечаек и днищ при внешних статических нагрузках на штуцер для цилиндрических и конических обечаек $d/D \leq 0,8$ , для днищ и крышек — $d/D \leq 0,6$ .				

$$\frac{d_{вп}}{D} = 0.05 \quad (132)$$

$$\frac{d_p - 2 \times c_s}{D} = 0.05 \quad (133)$$

$$\frac{s-c}{D} = 4.375 \times 10^{-3} \quad (134)$$

– условия применения расчетных формул выполняются.

Расчетную толщину стенки штуцера, нагруженного как внутренним, так и наружным давлением, вычисляют по формуле:

$$s_{p1} = \frac{p \times (d_{\text{вп}} + 2 \times c_s)}{2 \times \sigma_d \times \phi - p} = 2.885 \times 10^{-3} \text{ мм} \quad (135)$$

Таблица 17

Условный проход(Dy) трубы, в мм	Наружный диаметр(Dh), трубы, в мм
	Бесшовная стальная труба
40	45

Следовательно, исполнительная толщина стенки штуцера  $S_1=2.5$  мм.

Расчетные длины внешней и внутренней частей круглого штуцера, участвующие в укреплении отверстий и учитываемые при расчете, вычисляют по формулам:

Расчетная длина внешней части круглого штуцера:

$$l_{1p} = \min[l_1, \sqrt{(d_{\text{вп}} + 2 \times c_s) \times (s_1 - c_s)}] = 10.124 \text{ мм} \quad (136)$$

Расчетная длина внутренней части круглого штуцера:

$$l_{3p} = \min[l_3, 0.5 \sqrt{(d_{\text{вп}} + 2 \times c_s) \times (s_3 - c_s)}] = 2 \text{ мм} \quad (137)$$

Исполнительная ширина накладного кольца  $l_2=L_0$  мм

$$l_{2p} = \min[l_2, \sqrt{(D_p \times (s - c))}] = 52.915 \text{ мм} \quad (138)$$

Расчетный диаметр отверстия, не требующий дополнительного укрепления, вычисляют по формуле:

$$d_{op} = 0,4 \times \sqrt{D_p \times (s - c)} = 21.166 \text{ мм} \quad (139)$$

Следовательно, для данного штуцера требуется укрепление.

*Расчёт укрепления отверстия для выхода конденсата в днище.*

Расчет укрепления отверстия при внутреннем и внешнем давлениях.

Диаметры укрепляемых элементов вычисляют по формулам для эллиптических днищ при  $H = 0,25 D$ :

$x_3=0$  - расстояние от центра укрепляемого отверстия до оси эллиптического днища, мм;

$$D_{p3} = 2 \times D \times \sqrt{1 - 3 \times \left(\frac{x_3}{D}\right)^2} = 1.6 \times 10^3 \text{ мм} \quad (140)$$

Расчетный диаметр отверстия для смещенного штуцера на эллиптическом днище вычисляют по формуле:

$$d_{p3} = \frac{d_k + 2 \times c_s}{\sqrt{1 - \left(\frac{2 \times x_3}{D_{p3}}\right)^2}} = 21 \text{ мм} \quad (141)$$

Пределы применения расчетных формул ограничиваются условиями, приведенными в таблице 18.

Таблица 18

Наименование параметра	Условие применения формул для расчета укрепления отверстий в			
	цилиндрических обечайках	конических обечайках, переходах или днищах (крышках)	эллиптических днищах (крышках)	сферических и торо-сферических днищах (крышках)
Отношение диаметров <sup>1)</sup>	$\frac{d_p - 2c_s}{D} \leq 1,0$	$\frac{d_p - 2c_s}{D_k} \leq 1,0$	$\frac{d_p - 2c_s}{D} \leq 0,6$	$\frac{d_p - 2c_s}{D} \leq 0,6$
Отношение толщины стенки обечайки или днища к диаметру	$\frac{s - c}{D} \leq 0,1$	$\frac{s - c}{D_k} \leq \frac{0,1}{\cos \alpha}$	$\frac{s - c}{D} \leq 0,1$	$\frac{s - c}{D} \leq 0,1$
1) При расчете на прочность обечаек и днищ при внешних статических нагрузках на штуцер для цилиндрических и конических обечаек $d/D \leq 0,8$ , для днищ и крышек — $d/D \leq 0,6$ .				

$$\frac{d_{пр}}{D} = 0.025 \quad (142)$$

$$\frac{d_p - 2 \times c_s}{D} = 0.025 \quad (143)$$

$$\frac{s - c}{D} = 4.375 \times 10^{-3} \quad (144)$$

– условия применения расчетных формул выполняются.

Расчетную толщину стенки штуцера, нагруженного как внутренним, так и наружным давлением, вычисляют по формуле:

$$S_{p3} = \frac{p \times (d_k + 2 \times c_s)}{2 \times \sigma_d \times \phi - p} = 1.478 \times 10^{-3} \text{ мм} \quad (145)$$

Таблица 19

Условный проход(Dу) трубы, в мм	Наружный диаметр(Dh), трубы, в мм
	Бесшовная стальная труба
20	26

Следовательно, исполнительная толщина стенки штуцера  $S_I = 3$  мм.

Расчетные длины внешней и внутренней частей круглого штуцера, участвующие в укреплении отверстий и учитываемые при расчете, вычисляют по формулам:

Расчетная длина внешней части круглого штуцера:

$$l_{1p3} = \min[l_1, \sqrt{(d_k + 2 \times c_s) \times (s_1 - c_s)}] = 7.246 \text{ мм} \quad (146)$$

Расчетная длина внутренней части круглого штуцера:

$$l_{3p3} = \min[l_3, 0.5\sqrt{(d_k + 2 \times c_s) \times (s_3 - 2c_s)}] = 2 \text{ мм} \quad (147)$$

Расчетную ширину накладного кольца вычисляют по формуле:

$$l_{2p} = \min[l_2, \sqrt{D_p \times (s - c)}] = 52.915 \text{ мм} \quad (148)$$

Расчетный диаметр отверстия, не требующий дополнительного укрепления, вычисляют по формуле:

$$d_{op} = 0,4 \times \sqrt{D_p \times (s - c)} = 21.166 \text{ мм} \quad (149)$$

Следовательно, для данного штуцера укрепление не требуется.

### 3.3.5 Расчет фланцевых соединений

По ГОСТ 28759.1-90 для сосудов и аппаратов, работающих в условиях вакуума с остаточным давлением не ниже 665 Па (5 мм рт. ст.), допускается применять фланцы исполнений 1 -5 ГОСТ 28759.2 на Ру 0,3 Мпа [54].

По ГОСТ 28759.2 «Фланцы сосудов и аппаратов стальные плоские приварные» принимаем фланец исполнения 1 - с гладкой уплотнительной поверхностью. Для стального плоского приварного фланца по ГОСТ 12816-80 подбираем материал изготовления фланцев, болтов, шпилек - сталь 20 [50].

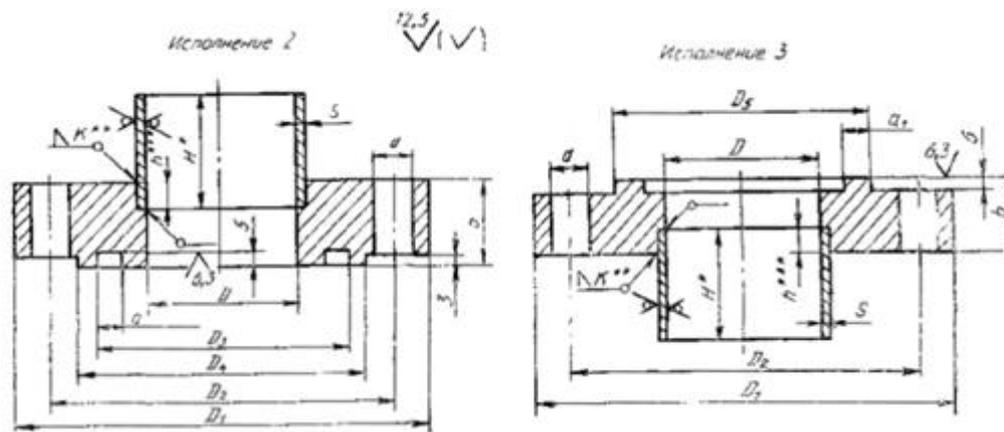


Рисунок 21. Фланец с шипом исполнение 2

Фланец с пазом исполнение 3

Таблица 20 – Размеры фланца

Размеры, мм													
Внутренний диаметр аппарата $D$	$D_1$	$D_2$	$D_3$	$D_4$	$a$	$D_5$	$a_1$	$b$	$s$	$d$	Болты, шпильки		Давление условное, МПа
											Диаметр	Количество	
800	920	880	842	852	14	841	12	25	8	23	M20	28	0,3
								35				32	0,6
	945	905	866	876		865		40	10			40	1,0
								55	12			40	1,6

Таблица 21 – Характеристики прокладок

Прокладки	Диаметр аппарата $D$ , мм	Ширина прокладки $b_p$ , мм
Плоские неметаллические	$D \leq 1000$	12...15
	$1000 < D \leq 2000$	15...25
	$D \geq 2000$	26
Плоские металлические	$D \leq 1000$	10...12
	$D > 1000$	12...15

По ГОСТ 28759.2 толщина резиновой прокладки принимается 3 мм.

Из ГОСТ 17133-83 «Пластины резиновые для изделий, контактирующих с пищевыми продуктами. Технические условия.» [53] выбираем представленные в таблице 22 тип пластины 3, технического рулонного вида, С-средней твердости.

Таблица 22

Тип пластмассы	Рабочая среда	Температурный интервал работоспособности, °С	Степень твердости	Код ОКП резиновой пластины	
				формовой	рулонной
3	Фрукты, овощи, фруктово-ягодные и овощные соки, пюре и консервы, пиво, дрожжевая суспензия, питьевая вода, газированная вода, минеральная вода, квас, сахарные сиропы и другие безалкогольные напитки	От -30 до +70	М	25 3414 3000	25 4314 3000
			С	25 3414 3100	25 4314 3100
			П	25 3414 3200	25 4314 3200
		От -30 до +100	М	25 3414 3300	25 4314 3300
			С	25 3414 3400	25 4314 3400
			П	25 3414 3500	25 4314 3500
		От -30 до +140	М	25 3414 3600	25 4314 3600
			С	25 3414 3700	25 4314 3700

ГОСТ 28759.6-90 "Прокладки из неметаллических материалов. Конструкция и размеры. Технические требования." [55] Исполнение прокладки 2 - для фланцев по ГОСТ 28759.2 исполнения 1.

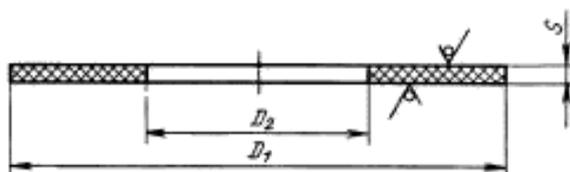


Рисунок 22. Конструкция прокладки

Таблица 23 – Размеры прокладки

Размеры, мм						
Внутренний диаметр аппарата $D$	$D_1$	$D_2$		Давление условное, МПа	Масса, кг	
		Исполнения			Исполнения	
		1	2		1	2
800	841	815	811	0,3	0,135	0,156
				0,6		
	865	839	835	1,0	0,139	0,160
				1,6		
	875	849	—	2,5	0,141	—
	869	831	—	4,0	0,203	—
884	846	—	6,3	0,207	—	

Количество болтов, необходимое для обеспечения герметичности соединения:

$$n \geq \frac{\pi D_b}{t_{ш}}, \quad (150)$$

где  $t_{ш}$  – рекомендуемый шаг расположения болтов в зависимости от давления

Таблица 23 – Рекомендуемый шаг расположения болтов

Давление в аппарате $P$ , МПа	Шаг расположения болтов
до 0,3	$(4,2...5) d_b$

$d_b$  - рекомендуемые диаметры болтов(шпилек),  $d_b = 20$  мм .

$$t_{ш} = 5 \times d_b = 100 \quad (151)$$

Исходные данные:

$D = 800$  мм внутренний диаметр фланца;

$D_H = 920$  мм наружный диаметр фланца;

$D_b = 880$  мм диаметр окружности расположения болтов (шпилек);

$D_{СП} = 835$  мм расчетный диаметр прокладки;

$b_{II} = 15$  мм ширина прокладки;

$h = 25$  мм толщина тарелки фланца;

$h_{II} = 3$  мм толщина прокладки;

$S_0 = 4$  мм толщина обечайки (трубы) плоского фланца;

$d = 20$  мм наружный диаметр болта (шпильки);

$$n_0 = \frac{\pi \times D_b}{t_{ш}} = 27.646 \quad (152)$$

так как количество болтов в обечайке должно быть кратно 4, принимаем число болтов с ГОСТ 28759.2:  $n = 28$ ;

$P = 0.02$  МПа - расчетное давление;

Примечание из ГОСТ 28759.1-90 [54]: расчет фланцевых соединений выполнен по действующим нормативно-техническим документам при расчетной температуре  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  с учетом прибавки на коррозию без учета внешнего изгибающего момента и внешней осевой силы.

$M = 0$  Н\*мм - внешний изгибающий момент;

$F = 0$  Н - внешняя осевая сила

$c_0 = 0.1$  мм - прибавка на коррозию

$t = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$  - расчетная температура стенки корпуса (штуцера) в месте расположения фланцевого соединения

Материал обечаек и фланцев - сталь 12X18H10T.

Материал болтов - сталь 20.

Материал прокладки - вулканизированная (пищевая) резина.

Фланцы с гладкой уплотнительной поверхностью рекомендуется применять для условных давлений среды до 1,6 МПа.

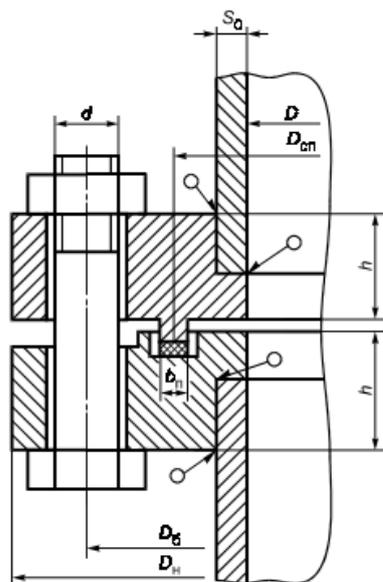


Рисунок 23. Фланцевое соединение с плоским фланцами  
С уплотнительной поверхностью шип-паз

Расчет по ГОСТ Р 52857.4-2007 [59].

*Определение расчетных параметров.*

Расчетные температуры по приложению В:

– расчетная температура неизолированных плоских фланцев

$$t_{\phi} = 0.96 \times t = 96 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (153)$$

– расчетная температура болтов

$$t_{\sigma} = 0.85 \times t = 85 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (154)$$

Допускаемые напряжения для болтов из стали 20:

В рабочем состоянии:

$$t = \begin{pmatrix} 20 \\ 100 \end{pmatrix} \quad (151) \quad \sigma = \begin{pmatrix} 147 \\ 142 \end{pmatrix} \quad (155)$$

$$\sigma_{\text{д.б}} = \text{Floor}(\text{linterp}(t, \sigma, t_{\sigma}), 0.5) = 142.5 \text{ МПа} \quad (156)$$

Модуль упругости для болтов при рабочей температуре:

$$E_{\text{б}} = 2.06 \times 10^5 \text{ МПа}.$$

Допускаемое напряжение для болтов при  $t = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ :  $\sigma_{20\text{б}} = 183.3 \text{ МПа}$ .

Модуль упругости для болтов при температуре испытания  $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$\sigma_{20\text{б}} = 2.15 \times 10^5 \text{ МПа}.$$

Коэффициент линейного расширения стали 20 при  $t = 20\text{-}100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$\alpha_{\sigma} = 11.6 \times 10^{-6} \text{ 1/К}.$$

Допускаемые напряжения для фланцев и обечаек стали 12Х18Н10Т:

$$t = \begin{pmatrix} 20 \\ 100 \end{pmatrix} \quad (154) \quad \sigma = \begin{pmatrix} 184 \\ 174 \end{pmatrix} \quad (157)$$

$$\sigma = \text{Floor}(\text{linterp}(t, \sigma, t_\sigma), 0.5) = 174.5 \text{ МПа} \quad (158)$$

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

$$\sigma_{д,ф} = \eta \times \sigma = 174.5 \text{ МПа} \quad (159)$$

Модуль упругости для стали 12Х18Н10Т при рабочей температуре:  
 $E=2.0 \times 10^5$  МПа.

Допускаемое напряжение для стали 20 при  $t = 20$  °С:  $\sigma_{20}=184$  МПа .

$$\sigma_{д20} = \eta \times \sigma_{20} = 184 \text{ МПа} \quad (160)$$

Модуль упругости для стали 12Х18Н10Т при температуре испытания  
 $20^\circ\text{C}$   $E_{20}=2.05 \times 10^5$  МПа .

Коэффициент линейного расширения стали 12Х18Н10Т при  $t = 20 - 100^\circ\text{C}$   
 $\alpha_\sigma = 16.4 \times 10^{-6}$  1/К .

Эффективная ширина плоской прокладки:

$$b_{\Pi} = 13 \text{ мм}$$

$$b_0 = \begin{cases} b_0 \leftarrow b_{\Pi} & \text{if } b_{\Pi} \leq 15 \\ b_0 \leftarrow \text{Ceil}(3.8 \sqrt{b_{\Pi}}, 1) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (161)$$

$$b_0 = 13 \text{ мм}$$

Характеристики прокладки из резины:

$$m=1.0$$

$$q_{обж} = 4.0 \text{ МПа}$$

$$q_d = 20 \text{ МПа}$$

$$K_{\text{обж}} = 0.09$$

$$E_{II} = 14 \text{ МПа}$$

Усилие, необходимое для смятия прокладки при затяжке:

$$P_{\text{обж}} = 0.5 \times \pi \times D_{\text{сп}} \times b_0 \times q_{\text{обж}} = 6.82 \times 10^4 \text{ Н} \quad (162)$$

Усилие на прокладке в рабочих условиях, необходимое для обеспечения герметичности фланцевого соединения, в случае расчета на действие наружного давления принимают:  $R_{II} = 0 \text{ Н}$ .

Площадь поперечного сечений болтов (шпилек):  $f_b = 225 \text{ мм}^2$ .

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

$$A_b = n \times f_b = 6.3 \times 10^3 \text{ мм}^2 \quad (163)$$

Равнодействующая нагрузка от давления:

$$Q_d = \frac{\pi}{4} \times (D_{\text{сп}})^2 \times P = 1.095 \times 10^4 \text{ Н} \quad (164)$$

Приведенная нагрузка, вызванная воздействием внешней силы и изгибающего момента:

$$Q_{\text{FM}} = \max \left( \left| F + \frac{4 \times |M|}{D_{\text{сп}}} \right|, \left| F - \frac{4 \times |M|}{D_{\text{сп}}} \right| \right) = 0 \text{ Н} \quad (165)$$

Податливость прокладки:

$$y_{\Pi} = \frac{h_{\Pi} \times K_{\text{обж}}}{E_{\Pi} \times \pi \times D_{\text{СП}} \times b_{\Pi}} = 5.655 \times 10^{-7} \text{ мм/Н} \quad (166)$$

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

$$L_{60} = 2 \times h + h_{\Pi} = 53 \text{ мм} \quad (167)$$

Эффективная длина болта (шпильки) при определении податливости:

$$L_6 = \begin{cases} L_{60} + 0.28 \times d & \text{if } bs=1 \\ L_{60} + 0.56 \times d & \text{if } bs=2 \end{cases} \quad L_6 = 58.6 \text{ мм} \quad (168)$$

Податливость болтов:

$$y_6 = \frac{L_6}{E_{206} \times A_6} = 4.367 \times 10^{-8} \text{ мм/Н} \quad (169)$$

Расчетные параметры фланцев:

- параметр длины обечайки

$$l_0 = \sqrt{D \times S_0} = 56.569 \text{ мм} \quad (170)$$

- отношение наружного диаметра тарелки фланца к внутреннему диаметру

$$K = \frac{D_{\text{н}}}{D} = 1.15 \quad (171)$$

- коэффициенты, зависящие от соотношения размеров тарелки фланца

$$\beta_T = \frac{K^2 \times (1 + 8.55 \times \log(K)) - 1}{(1.05 + 1.945 \times K^2) \times (K - 1)} = 1.857 \quad (172)$$

$$\beta_U = \frac{K^2 \times (1 + 8.55 \times \log(K)) - 1}{1.36(K^2 - 1) \times (K - 1)} = 15.334 \quad (173)$$

$$\beta_Y = \frac{1}{(K - 1)} \times \left[ 0.69 + 5.72 \times \frac{K^2 \times \log(K)}{(K^2 - 1)} \right] = 14.092 \quad (174)$$

$$\beta_Z = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = 7.202 \quad (175)$$

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

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

- коэффициент  $\lambda$

$$\lambda = \frac{\beta_F \times h + l_0}{\beta_T \times l_0} + \frac{\beta_V \times h^3}{\beta_U \times l_0 \times (S_0)^2} \quad \lambda = 1.374 \quad (176)$$

*Угловая податливость фланцев.*

Угловая податливость фланца при затяжке:

$$y_\phi = \frac{0.91 \times \beta_V}{E_{20} \times \lambda \times l_0 \times (S_0)^2} \quad y_\phi = 1.963 \times 10^{-9} \quad \frac{1}{\text{Н} \times \text{мм}} \quad (177)$$

Угловая податливость фланца, нагруженного внешним изгибающим моментом:

$$y_{\phi H} = \left( \frac{\pi}{4} \right)^3 \cdot \frac{D_6}{E_{20} \cdot h^3 \cdot D_H} \quad y_{\phi H} = 1.447 \times 10^{-10} \quad \frac{1}{\text{Н} \cdot \text{мм}} \quad (178)$$

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

$$C_F = \max \left[ 1, \sqrt{\frac{\pi \times D_6}{n \times \left( 2 \times d + \frac{6 \times h}{m+0.5} \right)}} \right] = 1 \quad (179)$$

Приведенный диаметр плоского фланца  $D_{\text{пр}} = 800$  мм.

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

$$b = 0.5(D_6 - D_{\text{СП}}) \quad b = 22.5 \text{ мм} \quad (180)$$

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

$$e = 0.5 \times (D_{\text{СП}} - D - S_0) \quad e = 15.5 \text{ мм} \quad (181)$$

Эквивалентная толщина втулки плоских фланцев:

$$S_9 = S_0 = 4 \text{ мм}$$

Коэффициент жесткости фланцевого соединения для приварных встык и плоских фланцев:

$$\gamma = \frac{1}{y_{\text{п}} + y_6 \times \frac{E_{206}}{E_6} + 2 \times b^2 \times y_{\text{ф}} \times \frac{E_{20}}{E}} = 3.777 \times 10^5 \quad (182)$$

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

$$\alpha = 1 - \frac{y_{II} - 2 \times e \times y_{\Phi} \times b}{y_{II} + y_B + 2 \times b^2 \times y_{\Phi}} = 1.349 \quad (183)$$

Коэффициент жесткости фланцевого соединения, нагруженного внешним изгибающим моментом:

$$\alpha_M = \frac{y_{\delta} + 2 \times y_{\Phi H} \times b \times \left( b + e - \frac{e^2}{D_{СП}} \right)}{y_{\delta} + y_{II} \times \left( \frac{D}{D_{СП}} \right)^2 + 2 \times y_{\Phi H} \times b^2} = 0.394 \quad (184)$$

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

$$Q_t = \gamma [2\alpha_{\Phi} \times h \times (t_{\Phi} - 20) - 2\alpha_{\delta} \times h \times (t_{\delta} - 20)] = 9.572 \times 10^4 \text{ Н} \quad (185)$$

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

$$P_{61} = \max \left[ \begin{array}{l} \alpha \times (Q_D + F) + R_{II} + \frac{4 \times \alpha_M \times |M|}{D_{СП}} \\ \alpha \times (Q_D + F) + R_{II} + \frac{4 \times \alpha_M \times |M|}{D_{СП}} - Q_t \end{array} \right] \quad P_{61} = 1.477 \times 10^4 \text{ Н} \quad (186)$$

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

$$P_{62} = \max(P_{обж}, 0.4 \times A_{\delta} \times \sigma_{206}) \quad (187)$$

$$P_{\text{обж}}=7.87 \times 10^4 \text{ Н} \quad P_{\text{б2}}=3.704 \times 10^5 \text{ Н} \quad (188)$$

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

$$P_{\text{бм}}=\max(P_{\text{б1}}, P_{\text{б2}}) \quad P_{\text{бм}}=3.704 \times 10^5 \text{ Н} \quad (189)$$

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

$$P_{\text{бр}}=P_{\text{бм}}+(1-\alpha) \times (Q_{\text{д}}+F)+Q_{\text{т}}+\frac{4 \times (1-\alpha_{\text{м}}) \times |M|}{D_{\text{сп}}}=3.762 \times 10^5 \text{ Н} \quad (190)$$

*Проверка прочности болтов (шпилек) и прокладки.*

Расчетные напряжения в болтах (шпильках):

- при затяжке

$$\sigma_{\text{б1}}=\frac{P_{\text{бм}}}{A_{\text{б}}}=58.8 \text{ МПа} \quad (191)$$

- в рабочих условиях

$$\sigma_{\text{б2}}=\frac{P_{\text{бр}}}{A_{\text{б}}}=59.713 \text{ МПа} \quad (192)$$

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

$$Usl\_1 = \begin{cases} \text{"Условия прочности в при затяжке НЕ выполняются условия я"} & \text{if } \sigma_{61} > \sigma_{206} \\ \text{"Условия прочности в рабочих условиях НЕ выполняются"} & \text{if } \sigma_{62} > \sigma_{д.6} \\ \text{"Условия прочности выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Usl\_1="Условия прочности выполняются"

$$\sigma_{61}=58.8 \text{ МПа} \quad \sigma_{206}=147 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{62}=59.713 \text{ МПа} \quad \sigma_{д.6}=142.5 \text{ МПа}$$

Удельное давление на прокладку

$$q = \frac{\max(P_{6m}, P_{6p})}{\pi \times D_{СП} \times b_{П}} = 9.561 \text{ МПа} \quad (193)$$

*Условие прочности прокладки (проверяется для мягких прокладок).*

$$Usl\_2 = \begin{cases} \text{"Условие прочности прокладки НЕ выполняется"} & \text{if } q > q_d \\ \text{"Условие прочности прокладки выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Usl\_2="Условие прочности прокладки выполняется"

$$q=9.561 \text{ МПа} \quad q_d=20 \text{ МПа}$$

*Расчет фланцев на статическую прочность.*

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

$$M_M = C_F \times P_{6m} \times b \quad M_M = 8.335 \times 10^6 \text{ Н} \times \text{мм} \quad (194)$$

Расчетный изгибающий момент, действующий на фланец в рабочих условиях для приварного встык фланца, плоского фланца и бурта свободного фланца:

$$M_P = C_F \times \max \left[ P_{6p} \times b + (Q_D + Q_{FM}) \times e, |Q_D + Q_{FM}| \times e \right] = 8.634 \times 10^6 \text{ Н} \times \text{мм} \quad (195)$$

Расчетные напряжения во фланце при затяжке:

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

$$\sigma_{0M} = \frac{M_M}{\lambda \times (S_0 - c_0)^2 \times D_{\text{ПР}}} = 498.397 \text{ МПа} \quad (196)$$

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

- радиальное напряжение

$$\sigma_{\text{РМ}} = \frac{1.33 \times \beta_F \times h + l_0}{\lambda \times h^2 \times l_0 \times D} = 18.617 \text{ МПа} \quad (197)$$

- окружное напряжение

$$\sigma_{\text{ТМ}} = \frac{\beta_Y \times M_M}{h^2 \times D} = 100.838 \text{ МПа} \quad (198)$$

Расчетные напряжения во фланце в рабочих условиях:

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

$$\sigma_{0p} = \frac{M_p}{\lambda \times (S_0 - c_0)^2 \times D_{\text{ПР}}} = 516.288 \text{ МПа} \quad (199)$$

- максимальное меридиональные мембранные напряжения в обечайке плоского фланца:

$$\sigma_{0mp} = \max \left[ \frac{Q_D + F + \frac{4|M|}{D_{СП}}}{\pi \times (S_0 + D) \times (S_0 - c_0)}, \frac{Q_D + F - \frac{4|M|}{D_{СП}}}{\pi \times (S_0 + D) \times (S_0 - c_0)} \right] = 1.112 \text{ МПа} \quad (200)$$

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

- радиальное напряжение

$$\sigma_{Rp} = \frac{1.33 \times \beta_F \times h + l_0}{\lambda \times h^2 \times l_0 \times D} = 19.285 \text{ МПа} \quad (201)$$

- окружное напряжение

$$\sigma_{Tp} = \frac{\beta_Y \times M_p}{h^2 \times D} - \beta_Z \times \sigma_{Rp} = 104.458 \text{ МПа} \quad (202)$$

где  $[\sigma]_R$ — допускаемое значение суммарных общих и местных условных упругих мембранных и изгибных напряжений в соответствии с пунктом 8.10 ГОСТ Р 52857.1, МПа:

$$\sigma_R = 3 \times \sigma_{д.ф} = 523.5 \text{ МПа} \quad (203)$$

$K_T = 1.3$  при расчете с учетом стесненности температурных деформаций.  
При расчете без учета стесненности температурных деформаций  $K_T = 1$ .

Для плоских фланцев при  $D \geq 400$  мм допускается принимать:

$$\sigma_0 = \frac{1.3}{K_T} \times \sigma_R = 523.5 \text{ МПа} \quad (204)$$

*Проверка условий статической прочности фланцев.*

$$\sigma_{P_{\max}} = \max \left( \left( \left( \left| \sigma_{0P} - \sigma_{0MP} + \sigma_{Tp} \right| \right) \right) \right) \quad (205)$$

$$\sigma_{3_{\max}} = \max(|\sigma_{0M} + \sigma_{Rm}|, |\sigma_{0M} + \sigma_{Tm}|) \quad (206)$$

PR\_1= “условия статической прочности при затяжке и в рабочих условиях выполняются”

PR\_3= “Условия статической прочности НЕ выполняются”

$$Usl_3 = \begin{cases} PR_1 & \text{if } \sigma_{3_{\max}} \leq K_T \cdot \sigma_0 \wedge \sigma_{P_{\max}} \leq K_T \cdot \sigma_0 \\ PR_3 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Usl\_3 = "Условия статической прочности при затяжке и в рабочих условиях выполняются"

$$\sigma_{3_{\max}} = 599.234 \text{ МПа} \quad K_T \times \sigma_0 = 680.55 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{P_{\max}} = 619.634 \text{ МПа} \quad K_T \times \sigma_0 = 680.55 \text{ МПа}$$

Проверка углов поворота фланцев.

Допустимый угол поворота приварного встык фланца:

$$[\Theta] = 0,006 \text{ при } D \leq 400 \text{ мм,}$$

$$[\Theta] = 0,013 \text{ при } D > 2000 \text{ мм.}$$

При значениях  $400 \text{ мм} < D \leq 2000 \text{ мм}$  допустимый угол поворота  $[\Theta]$  определяют с помощью линейной интерполяции.

$$\text{при } D=800 \text{ мм } \Theta=0.0095$$

Допустимый угол поворота плоского фланца  $\Theta_D=0.013$

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

Usl\_P= "Условие поворота плоского фланца выполняется"

### 3.3.6 Расчёт веса выпарного аппарата

Установка аппаратов на фундаменты или специальные несущие конструкции осуществляется с помощью опор. Для того, чтобы выбрать опору, необходимо рассчитать вес всего аппарата в рабочем состоянии.

Вес аппарата:

- 1) днище по ГОСТ 6533-78 [47]

$$m_d = 24 \text{ кг}$$

- 2) плоская крышка по ГОСТ 12622-78

$$m_k = 29,8 \text{ кг}$$

- 3) обечайка

$$V = l * D * \pi * S_R = 0,65 * 0,8 * 3,14 * 0,004 = 0,007 \text{ м}^3 \quad (207)$$

$$m_{об} = \rho * V = 7920 * 0,007 = 55,5 \text{ кг} \quad (208)$$

$\rho$  – удельный вес стали 12Х18Н10Т, кг/м<sup>3</sup>.

- 4) штуцера

$$m_{шт} = 2 * 0,2 + 0,32 = 0,72 \text{ кг} \quad (209)$$

- 5) фланцы

$$m_{фл} = 31,6 \text{ кг} \quad (210)$$

- 6) электроды

$$\rho_э = 2,2 \text{ гр/см}^3 \quad (211)$$

$$V_э = 0,1 * 0,5 * 0,01 = 0,0005 \text{ м}^3 = 500 \text{ см}^3 \quad (213)$$

$$m_э = 4 * \rho_э * V_э = 4 * 2,2 * 500 = 4400 \text{ г} = 4,4 \text{ кг} \quad (214)$$

7) Масса воды в полностью заполненном аппарате:

$$m_{H_2O} = \frac{\pi * D^2 * l * \rho_{H_2O}}{4} = \frac{3,14 * 0,8^2 * 0,65 * 1000}{4} = 326,6 \text{ кг} \quad (215)$$

8) Масса яблочного сока в заполненном аппарате:

$$m_{\text{яс}} = \frac{\pi * D^2 * l * \rho_{\text{яс}}}{4} = \frac{3,14 * 0,8^2 * 0,65 * 1446,12}{4} = 472,3 \text{ кг} \quad (216)$$

Общая масса аппарата, заполненного водой:

$$m_{\text{общ}} = 24 + 29,8 + 55,5 + 0,72 + 31,6 + 4,4 + 326,6 = 472,7 \text{ кг} \quad (217)$$

Общая масса аппарата, заполненного соком:

$$m_{\text{общ}2} = 24 + 29,8 + 55,5 + 0,72 + 31,6 + 4,4 + 472,3 = 618,4 \text{ кг} \quad (218)$$

Вес аппарата, заполненного водой:

$$P = m_{\text{общ}} * g = 472,3 * 9,81 = 4637,2 \approx 4700 \text{ Н} \quad (219)$$

Вес аппарата, заполненного соком:

$$P = m_{\text{общ}2} * g = 618,4 * 9,81 = 6065,8 \approx 6100 \text{ Н} \quad (220)$$

Принимаем число опорных лап  $n_{\text{л}}=4$ , определяем нагрузку, приходящуюся на одну опорную лапу:

$$P_{л} = \frac{P}{n_{л}} = \frac{6100}{4} = 1525 \text{ Н} \quad (221)$$

Принимаем опорные лапы на нагрузку  $P_0=4000 \text{ Н}$ , тип 1 (штампованные)  
[3; табл. 29.2, стр.673].

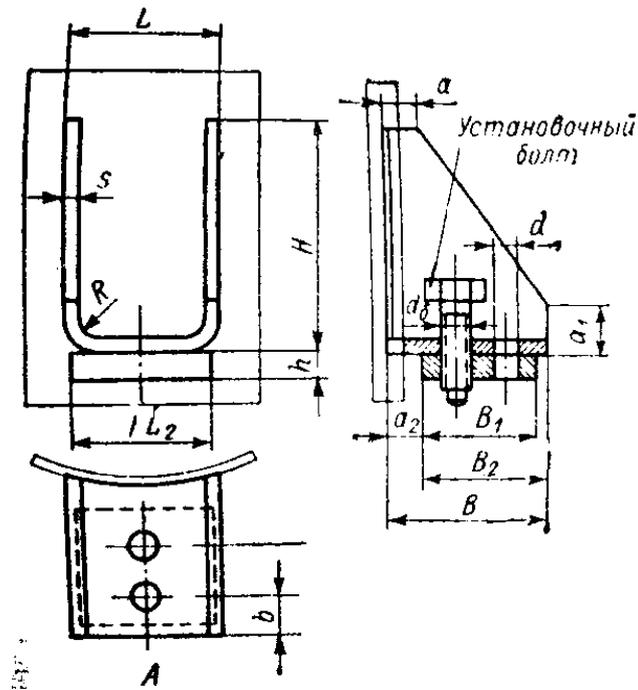


Рисунок 24. Опора

Условное обозначение опоры типа 1, исполнения А на нагрузку 4000 Н:  
«опора ОВ-1-А-4000 ОН 26-01-69-68».

Таблица 24 – Размеры опор

P, Н	L	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	B	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	b	b <sub>1</sub>	H	h	S	a	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	R	d	d <sub>6</sub>	Масса кг	Подкладной лист		
	Мм																		s <sub>1</sub>	L <sub>3</sub>	H <sub>1</sub>
																		мм			
0,4	85	95	80	95	65	70	22	50	140	10	5	15	25	25	8	12	M10	1,08	6	125	200

### 3.3.7 Расчёт опор выпарного аппарата

Расчет по ГОСТ Р 52857.5-2007 «Обечайки и днища от воздействия опорных нагрузок» [60].

Длина обечайки,  $l=650$  мм.

Внутренний (расчетный) диаметр,  $D=800$  мм.

Рабочее давление,  $p=0.02$  МПа.

Температура среды в аппарате,  $t_{cp} = 100$  °С .

Материал аппарата - сортовой прокат из стали 12х18н10т.

Скорость коррозии для материала 12х18н10т,  $P=0,1$  мм/год.

Срок эксплуатации,  $mv=5$  лет.

$c=P \times mv=0,5$  - сумма прибавок к расчетной толщине стенки, мм.

Высота выпуклой части днища без учета цилиндрической части,  $H=200$ мм.

Допускаемое напряжение  $\sigma_d = 142,1$  МПа.

Расчетное осевое растягивающее или сжимающее усилие (сжимающее усилие со знаком минус), действующее на полную площадь сечения обечайки в направлении оси цилиндрической или конической обечайки (без учета нагрузки, возникающей от внутреннего избыточного или наружного давления)  $F_d=1.068 \cdot 10^6$  Н.

Расчетный изгибающий момент, действующий на обечайку в сечении, где расположены опорные узлы, в условиях эксплуатации или испытания (монтажа),  $M=2.26 \cdot 10^8$  Н·мм.

Исполнительная толщина стенки обечайки,  $s=4$  мм.

Исполнительная толщина стенки выпуклого днища,  $s_1=4$  мм.

$G$  - вес сосуда,  $G=4000$  Н.

Расстояние между средними линиями ребер,  $g=85$  мм;

высота опорной лапы,  $h_1=140$  мм;

ширина подкладного листа опоры,  $b_2=125$  мм;

длина подкладного листа опоры,  $b_3=200$  мм;

ширина основной плиты опорной лапы,  $b_4=80$  мм;

исполнительная толщина подкладного листа,  $s_2=4$  мм;

число опор  $n=4$ ;

длина опорной лапы,  $l_1=95$  мм;

Опорные лапы присоединены к цилиндрическим обечайкам.

Направление действия усилия принимают параллельно оси обечайки.

Расчетные формулы применяют при условиях:

$$g \geq 0.2 \times h_1 \quad g = 85 \quad 0.2 \times h_1 = 28 - \text{условие выполняется} \quad (222)$$

$$0.04 \leq \frac{h_1}{D_p} \leq 0.5 \quad \frac{h_1}{D_p} = 0.175 - \text{условие выполняется} \quad (223)$$

$$0.04 \leq \frac{b_4}{D_p} \leq 0.5 \quad \frac{b_4}{D_p} = 0.1 - \text{условие выполняется} \quad (224)$$

$$0.04 \leq \frac{b_3}{D_p} \leq 0.8 \quad \frac{b_3}{D_p} = 0.25 - \text{условие выполняется} \quad (225)$$

$$b_2 \geq 0.6 \times h_3 \quad b_2 = 125 \quad 0.6 \times h_3 = 120 - \text{условие выполняется} \quad (226)$$

$$b_3 \leq 1.5 \times h_1 \quad b_3 = 200 \quad 1.5 \times h_1 = 210 - \text{условие выполняется} \quad (227)$$

$$s_2 \geq s \quad s_2 = 10 \quad s = 5 - \text{условие выполняется} \quad (228)$$

Усилие, действующее на опорную лапу:

$$e_{10} = \frac{5 \times l_1}{6} = 79.167 \text{ мм} \quad (229)$$

При  $n=4$ , обеспечивающих равномерное распределение нагрузки между всеми опорными лапами усилие вычисляют по формуле:

$$F_{l0} = \frac{G}{4} + \frac{M}{D+2 \times (e_{l0}+s+s_2)} = 2.335 \times 10^5 \text{ Н} \quad (230)$$

$K_1$  вычисляют при  $\vartheta_1=0,4$ ;  $\vartheta_2$  — по формуле (2), где  $\sigma_m$  равно  $\sigma_{my}$  — по формуле:

$$K_1 = \frac{1 \times \vartheta_2^2}{\left(\frac{1}{3} \times \vartheta_1 \times \vartheta_2\right) \times \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \times \vartheta_2\right)^2 + (1 - \vartheta_2^2) \times \vartheta_1^2}} = 1.159 \quad (231)$$

$$\sigma_i = K_1 \times K_{2p} = 1.449 \quad (232)$$

Коэффициент  $K_8$  вычисляют по формуле:

$$x = \ln \left[ \frac{D_p}{2 \times (s-c)} \right] \quad (226) \quad y = \ln \left( \frac{h_1}{D_p} \right) \quad (227) \quad y_1 = \ln \left( \frac{b_3}{D_p} \right) \quad (233)$$

$$K_8 = \min(\exp(-49.919 - 39.113 \times x - 107.01 \times y_1 - 1.693 \times x^2 - 11.920 \times x \times y_1 - 39.276 \times y_1 + 0.237 \times x^3 + 1.608 \times x^2 \times y_1 + 2.761 \times x \times y_1^2 - 3.854 \times y_1^3) \times 10^{-2}, \exp(-5.964 - 11.395 \times x - 18.984 \times y_1 - 2.413 \times x^2 - 7.286 \times x \times y - 2.042 \times y^2 + 0.1322 \times x^3 + 0.4833 \times x^2 \times y + 0.8469 \times x \times y^2 + 1.428 \times y^3) \times 10^{-2}) = 1.391 \times 10^{-14} \quad (234)$$

Проверка несущей способности обечайки:

$$F_{1od} = \frac{\sigma_i \times b_3 + (s-c)^2}{K_8 \times (e_1 + s_2)} = 5.568 \times 10^{13} \text{ Н} \quad (235)$$

Несущая способность обечайки в месте приварки опорной лапы с подкладным листом должна удовлетворять условию:  $F_{1o} \leq F_{1od}$  - условие выполняется.

### 3.3.8 Подбор изоляторов для крепления электродов

Корундовые материалы с содержанием окиси алюминия Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 94,2-99,7% применяются в различных областях промышленности. Благодаря своим свойствам керамика используется в качестве высоковольтных и высокочастотных изоляторов, токовых вводов, оболочек приборов, подложек электросопротивлений (табл. 25).

Высокотемпературные (до 400°C), металлокерамические, проходные изоляторы используются для высокого вакуума. Соединение керамики с металлом (ковар) произведено при помощи пайки специальным, серебряным припоем.

Таблица 25 – Свойства материалов

Параметр	ВК 95	ВК 94-1
Содержание оксида алюминия в %	95,3	94,4
Содержание оксида магния в %	1,2	-
Содержание оксида хрома в %	-	0,49
Объемная масса г/см <sup>3</sup>	3,67	3,65
Цвет	белый	красный
Водопоглощение, %	0,02	0,02
Содержание оксида марганца,%	-	2,35
Коэффициент линейного теплового расширения (20...1000 °C) 10 <sup>-6</sup> К <sup>-1</sup>	10	11

Основные свойства деталей из керамики:

- высокая механическая прочность;
- хорошая теплопроводность и теплостойкость;
- высокое электросопротивление;
- высокая электрическая прочность;
- низкие диэлектрические потери в широком спектре частот и температур.

Материал производится из высококачественного глиноземного сырья. Они зарекомендовали себя как выдающиеся керамические материалы за счет высокой твердости, устойчивости к истиранию, отличной коррозионной стойкости и великолепного качества поверхности.

Материалы имеют высокую устойчивость к истиранию (абразивостойкость).

Принимаем изоляторы по ГОСТ 5862-79 «Изоляторы и покрышки керамические на напряжение свыше 1000 В [46]. Общие технические условия». Изолятор изготавливается по заказу с требуемыми по расчету размерами и конфигурацией.

## Глава 4. Расчет теплообменного аппарата типа холодильник конденсатор

Исходные данные:

Производительность по выпариваемой воде 0,0694 кг/с.

Пары поступают в аппарат при температуре конденсации и  $P = 0,02$  МПа, конденсат отводится при температуре 40 °С.

Температура охлаждающей воды:

- на входе 14 °С
- на выходе 26 °С.

Вторичный пар подаётся в межтрубное пространство. Охлаждающая вода подаётся в трубное пространство.

*Перевод некоторых величин*

Расход смеси (вторичного пара):  $G_{см} = 0,0694$  кг/с

Давление:  $P = 0,02$  МПа = 150 мм рт ст = 0,2 бар

### 4.1 Тепловой и материальный расчеты

Целью тепловых расчетов является определение требуемой поверхности теплопередачи.

Таблица 26 - Свойства насыщенного водяного пара от 0 до 100 бар

Давление насыщенного	Температура кипения (конденсации).	Удельный объем = объемная масса (обратная плотность)	Плотность. (пара)	Удельная энтальпия жидкой воды		Удельная энтальпия пара		Удельная теплота парообразования (конденсации)		Теплоемкость пара	Динамическая вязкость пара
				кДж/кг	кКал/кг	кДж/кг	кКал/кг	кДж/кг	кКал/кг		
бар	°С	м <sup>3</sup> /кг	кг/м <sup>3</sup>	кДж/кг	кКал/кг	кДж/кг	кКал/кг	кДж/кг	кКал/кг	кДж/(кг*°С)	кг/(м*с)
0.2	60.09	7.650	0.131	251.46	60.06	2609.86	623.35	2358.40	563.30	1.9156	0.000011

Из таблицы 1 видим, что  $T_{\text{конд}} = 60,09 \text{ }^\circ\text{C}$ .

*Уравнения теплового баланса*

Тепловая нагрузка при конденсации перегретых паров с охлаждением конденсата:

$$Q_{\text{см}}^I = G_{\text{см}} * r_{\text{см}} = 0,0694 * 2358400 = 163673 \text{ Дж} \quad (236)$$

$r_{\text{см}}$  – теплота конденсации исходной смеси при температуре  $T_{\text{конд}} = 60,09 \text{ }^\circ\text{C}$ , кДж/кг, [табл. XLV, стр. 541; 1]

$$r_{\text{см}} = 2358,40 \text{ кДж/кг} \quad (237)$$

Тепловая нагрузка требуемая на охлаждение:

$$Q_{\text{см}}^{II} = G_{\text{см}} * C_{\text{см}} * (T_{\text{конд}} - T_{\text{к}}) = 0,0694 * 1915,6 * (60,09 - 40) = 2670,8 \text{ Дж} \quad (238)$$

$C_{\text{см}}$  – удельная теплоемкость смеси,  $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} * \text{К}}$  [табл. 1]

$$C_{\text{см}} = 1915,6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} * \text{К}} \quad (239)$$

Тепловой баланс:

$$Q_{\text{отд}} = Q_{\text{в}} = Q_{\text{см}}^I + Q_{\text{см}}^{II} \quad (240)$$

Тепло, принятое водой:

$$Q_{\text{в}} = G_{\text{в}} * C_{\text{в}} * (t_{\text{к}} - t_{\text{н}}) \Rightarrow \quad (241)$$

Расход охлаждающей воды:

$$G_B = \frac{Q_{CM}^I + Q_{CM}^{II}}{C_B * (t_K - t_H)} = \frac{163673 + 2670,8}{4180 * (26 - 14)} = 3,32 \text{ кг/с} \quad (242)$$

где  $C_B$  - удельная теплоемкость воды, Дж/кг·К (в расчетах принимаем равной 4180).

$$Q_B = 3,32 * 4180 * (26 - 14) = 166531,2 \text{ Дж} \quad (243)$$

$$Q_{CM}^I + Q_{CM}^{II} = 163673 + 2670,8 = 166343,8 \text{ Дж} \Rightarrow$$

$$Q_{ПОТ} = 166531,2 - 166343,8 = 187,4 \text{ Дж} \quad (244)$$

Температура смеси между зонами конденсации и охлаждения определяется:

$$t_x = \frac{Q_{CM}^{II}}{G_B * C_B} + t_H = \frac{2670,8}{3,32 * 4180} + 14 = 14,2 \text{ °C} \quad (245)$$

Средняя разность температур при противотоке теплоносителей:

$$+60,09\text{°C} \rightarrow +40\text{°C}$$

$$\underline{+26\text{°C} \rightarrow +14\text{°C}}$$

$$\Delta t_6 = 34,09\text{°C} \quad \Delta t_M = 26\text{°C}$$

$$\Delta t_{CP} = \frac{\Delta t_6 - \Delta t_M}{\ln\left(\frac{\Delta t_6}{\Delta t_M}\right)} = \frac{34,09 - 26}{\ln\left(\frac{34,09}{26}\right)} = 29,9\text{°C} \quad (246)$$

Для ориентировочного выбора аппарата из уравнения теплопередачи рассчитывается поверхность теплообмена аппарата:

$$F_{OP} = \frac{Q}{K * \Delta t_{CP}} \quad (247)$$

где  $K$  – коэффициент теплопередачи,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 * \text{К}}$ ;

$\Delta t_{CP}$  – средний температурный напор, К.

На основании практических данных для конденсатора-холодильника принимаем средний коэффициент теплопередачи при вынужденном движении

[табл. 4.8, стр. 172; 1]:  $K_{op} = 2150 \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$

$$F_{op} = \frac{166531,2}{2150 \cdot 29,9} = 2,6 \text{ м}^2 \quad (248)$$

По полученным числовым значениям поверхности теплообмена по ГОСТ 14245-79 [52] выбираем теплообменный кожухотрубчатый аппарат с U-образными трубами (с диаметром труб  $\phi = 20 \times 2 \text{ мм}$ ) с параметрами: внутренний диаметр кожуха  $D=400 \text{ мм}$ , длина труб  $l=3,0 \text{ м}$ , число труб расположенных по вершинам квадрата  $n=140$ , условное давление  $P_y = 1,6 \text{ МПа}$ .

Таблица 27 - Основные характеристики теплообменников ТУ

Диаметр кожуха		Давление $P_y$ , МПа (кгс/см <sup>2</sup> )	$L^*$	Длина трубы $l$	$l_0$	$l_1^*$	$l_2$	Размещение перегородок		$H$	$H/2$	$h$	$D_y$ штуцеров	$A$	$A_1$
наружный	внутренний							$l_3$	Число						
426	400	1,6 и 2,5 (16 и 25)	3940	3000	1500	310	400	200	10	714	357	352	100	500	2500
			6940	6000	3000		1100								26
		4,0 (40)	3960	3000	1500	400	10		26	810	405				2500
			6960	6000	3000	1100									26
		6,4 (64)	4010	3000	1500	280	10		26	810	405				2500
			7010	6000	3000	1100									26

Находим критерии, которые учитывают влияние физических свойств теплоносителя и особенности гидромеханики его движения на интенсивность теплоотдачи.

Находим критерий Рейнольдса:

$$Re = \frac{\omega \cdot d_{тр\text{ вн}} \cdot \rho_B}{\mu_B} \quad (249)$$

где диаметр труб  $\phi = 20 \times 2 \text{ мм} \Rightarrow d_{тр\text{ вн}} = 18 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ;

$\mu_B$  – динамический коэффициент вязкости воды, Па\*с,

$\rho_B$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>, [табл. XXXIX, стр. 537; 1]

при  $T_{\text{конд}} = 60,09$  °С  $\mu_B = 0,47$  мПа \* с  $\rho_B = 983$  кг/м<sup>3</sup>

$\omega$  – средняя скорость потока, м/с.

Из уравнения объемного расхода жидкости:  $V = \omega S \Rightarrow \omega = V/S$

$$\omega = \frac{G_{\text{см}}}{\rho * S} = \frac{G_{\text{см}} * 4}{\rho * \pi * d^2} = \frac{0,0694 * 4}{983 * 3,14 * (18 * 10^{-3})^2} = 0,2 \text{ м/с} \quad (250)$$

$$Re = \frac{0,2 * 18 * 10^{-3} * 983}{0,47 * 10^{-3}} = 7529 \quad (251)$$

$2300 < Re' < 10000$  следовательно, в трубном пространстве будет обеспечен переходный режим теплоносителя.

Критерий Грасгофа:  $Gr = \frac{g * d^3}{\nu^2} * \beta * \Delta t \quad (252)$

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

$d$  – определяющий геометрический размер, м

$\nu$  – кинематический коэффициент вязкости рассчитываемый по формуле:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{1,2 * 10^{-3}}{999} = 1,2 * 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с} \quad (253)$$

$\mu$  – динамический коэффициент вязкости воды, Па\*с,

$\rho$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>, [табл. XXXIX, стр. 537; 1]

при  $t_H = 14$  °С  $\mu = 1,2$  мПа \* с  $\rho = 999$  кг/м<sup>3</sup>

$\beta$  – коэффициент объемного расширения, К<sup>-1</sup>, [табл. XXXIII, стр. 531; 1]

$\beta = 0,129 * 10^{-3} \text{ К}^{-1}$ .

$\Delta t$  – разность температур стенки и жидкости, °С, рассчитываемая по формуле:

$$\Delta t = \frac{t_1 + t_2}{2} \quad (254)$$

$t_2$  – температура охлаждающей воды, °C

$$t_2 = \frac{t_H + t_K}{2} = \frac{14 + 26}{2} = 20 \text{ °C} \quad (255)$$

$t_1$  – температура вторичного пара, °C

$$t_1 = t_2 + \Delta t_{cp} = 20 + 29,9 = 49,9 \text{ °C} \quad (256)$$

$$\Delta t = \frac{49,9 + 20}{2} = 35 \text{ °C} \quad (257)$$

$$Gr = \frac{9,81 * (18 * 10^{-3})^3}{(1,2 * 10^{-6})^2} * 0,129 * 10^{-3} * 35 = 39730500 \quad (258)$$

Критерий Прандтля:

$$Pr = \frac{c_B * \mu}{\lambda_{в ст}} = \frac{4180 * 1,2 * 10^{-3}}{58,5 * 10^{-2}} = 8,6 \quad (259)$$

где  $\lambda_{в ст}$  - коэффициент теплопроводности воды, Вт/м·К, [табл. XXXIX, стр. 537; 1] при  $t_H = 14 \text{ °C}$   $\lambda_{в ст} = 58,5 * 10^{-2}$  Вт/м·К

Находим произведение критериев Грасгофа и Прандтля и по таблице 4.4 [стр. 155; 1] подбираем формулы для дальнейших расчетов.

$$Gr * Pr = 39730500 * 8,6 = 341682300 \quad (260)$$

Для вертикального расположения труб ( $Re > 3500$ ) рассчитываем критерий Нуссельта:

$$Nu = 0,022 * Re^{0,8} * Pr^{0,4} * \left( \frac{\mu}{\mu_{ст}} \right) = 0,022 * 7529^{0,8} * 8,6^{0,4} * \left( \frac{1,2 * 10^{-3}}{730,5 * 10^{-6}} \right) = 1079 \quad (261)$$

где  $\mu_{ст}$  – динамический коэффициент вязкости жидкости при температуре стенки рубашки или змеевика, [табл. XXXIX, стр. 537; 1] при  $\Delta t = 35 \text{ }^\circ\text{C}$   $\mu_{ст} = 730,5 * 10^{-6} \text{ Па} * \text{с}$

Из критерия Нуссельта найдем коэффициент теплоотдачи:

$$Nu = \frac{\alpha^I_{вод} * d_{тр\text{ вн}}}{\lambda_{в\text{ ст}}} \quad (262)$$

Определение коэффициента теплоотдачи от стенки к воде:

$$\alpha^I_{вод} = \frac{Nu * \lambda_{в}}{d_{тр\text{ вн}}} = \frac{1079 * 58,5 * 10^{-2}}{18 * 10^{-3}} = 35068 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К} \quad (263)$$

Определим коэффициент теплопередачи.

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha^I_{см}} + \frac{1}{\alpha^I_{вод}} + \sum R} \quad (264)$$

Считаем, что со стороны смеси накипь не образуется. Коэффициент теплопроводности стали  $\lambda_{ст} = 46,5 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$  [табл. XXVIII, стр. 529; 1], коэффициент теплопроводности накипи  $\lambda_{н} = 2 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ .

$$\sum R = \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + r_{1загр} + r_{2загр} = \frac{2 * 10^{-3}}{46,5} + \frac{1}{2000} + \frac{1}{5000} = 9,03 * 10^{-4} \frac{\text{м}^2 * \text{К}}{\text{Вт}} \quad (265)$$

где  $\delta_{ст} = 2 \text{ мм}$  – толщина стенки трубы;

$r_{1загр} = \frac{1}{2000}$  – среднее значение тепловой проводимости загрязнений стенок от воды среднего качества,  $\text{Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$  [табл. XXXI, стр. 531; 1];

$r_{2загр} = \frac{1}{5000}$  – среднее значение тепловой проводимости загрязнений стенок от воды хорошего качества,  $\text{Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ .

Определение коэффициента теплоотдачи от конденсирующего пара к изотермической стенке при температуре  $T_{\text{конд}} = 60,09 \text{ }^\circ\text{C}$ .

$$\alpha_{\text{см}}^I = 3,78 * \lambda_{\text{к}} * \varepsilon * \sqrt[3]{\frac{\rho_{\text{к}}^2 * n * d_{\text{ЭКВ}}}{\mu_{\text{к}} * G_{\text{см}}}} \quad (266)$$

где  $n$  - общее число труб в теплообменнике;

$\varepsilon$  – поправочная функция, для воды в первом приближении равна 1 [ф.4.50, стр. 161; 1];

$d_{\text{ЭКВ}} = 18 * 10^{-3}$  - эквивалентный диаметр труб, мм;

$\lambda_{\text{к}}$  - коэффициент теплопроводности конденсата, Вт/(м<sup>2</sup>·К), [рис. X, стр. 561; 1]  $\lambda_{\text{к}} = 0,56 \frac{\text{Вт}}{\text{м} * \text{К}}$ .

$\rho_{\text{к}}$ - плотность конденсата, кг/м<sup>3</sup>, [табл. IV, стр. 512; 1]  $\rho_{\text{к}} = 983,4 \text{ кг/м}^3$

$\mu_{\text{к}}$ - динамический коэффициент вязкости конденсата, Па·с, [рис. V, стр. 556; 1]  $\mu_{\text{к}} = 0,47 * 10^{-3} \text{ Па} * \text{с}$ .

$$\alpha_{\text{см}}^I = 3,78 * 0,56 * 1 * \sqrt[3]{\frac{983,4^2 * 144 * 18 * 10^{-3}}{0,47 * 10^{-3} * 0,0694}} = 586812 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 * \text{К}} \quad (267)$$

Коэффициент теплопередачи:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{586812} + \frac{1}{35068} + 9,03 * 10^{-4}} = 1072 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 * \text{К}} \quad (268)$$

Определим поверхность теплообмена:

$$F_{\text{к}} = \frac{Q_{\text{в}}}{K * \Delta t_{\text{ср}}} = \frac{166531,2}{1072 * 29,9} = 5,2 \text{ м}^2 \quad (269)$$

Подобранный теплообменник подходит для данной поверхности теплообмена.

## 4.2 Механический расчет теплообменного аппарата

### 4.2.1 Расчёт цилиндрической обечайки теплообменного аппарата

Исходные данные:

$p = 0.02$  МПа - давление в аппарате;

12Х18Н10Т – марка стали аппарата;

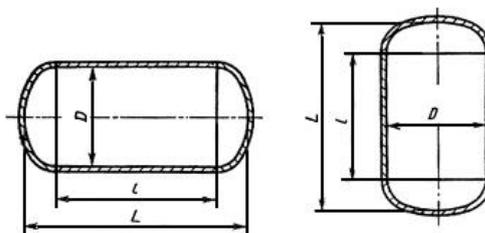
Среда в аппарате – водяной пар.

В соответствии с ГОСТ 9931-85 «Корпуса цилиндрические стальных сварных сосудов и аппаратов» должны соответствовать таблице 29 [48]:

Таблица 29

Обозначение		Наименование корпусов	Диапазон объемов, м <sup>3</sup>
типа	исполнения		
ВЭЭ	2	Вертикальный с эллипсоидным днищем и эллипсоидной крышкой	0,040-200

Исполнение 1



Исполнение 2

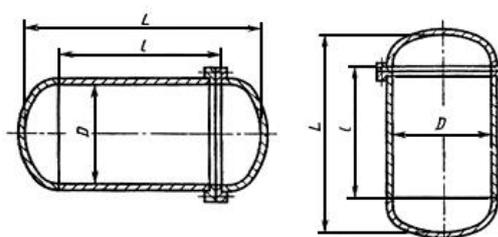


Рисунок 25. Исполнение корпусов типа ВЭЭ

Таблица 30

Размеры, мм		
Типы днищ	Диапазон диаметров	Высота цилиндрической части
Эллипсоидные	400-1600	25
	1800-3000	40
	3200-3400	60
	3600	60

Основные размеры крышки и днища по ГОСТ 6533-78 должны соответствовать указанным на рисунке 26 и в таблице 31 [47].

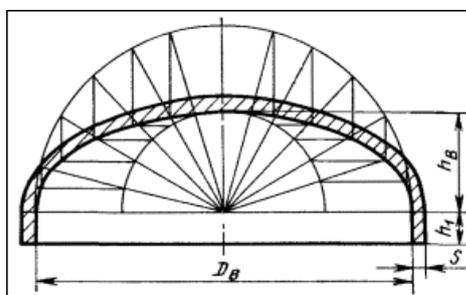


Рисунок 26. Эллиптическое днище

Таблица 31

Размеры в мм						
$D_в$	$h_г$	$h_т$	$s$	$F, м^2$	$V, дм^3$	Масса, кг
400	25	100	4	0,20	11,5	6,6
			5			8,3
			6			10,0
			8			13,4
			10			17,0

Расчет производится по ГОСТ Р 52857.2-2007 [57].

$L$  — расчетная длина цилиндрической обечайки, укрепленной кольцами жесткости, мм;

$l$  — расчетная длина гладкой обечайки, мм;

$c$  — сумма прибавок к расчетным толщинам стенок, мм;

$c_1$  — прибавка для компенсации коррозии и эрозии, мм;

$c_2$  — прибавка для компенсации минусового допуска, мм;

$c_3$  — технологическая прибавка, мм;

$D$  — внутренний диаметр сосуда или аппарата, мм;

$\phi_p$  — коэффициент прочности продольного сварного шва;

$s$  — исполнительная толщина стенки обечайки, мм;

$s_p$  — расчетная толщина стенки обечайки или днища, мм;

$p$  — расчетное внутреннее избыточное или наружное давление, МПа;

$[\sigma]$  — допускаемое напряжение при расчетной температуре, МПа;

Длина обечайки,  $l=1500$  мм;

Внутренний диаметр,  $D=400$  мм;

Рабочее давление,  $p=0.02$  МПа;

Температура среды в аппарате,  $t_{cp} = 60,09$  °С.

Материал аппарата - сортовой прокат из стали 12х18н10т.

Скорость коррозии для материала 12х18н10т,  $P=0.1$  мм/год;

Срок эксплуатации,  $t_b=20$  лет;

Высота цилиндрической части отбортовки днища/крышки,  $h_1 = 50$  мм.

Допускаемое напряжение в рабочем состоянии:

Поправочный коэффициент к допускаемым напряжениям ( $\eta=1$ ), так как аппарат изготавливается из сортового проката

$$t = t_{cp} = 60,09 \text{ °С} \quad (270)$$

$$t_r = \max(20, t) \quad t_r = 60,09 \text{ °С} \quad (271)$$

$$\sigma_d = \sigma_r = 180 \text{ МПа} \quad (272)$$

Для сортового проката из стали марок 12X18H10T, 10X17H13M2T, 10X17H13M3T допускаемые напряжения, приведенные в настоящей таблице, при температурах до 550 °С умножают на отношение  $\frac{R_{p0.220}}{240}$ .

$R_{p0.220} = 196$  МПа - предел текучести материала сортового проката.

$$\sigma_d = \eta \times \sigma_d \times \left(\frac{R_{p0.220}}{240}\right) = 147 \text{ МПа} \quad (273)$$

Таблица 32

Класс и порядковый номер марки по ГОСТ 5632	Марка стали	Рекомендуемый режим термической обработки заготовок для изготовления образцов	Временное сопротивление $\sigma_s$ , Н/мм <sup>2</sup> (кгс/мм <sup>2</sup> )	Предел текучести $\sigma_t$ , Н/мм <sup>2</sup> (кгс/мм <sup>2</sup> )	Относительное удлинение $\delta_5$ , %	Относительное сужение $\psi$ , %	Ударная вязкость, КСЧ, Дж/см <sup>2</sup> (кгс·м/см <sup>2</sup> )
6—31	12X18H10T	Закалка с 1020—1100 °С, охлаждение на воздухе, в масле или в воде	510 (52)	196 (20)	40	55	—
6—33	03X18H11		440 (45)	155 (16)			
6—37	12X18H12T		540 (55)	196 (20)			
6—38	08X18H12Б		490 (50)	175 (18)			

Коэффициент прочности продольных сварных швов  $\phi_p = 1$ , так как принято, что швы с двухсторонним сплошным проваром выполняются автоматической сваркой.

Прибавки к расчетной толщине стенки:

$C = \Pi \times t_{в2} = 2$  - сумма прибавок к расчетной толщине стенки, мм.

*Обечайки, нагруженные наружным давлением.*

Толщину стенки предварительно вычисляют по формулам ниже с обязательной последующей проверкой по формуле:

$$s \geq sp + c \quad (274)$$

Коэффициент В вычисляют по формуле:

$E = 1.94 \times 10^5$  — модуль продольной упругости стали 12x18h10t при расчетной температуре, МПа.

$$B = \max \left[ 1.047 \times \left( \frac{p}{10^{-5} \times E} \right)^{0.067} \times \left( \frac{1}{D} \right)^{0.4} \right] = 1 \quad (275)$$

Расчетную толщину стенки вычисляют по формуле:

$$s_p = \max \left[ 1.06 \times \frac{10^{-2} \times D}{B} \times \left( \frac{p \times 1}{10^{-5} \times E \times D} \right), \frac{1.2 \times p \times D}{2 \times \sigma_d - p} \right] = 0.164 \text{ мм} \quad (276)$$

Таблица 33

**Рекомендуемые минимальные толщины  
(без прибавки на коррозию) стенок  
цилиндрических вальцованных обечаек, мм**

$D_e$	< 400	≥ 400 до 1000	> 1000 до 2000	> 2000 до 4000
$s$	2	3	4	5

Примечание. Указанные толщины стенок обечаек при возможности коррозии их материала соответственно увеличиваются на коррозионную прибавку  $S_k$ .

Исходя из табличных данных, принимаем  $s_p = 3$  мм.

Максимальная исполнительная толщина стенки из условия прочности:

$$s = \text{ceil}(s_p + c) = 5 \text{ мм} \quad (277)$$

Условия применения расчетных формул:

Расчетные формулы применимы при отношении толщины стенки к диаметру:

$$\frac{(s-c)}{D} \leq 0.1 \text{ для обечаек и труб при } D \geq 200 \text{ мм} \quad (278)$$

$\frac{s-c}{D} = 7,5 \times 10^{-3}$  - условие применения расчетных формул выполняется.

Расчетные формулы для обечаек, работающих под действием осевого сжимающего усилия, применимы при следующем условии:

$$\frac{1}{D} \geq 1.0 \quad (279)$$

$\frac{1}{D} = 3,75$  мм - условие применения расчетных формул выполняется.

Допускаемое наружное давление вычисляют по формуле:

$$p_d = \frac{p_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{p_{\Pi}}{p_E}\right)^2}} \quad (280)$$

где допускаемое давление из условия прочности вычисляют по формуле:

$$p_{\Pi} = \frac{2 \times \sigma_d \times (s-c)}{(s-c) + D} = 2,189 \text{ МПа} \quad (281)$$

а допускаемое давление из условия устойчивости в пределах упругости вычисляют по формуле:

$n_y = 2.4$  — коэффициент запаса устойчивости.

$$B_1 = \min \left[ 1,9.45 \times \frac{D}{1} \times \sqrt{\frac{D}{[100 \times (s-c)]}} \right] = 1 \quad (282)$$

$$p_E = \frac{2.08 \times 10^{-5} \times E \times D}{n_y \times B_1 \times 1} \times \left[ \frac{100 \times (s-c)}{D} \right]^{2.5} = 0.218 \text{ МПа} \quad (283)$$

$$p_d = \frac{p_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{p_{\Pi}}{p_E}\right)^2}} = 0.217 \text{ МПа} \quad (284)$$

При определении расчетной длины обечайки  $l$  или  $L$  длину примыкающего элемента  $l_3$  следует вычислять по формулам для выпуклых днищ:

$H$  — высота выпуклой части днища без учета цилиндрической части, мм;

$$H=0.25 \times D=100 \text{ мм} \quad (285)$$

$$l_3 = \frac{H}{3} = 33.333 \text{ мм} \quad (286)$$

*Обечайки, нагруженные осевым сжимающим усилием.*

Допускаемое осевое сжимающее усилие вычисляют по формуле:

$$F_D = \frac{F_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{F_{\Pi}}{F_E}\right)^2}} \quad (287)$$

где допускаемое осевое сжимающее усилие из условия прочности вычисляют по формуле:

$$F_{\Pi} = \pi \times (D + s - c) \times (s - c) \times \sigma_d = 5,583 \times 10^5 \text{ Н} \quad (288)$$

а допускаемое осевое сжимающее усилие в пределах упругости из условия устойчивости вычисляют по формуле:

$$F_E = \min(F_{E1}, F_{E2}) \quad (289)$$

В случае если  $\frac{1}{D} < 10$  формула (63) принимает вид  $F_E = F_{E1}$

$$F_{E1} = \frac{31.0 \times 10^{-5} \times E \times D^2}{n_y} \left[ \frac{100 \times (s - c)}{D} \right]^{2.5} = 1,953 \times 10^6 \text{ Н} \quad (290)$$

$$F_D = \frac{F_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{F_{\Pi}}{F_E}\right)^2}} = 5,368 \times 10^5 \text{ Н} \quad (291)$$

Гибкость  $\lambda$  вычисляют по формуле:

$$l_{\text{пр}} = 2 \times l = 3 \times 10^3 \text{ мм} \quad (292)$$

$$\lambda = \frac{2.83 \times l_{np}}{D+s-c} = 21,067 \quad (293)$$

Для рабочих условий допускаемое сжимающее усилие можно вычислять по формуле:  $\varphi_1=0.98$   $\varphi_2=1$ .

$$F_{доп} = \pi \times (D + s - c) \times (s - c) \times \sigma_d \times \min(\varphi_1, \varphi_2) = 5,472 \times 10^5 \text{ Н} \quad (294)$$

Коэффициенты  $\phi_1$  и  $\phi_2$  определены по графикам, приведенным на рисунках 27 и 28:

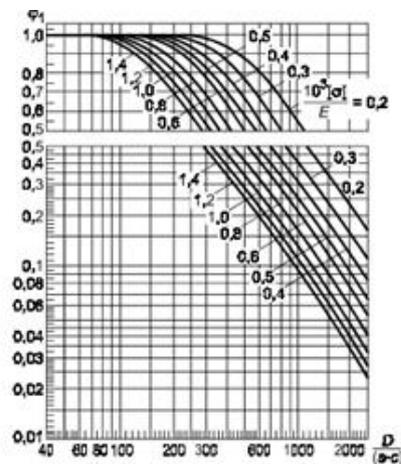


Рисунок 27. График для определения коэффициента  $\phi_1$

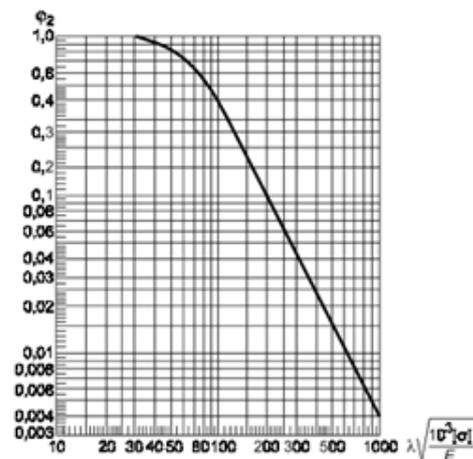


Рисунок 28. График для определения коэффициента  $\phi_2$

$$\frac{D}{(s-c)} = 133,33 \quad (295)$$

$$\frac{10^3 \times \sigma_d}{E} = 0.758 \quad (296)$$

$$\varphi_1 = 0.98 \quad (297)$$

$$\lambda \times \sqrt{\frac{10^3 \times \sigma_d}{E}} = 18,338 \quad (298)$$

$$\varphi_2 = 1 \quad (299)$$

*Обечайки, нагруженные изгибающим моментом.*

Допускаемый изгибающий момент вычисляют по формуле:

$$M_d = \frac{M_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{M_{\Pi}}{M_E}\right)^2}} \quad (300)$$

где допускаемый изгибающий момент из условия прочности вычисляют по формуле:

$$M_{\Pi} = \frac{\pi}{4} \times D \times (D + s - c) \times (s - c) \times \sigma_d = 5.583 \times 10^7 \text{ Н} \times \text{мм} \quad (301)$$

а допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости в пределах упругости вычисляют по формуле:

$$M_E = \frac{8.9 \times 10^{-5} \times E}{n_y} \times D^3 \times \left[ \frac{100 \times (s - c)}{D} \right]^{2.5} = 2,243 \times 10^8 \text{ Н} \times \text{мм} \quad (302)$$

$$M_d = \frac{M_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{M_{\Pi}}{M_E}\right)^2}} = 5,418 \times 10^7 \text{ Н} \times \text{мм} \quad (303)$$

Коэффициент  $\phi_3$  следует определять по графику, приведенному на рисунке 29.

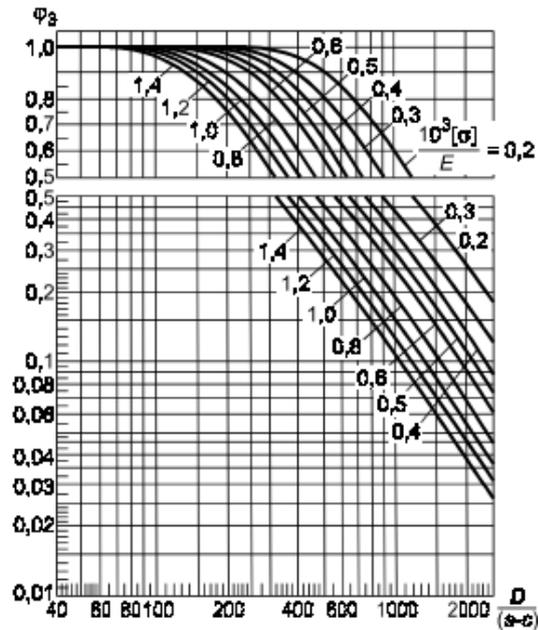


Рисунок 29. График для определения коэффициента  $\varphi_3$

$$\frac{10^3 \times \sigma_D}{E} = 0.758 \quad (304)$$

$$\frac{D}{(s-c)} = 133,33 \quad (305)$$

$$\varphi_3 = 1 \quad (306)$$

Для рабочих условий допустимый изгибающий момент можно вычислять по формуле:

$$M_{\text{дру}} = \frac{\pi}{4} \times D \times (D + s - c) \times (s - c) \times \sigma_D \times \varphi_3 = 5,583 \times 10^7 \text{ Н} \times \text{мм} \quad (307)$$

*Обечайки, нагруженные поперечными усилиями.*

Допускаемое поперечное усилие вычисляют по формуле:

$$Q_D = \frac{Q_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{Q_{\Pi}}{Q_E}\right)^2}} \quad (308)$$

где допустимое поперечное усилие из условия прочности вычисляют по формуле:

$$Q_{\pi} = 0.25 \times \sigma_{\text{д}} \times \pi \times D \times (s - c) = 1,385 \times 10^5 \text{ Н} \quad (309)$$

а допускаемое поперечное усилие из условия устойчивости в пределах упругости вычисляют по формуле:

$$Q_E = \frac{2.4 \times E \times (s-c)^2}{n_y} \times \left[ 0.18 + 3.3 \times \frac{D \times (s-c)}{l^2} \right] = 3,174 \times 10^5 \text{ Н} \quad (310)$$

$$Q_{\text{д}} = \frac{Q_{\pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{Q_{\pi}}{Q_E}\right)^2}} = 1,27 \times 10^5 \text{ Н} \quad (311)$$

*Обечайки, работающие под совместным действием наружного давления, осевого сжимающего усилия, изгибающего момента и поперечного усилия.*

Обечайки, работающие под совместным действием нагрузки, проверяют на устойчивость по формуле:

$$\frac{p_{\text{атм}}}{p_{\text{д}}} + \frac{F}{F_{\text{д}}} + \frac{M}{M_{\text{д}}} + \left(\frac{Q}{Q_{\text{д}}}\right)^2 \leq 1 \quad (312)$$

Где  $p$  — расчетное внутреннее избыточное или наружное давление, МПа  
 $p=0.02$  МПа;

$F$  — расчетное осевое растягивающее или сжимающее усилие (без учета нагрузки, возникающей от внутреннего избыточного или наружного давления), Н;

$Q$  — расчетное поперечное усилие,  $Q=0$  Н;

$M$  — расчетный изгибающий момент,  $M=0$  Н · мм;

Равны нулю так как нет аппаратов, которые непосредственно влияют на обечайку и нет ветровой и сейсмической нагрузки.

$G$  — вес сосуда,  $G=2943$  Н;

$$p_{\text{атм}} = (0.01 - p) = 0.08 \text{ МПа} \quad (313)$$

$$S_0 = \pi \times \frac{\left(\frac{D}{10^3}\right)^2}{4} = 1.257 \times 10^3 \text{ м}^2 \quad (314)$$

$$F = \frac{p_{\text{атм}} \times 10^6}{s_0} + G = 2.944 \times 10^3 \text{ Н} \quad (315)$$

$$\frac{p_{\text{атм}}}{p_d} + \frac{F}{F_d} + \frac{M}{M_d} + \left(\frac{Q}{Q_d}\right)^2 = 0,374 - \text{условие выполняется.}$$

*Цилиндрические обечайки с кольцами жесткости, нагруженные внутренним избыточным давлением.*

Определение размеров колец жесткости при внутреннем давлении:

Для заданных расчетного давления  $P_{\text{и}}$  толщины стенки  $s$  коэффициент  $K_4$  следует вычислять по формуле:

$\phi$  — коэффициенты прочности сварных швов;  $\phi=1$

$\phi_{\text{р}}$  — коэффициент прочности продольного сварного шва;  $\phi_{\text{р}}=1$

$\phi_{\text{т}}$  — коэффициент прочности кольцевого сварного шва;  $\phi_{\text{т}}=1$

$$K_4 = \frac{p \times (D + s - c)}{2 \times \phi \times \sigma_d \times (s - c)} - 1 = -0.991 \quad (316)$$

Если  $K_4 \leq 0$ , то укрепление кольцами жесткости не требуется.

#### 4.2.2 Расчет выпуклого днища и крышки теплообменного аппарата

На рисунке 30 приведена расчетная схема эллиптического днища.

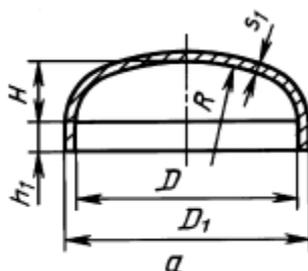


Рисунок 30. Выпуклые эллиптические днища и крышки

Радиус кривизны в вершине днища равен:

$H$  — высота выпуклой части днища (крышки) без учета цилиндрической части, мм,

$R_1 = D = 400$  мм - для эллиптических днищ с  $H$ , равным  $0,25 D$ .

*Эллиптические днища, нагруженные наружным давлением.*

Толщину стенки предварительно вычисляют по формулам ниже с обязательной последующей проверкой по формуле  $s_1 \geq s_{1p} + c$ .

Для предварительного расчета  $K_3$  принимают равным  $0,9$  для эллиптических днищ.

$$s_{1p} = \max \left( \frac{K_3 \times R_1}{161} \times \sqrt{\frac{n_y \times p}{10^{-5} \times E}, \frac{1.2 \times p \times R_1}{2 \times \sigma_d}} \right) = 0.352 \text{ мм} \quad (317)$$

Принимаем стандартную толщину для днища исходя из справочных данных  $s_{1p} = 3$  мм.

Максимальная исполнительная толщина стенки из условия прочности:

$$S_1 = \text{ceil}(s_{1p} + c) = 5 \text{ мм} \quad (318)$$

Допускаемое наружное давление вычисляют по формуле:

$$p_{d2} = \frac{p_{п2}}{\sqrt{1 + \left(\frac{p_{п2}}{p_{E2}}\right)^2}} \quad (319)$$

где допускаемое давление из условия прочности:

$$p_{п2} = \frac{2 \times \sigma_d \times (s_1 - c)}{R_1 + 0.5 \times (s_1 - c)} = 2,197 \text{ МПа} \quad (320)$$

а допускаемое давление из условия устойчивости в пределах упругости:

$$p_{E2} = \frac{2.6 \times 10^{-5} \times E}{n_y} \times \left[ \frac{100 \times (s_1 - c)}{K_3 \times R_1} \right]^2 = 1,459 \text{ МПа} \quad (321)$$

$$p_{d2} = \frac{p_{п2}}{\sqrt{1 + \left( \frac{p_{п2}}{p_{E2}} \right)^2}} = 1,216 \text{ МПа} \quad (322)$$

Коэффициент  $K_3$  определяют по графику, приведенному на рисунке 31, или по формулам в зависимости от отношений  $D/s_1 - c$  и  $H/D$ :

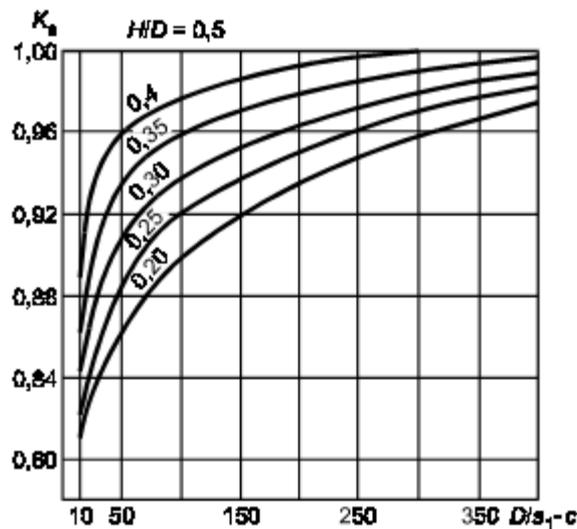


Рисунок 31. График для определения коэффициента  $K_3$

По формулам:

$$x = 10 \times \frac{(s_1 - c)}{D} \times \left( \frac{D}{2 \times H} - \frac{2 \times H}{D} \right) = 0,113 \quad (323)$$

$$K_3 = \frac{1 + (2.5 + 8 \times x) \times x}{1 + (3.0 + 10 \times x) \times x} = 0.937 \quad (324)$$

По графику:  $\frac{H}{D} = 0.25 \quad (325)$

$$\frac{D}{s_1} - c = 78 \quad (326)$$

$$K_3 = 0.9 \quad (327)$$

*Условия применения расчетных формул.*

Формулы применимы при выполнении условий для эллиптических днищ:

$$0.002 \leq \frac{s_1 - c}{D} \leq 0.100 \quad \frac{s_1 - c}{D} = 7,5 \times 10^{-3} \quad (328)$$

$$0.2 \leq \frac{H}{D} \leq 0.5 \quad \frac{H}{D} = 0.25 \quad (329)$$

- условия выполняются.

Формулы для не отбортованных днищ и крышек применяют при условии выполнения угловых швов с двусторонним сплошным проваром.

Формулы, применимы при условии, если расчетные температуры не превышают значений, при которых учитывается ползучесть материалов, т. е. при таких температурах, когда допускаемое напряжение определяют только по пределу текучести или временному сопротивлению (пределу прочности).

### 4.2.3 Подбор штуцеров

Для расчета гидравлического сопротивления необходимо подобрать штуцера для подачи/отвода смеси.

Штуцеры должны соответствовать по конструкции и прочности рабочему давлению внутри аппарата, при этом должны обеспечивать высокую герметичность.

Штуцеры изготавливают из стальных труб необходимого размера. В зависимости от рабочего давления внутри аппарата выбирают размеры фланцев.

Диаметр условного прохода (внутренний диаметр) штуцеров для подвода и отвода теплоносителей рассчитывается на основе уравнения массового расхода:

$$G = \rho * \omega_{шт} * \frac{\pi * d_{вн.шт}^2}{4} \quad (330)$$

$$\text{откуда } d_{вн.шт} = \sqrt{\frac{4 * G}{\pi * \rho * \omega_{шт}}} \quad (331)$$

где  $\omega_{шт}$  – скорость течения теплоносителя в штуцере, м/с [табл. 1.1, стр. 17; 1].

Для паров смеси принимаем  $\omega_{шт1} = 60$  м/с, для сконденсировавшейся жидкости принимаем  $\omega_{шт2} = 0,5$  м/с и для воды берем рассчитанную ранее  $\omega_{шт3} = 0,2$  м/с.

При  $T_{конд} = 60,09$  °С [табл.1] определяем плотность вторичного пара  $\rho_{пара} = 0,131$  кг/м<sup>3</sup>.

$$d_1^{вх.см\ пар} = d_5^{вых\ пар} = \sqrt{\frac{4 \cdot G_{см}}{\pi \cdot \omega_{шт1} \cdot \rho_{пара}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0694}{3,14 \cdot 60 \cdot 0,131}} = 0,10 \text{ м} \quad (332)$$

Принимаем [табл. 2, стр.19; 3]  $D_{вх.см} = 100$  мм. Масса штуцера  $m_{вх.см} = 5,2$  кг.

При  $T_{конд} = 60,09$  °С [табл. XXXIX, стр. 537; 1] определяем плотность сконденсировавшейся жидкости  $\rho_{жид} = 983$  кг/м<sup>3</sup>.

$$d_2^{вых.кон\ жид} = \sqrt{\frac{4 \cdot G_{см}}{\pi \cdot \omega_{шт2} \cdot \rho_{жид}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0694}{3,14 \cdot 0,5 \cdot 983}} = 0,013 \text{ м} \quad (333)$$

Принимаем  $D_{вых.кон} = 25$  мм. Масса штуцера  $m_{вых.кон} = 1,1$  кг.

При средней температуре охлаждающей воды  $t_2 = 20$ °С определяем её плотность [табл. XXXIX, стр. 537; 1]  $\rho_{воды} = 998$  кг/м<sup>3</sup>.

$$d_3^{вод} = d_4^{вод} = \sqrt{\frac{4 \cdot G_{в}}{\pi \cdot \omega_{шт3} \cdot \rho_{воды}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 3,32}{3,14 \cdot 0,2 \cdot 998}} = 0,146 \text{ м} \quad (334)$$

Принимаем  $D_{вод} = 150$  мм. Масса штуцеров  $m_{вод} = 7,9$  кг.

#### 4.2.4 Расчет укрепления отверстий на обечайке, крышке и днище теплообменного аппарата

Расчет по ГОСТ Р 52857.3-2007 «Укрепление отверстий» [58].

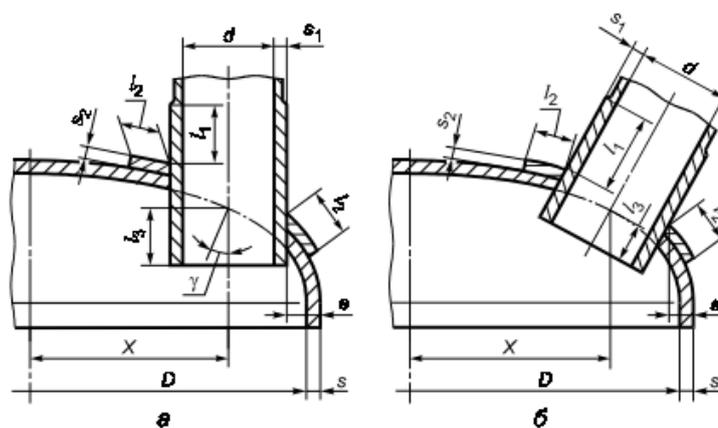


Рисунок 32. Смещённые штуцера на выпуклом днище

При установке наклонных штуцеров с круговым поперечным сечением на цилиндрических обечайках метод расчета укрепления отверстий применим, если угол  $\gamma$  не превышает  $45^\circ$ , а отношение осей овального отверстия  $d_1$  и  $d_2$  удовлетворяет условию.

Для смещенных (нецентральных) штуцеров на эллиптических днищах угол  $\gamma$  не должен превышать  $60^\circ$ .

В краевой зоне эллиптических и полусферических днищ допускается размещение отверстий без ограничений.

Расчет на прочность при внешних статических нагрузках применим для штуцеров, нормально расположенных к поверхности обечаек или днищ.

Внутренний диаметр обечайки,  $D=400$  мм.

Расчетное давление в аппарате,  $p=0.02$  МПа.

Температура среды в аппарате,  $t_c=60.09$  °С.

Расчетная длина гладкой обечайки,  $l=1500$  мм.

Материал аппарата - листовой прокат из стали 12x18н10т.

Срок эксплуатации,  $\tau = 20$  лет.

Внутренний диаметр штуцеров для входа вторичного пара и выхода пара с не сконденсировавшейся жидкостью  $d_{вн}=100$  мм.

Внутренний диаметр штуцера для выхода сконденсировавшейся жидкости  $d_{вж}=25$  мм.

Внутренний диаметр штуцеров для входа и выхода охлаждающей воды  $d_k=150$  мм.

Суммарные прибавки к расчетной толщине стенки обечайки  $c=2$  мм.

Исполнительная толщина стенки обечайки  $s=5$  мм.

Модуль продольной упругости стали 12x18н10т при расчетной температуре,  $E=1.94 \times 10^5$  МПа.

Допускаемое напряжение стали 12X18Н10Т  $\sigma_d = 147$  МПа.

Допускаемое напряжение для материала накладного кольца при расчетной температуре  $\sigma_{д1} = \sigma_d = 147$  МПа.

Допускаемое напряжение для материала внешней части штуцера при расчетной температуре  $\sigma_{д2} = \sigma_d = 147$  МПа.

Допускаемое напряжение для материала внутренней части штуцера при расчетной температуре  $\sigma_{д3} = \sigma_d = 147$  МПа.

Скорость коррозии для материала 12X18Н10Т,  $\Pi=0.1$  мм/год.

Сумма прибавок к расчетной толщине стенки штуцера:  $c_s=\Pi \cdot \tau =2$  мм.

$c_{s1}, c_{s1'}, c_{s1''}$ -прибавка на коррозию к расчётной толщине стенке штуцера,  $C_{s1}=0.1$  мм.

*Расчёт укрепления отверстия для входа вторичного пара в цилиндрической обечайке.*

Диаметры укрепляемых элементов вычисляют по формулам для цилиндрической обечайки:  $Dp=D=400$  мм

Расчетный диаметр отверстия для штуцера, ось которого лежит в плоскости поперечного сечения цилиндрической или конической обечайки, вычисляют по формуле:

$$d_p = d_{en} + 2 \times c_s = 104 \text{ мм} \quad (335)$$

Коэффициент прочности сварных соединений.

Если ось сварного шва обечайки (днища) удалена от наружной поверхности штуцера на расстояние более чем три толщины укрепляемого элемента  $3s$ , то коэффициент прочности этого сварного соединения при расчете укрепления отверстий следует принимать  $\phi = 1$ .

Если плоскость, проходящая через продольный шов вальцованного штуцера и ось этого штуцера, образует угол  $\psi$  не менее  $60^\circ$  с плоскостью продольного осевого сечения цилиндрической или конической обечайки, то принимают  $\phi_1 = 1$ .

Пределы применения расчетных формул ограничиваются условиями, приведенными в таблице 34.

Таблица 34

Наименование параметра	Условие применения формул для расчета укрепления отверстий в			
	цилиндрических обечайках	конических обечайках, переходах или днищах (крышках)	эллиптических днищах (крышках)	сферических и торо-сферических днищах (крышках)
Отношение диаметров <sup>1)</sup>	$\frac{d_p - 2c_s}{D} \leq 1,0$	$\frac{d_p - 2c_s}{D_k} \leq 1,0$	$\frac{d_p - 2c_s}{D} \leq 0,6$	$\frac{d_p - 2c_s}{D} \leq 0,6$
Отношение толщины стенки обечайки или днища к диаметру	$\frac{s - c}{D} \leq 0,1$	$\frac{s - c}{D_k} \leq \frac{0,1}{\cos \alpha}$	$\frac{s - c}{D} \leq 0,1$	$\frac{s - c}{D} \leq 0,1$
<sup>1)</sup> При расчете на прочность обечаек и днищ при внешних статических нагрузках на штуцер для цилиндрических и конических обечаек $d/D \leq 0,8$ , для днищ и крышек — $d/D \leq 0,6$ .				

$$\frac{d_{вп}}{D} = 0.25 \quad (336)$$

$$\frac{d_p - 2 \times c_s}{D} = 0.25 \quad (337)$$

$$\frac{s - c}{D} = 7,5 \times 10^{-3} \quad (338)$$

- условия применения расчетных формул выполняются.

Расчетную толщину стенки штуцера, нагруженного как внутренним, так и наружным давлением, вычисляют по формуле:

$$s_{p1} = \frac{p \times (d_{вп} + 2 \times c_s)}{2 \times \sigma_d \times \phi - p} = 7.075 \times 10^{-3} \text{ мм} \quad (339)$$

Таблица 35

Условный проход(Dy) трубы, в мм	Наружный диаметр(Dh), трубы, в мм
	Бесшовная стальная труба
100	108

Следовательно, исполнительная толщина стенки штуцера  $S_1=4\text{мм}$ .

Расчетные длины штуцеров.

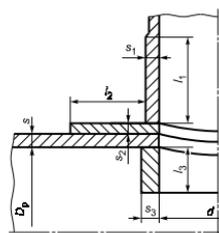


Рисунок 32. Соединение штуцера со стенкой

Расчетные длины внешней и внутренней частей круглого штуцера, участвующие в укреплении отверстий и учитываемые при расчете, вычисляют по формулам:

где  $l_1, l_3$  -исполнительная длина штуцеров, мм;

$l_2$  - исполнительная ширина накладного кольца, мм;

$s_1, s_1', s_1''$ - исполнительные толщины стенок штуцеров, мм;

$s_2, s_2', s_2''$ - исполнительные толщины накладных колец, мм;

$s_3, s_3', s_3''$ - исполнительные толщины внутренних частей штуцеров, мм.

Исполнительная длина внешней части штуцера  $l_1=155$  мм.

Исполнительная длина внутренней части штуцера  $l_3= 2$  мм.

Исполнительную толщину накладного кольца принимаем равной толщине стенки обечайки  $S_2=s=4$  мм.

Толщина стенки штуцера:

-внешней части  $s_l=4$  мм.

-внутренней части  $s_3=s_l=4$  мм.

Расчетная длина внешней части круглого штуцера:

$$l_{1p} = \min[l_1, \sqrt{(d_{\text{вп}} + 2 \times c_s) \times (s_1 - c_s)}] = 14.422 \text{ мм} \quad (340)$$

Расчетная длина внутренней части круглого штуцера:

$$l_{3p} = \min[l_3, 0,5\sqrt{(d_{\text{вп}} + 2 \times c_s) \times (s_3 - c_s)}] = 0 \text{ мм} \quad (341)$$

Исполнительная ширина накладного кольца  $l_2=L_0$  мм:

$$l_{2p} = \min[l_2, \sqrt{D_p \times (s - c)}] = 34.641 \text{ мм} \quad (342)$$

Расчетную ширину зоны укрепления в обечайках, переходах и днищах вычисляют по формуле:

$$L_0 = \sqrt{D \times (s - c)} = 34.641 \text{ мм} \quad (343)$$

Отношения допускаемых напряжений:

- для внешней части штуцера

$$x_1 = \min\left(1, \frac{\sigma_{д1}}{\sigma_d}\right) = 1 \quad (344)$$

-для накладного кольца

$$x_2 = \min \left( 1, \frac{\sigma_{д2}}{\sigma_d} \right) = 1 \quad (345)$$

-для внутренней части штуцера

$$x_3 = \min \left( 1, \frac{\sigma_{д3}}{\sigma_d} \right) = 1 \quad (346)$$

Расчетный диаметр отверстия, не требующий дополнительного укрепления, вычисляют по формуле:

$$d_{op} = 0,4 \times \sqrt{D_p \times (s - c)} = 13,856 \text{ мм} \quad (347)$$

Следовательно, укрепление для данного штуцера требуется.

Допускаемое внутреннее избыточное давление вычисляют по формуле:

где  $K_2=2$  - для выпуклых днищ.

$$p_d = \frac{2 \times K_1 \times (s - c) \times \phi \times \sigma_d}{D_p + (s - c) \times V} \times V \quad (348)$$

$$V = \min \left[ 1, \frac{1 + \frac{l_1 p \times (s_1 - c) \times x_1 + l_2 p \times s_2 \times x_1 + l_3 p \times (s_3 - c_s - c_{s1}) \times x_3}{l_p \times (s - c)}}{1 + 0,5 \times \frac{d_p - d_{op}}{l_p} + K_1 \times \frac{d_{вп} + 2 \times c_s \times \phi \times l_1 p}{D_p \times \phi_1 \times l_p}} \right] = 1 \quad (349)$$

$$p_d = \frac{2 \times K_1 \times (s - c) \times \phi \times \sigma_d}{D_p + (s - c) \times V} \times V = 4,377 \text{ МПа} \quad (350)$$

Укрепление отверстий в сосудах и аппаратах, нагруженных наружным давлением.

Допускаемое наружное давление вычисляют по формуле:

$$p_d = \frac{p_{п}}{\sqrt{1 + \left( \frac{p_{п}}{p_{Е}} \right)^2}} \quad (351)$$

где допускаемое давление из условия прочности вычисляют по формуле:

$$p_{\Pi} = \frac{2 \times \sigma_d \times (s-c)}{(s-c)+D} = 2,189 \text{ МПа} \quad (352)$$

а допускаемое давление из условия устойчивости в пределах упругости вычисляют по формуле:

где  $l=850$  - расчетная длина гладкой обечайки, мм.

$E=1,94 \times 10^5$  — модуль продольной упругости стали 12х18н10т при расчетной температуре, МПа;

$$B_1 = \min \left[ 1,945 \times \frac{D}{1} \times \sqrt{\frac{D}{100 \times (s-c)}} \right] = 1 \quad (353)$$

$$p_E = \frac{2,08 \times 10^{-5} \times E \times D}{n_y \times B_1 \times 1} \times \left[ \frac{100 \times (s-c)}{D} \right]^{2,5} = 0,218 \text{ МПа} \quad (354)$$

$$p_{\Pi} = \frac{p_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left( \frac{p_{\Pi}}{p_E} \right)^2}} = 0.217 \text{ МПа} \quad (355)$$

*Расчёт укрепления отверстия для выхода сконденсировавшейся жидкости в цилиндрической обечайке.*

Диаметры укрепляемых элементов вычисляют по формулам для цилиндрической обечайки:  $D_p = D = 400$  мм.

Расчетный диаметр отверстия для штуцера, ось которого лежит в плоскости поперечного сечения цилиндрической или конической обечайки, вычисляют по формуле:

$$d_p = d_{в.ж} + 2 \times c_s = 29 \text{ мм} \quad (356)$$

Коэффициент прочности сварных соединений.

Пределы применения расчетных формул ограничиваются условиями, приведенными в таблице 36.

Таблица 36

Наименование параметра	Условие применения формул для расчета укрепления отверстий в			
	цилиндрических обечайках	конических обечайках, переходах или днищах (крышках)	эллиптических днищах (крышках)	сферических и торо-сферических днищах (крышках)
Отношение диаметров <sup>1)</sup>	$\frac{d_p - 2c_s}{D} \leq 1,0$	$\frac{d_p - 2c_s}{D_k} \leq 1,0$	$\frac{d_p - 2c_s}{D} \leq 0,6$	$\frac{d_p - 2c_s}{D} \leq 0,6$
Отношение толщины стенки обечайки или днища к диаметру	$\frac{s - c}{D} \leq 0,1$	$\frac{s - c}{D_k} \leq \frac{0,1}{\cos \alpha}$	$\frac{s - c}{D} \leq 0,1$	$\frac{s - c}{D} \leq 0,1$
1) При расчете на прочность обечайек и днищ при внешних статических нагрузках на штуцер для цилиндрических и конических обечайек $d/D \leq 0,8$ , для днищ и крышек — $d/D \leq 0,6$ .				

$$\frac{d_{\text{вж}}}{D} = 0.063 \quad (357)$$

$$\frac{d_p - 2 \times c_s}{D} = 0.063 \quad (358)$$

$$\frac{s - c}{D} = 7,5 \times 10^{-3} \quad (359)$$

- условия применения расчетных формул выполняются.

Расчетную толщину стенки штуцера, нагруженного как внутренним, так и наружным давлением, вычисляют по формуле:

$$s_{p1} = \frac{p \times (d_{\text{вж}} + 2 \times c_s)}{2 \times \sigma_d \times \phi - p} = 1,973 \times 10^{-3} \text{ мм} \quad (360)$$

Таблица 37

Условный проход(Dy) трубы, в мм	Наружный диаметр(Dh), трубы, в мм
	Бесшовная стальная труба
25	32

Следовательно, исполнительная толщина стенки штуцера  $S_1=3,5$  мм.

Расчетные длины штуцеров.

Расчетные длины внешней и внутренней частей круглого штуцера, участвующие в укреплении отверстий и учитываемые при расчете, вычисляются по формулам:

Расчетная длина внешней части круглого штуцера:

$$l_{1p} = \min[l_1, \sqrt{(d_{\text{вж}} + 2 \times c_s) \times (s_1 - c_s)}] = 6.595 \text{ мм} \quad (361)$$

Расчетная длина внутренней части круглого штуцера:

$$l_{3p} = \min[l_3, 0,5\sqrt{(d_{\text{вж}} + 2 \times c_s) \times (s_3 - c_s)}] = 0 \text{ мм} \quad (362)$$

Исполнительная ширина накладного кольца  $l_2=L_0$  мм:

$$l_{2p} = \min[l_2, \sqrt{(D_p \times (s - c))}] = 34,641 \text{ мм} \quad (363)$$

Расчетную ширину зоны укрепления в обечайках, переходах и днищах вычисляют по формуле:

$$L_0 = \sqrt{D \times (s - c)} = 34,641 \text{ мм} \quad (364)$$

Отношения допускаемых напряжений:

- для внешней части штуцера

$$x_1 = \min\left(1, \frac{\sigma_{d1}}{\sigma_d}\right) = 1 \quad (365)$$

-для накладного кольца

$$x_2 = \min\left(1, \frac{\sigma_{d2}}{\sigma_d}\right) = 1 \quad (366)$$

-для внутренней части штуцера

$$x_3 = \min \left( 1, \frac{\sigma_{дз}}{\sigma_d} \right) = 1 \quad (367)$$

Расчетный диаметр отверстия, не требующий дополнительного укрепления, вычисляют по формуле:

$$d_{op} = 0,4 \times \sqrt{D_p \times (s - c)} = 13,856 \text{ мм} \quad (368)$$

Следовательно, укрепление для данного штуцера требуется.

Допускаемое внутреннее избыточное давление вычисляют по формуле:

где  $K_2=2$  - для выпуклых днищ

$$p_d = \frac{2 \times K_1 \times (s - c) \times \phi \times \sigma_d}{D_p + (s - c) \times V} \times V \quad (369)$$

$$V = \min \left[ 1, \frac{1 + \frac{l_1 p \times (s_1 - c) \times x_1 + l_2 p \times s_2 \times x_1 + l_3 p \times (s_3 - c_s - c_{s1}) \times x_3}{l_p \times (s - c)}}{1 + 0,5 \times \frac{d_p - d_{op}}{l_p} + K_1 \times \frac{d_{вж} + 2 \times c_s \times \phi \times l_1 p}{D_p \times \phi_1 \times l_p}} \right] = 1 \quad (370)$$

$$p_d = \frac{2 \times K_1 \times (s - c) \times \phi \times \sigma_d}{D_p + (s - c) \times V} \times V = 4,377 \text{ МПа} \quad (371)$$

Укрепление отверстий в сосудах и аппаратах, нагруженных наружным давлением.

Допускаемое наружное давление вычисляют по формуле:

$$p_d = \frac{p_{п}}{\sqrt{1 + \left( \frac{p_{п}}{p_{Е}} \right)^2}} \quad (372)$$

где допускаемое давление из условия прочности вычисляют по формуле:

$$p_{п} = \frac{2 \times \sigma_d \times (s - c)}{(s - c) + D} = 2,189 \text{ МПа} \quad (373)$$

а допускаемое давление из условия устойчивости в пределах упругости вычисляются по формуле:

где  $l=850$  - расчетная длина гладкой обечайки, мм;

$E=1,94 \times 10^5$  — модуль продольной упругости стали 12х18н10т при расчетной температуре, МПа;

$$B_1 = \min \left[ 1,9.45 \times \frac{D}{1} \times \sqrt{\frac{D}{[100 \times (s-c)]}} \right] = 1 \quad (374)$$

$$p_E = \frac{2,08 \times 10^{-5} \times E \times D}{n_y \times B_1 \times 1} \times \left[ \frac{100 \times (s-c)}{D} \right]^{2.5} = 0.218 \text{ МПа} \quad (375)$$

$$p_{\Pi} = \frac{p_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{p_{\Pi}}{p_E}\right)^2}} = 0.217 \text{ МПа} \quad (376)$$

*Расчёт укрепления отверстия для выхода и входа охлаждающей воды в днище.*

Диаметры укрепляемых элементов вычисляются по формулам для эллиптических днищ при  $H=0,25 D$ :

$x_2=0$  — расстояние от центра укрепляемого отверстия до оси эллиптического днища, мм;

$$D_{p2} = 2 \times D \times \sqrt{1 - 3 \times \left(\frac{x_2}{D}\right)^2} = 800 \text{ мм} \quad (377)$$

Расчетный диаметр отверстия для штуцера на эллиптическом днище вычисляются по формуле:

$$d_{p2} = \frac{d_{\text{вп}} + 2 \times c_s}{\sqrt{1 - \left(\frac{2 \times x_2}{D_{p2}}\right)^2}} = 154 \text{ мм} \quad (378)$$

Пределы применения расчетных формул ограничиваются условиями, приведенными в таблице 38.

Таблица 38

Наименование параметра	Условие применения формул для расчета укрепления отверстий в			
	цилиндрических обечайках	конических обечайках, переходах или днищах (крышках)	эллиптических днищах (крышках)	сферических и торо-сферических днищах (крышках)
Отношение диаметров <sup>1)</sup>	$\frac{d_p - 2c_s}{D} \leq 1,0$	$\frac{d_p - 2c_s}{D_k} \leq 1,0$	$\frac{d_p - 2c_s}{D} \leq 0,6$	$\frac{d_p - 2c_s}{D} \leq 0,6$
Отношение толщины стенки обечайки или днища к диаметру	$\frac{s - c}{D} \leq 0,1$	$\frac{s - c}{D_k} \leq \frac{0,1}{\cos \alpha}$	$\frac{s - c}{D} \leq 0,1$	$\frac{s - c}{D} \leq 0,1$
1) При расчете на прочность обечайек и днищ при внешних статических нагрузках на штуцер для цилиндрических и конических обечайек $d/D \leq 0,8$ , для днищ и крышек — $d/D \leq 0,6$ .				

$$\frac{d_{ип}}{D} = 0.375 \quad (379)$$

$$\frac{d_p - 2 \times c_s}{D} = 0.375 \quad (380)$$

$$\frac{s - c}{D} = 7,5 \times 10^{-3} \quad (381)$$

- условия применения расчетных формул выполняются.

Расчетную толщину стенки штуцера, нагруженного как внутренним, так и наружным давлением, вычисляют по формуле:

$$S_{p1} = \frac{p \times (d_B + 2 \times c_s)}{2 \times \sigma_d \times \phi - p} = 0.01 \text{ мм} \quad (382)$$

Таблица 39

Условный проход (Dy) трубы, в мм	Наружный диаметр (Dh), трубы, в мм
	Бесшовная стальная труба
150	159

Следовательно, исполнительная толщина стенки штуцера  $S_I = 4,5 \text{ мм}$ .

Расчетные длины внешней и внутренней частей круглого штуцера, участвующие в укреплении отверстий и учитываемые при расчете, вычисляются по формулам:

Расчетная длина внешней части круглого штуцера:

$$l_{1p} = \min[l_1, \sqrt{(d_{\text{ир}} + 2 \times c_s) \times (s_1 - c_s)}] = 15.199 \text{ мм} \quad (383)$$

Расчетная длина внутренней части круглого штуцера:

$$l_{3p} = \min[l_3, 0.5\sqrt{(d_{\text{ир}} + 2 \times c_s) \times (s_3 - c_s)}] = 0 \text{ мм} \quad (384)$$

Исполнительная ширина накладного кольца  $l_2=L_0$  мм

$$l_{2p} = \min[l_2, \sqrt{D_p \times (s - c)}] = 34,641 \text{ мм} \quad (385)$$

Расчетный диаметр отверстия, не требующий дополнительного укрепления, вычисляют по формуле

$$d_{op} = 0,4 \times \sqrt{D_p \times (s - c)} = 19,596 \text{ мм} \quad (386)$$

Следовательно, для данного штуцера требуется укрепление.

#### 4.2.5 Подбор фланцевых соединений

По ГОСТ 12820-80 «Фланцы стальные плоские приварные» принимаем фланцы для  $R_y$  0,1-1,0 МПа. Конструкция фланца должна соответствовать рисунку 33 и таблицам 40-42 [51].

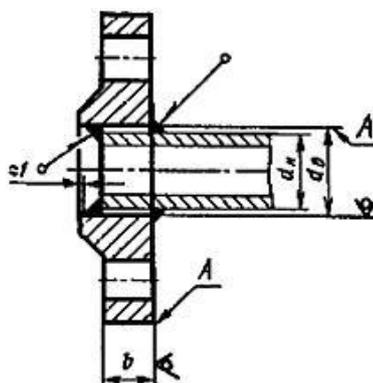


Рисунок 33. Фланец стальной плоский приварной на  $P_y$  0,1-1,0 МПа

Фланец на штуцер для входа вторичного пара и выхода пара с не сконденсировавшейся жидкостью для  $D_{\text{вх.см}}=100$  мм.

Таблица 40 – Размеры фланца для входа вторичного пара

Проход условный $D_y$	$P_y$ 0,1 и 0,25 МПа (1 и 2,5 кгс/см <sup>2</sup> )					
	Размеры в мм					
	$d_n$	$d_b$	b	Масса, кг		
с соединительным выступом				с выступом	с впадиной	
100	108	110	15	2,60	2,56	2,42

Фланец на штуцер для выхода сконденсировавшейся жидкости для  $D_{\text{вых.кон}}=25$  мм.

Таблица 41 – Размеры фланца для выхода сконденсировавшейся жидкости

Проход условный $D_y$	$P_y$ 0,1 и 0,25 МПа (1 и 2,5 кгс/см <sup>2</sup> )					
	Размеры в мм					
	$d_n$	$d_b$	b	Масса, кг		
с соединительным выступом				с выступом	с впадиной	
25	32	33	10	0,55	0,55	0,52

Фланец на штуцера для входа и выхода охлаждающей воды для  $D_{\text{вод}}=150$  мм.

Таблица 42 – Размеры фланца для входа и выхода охлаждающей воды

Проход условный $D_y$	$P_y$ 0,1 и 0,25 МПа (1 и 2,5 кгс/см <sup>2</sup> ) Размеры в мм					
	$d_n$	$d_b$	b	Масса, кг		
				с соединительным выступом	с выступом	с впадиной
150	152	154	13	3,61	3,62	3,41

#### 4.2.6 Расчет фланцевых соединений

По ГОСТ 28759.1-90 для сосудов и аппаратов, работающих в условиях вакуума с остаточным давлением не ниже 665 Па (5 мм рт. ст.), допускается применять фланцы исполнений 1 -5 ГОСТ 28759.2 на  $P_y$  0,3 МПа [54].

По ГОСТ 28759.2 «Фланцы сосудов и аппаратов стальные плоские приварные» принимаем фланец исполнения 1 - с гладкой уплотнительной поверхностью. Для стального плоского приварного фланца по ГОСТ 12816-80 подбираем материал изготовления фланцев, болтов, шпилек - сталь 20 [50].

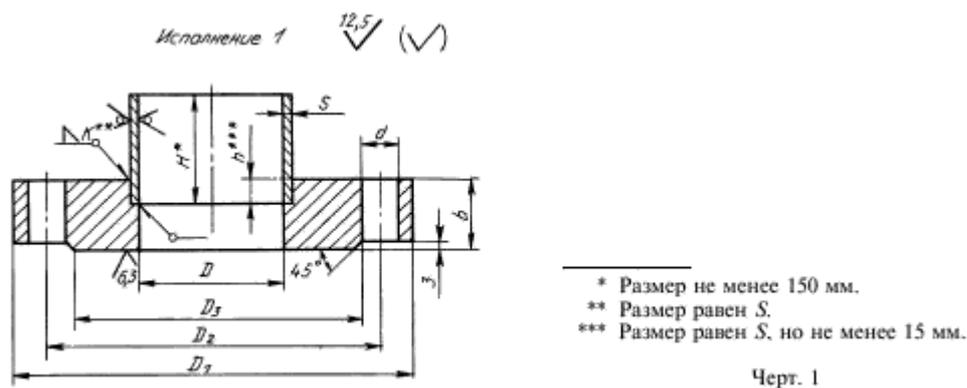


Рисунок 34. Фланец с гладкой уплотнительной поверхностью

Таблица 43 – Размеры фланца

Размеры, мм													
Внутренний диаметр аппарата $D$	$D_1$	$D_2$	$D_3$	$D_4$	$a$	$D_5$	$a_1$	$b$	$s$	$d$	Болты, шпильки		Давление условное, МПа
											Диаметр	Количество	
400	520	480	444	452	13,5	443	12	25	6	23	M20	16	0,6
	535	495	458	466		457		30				20	1,0
								35				8	20

Таблица 44 – Характеристики прокладок

Прокладки	Диаметр аппарата $D$ , мм	Ширина прокладки $b_p$ , мм
Плоские неметаллические	$D \leq 1000$	12...15
	$1000 < D \leq 2000$	15...25
	$D \geq 2000$	26
Плоские металлические	$D \leq 1000$	10...12
	$D > 1000$	12...15

По ГОСТ 28759.2 толщина резиновой прокладки принимается 3 мм.

ГОСТ 28759.6-90 "Прокладки из неметаллических материалов. Конструкция и размеры. Технические требования." [55] Исполнение прокладки 2 - для фланцев по ГОСТ 28759.2 исполнения 1.

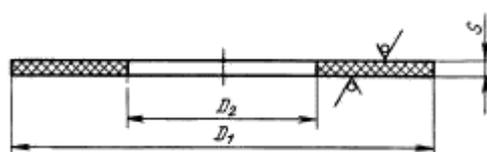


Рисунок 35. Конструкция прокладки

Таблица 45 – Размеры прокладки

Размеры, мм								
Внутренний диаметр аппарата $D$	$D_1$	$D_2$		Давление условное, МПа	Масса, кг			
		Исполнения			Исполнения			
		1	2		1	2		
400	443	418	413	0,3	0,068	0,081		
				0,6				
	457	432	427	1,0	0,070	0,083		
				1,6				
				—			2,5	—
				—			4,0	—
—	428	—	—	0,081	—			
—	—	—	—	6,3	—	—		

Количество болтов, необходимое для обеспечения герметичности соединения:

$$n \geq \frac{\pi D_b}{t_{ш}}, \quad (386)$$

где  $t_{ш}$  – рекомендуемый шаг расположения болтов в зависимости от давления

Таблица 46 – Рекомендуемый шаг расположения болтов

Давление в аппарате $P$ , МПа	Шаг расположения болтов
до 0,3	$(4,2...5) d_b$

$d_b$  - рекомендуемые диаметры болтов (шпилек), мм  $d_b = 20$

$$t_{ш} = 5 \times d_b = 100 \quad (387)$$

Исходные данные:

$D = 400$  мм внутренний диаметр фланца;

$D_H = 520$  мм наружный диаметр фланца;

$D_b = 480$  мм диаметр окружности расположения болтов (шпилек);

$D_{СП} = 443$  мм расчетный диаметр прокладки;

$b_{II} = 21.5$  мм ширина прокладки;

$h = 25$  мм толщина тарелки фланца;

$h_{II} = 3$  мм толщина прокладки;

$S_0 = 5$  мм толщина обечайки (трубы) плоского фланца;

$d = 20$  мм наружный диаметр болта (шпильки);

$$n_0 = \frac{\pi \times D_b}{t_{ш}} = 15.08 \quad (388)$$

так как количество болтов в обечайке должно быть кратно 4, принимаем число болтов с ГОСТ 28759.2:  $n = 28$ ;

$P = 0.02$  МПа - расчетное давление;

Примечание из ГОСТ 28759.1-90 [54]: расчет фланцевых соединений выполнен по действующим нормативно-техническим документам при расчетной температуре  $60.09$  °С с учетом прибавки на коррозию без учета внешнего изгибающего момента и внешней осевой силы.

$M = 0$  Н\*мм - внешний изгибающий момент;

$F = 0$  Н - внешняя осевая сила;

$c_0 = 0.1$  мм - прибавка на коррозию.

$t = 60.09$  °С - расчетная температура стенки корпуса (штуцера) в месте расположения фланцевого соединения.

Материал обечаек и фланцев - сталь 12Х18Н10Т.

Материал болтов - сталь 20.

Материал прокладки - вулканизированная резина.

Фланцы с гладкой уплотнительной поверхностью рекомендуется применять для условных давлений среды до 1,6 МПа.

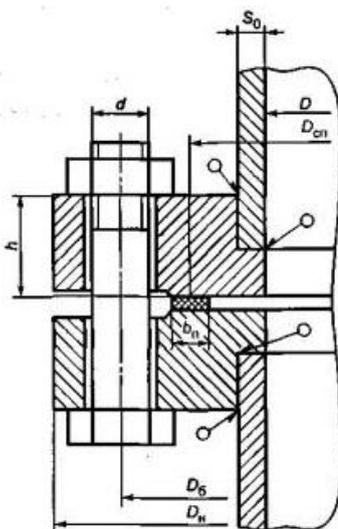


Рисунок 36. Фланцевое соединение с плоским фланцами

Расчет по ГОСТ Р 52857.4-2007 [59].

*Определение расчетных параметров.*

Расчетные температуры по приложению В:

- расчетная температура неизолированных плоских фланцев

$$t_{\phi} = 0.96 \times t = 57.686 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (389)$$

- расчетная температура болтов

$$t_{\sigma} = 0.85 \times t = 51.077 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (390)$$

Допускаемые напряжения для болтов из стали 20:

В рабочем состоянии:

$$t = \begin{pmatrix} 20 \\ 100 \end{pmatrix} \quad \sigma = \begin{pmatrix} 147 \\ 142 \end{pmatrix} \quad (391)$$

$$\sigma_{\text{д.б}} = \text{Floor}(\text{linterp}(t, \sigma, t_{\sigma}), 0.5) = 145 \text{ МПа} \quad (392)$$

Модуль упругости для болтов при рабочей температуре  
 $E_{\text{б}} = 2.06 \times 10^5 \text{ МПа}$ .

Допускаемое напряжение для болтов при  $t = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$   $\sigma_{20\text{б}} = 147 \text{ МПа}$ .

Модуль упругости для болтов при температуре испытания  $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$   
 $\sigma_{20\text{б}} = 2.13 \times 10^5 \text{ МПа}$ .

Коэффициент линейного расширения стали 20 при  $t = 20-100 \text{ }^{\circ}\text{C}$   
 $\alpha_{\sigma} = 11.6 \times 10^{-6} \text{ 1/K}$ .

Допускаемые напряжения для фланцев и обечаек стали 12Х18Н10Т:

$$t = \begin{pmatrix} 20 \\ 100 \end{pmatrix} \quad \sigma = \begin{pmatrix} 184 \\ 174 \end{pmatrix} \quad (393)$$

$$\sigma = \text{Floor}(\text{linterp}(t, \sigma, t_{\sigma}), 0.5) = 179 \text{ МПа} \quad (394)$$

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

$$\sigma_{\text{д,ф}} = \eta \times \sigma = 179 \text{ МПа} \quad (395)$$

Модуль упругости для стали 12Х18Н10Т при рабочей температуре  $E=2.0 \times 10^5$  МПа.

Допускаемое напряжение для стали 20 при  $t = 20$  °С  $\sigma_{20} = 184$  МПа

$$\sigma_{\text{д20}} = \eta \times \sigma_{20} = 184 \text{ МПа} \quad (396)$$

Модуль упругости для стали 12Х18Н10Т при температуре испытания 20°С  $E_{20} = 2.05 \times 10^5$  МПа.

Коэффициент линейного расширения стали 12Х18Н10Т при  $t = 20 - 100$ °С  $\alpha_{\sigma} = 16.4 \times 10^{-6}$  1/К.

Эффективная ширина плоской прокладки:

$$b_{\text{п}} = 21.5 \text{ мм}$$

$$b_0 = \begin{cases} b_0 \leftarrow b_{\text{п}} & \text{if } b_{\text{п}} \leq 15 \\ b_0 \leftarrow \text{Ceil}(3.8 \cdot \sqrt{b_{\text{п}}}, 1) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (397)$$

$$b_0 = 18 \text{ мм}$$

Характеристики прокладки из резины:

$$m = 1.0$$

$$q_{\text{обж}} = 4.0 \text{ МПа}$$

$$q_d = 20 \text{ МПа}$$

$$K_{\text{обж}} = 0.09$$

$$E_{II}=14 \text{ МПа}$$

Усилие, необходимое для смятия прокладки при затяжке:

$$P_{\text{обж}}=0.5 \times \pi \times D_{\text{сп}} \times b_0 \times q_{\text{обж}} = 5.01 \times 10^4 \text{ Н} \quad (398)$$

Усилие на прокладке в рабочих условиях, необходимое для обеспечения герметичности фланцевого соединения, в случае расчета на действие наружного давления принимают:  $R_{II}=0 \text{ Н}$ .

Площадь поперечного сечений болтов (шпилек):  $f_b=225 \text{ мм}^2$ .

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

$$A_b=n \times f_b=6.3 \times 10^3 \text{ мм}^2 \quad (399)$$

Равнодействующая нагрузка от давления:

$$Q_d=\frac{\pi}{4} \times (D_{\text{сп}})^2 \times P=3.083 \times 10^3 \text{ Н} \quad (400)$$

Приведенная нагрузка, вызванная воздействием внешней силы и изгибающего момента:

$$Q_{FM}=\max \left( \left| F + \frac{4 \times |M|}{D_{\text{сп}}} \right|, \left| F - \frac{4 \times |M|}{D_{\text{сп}}} \right| \right) = 0 \text{ Н} \quad (401)$$

Податливость прокладки:

$$y_{\Pi} = \frac{h_{\Pi} \times K_{\text{обж}}}{E_{\Pi} \times \pi \times D_{\text{СП}} \times b_{\Pi}} = 6.445 \times 10^{-7} \text{ мм/Н} \quad (402)$$

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

$$L_{60} = 2 \times h + h_{\Pi} = 53 \text{ мм} \quad (403)$$

Эффективная длина болта (шпильки) при определении податливости:

$$L_6 = \begin{cases} L_{60} + 0.28 \times d & \text{if } bs=1 \\ L_{60} + 0.56 \times d & \text{if } bs=2 \end{cases} \quad L_6 = 58.6 \text{ мм} \quad (404)$$

Податливость болтов:

$$y_6 = \frac{L_6}{E_{206} \times A_6} = 4.367 \times 10^{-8} \text{ мм/Н} \quad (405)$$

Расчетные параметры фланцев:

- параметр длины обечайки

$$l_0 = \sqrt{D \times S_0} = 44,721 \text{ мм} \quad (406)$$

- отношение наружного диаметра тарелки фланца к внутреннему диаметру

$$K = \frac{D_H}{D} = 1.3 \quad (407)$$

- коэффициенты, зависящие от соотношения размеров тарелки фланца

$$\beta_T = \frac{K^2 \times (1 + 8.55 \times \log(K)) - 1}{(1.05 + 1.945 \times K^2) \times (K - 1)} = 1.796 \quad (408)$$

$$\beta_U = \frac{K^2 \times (1 + 8.55 \times \log(K)) - 1}{1.36(K^2 - 1) \times (K - 1)} = 8.299 \quad (409)$$

$$\beta_Y = \frac{1}{(K - 1)} \times \left[ 0.69 + 5.72 \times \frac{K^2 \times \log(K)}{(K^2 - 1)} \right] = 7.621 \quad (410)$$

$$\beta_Z = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = 3.899 \quad (411)$$

- 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  $\lambda$

$$\lambda = \frac{\beta_F \times h + 1_o}{\beta_T \times 1_o} + \frac{\beta_V \times h^3}{\beta_U \times 1_o \times (S_0)^2} = 1,766 \quad (412)$$

*Угловая податливость фланцев.*

Угловая податливость фланца при затяжке:

$$y_\phi = \frac{0.91 \times \beta_V}{E_{20} \times \lambda \times 1_o \times (S_0)^2} = 1.236 \times 10^{-9} \quad \frac{1}{\text{Н} \times \text{мм}} \quad (413)$$

Угловая податливость фланца, нагруженного внешним изгибающим моментом:

$$y_{\phi H} = \left( \frac{\pi}{4} \right)^3 \cdot \frac{D_6}{E_{20} \cdot h^3 \cdot D_H} \quad y_{\phi H} = 1.396 \times 10^{-10} \quad \frac{1}{\text{Н} \cdot \text{мм}} \quad (414)$$

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

$$C_F = \max \left[ 1, \sqrt{\frac{\pi \times D_6}{n \times (2 \times d + \frac{6 \times h}{m+0.5})}} \right] = 1 \quad (415)$$

Приведенный диаметр плоского фланца  $D_{\text{пр}} = 400$  мм.

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

$$b = 0.5(D_6 - D_{\text{сп}}) \quad b = 18.5 \text{ мм} \quad (416)$$

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

$$e = 0.5 \times (D_{\text{сп}} - D - S_0) \quad e = 19 \text{ мм} \quad (417)$$

Эквивалентная толщина втулки плоских фланцев:  $S_9 = S_0 = 5$  мм.

Коэффициент жесткости фланцевого соединения для приварных встык и плоских фланцев:

$$\gamma = \frac{1}{y_{\text{п}} + y_6 \times \frac{E_{206}}{E_6} + 2 \times b^2 \times y_{\text{ф}} \times \frac{E_{20}}{E}} = 6,422 \times 10^5 \quad (418)$$

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

$$\alpha = 1 - \frac{y_{II} - 2 \times e \times y_{\phi} \times b}{y_{II} + y_B + 2 \times b^2 \times y_{\phi}} = 1.146 \quad (419)$$

Коэффициент жесткости фланцевого соединения, нагруженного внешним изгибающим моментом:

$$\alpha_M = \frac{y_{\phi} + 2 \times y_{\phi H} \times b \times \left( b + e - \frac{e^2}{D_{СП}} \right)}{y_{\phi} + y_{II} \times \left( \frac{D}{D_{СП}} \right)^2 + 2 \times y_{\phi H} \times b^2} = 0.26 \quad (420)$$

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

$$Q_t = \gamma [2\alpha_{\phi} \times h \times (t_{\phi} - 20) - 2\alpha_{\phi} \times h \times (t_{\phi} - 20)] = 8,271 \times 10^3 \text{ Н} \quad (421)$$

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

$$P_{\phi 1} = \max \left[ \begin{array}{l} \alpha \times (Q_D + F) + R_{II} + \frac{4 \times \alpha_M \times |M|}{D_{СП}} \\ \alpha \times (Q_D + F) + R_{II} + \frac{4 \times \alpha_M \times |M|}{D_{СП}} - Q_t \end{array} \right] = 3.534 \times 10^3 \text{ Н} \quad (422)$$

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

$$P_{\phi 2} = \max(P_{\text{обж}}, 0.4 \times A_{\phi} \times \sigma_{20\phi}) \quad P_{\text{обж}} = 5.01 \times 10^4 \text{ Н} \quad P_{\phi 2} = 3.704 \times 10^5 \text{ Н} \quad (423)$$

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

$$P_{\text{бм}} = \max(P_{\text{б1}}, P_{\text{б2}}) \quad P_{\text{бм}} = 3.704 \times 10^5 \text{ Н} \quad (424)$$

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

$$P_{\text{бр}} = P_{\text{бм}} + (1-\alpha) \times (Q_{\text{д}} + F) + Q_{\text{т}} + \frac{4 \times (1-\alpha_{\text{м}}) \times |M|}{D_{\text{СП}}} = 3.783 \times 10^5 \text{ Н} \quad (425)$$

*Проверка прочности болтов (шпилек) и прокладки.*

Расчетные напряжения в болтах (шпильках):

- при затяжке

$$\sigma_{\text{б1}} = \frac{P_{\text{бм}}}{A_{\text{б}}} = 58.8 \text{ МПа} \quad (426)$$

- в рабочих условиях

$$\sigma_{\text{б2}} = \frac{P_{\text{бр}}}{A_{\text{б}}} = 60,041 \text{ МПа} \quad (427)$$

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

$$Usl\_1 = \begin{cases} \text{"Условия прочности в при затяжке НЕ выполняются"} & \text{if } \sigma_{\text{б1}} > \sigma_{206} \\ \text{"Условия прочности в рабочих условиях НЕ выполняются"} & \text{if } \sigma_{\text{б2}} > \sigma_{\text{д.б}} \\ \text{"Условия прочности выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Usl\_1= "Условия прочности выполняются"

$$\sigma_{61}=58.8 \text{ МПа} \quad \sigma_{206}=147 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{62}=59.829 \text{ МПа} \quad \sigma_{д.б}=145 \text{ МПа} .$$

Удельное давление на прокладку

$$q = \frac{\max(P_{6m}, P_{6p})}{\pi \times D_{СП} \times b_{П}} = 12.641 \text{ МПа} \quad (428)$$

*Условие прочности прокладки (проверяется для мягких прокладок).*

$$Usl\_2 = \begin{cases} \text{"Условие прочности прокладки НЕ выполняется"} & \text{if } q > q_d \\ \text{"Условие прочности прокладки выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Usl\_2 = "Условие прочности прокладки выполняется"

$$q=12.597 \text{ МПа} \quad q_d=20 \text{ МПа} .$$

*Расчет фланцев на статическую прочность.*

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

$$M_M = C_F \times P_{6m} \times b = 6.853 \times 10^6 \text{ Н} \times \text{мм} \quad (429)$$

Расчетный изгибающий момент, действующий на фланец в рабочих условиях для приварного встык фланца, плоского фланца и бурта свободного фланца:

$$M_P = C_F \times \max \left[ P_{6p} \times b + (Q_D + Q_{FM}) \times e, |Q_D + Q_{FM}| \times e \right] = 7.056 \times 10^6 \text{ Н} \times \text{мм} \quad (430)$$

Расчетные напряжения во фланце при затяжке:

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

$$\sigma_{0M} = \frac{M_M}{\lambda \times (S_0 - c_0)^2 \times D_{\text{ПР}}} = 403,985 \text{ МПа} \quad (431)$$

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

- радиальное напряжение

$$\sigma_{\text{РМ}} = \frac{1.33 \times \beta_F \times h + l_0}{\lambda \times h^2 \times l_0 \times D} = 26,02 \text{ МПа} \quad (432)$$

- окружное напряжение

$$\sigma_{\text{ТМ}} = \frac{\beta_Y \times M_M}{h^2 \times D} = 107,475 \text{ МПа} \quad (433)$$

Расчетные напряжения во фланце в рабочих условиях:

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

$$\sigma_{0p} = \frac{M_p}{\lambda \times (S_0 - c_0)^2 \times D_{\text{ПР}}} = 415,966 \text{ МПа} \quad (434)$$

- максимальные меридиональные мембранные напряжения в обечайке плоского фланца

$$\sigma_{0mp} = \max \left[ \frac{Q_d + F + \frac{4|M|}{D_{СП}}}{\pi \times (S_0 + D) \times (S_0 - c_0)}, \frac{Q_d + F - \frac{4|M|}{D_{СП}}}{\pi \times (S_0 + D) \times (S_0 - c_0)} \right] = 0,494 \text{ МПа} \quad (435)$$

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

- радиальное напряжение

$$\sigma_{Rp} = \frac{1,33 \times \beta_F \times h + l_0}{\lambda \times h^2 \times l_0 \times D} \times M_p = 26,791 \text{ МПа} \quad (436)$$

- окружное напряжение

$$\sigma_{Tp} = \frac{\beta_Y \times M_p}{h^2 \times D} - \beta_Z \times \sigma_{Rp} = 110,662 \text{ МПа} \quad (437)$$

где  $[\sigma]_R$ — допускаемое значение суммарных общих и местных условных упругих мембранных и изгибных напряжений в соответствии с пунктом 8.10 ГОСТ Р 52857.1, МПа:  $[\sigma]_R = 3[\sigma]$

$$\sigma_R = 3 \times \sigma_{д.ф} = 537 \text{ МПа} \quad (438)$$

КТ = 1.3 при расчете с учетом стесненности температурных деформаций.  
При расчете без учета стесненности температурных деформаций КТ = 1.

Для плоских фланцев при  $D \geq 400$  мм допускается принимать:

$$\sigma_0 = \frac{1,3}{K_T} \times \sigma_R = 537 \text{ МПа} \quad (439)$$

*Проверка условий статической прочности фланцев.*

$$\sigma_{P_{\max}} = \max \left( \left( \left| \sigma_{0P} - \sigma_{0MP} + \sigma_{Tp} \right| \right), \left( \left| \sigma_{0P} - \sigma_{0MP} + \sigma_{Rp} \right| \right), \left( \left| \sigma_{0P} + \sigma_{0,mp} \right| \right) \right) \quad (440)$$

$$\sigma_{3\max} = \max(|\sigma_{0,м} + \sigma_{Rм}|, |\sigma_{0,м} + \sigma_{Tм}|) \quad (441)$$

PR\_1= “условия статической прочности при затяжке и в рабочих условиях выполняются”

PR\_3= “Условия статической прочности НЕ выполняются”

$$Usl_3 = \begin{cases} PR_1 & \text{if } \sigma_{3\max} \leq K_T \cdot \sigma_0 \wedge \sigma_{P\max} \leq K_T \cdot \sigma_0 \\ PR_3 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Usl\_3 = "Условия статической прочности при затяжке и в рабочих условиях выполняются"

$$\sigma_{3\max} = 511.46 \text{ МПа} \quad K_T \times \sigma_0 = 698.1 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{P\max} = 526.133 \text{ МПа} \quad K_T \times \sigma_0 = 698.1 \text{ МПа}$$

*Проверка углов поворота фланцев.*

Допустимый угол поворота приварного встык фланца:

$$[\Theta] = 0,006 \text{ при } D \leq 400 \text{ мм,}$$

$$[\Theta] = 0,013 \text{ при } D > 2000 \text{ мм.}$$

При значениях  $400 \text{ мм} < D \leq 2000 \text{ мм}$  допустимый угол поворота  $[\Theta]$  определяют с помощью линейной интерполяции.

$$\text{при } D=400 \text{ мм } \Theta=0.006$$

Допустимый угол поворота плоского фланца  $\Theta_D=0.013$

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

Usl\_P= "Условие поворота плоского фланца выполняется"

#### 4.2.7 Расчет трубной решетки теплообменного аппарата

Рабочая температура холодного теплоносителя:  $t_{\text{хол}}=14$  °С.

Рабочая температура горячего теплоносителя:  $t_{\text{гор}}=60$  °С.

Толщина аппарата:  $s_1 := 5$  мм.

Сумма прибавок к расчетной толщине стенки, мм:  $c := 2$ .

Длина труб:  $l_{\text{труб}} := 3000$  мм.

Наружный диаметр фланца:  $D_{\text{н}} := 520$  мм.

Длина цилиндрической обечайки:  $l := 1500$  мм.

Число труб:  $n_{\text{тр}}=140$ .

Для трубной решетки используем материал сталь 12Х18Н10Т.

Допускаемое напряжение трубной решетки:  $\sigma_{\text{реш}} := 180$  МПа.

Модуль упругости:  $E_{\text{реш}} := 1.94 \cdot 10^5$  МПа.

Для труб используется материал сталь 12Х18Н10Т.

Допускаемое напряжение трубного пучка:

$$t_{\text{таб1}} := \begin{pmatrix} 20 \\ 100 \end{pmatrix} \quad \sigma_{\text{таб1}} := \begin{pmatrix} 184 \\ 174 \end{pmatrix} \quad (442)$$

$$\sigma_{\text{тр120}} := \text{Floor}(\text{linterp}(t_{\text{таб1}}, \sigma_{\text{таб1}}, t_{\text{хол}}), 0.5) = 184.5 \quad \text{МПа} \quad (443)$$

Модуль упругости:  $E_{\text{тр120}} := 1.76 \cdot 10^5$  МПа.

Внутренний диаметр аппарата:  $D := 400$  мм.

Диаметр трубы внутренний:  $d_{\text{тр}} := 18$  мм.

Толщина стенки трубы:  $s_{\text{тр}} := 2$  мм.

Диаметр трубы наружный:  $d_{\text{нр}} := 20$  мм.

Внутренний радиус кожуха:  $a := \frac{D}{2} = 200$  мм.

Расстояние от оси кожуха до оси наиболее удаленной трубы:  $a_1 := 174$  мм.

Плотность рабочей среды:  $\rho_{\text{ср}} := 0.131$  кг/м<sup>3</sup>.

Рабочее избыточное давление в трубном пространстве:  $P_{\text{тр}} := 0.02$  МПа.

Рабочее избыточное давление в межтрубном пространстве:  $P_{\text{мт}} := 0.02$  МПа.

Расчет давлений: Определить гидростатическое давление в аппарате.

Плотность воды при гидроиспытаниях (температура 20 градусов):

$\rho_{\text{вод}} := 979$  кг/м<sup>3</sup>.

Ускорение свободного падения:  $g = 9,8$  м/с<sup>2</sup>.

Высоту гидравлического столба в аппарате принимаем равной диаметру аппарата:  $H_{\text{гид}} := D = 400$  мм.

Давление гидравлического столба при гидроиспытаниях:

$$P_{\text{гид1}} := \frac{g \cdot H_{\text{гид}} \cdot \rho_{\text{вод}}}{10^9} = 3.838 \times 10^{-3} \text{ МПа} \quad (444)$$

Так как коэффициент заполнения аппарата при рабочем состоянии нам не известен, будем считать, что аппарат полностью заполнен (рассмотрим самые худшие условия, которые могут возникнуть).

Давление гидравлического столба при рабочих условиях:

$$P_{\text{гид2}} := \frac{g \cdot H_{\text{гид}} \cdot \rho_{\text{ср}}}{10^9} = 5.135 \times 10^{-7} \text{ МПа} \quad (445)$$

Для дальнейшего расчета выберем максимально возможное гидравлическое давление, которое может быть оказано на аппарат:

$$P_{\text{гид\_мак}} := \max(P_{\text{гид1}}, P_{\text{гид2}}) = 3.838 \times 10^{-3} \text{ МПа} \quad (446)$$

*Давление в трубном пространстве.*

Расчетное давление в трубном пространстве в рабочих условиях:

$$P_{\text{рас1}} := (P_{\text{тр}} + P_{\text{гид\_мак}}) = 0.024 \text{ МПа} \quad (447)$$

Допускаемое напряжение материала 12x18н10т при температуре 20 градусов:  $\sigma_{\text{Д20}} := 174$  МПа.

Допускаемое напряжение материала 12x18н10т при рабочей температуре горячего теплоносителя:  $\sigma_{\text{т2}} := 180$  МПа.

Давление при гидроиспытаниях:

$$P_{\text{и1}} := 1.25 \cdot P_{\text{рас1}} \cdot \frac{\sigma_{\text{Д20}}}{\sigma_{\text{т2}}} = 0.029 \text{ МПа} \quad (448)$$

Условное давление: (для горячего теплоносителя)

$$P_{\text{усл1}} := P_{\text{рас1}} \cdot \frac{\sigma_{\text{Д20}}}{\sigma_{\text{т2}}} = 0.023 \text{ МПа} \quad (449)$$

*Давление в межтрубном пространстве.*

Расчетное давление:

$$P_{\text{рас2}} := (P_{\text{мт}} + P_{\text{гид\_мак}}) = 0.024 \text{ МПа} \quad (450)$$

Давление при гидроиспытаниях:

$$P_{н2} := 1.25 \cdot P_{рас2} \cdot \frac{\sigma_{Д20}}{\sigma_{t1}} = 0.03 \text{ МПа} \quad (451)$$

Условное давление: (межтрубного пространства)

$$P_{усл2} := P_{рас2} \cdot \frac{\sigma_{Д20}}{\sigma_{t1}} = 0.024 \text{ МПа} \quad (452)$$

*Расчет трубной решетки.*

Относительную характеристику безтрубного края трубной решетки:

$$m_n := \frac{a}{a_1} = 1.149 \quad (453)$$

Шаг расположения труб (располагаются по равнобедренному треугольнику):

$$t := 1.2 \cdot d_{нр} + 2 = 26 \text{ мм} \quad (454)$$

Коэффициент прочности решетки:

$$\phi_p := \frac{t - 21}{t} = 0.192 \quad (455)$$

Толщина трубной решетки для аппарата с U-образными трубами:

$$s_p := \frac{D}{3.4} \cdot \sqrt{\frac{P_{н2}}{\sigma_{реш} \cdot \phi_p}} + c = 5.452 \text{ мм} \quad (456)$$

Принимаем толщину трубной решетки:  $s_p = 25$  мм.

Коэффициенты влияния давления на трубную решетку вычисляют по формулам:

- со стороны межтрубного пространства:

$$\eta_M := 1 - \frac{n_{тр} \cdot d_{нр}^2}{4 \cdot a_1^2} = 0.538 \quad (457)$$

- со стороны трубного пространства:

$$\eta_T := 1 - \frac{n_{тр} \cdot (d_{нр} - 2 \cdot s_{тр})^2}{4 \cdot a_1^2} = 0.704 \quad (458)$$

Основные характеристики жесткости элементов теплообменного аппарата.

Модуль упругости основания (системы труб) вычисляют по формуле:

$$K_y := \frac{E_{тр120} \cdot (\eta_T - \eta_M)}{l_{туб}} = 9.766 \frac{Н}{мм^3} \quad (459)$$

Модуль упругости кожуха при температуре 60,09 градусов:

$$E_{кож} := 1.76 \cdot 10^5 \text{ МПа} \quad (460)$$

Приведенное отношение жесткости труб к жесткости кожуха вычисляют по формуле:

$$\rho := \frac{K_y \cdot a_1 \cdot l_{\text{труб}}}{E_{\text{кож}} \cdot s_1} = 5.793 \quad (461)$$

Коэффициенты изменения жесткости системы трубы — кожух вычисляют по формулам:

Для аппаратов с неподвижными трубными решетками  $K_{p1}=K_{q1}=0$ .

$K_q$  - коэффициент изменения жесткости системы трубы - кожух при действии осевой силы:

$$K_q := 1 + K_{p1} = 1 \quad (462)$$

$K_p$  - коэффициент изменения жесткости системы трубы - кожух при действии давления:

$$K_p := 1 + K_{q1} = 1 \quad (463)$$

Коэффициент системы решетка — трубы:

Коэффициент жесткости перфорированной плиты  $\psi_0$  при  $\eta_{\text{т}} = 0.704$  определяют по таблице.

Таблица 47 - Коэффициент жесткости перфорированной плиты  $\psi_0$

$\eta_{\text{т}}$	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85
$\psi_0$	0,12	0,15	0,2	0,25	0,3	0,37	0,44	0,51	0,59	0,68

$$\eta_{\text{т\_таб}} := \begin{pmatrix} 0.7 \\ 0.75 \end{pmatrix} \quad \psi_{0\_таб} := \begin{pmatrix} 0.44 \\ 0.51 \end{pmatrix} \quad (464)$$

Коэффициент прочности перфорированной трубы:

$$\psi_0 := \text{Floor}[\text{interp}[\eta_{\Gamma\_таб}, \psi_{0\_таб}, (\eta_{\Gamma})], 0.005] = 0.445 \quad (465)$$

Модуль продольной упругости материала трубной решетки:

$$E_p := 1.76 \cdot 10^5 \text{ МПа.}$$

Коэффициент системы решетка - трубы:

$$\beta := \frac{1.82}{s_p} \cdot \sqrt[4]{\frac{K_y \cdot s_p}{\psi_0 \cdot E_{реш}}} = 0.017 \quad (466)$$

Безразмерный параметр системы решетка — трубы вычисляют по формуле:

$$\omega := \beta \cdot a_1 = 2.921 \quad (467)$$

*Определение усилий в элементах теплообменного аппарата.*

Коэффициент жесткости фланцевого соединения при изгибе  $K_{\phi} := 1$   
Н·мм.

Максимальное давление в трубном пространстве:  $P_{\text{мак1}} := 0.2$  МПа.

Максимальное давление в межтрубном пространстве:  $P_{\text{мак2}} := 0.2$  МПа.

Радиус центра тяжести тарелки фланца кожуха:

$$R_1 := \frac{D_H - D}{4} + \frac{D}{2} = 230 \text{ мм} \quad (468)$$

Коэффициент влияния давления на продольную деформацию труб:

$$m_{cp} := 0.15 \cdot \frac{n_{тр} \cdot (d_{нр} - 2 \cdot s_{тр})^2}{4 \cdot a_1^2} = 0.044 \quad (469)$$

Приведенное давление  $p_0$  вычисляют по формуле:

- коэффициент линейного расширения кожуха, ГОСТ Р 52857.1-2007 [56],

$1/C$ ,  $\alpha_k := 11.6 \cdot 10^{-6}$   $\alpha_T := \alpha_k$  так как материал идентичен.

$$p_0 := [\alpha_k \cdot (t_{гор} - 20) - \alpha_T \cdot (t_{хол} - 20)] \cdot K_y \cdot 1 + \\ + [\eta_T - 1 + m_{cp} + m_n \cdot (m_n + 0.5\rho \cdot K_q)] \cdot P_{и2} - \\ - [\eta_M - 1 + m_{cp} + m_n \cdot (m_n + 0.3\rho \cdot K_p)] \cdot P_{мак1} = 7.368 \text{ МПа} \quad (470)$$

Приведенное отношение жесткости труб к жесткости фланцевого соединения вычисляют по формуле, Па:

$$\rho_1 := \frac{K_y \cdot a \cdot a_1}{\beta^2 \cdot K_\phi \cdot R_1} = 5.243 \times 10^6 \quad (471)$$

Коэффициенты, учитывающие влияние безтрубного края и поддерживающие влияние труб Ф1, Ф2, Ф3 определяют по таблице:

Таблица 48 - Коэффициенты  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$ ,  $\Phi_3$

$\omega$	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
$\Phi_1$	2	2,0	2,06	2,28	2,79	3,58	4,5	5,39
$\Phi_2$	0	0,02	0,19	0,62	1,32	2,16	2,94	3,59
$\Phi_3$	0	0,19	0,76	1,65	2,75	3,76	4,65	5,36
$\omega$	4	5	6	7	8	9	10	> 10
$\Phi_1$	6,19	7,65	9,08	10,51	11,94	13,36	14,78	$\sqrt{2\omega}$
$\Phi_2$	4,13	5,13	6,15	7,17	8,19	9,2	10,21	$\omega$
$\Phi_3$	6,03	7,38	8,81	10,24	11,66	13,08	14,5	$\sqrt{2\omega}$

Безразмерный параметр системы решетка – трубы  $\omega = 2.921$ .

$$\omega_{_1} := \begin{pmatrix} 2 \\ 2.5 \end{pmatrix} \quad \Phi_{1\_раб} := \begin{pmatrix} 2.79 \\ 3.58 \end{pmatrix} \quad (472)$$

$$\Phi_1 := \text{Floor}(\text{linterp}(\omega_{_1}, \Phi_{1\_раб}, \omega), 0.05) = 4.2 \quad (473)$$

$$\omega_{_2} := \begin{pmatrix} 2 \\ 2.5 \end{pmatrix} \quad \Phi_{2\_раб} := \begin{pmatrix} 1.32 \\ 2.16 \end{pmatrix} \quad (474)$$

$$\Phi_2 := \text{Floor}(\text{linterp}(\omega_{_2}, \Phi_{2\_раб}, \omega), 0.05) = 2.85 \quad (475)$$

$$\omega_{_3} := \begin{pmatrix} 2 \\ 2.5 \end{pmatrix} \quad \Phi_{3\_раб} := \begin{pmatrix} 2.75 \\ 3.76 \end{pmatrix} \quad (476)$$

$$\Phi_3 := \text{Floor}(\text{linterp}(\omega_{_3}, \Phi_{3\_раб}, \omega), 0.05) = 4.6 \quad (477)$$

Значения  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  вычисляются по формулам:

$$t_1 := 1 + 1.4\omega \cdot (m_n - 1) = 1.611 \quad (478)$$

$$T_1 := \Phi_1 \cdot [m_n + 0.5(1 + m_n \cdot t_1) \cdot (t_1 - 1)] = 8.487 \quad (479)$$

$$T_2 := \Phi_2 \cdot t_1 = 4.592 \quad (480)$$

$$T_3 := \Phi_3 \cdot m_n = 5.287 \quad (481)$$

Изгибающий момент и перерезывающую силу, распределенные по краю трубной решетки, вычисляют по формулам:

- для изгибающего момента:

$s_{1k}$  - толщина стенки кожуха в месте соединения с трубной решеткой или с фланцем:  $s_{1k} := 5 \text{ мм}$      $s_{2k} := 5 \text{ мм}$ .

$\beta_1$  - коэффициент системы кожух - решетка, 1/мм;

$$\beta_1 := \frac{1.3}{\sqrt{s_{1k} \cdot a}} = 0.041 \quad (482)$$

$\beta_2$  - коэффициент системы обечайка - фланец камеры, 1/мм;

$$\beta_2 := \frac{1.3}{\sqrt{s_{2k} \cdot a}} = 0.041 \quad (483)$$

$h_1$  - толщина тарелки фланца кожуха,  $h_1 := 25 \text{ мм}$ ;

$m_1$  - коэффициент влияния давления на изгиб фланца:

$$m_1 := \frac{1 + \beta_1 \cdot h_1}{\beta_1^2} = 1.2 \times 10^3 \quad (484)$$

$m_2$  - коэффициент влияния давления на изгиб 2-го фланца:

$$m_2 := \frac{1 + \beta_2 \cdot h_1}{\beta_2^2} = 1.2 \times 10^3 \quad (485)$$

$p_1$  - приведенное давление на фланцы, Па:

$$p_1 := \frac{K_y}{\beta \cdot K_\phi} \cdot (m_1 \cdot P_{\text{мак1}} - m_2 \cdot P_{\text{мак2}}) = 0 \quad (486)$$

Расчетное давление воздушного охлаждения в камере аппарата, МПа:

$$P := P_{\text{мак2}} = 0.2 \quad (487)$$

- для изгибающего момента:

$$M_{\text{п}} := \left( \frac{a_1}{\beta} \right) \cdot \frac{p_1 \cdot (T_1 + \rho \cdot K_q) - p_0 \cdot T_2}{(T_1 + \rho \cdot K_q) \cdot (T_3 + \rho_1) - T_2^2} = -4.683 \times 10^{-3} \text{ Н*мм.} \quad (488)$$

- для перерезывающей силы:

$$Q_{\text{п}} := a_1 \cdot \frac{p_0 \cdot (T_3 + \rho_1) - p_1 \cdot T_2}{(T_1 + \rho \cdot K_q) \cdot (T_3 + \rho_1) - T_2^2} = 89.772 \text{ Н.} \quad (489)$$

Изгибающий момент и перерезывающие силы, распределенные по периметру перфорированной зоны решетки, вычисляются по формулам:

- для изгибающего момента:

$$M_a := M_{\text{п}} + (a - a_1) \cdot Q_{\text{п}} = 2.334 \times 10^3 \text{ Н*мм.} \quad (490)$$

- для перерезывающей силы:

$$Q_a := m_{\text{п}} \cdot Q_{\text{п}} = 103.187 \text{ Н.} \quad (491)$$

Уклон втулки (принимаем):

$$i := \frac{1}{3} \quad (492)$$

Осевую силу и изгибающий момент, действующие на трубу, вычисляют по формулам:

- для осевой силы, Н:

$$N_T := \frac{\pi \cdot a_1}{i} \cdot [(\eta_M \cdot P_{\text{мак2}} - \eta_T \cdot P_{\text{мак1}}) \cdot a_1 + \Phi_1 \cdot Q_a + \Phi_2 \cdot \beta \cdot M_a] = 8.844 \times 10^5 \quad (493)$$

Внутренний диаметр трубы, мм:

$$d_B := d_{\text{нр}} - 2 \cdot s_{\text{тр}} = 21 \quad (494)$$

$J_T$  - момент инерции поперечного сечения трубы, мм<sup>4</sup>;

$$J_T := \frac{\pi}{64} \cdot (d_{\text{нр}}^4 - d_B^4) = 4.637 \times 10^3 \quad (495)$$

Приведенная длина трубы, используемая при расчете прогиба труб и изгибающего момента, действующего на трубу, мм:

$$l_{\text{пр}} := l_{\text{труб}} = 3 \times 10^3 \quad (496)$$

Усилия в кожухе вычисляют по формулам:

- усилие, распределенное по периметру кожуха:

$$Q_k := \frac{a}{2} \cdot P_{H2} + Q_{\Pi} = 92.752 \text{ Н.} \quad (497)$$

- изгибающий момент, распределенный по периметру кожуха:

$$M_k := \frac{K_1}{\rho \cdot K_{\Phi} \cdot \beta} \cdot (T_2 \cdot Q_{\Pi} + T_3 \cdot \beta \cdot M_{\Pi}) - \frac{P_{\text{мак1}}}{2 \cdot \beta_1^2} = 4.179 \times 10^3 \text{ Н*мм.} \quad (498)$$

- суммарная осевая сила, действующая на кожух:

$$F := \pi D \cdot Q_k = 1.166 \times 10^5 \text{ Н.} \quad (499)$$

*Расчетные напряжения в элементах конструкции.*

$b_1$  - ширина тарелки фланца кожуха,

$$b_1 := \frac{D_H - D}{2} = 60 \text{ мм.} \quad (500)$$

$R_1$  - радиус центра тяжести тарелки фланца кожуха,

$$R_1 := \frac{D_H - D}{4} = 30 \text{ мм.} \quad (501)$$

*Расчетные напряжения в трубных решетках.*

Напряжения в трубной решетке в месте соединения с кожухом вычисляют по формулам:

- изгибные:

$$\sigma_{p1} := \frac{6 \cdot |M_{п}|}{(s_{1p} - c)^2} = 5.312 \times 10^{-5} \text{ МПа.} \quad (502)$$

- касательные:

$$\tau_{1p} := \frac{|Q_{п}|}{s_{1p} - c} = 3.903 \text{ МПа.} \quad (503)$$

В - коэффициент, определяемый по таблице 6, в зависимости от  $\omega$  и  $n_B$ :

$$\omega = 2.921.$$

$n_B$  - коэффициент для определения максимального изгибающего момента в перфорированной части трубной решетки;

$$n_B := \frac{Q_a}{\beta \cdot M_a} = 2.633 \quad (504)$$

Таблица 49 - Коэффициент В

$n_B$	$\omega$							
	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	5,0	$\geq 10$
1,0	0,843	0,972	1,041	0,991	0,964	1,029	1,071	1,117
0,9	0,829	0,943	1,000	0,949	0,940	1,000	1,040	1,083
0,8	0,815	0,914	0,960	0,908	0,910	0,971	1,009	1,051
0,7	0,800	0,886	0,920	0,871	0,884	0,944	0,979	1,020
0,6	0,786	0,858	0,880	0,836	0,860	0,918	0,951	0,990
0,5	0,771	0,829	0,840	0,804	0,839	0,894	0,925	0,963
0,4	0,757	0,801	0,799	0,777	0,819	0,871	0,900	0,938
0,3	0,742	0,773	0,761	0,754	0,802	0,852	0,878	0,915
0,2	0,728	0,744	0,732	0,737	0,789	0,835	0,860	0,896
0,1	0,714	0,716	0,714	0,727	0,780	0,823	0,846	0,882
0	0,700	0,702	0,709	0,725	0,776	0,816	0,837	0,874
-0,1	0,703	0,707	0,716	0,732	0,778	0,815	0,835	0,873
-0,2	0,705	0,712	0,723	0,741	0,787	0,821	0,841	0,876
-0,3	0,708	0,717	0,730	0,750	0,796	0,828	0,846	0,879
-0,4	0,711	0,722	0,738	0,759	0,805	0,835	0,852	0,882
-0,5	0,713	0,728	0,745	0,768	0,814	0,842	0,857	0,884
-0,6	0,716	0,733	0,753	0,777	0,823	0,850	0,863	0,887
-0,7	0,718	0,738	0,760	0,786	0,832	0,857	0,869	0,890
-0,8	0,721	0,743	0,768	0,795	0,841	0,864	0,874	0,893
-0,9	0,723	0,748	0,775	0,804	0,849	0,871	0,880	0,895
-1,0	0,726	0,754	0,783	0,813	0,858	0,878	0,885	0,898

$$B := 0.984 \quad (505)$$

где  $A$  - коэффициент, определяемый по таблице 7 в зависимости от  $\omega$  и  $m_A$ ;

$$m_A := \frac{\beta \cdot M_a}{Q_a} = 0.38 \quad (506)$$

$$A := 0.594 \quad (507)$$

Таблица 50 - Коэффициент  $A$

$m_A$	$\omega$							
	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	5,0	$\geq 10$
-1,0	0,726	0,754	0,783	0,813	0,858	0,878	0,885	0,898
-0,9	0,656	0,683	0,712	0,740	0,781	0,797	0,802	0,811
-0,8	0,586	0,613	0,641	0,668	0,705	0,716	0,720	0,724
-0,7	0,516	0,543	0,570	0,596	0,628	0,636	0,637	0,637
-0,6	0,446	0,473	0,500	0,524	0,551	0,555	0,554	0,550
-0,5	0,376	0,403	0,429	0,451	0,474	0,474	0,471	0,463
-0,4	0,306	0,333	0,358	0,379	0,397	0,393	0,388	0,376
-0,3	0,236	0,262	0,287	0,307	0,320	0,313	0,305	0,289
-0,2	0,166	0,192	0,274	0,355	0,305	0,273	0,289	0,308
-0,1	0,096	0,216	0,338	0,408	0,337	0,319	0,338	0,359
0	0,144	0,284	0,402	0,461	0,376	0,370	0,392	0,414
0,1	0,214	0,353	0,466	0,514	0,420	0,426	0,450	0,474
0,2	0,284	0,422	0,530	0,567	0,470	0,485	0,511	0,537
0,3	0,354	0,491	0,593	0,620	0,523	0,546	0,575	0,603
0,4	0,424	0,559	0,657	0,672	0,580	0,610	0,641	0,671
0,5	0,494	0,628	0,721	0,725	0,639	0,677	0,709	0,742
0,6	0,564	0,697	0,785	0,778	0,701	0,745	0,779	0,814
0,7	0,634	0,766	0,849	0,831	0,765	0,814	0,851	0,888
0,8	0,704	0,834	0,913	0,884	0,830	0,885	0,923	0,963
0,9	0,773	0,903	0,977	0,937	0,896	0,956	0,997	1,040
1,0	0,843	0,972	1,041	0,991	0,964	1,030	1,071	1,117

$M_{\max}$  — максимальный расчетный изгибающий момент в перфорированной части трубной решетки.

$$((B \cdot |M_a|)) = 2.297 \times 10^3 \text{ Н*мм.} \quad (508)$$

$$A \cdot \frac{|Q_a|}{\beta} = 3.651 \times 10^3 \text{ Н*мм.} \quad (509)$$

$$M_{\max} := 3.994 \times 10^4 \text{ Н*мм.} \quad (510)$$

Напряжения в перфорированной части трубной решетки вычисляются по формулам:

- изгибные:

$$\sigma_{p2} := \frac{6 \cdot M_{\max}}{\phi_p \cdot (s_{1p} - c)^2} = 453.006 \text{ МПа.} \quad (511)$$

- касательные:

$$\tau_{2p} := \frac{|Q_a|}{\phi_p \cdot (s_{1p} - c)} = 4.486 \text{ МПа.} \quad (512)$$

*Напряжения в кожухе в месте присоединения к решетке.*

в меридиональном направлении:

- мембранные:

$$\sigma_{Mx} := \frac{|Q_k|}{(s_{1k} - c)} = 30.917 \text{ МПа.} \quad (513)$$

- изгибные:

$$\sigma_{ux} := \frac{6 \cdot |M_k|}{(s_{1k} - c)^2} = 2.786 \times 10^3 \text{ МПа.} \quad (514)$$

в окружном направлении:

- мембранные:

$$\sigma_{M\varphi} := \frac{P_{\max 1} \cdot a}{(s_{1k} - c)} = 13.333 \text{ МПа.} \quad (515)$$

- изгибные:

$$\sigma_{\text{изг}} := 0.3 \cdot \sigma_{\text{изг}} = 835.822 \text{ МПа.} \quad (516)$$

- окружные:

$$\sigma_{2r} := \frac{(d_{\text{нр}} - s_{\text{тр}}) \max(|P_{\max 2}|, |P_{\max 1}|, |P_{\max 2} - P_{\max 1}|)}{2 \cdot s_{\text{тр}}} = 0.9 \text{ МПа.} \quad (517)$$

*Проверка прочности трубных решёток.*

$$\text{Пров}_{\text{труб\_реш}} := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } \max(\tau_{1p}, \tau_{2p}) \leq 0.8 \cdot \sigma_{\text{др}} \\ \text{"Условие прочности НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

**Пров<sub>труб\_реш</sub> = "Условие прочности выполняется"**

*Проверка прочности и устойчивости кожуха.*

Допускаемое напряжение для материала кожуха теплообменного аппарата или крышки аппарата воздушного охлаждения,  $\sigma_{\text{д200}} := 184 \text{ МПа}$ ;

Условие статической прочности кожуха в месте присоединения к решетке:

$$\text{Пров}_{\text{кож}} := \begin{cases} \text{"Условие выполняется"} & \text{if } \sigma_{\text{Мх}} \leq 1.3 \cdot \sigma_{\text{д200}} \\ \text{"Условие НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

**Пров<sub>кож</sub> = "Условие выполняется"**

Расчёт трубы на прочность, устойчивость и жесткость. Расчет крепления труб к решетке.

Условие статической прочности труб:

$$\text{Пров}_{\text{ст\_прочности}} := \begin{cases} \text{"Условие выполняется"} & \text{if } \sigma_{2r} \leq \sigma_{\text{тр}120} \\ \text{"Условие НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Пров}_{\text{ст\_прочности}} = \text{"Условие выполняется"}$$

Для труб завальцованных в гладком отверстии с отбортовкой:

Площадь трубной решетки, заключенной между четырьмя трубами:

$$f := 0.866 \cdot t^2 - \frac{\pi \cdot d_{\text{тр}}^2}{4} = 330.947 \text{ мм}^2. \quad (518)$$

Трубная нагрузка:

$$q := P_{\text{рас1}} \cdot f = 7.889 \text{ Н} \quad (519)$$

$$Q := 6.357 \times 10^4 \text{ Па} \quad (520)$$

$$q := \frac{Q}{n_{\text{тр}}} = 454.071 \text{ Н} \quad (521)$$

Температурное напряжение в трубе:

$$\sigma_r := 4.853 \times 10^8 \text{ Па}. \quad (522)$$

Площадь поперечного сечения стенки трубы:

$$d_{\text{н}} := 0.025 \text{ м}; \quad d_{\text{в}} := 0.016 \text{ м}. \quad (523)$$

$$f_T := \frac{\pi}{4} \cdot (d_H^2 - d_B^2) = 2.898 \times 10^{-4} \text{ м}^2 \quad (524)$$

$$q_T := \sigma_T \cdot f_T = 1.406 \times 10^5 \text{ Н} \quad (525)$$

Суммарное усилие:

$$q_c := q - q_T = -1.402 \times 10^5 \text{ Н.} \quad (526)$$

Удельная нагрузка от давления на единицу длины окружности:

$$\sigma_0 := \frac{q}{\pi \cdot d_H} = 5.781 \times 10^3 \text{ Н/м} \quad (527)$$

$$\sigma_{0д} := 0.04 \cdot 10^6 \text{ Н/м} \quad (528)$$

$$\text{Пров}_{\text{прочности}} := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } \sigma_0 \leq \sigma_{0д} \\ \text{"Условие НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

**Пров<sub>прочности</sub> = "Условие прочности выполняется"**

#### 4.2.8 Расчёт веса теплообменного аппарата

Установка аппаратов на фундаменты или специальные несущие конструкции осуществляется с помощью опор. Для того, чтобы выбрать опору, необходимо рассчитать вес всего аппарата в рабочем состоянии.

Вес аппарата:

- 1) днище и крышка по ГОСТ 6533-78 [47]

$$m_{д+к} = 2 * 4,3 = 8,6 \text{ кг} \quad (529)$$

- 2) обечайка

$$V = l * D * \pi * S_R = 1,5 * 0,4 * 3,14 * 0,005 = 0,009 \text{ м}^3 \quad (530)$$

$$m_{об} = \rho * V = 7920 * 0,008 = 74,6 \text{ кг} \quad (531)$$

$\rho$  – удельный вес стали 12Х18Н10Т, кг/м<sup>3</sup>.

3) штуцера

$$m_{шт} = 2 * 7,9 + 2 * 5,2 + 1,1 = 27,3 \text{ кг} \quad (532)$$

4) фланцы

$$m_{фл} = 2,6 + 0,55 + 2 * 3,16 + 2 * 9,33 = 28,13 \text{ кг} \quad (533)$$

5) масса воды в полностью заполненном аппарате:

$$m_{H_2O} = \frac{\pi * D^2 * l * \rho_{H_2O}}{4} = \frac{3,14 * 0,4^2 * 1,5 * 1000}{4} = 188,4 \text{ кг} \quad (534)$$

Общая масса аппарата, заполненного водой:

$$m_{общ} = 8,6 + 47,6 + 27,3 + 28,13 + 188,4 \approx 300 \text{ кг} \quad (535)$$

Вес аппарата, заполненного водой:

$$P = m_{общ} * g = 300 * 9,81 = 2746,8 \approx 2943 \text{ Н} \quad (536)$$

Принимаем число опорных лап  $n_l = 4$ , определяем нагрузку, приходящуюся на одну опорную лапу:

$$P_l = \frac{P}{n_l} = \frac{2943}{4} = 735,8 \text{ Н} \quad (537)$$

Принимаем опорные лапы на нагрузку  $P_0=1600$  Н, тип 1 (штампованные)  
 [табл. 29.2, стр.673; 3].

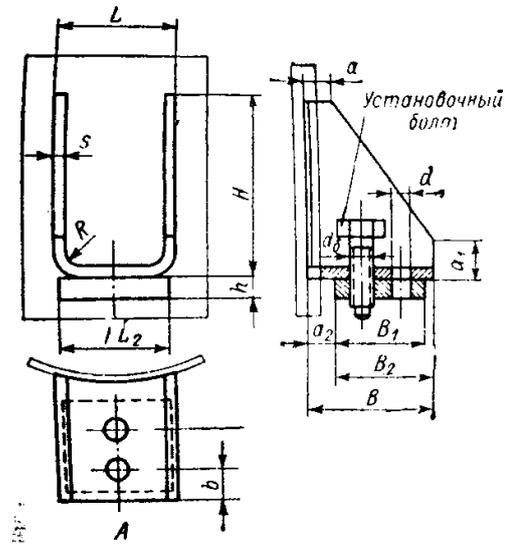


Рисунок 37. Опора

Таблица 51 – Опоры вертикальных цилиндрических аппаратов

P, H	L	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	B	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	b	b <sub>1</sub>	H	h	S	a	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	R	d	d <sub>6</sub>	Масса кг	Подкладной лист		
	Мм																		s <sub>1</sub>	L <sub>3</sub>	H <sub>1</sub>
0,16	50	60	40	60	45	50	15	40	85	6	4	10	15	10	8	12	M10	0,46	6	75	120

## Глава 5. Социальная ответственность

Данный раздел актуален в связи с V разделом «Генерального соглашения между общероссийскими объединениями профсоюзов, общероссийскими объединениями работодателей и Правительством Российской Федерации на 2014 – 2016 годы (продлен на 2017 год)». В котором сказано, что «стороны считают обеспечение безопасности жизни и здоровья работников в процессе трудовой деятельности одним из национальных приоритетов в целях сохранения человеческого капитала и рассматривают их в неразрывной связи с решением задач по улучшению условий и охраны труда, промышленной и экологической безопасности» [32, с.19].

В данной работе осуществляется проектирование вакуум-выпарной установки омического нагрева плодово-ягодных соков непрерывного действия. Цели данного раздела дипломной работы – это дать характеристику рабочей зоне и технологическому процессу; рассмотреть технологическое оборудование и определить все связанные с ним опасные и вредные производственные факторы; подобрать необходимые средства защиты и безопасности опираясь на законодательную и нормативную документацию и учебную литературу.

Вакуум-выпарная установка омического нагрева растительного сырья непрерывного действия включает в себя:

- электроды под напряжением;
- центробежный и вакуумный насосы;
- трубопроводы и паропроводы;
- сборник исходного раствора и буферная емкость;
- контрольно-измерительные приборы;
- теплообменный аппарат: холодильник-конденсатор.

К основным элементам производственного процесса, формирующим вредные и опасные факторы можно отнести (табл. 52):

Таблица 52 - Вредные и опасные производственные факторы

<i><b>Факторы</b></i>	
<i><b>Вредные</b></i>	<i><b>Опасные</b></i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>– превышение уровня шума и вибрации</li> <li>– недостаточная освещённость рабочей зоны</li> <li>– производственные метеоусловия: повышенная температура</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– электрический ток</li> <li>– нагретые поверхности</li> <li>– движущиеся части машин и механизмов</li> <li>– давление (разрушение аппарата, работающего под давлением)</li> </ul>

Оборудование, используемое в данном технологическом процессе, простое в эксплуатации и не требует дополнительных усилий в ремонте и обслуживании. Для безопасной и безаварийной эксплуатации все оборудование должно подвергаться технологическому обслуживанию, которое осуществляется в соответствии с «Системой технического обслуживания и ремонта оборудования предприятий химической промышленности», согласованной с Ростехнадзором. Для предупреждения преждевременного износа оборудования и сохранения его в работоспособном состоянии производится техническое обслуживание, капитальный ремонт и текущий ремонт в соответствии с системой планово-предупредительных ремонтов. Служба контрольно-измерительных приборов и автоматики (КИПиА) ежемесячно проводит проверку всех приборов. Два раза в год проводится проверка токоведущих частей и заземления.

Для того чтоб идентифицировать опасные и вредные факторы производственной среды и трудового процесса и оценить их уровень воздействия на человека, учитывая отклонения их действительных значений от принятых гигиенических нормативов условий труда и использования средств коллективной и индивидуальной защиты рабочих проводят специальную оценку условий труда. Которую с 1 января 2014 года регламентируют два закона:

Федеральный закон от 28 декабря 2013 г. № 426-ФЗ «О специальной оценке условий труда» [24] и Федеральный закон от 28 декабря 2013 г. № 421-ФЗ «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в связи с принятием Федерального закона «О специальной оценке условий труда»» [25]. Специальная оценка условий труда предусматривает введение единой процедуры взамен прежних двух: аттестации рабочих мест и государственной экспертизы условий труда [69].

## **5.1 Техногенная безопасность**

### **Анализ факторов рабочей зоны на предмет вредных проявлений**

**5.1.1** Нормализация воздушной среды рассматривается как основная мера снижения влияния на работника неблагоприятных факторов метеоусловий производственных помещений или микроклимата. Микроклимат в любом рабочем помещении определяется сочетанием повышенных или пониженных значений температуры воздуха, скорости движения и относительной влажности воздуха, барометрическим давлением и интенсивностью теплового излучения от нагретых поверхностей.

«Микроклимат производственных помещений – это метеорологические условия внутренней среды этих помещений, которые определяются действующими на организм человека сочетаниями температуры, влажности, скорости движения воздуха и теплового излучения» [29, с. 8].

«Допустимые микроклиматические условия – это сочетания количественных показателей микроклимата, которые при длительном и систематическом воздействии на человека могут вызвать переходящие и быстро нормализующиеся изменения теплового состояния организма, сопровождающиеся напряжением механизмов терморегуляции, не выходящим за пределы физиологических приспособительных возможностей. При этом не возникает повреждений или нарушений состояния здоровья, но могут

наблюдаться дискомфортные тепло ощущения, ухудшение самочувствия и понижение работоспособности» [29, с. 8].

Сочетания допустимых параметров микроклимата при длительном и систематическом воздействии на человека могут вызвать переходящие и быстро нормализующиеся изменения теплового состояния организма, сопровождающиеся напряжением механизмов терморегуляции, не выходящим за пределы физиологических приспособительных возможностей. При этом не возникает повреждений или нарушений состояния здоровья человека, но могут наблюдаться дискомфортные тепловые ощущения, ухудшение самочувствия и понижение работоспособности.

ГОСТ 12.1.005-88 устанавливает нормы производственного микроклимата [36]. Данный стандарт нормирует каждый компонент микроклимата в рабочей зоне производственного помещения: температуру, относительную влажность воздуха, скорость движения воздуха, интенсивность теплового излучения. Для оценки акклиматизации организма и характера одежды в различное время года существует понятие периода года. Теплый период года – это период, характеризуемый среднесуточной температурой наружного воздуха выше  $+10^{\circ}\text{C}$ , холодный характеризуется температурой равной  $+10^{\circ}\text{C}$  и ниже.

Тяжесть труда в процессе выполнения работ зависит от количества энергозатрат организма в килокалориях за час. Исходя из общих энергозатрат организма все виды работ делятся на три категории: легкие, средней тяжести и тяжелые.

Микроклиматические условия в производственных помещениях предприятия согласно СанПиН 2.2.4.548 - 96 должны соответствовать данным, приведенным в таблице 53 [42].

Таблица 53 - Допустимые нормы метеоусловий в рабочей зоне производственных помещений

<i>Период года</i>	<i>Температура воздуха, °С</i>	<i>Относительная влажность воздуха, %</i>	<i>Скорость движения воздуха, м/с</i>
Теплый	21 ... 27	15 ... 75	0,3 ... 0,5
Холодный	19 ... 22	12 ... 75	0,2 ... 0,4

**5.1.2** Нормативное освещение на рабочем месте должно обеспечить психологический комфорт, предотвратить зрительную и общую утомляемость, а также профессиональные заболевания глаз. Слабое освещение снижает зрительное восприятие, приводит к близорукости, вызывает головную боль, влияет на центральную нервную систему, уменьшает производительность труда, служит источником несчастных случаев.

Чтобы сохранить работоспособность в течении рабочего времени необходимо рациональное освещение помещений и рабочих мест. Такое освещение можно обеспечить искусственным, естественным или совмещённым освещением. Освещённость – это основной параметр освещения, измеряется в люксах. в зданиях и рабочих помещениях освещённость нормируется в соответствии с СП 52.13330.2011 и зависит от категории зрительных работ, назначения помещения и условий выполняемой работы [43].

По нормам различают восемь разрядов зрительной работы. Наименьший или эквивалентный размер объектов различения – это основа первых семи разрядов.

Для зрения более благоприятным является естественное освещение. Оно наиболее экономично и осуществляется через окна в наружных стенах, световыми фонарями в кровле или комбинированным освещением.

Искусственное освещение осуществляют лампами накаливания и газоразрядными лампами. Для общего освещения рабочих мест применяют люминесцентные лампы.

В производственных помещениях для данной установки имеется аварийное освещение на случай, если внезапно прекратится функционирование рабочего освещения. Аварийное освещение по назначению подразделяется на два вида: для временного продолжения работ и для эвакуации людей из помещения.

Для эвакуации людей аварийное освещение должно обеспечивать освещенность на полу по линии основных проходов не менее 0,5 лк.

Для временного продолжения работы аварийное освещение необходимо чтобы наступившая темнота, не повлекла за собой ошибочные действия обслуживающего персонала, которые вызовут нарушение технологического процесса, несчастные случаи, возможность взрывов и пожаров. Аварийное освещение должно создавать на рабочих поверхностях освещенность не менее чем 5 % от рабочего.

**5.1.3** Шум и вибрация — это механические колебания, распространяющиеся в газообразной и твердой средах. Шум и вибрация различаются между собой частотой колебаний. Последствия их воздействия могут проявляться в форме нарушения слуха, различных заболеваний нервной системы, повышения давления, изменения ритма сердечных сокращений.

В проектируемой установке источниками вибрации и шума являются:

- центробежный и вакуумный насосы;
- трубопроводы и паропроводы.

Допустимый уровень звукового давления нормируют в соответствии с ГОСТ 12.1.003-2014 [34]. Уровень звука по данному стандарту на рабочем месте и на территориях предприятия не должен превышать 80 дБ А. Работающим в зонах где уровень звука превышает данную норму, администрация обязана предоставить средства индивидуальной защиты и обозначить зону знаками безопасности по ГОСТ 12.4.026-2015 [40].

Для обеспечения безопасности при воздействии шума работодатель должен принять следующие меры [34]:

- периодически проводить контроль шума на рабочих местах;

- проектировать рабочие места с учетом допустимых уровней шума;
- использовать малошумную технику;
- размещать шумные машины, так чтобы минимизировать воздействие шума;
- обеспечить рабочих в качестве дополнительной меры безопасности средствами индивидуальной защиты;
- проводить профилактические мероприятия, ослабляющие неблагоприятное воздействие шума.

В проектируемой установке для защиты от негативного действия вибрации следует предпринять:

- жесткую установку насосов на фундамент;
- жестко закрепить трубопроводы и паропроводы;
- автоматизировать основное и вспомогательное оборудование, для управления им со щита.

Средства индивидуальной защиты от воздействия вибрации и шума [40]:

- для персонала, находящегося в зоне высокого шума, рекомендовано применение защитных наушников;
- для персонала, находящегося в зоне вибрации, рекомендовано применение виброизолирующих подметок, стелек и специальной виброизолирующей обуви. Защита рук от вибрации осуществляется посредством виброизолирующих прокладок и вкладышей, специальных перчаток и рукавиц.

### **Анализ факторов рабочей зоны на предмет опасных проявлений**

**5.1.4** Во вспомогательном оборудовании вакуум-выпарной установки имеются электродвигатели, которые вращательными моментами приводят в движение центробежный и вакуум насосы.

Для обеспечения безопасности рабочего персонала необходимо устанавливать предупреждающие знаки и ограждения, защитные кожухи, и требовать соблюдения правил техники безопасности [33]. По мимо этого,

регулярно проводить инструктаж рабочего персонала по технике безопасности при работе с источниками механического травмирования.

Для защиты обслуживающего персонала от механического травмирования используют индивидуальные средства защиты [38]:

- спец обувь, предназначенная для предохранения ног от механических воздействий, повышенных температур, общепроизводственных загрязнений, растворов кислот и щелочей (20%), вредных биологических факторов, воздействий электрической дуги, открытого пламени;
- головные уборы (подшлемник, каска) для защиты головы и шеи от механических воздействий, повышенных температур и атмосферных осадков;
- термостойкие перчатки для защиты рук от повышенных температур и механических воздействий;
- специальные очки для защиты глаз от механических воздействий, повышенных температур и пыли.

**5.1.5** Опасными факторами воздействия на человека при эксплуатации электроустановок, являются:

- поражение электрическим током;
- влияние электрической дуги;
- повышенный уровень статического электричества;
- влияние биологически активного электрического поля;
- влияние биологически активного магнитного поля;
- влияние электромагнитного излучения.

«Электробезопасность – это система организационных и технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей от вредного и опасного воздействия электрического тока, электрической дуги, электромагнитного поля и статического электричества» [37, с.6].

Требования к безопасной эксплуатации электроустановок изложены в «Правилах по охране труда при эксплуатации электроустановок» [28], «Межотраслевых правилах по охране труда (правила безопасности) при

эксплуатации электроустановок» [29], ГОСТах и других нормативных правовых актах.

«Электроустановки должны находиться в технически исправном состоянии, обеспечивающем безопасные условия труда. Электроустановки должны быть укомплектованы испытанными, готовыми к использованию защитными средствами, а также средствами оказания первой медицинской помощи в соответствии с действующими нормами и правилами» [29].

Работодатель обязан обеспечить безопасные условия труда, изложить их в соответствующих инструкциях по охране труда и осуществлять контроль за соблюдением правил. Установки, вспомогательное оборудование и электропреобразователи должны находиться в технически исправном состоянии. Электроустановки необходимо укомплектовать защитными средствами и изделиями медицинского назначения для оказания первой помощи работникам [28, 13].

Работники обязаны проходить обучение по безопасной эксплуатации электроустановок, по оказанию первой помощи пострадавшему на производстве, обязательна периодическая проверка знаний правил и других нормативно-технических документов и иметь соответствующую группу по электробезопасности. Результаты проверки знаний оформляются протоколом проверки знаний правил работы в электроустановках, выдается удостоверение [28, 13].

Средства защиты от поражения электрическим током можно разделить на следующие группы: средства защиты от поражения электрическим током (электрозащитные средства); технические средства защиты от электрического напряжения (коллективные и индивидуальные); средства индивидуальной защиты.

К электрозащитным средствам относятся:

- защитные оболочки;
- электрическое замыкание на корпус или на землю;
- различные виды изоляции;

- защитное устройство;
- изолирующие штанги;
- переносные заземления;
- изолирующие и электроизмерительные клещи;
- сигнализатор наличия напряжения;
- предупредительная блокировка;
- изолированный инструмент;
- диэлектрические перчатки, боты и галоши, ковры, изолирующие подставки;
- защитные барьеры;
- защитные ограждения (временные или стационарные);
- плакаты и знаки безопасности.

В нормативно-технической документации на электроустановку должны быть указаны технические способы и средства защиты.

Средства коллективной защиты от поражения электрическим током при прикосновении к металлическим нетоковедущим частям, которые могут оказаться под напряжением [38]:

- защитное заземление;
- зануление;
- защитное экранирование;
- защитное отключение;
- система защитных проводов;
- электрической разделение сети;
- защитное отключение;
- использование малых напряжений;
- контроль изоляции нетоковедущих частей;
- оградительное устройство;
- электроизоляционные средства;
- компенсация токов замыкания на землю;

- сигнализация, блокировка, знаки безопасности, плакаты.

Использование в установке электродов под напряжением свыше 1кВт, вызывает необходимость применения средств индивидуальной защиты (СИЗ) согласно ГОСТ 12.4.011-89 [40]. СИЗ, применяемые в электроустановках: защитные каски; очки для защиты глаз и щитки для защиты лица, респираторы для защиты органов дыхания; резиновые диэлектрические рукавицы и перчатки; боты и галоши; изолирующие подставки; спецодежда летняя и зимняя, предназначенная для защиты от воздействия электрической дуги; резиновые фартуки; инструмент с изолированными ручками; диэлектрические коврики; средства, пояса, канаты - страхующие от падения.

Исправность средств защиты используемых на электроустановках необходимо проверять визуально перед каждым применением, а также через каждые 6-12 месяцев в зависимости от условий эксплуатации и защитного устройства.

**5.1.6** К термическому травмированию в данной установке может привести соприкосновение с нагретыми частями оборудования или с охлажденным оборудованием. Источниками таких опасностей являются: вакуум-выпарной аппарат, трубопроводы и паропроводы, запорная и регулирующая арматура, конденсатор.

Для безопасной эксплуатации необходимо соблюдать правила охраны труда, проводить осмотр оборудования перед началом работы, своевременно устранять дефекты оборудования и восстанавливать тепловую изоляцию.

Для защиты персонала от горячих поверхностей необходимо выполнять тепловую изоляцию аппаратов, применять теплозащитные экраны для локализации источников лучистой теплоты, уменьшения облученности на рабочих местах и снижения температуры поверхностей, окружающих рабочее место. А также применять воздушное душирование в местах длительного пребывания рабочего и местах кратковременного отдыха для охлаждающего эффекта [43].

Средства индивидуальной защиты обслуживающего персонала от термического травмирования являются [40]:

- спец обувь, предназначенная для предохранения ног от механических воздействий, повышенных температур, общепроизводственных загрязнений, растворов кислот и щелочей (20%), вредных биологических факторов, воздействий электрической дуги, открытого пламени;
- головные уборы (подшлемник, каска) для защиты головы и шеи от механических воздействий, повышенных температур и атмосферных осадков;
- термостойкие перчатки для защиты рук от повышенных температур и механических воздействий;
- специальные очки для защиты глаз от механических воздействий, повышенных температур и пыли;
- для защиты кожи используют специализированные дерматологические средства.

## **5.2 Организационные мероприятия обеспечения безопасности**

Для реализации данного проекта необходима постройка помещения с последующим монтажом в нём необходимого производственного оборудования, позволяющего запустить производство из ягод и фруктов.

Производственное оборудование, применяемое на предприятии должно соответствовать требованиям безопасности по ГОСТ 12.2.003-91 [39]. Расстояние между оборудованием относительно друг друга, от стен и колонн здания, зоны обслуживания аппаратов, ширина проездов следует принимать по нормам технологического проектирования предприятий [8].

Здания, сооружения, конструкции и коммуникации следует окрашивать в цвета в соответствии с ГОСТ 12.4.026-2015 [31] и нормативами по цветовой отделке интерьеров производственных зданий промышленных предприятий.

Для восстановления физиологических показателей рабочих в цехах с повышенной температурой устраивают специально оборудованные

стационарные комнаты отдыха. В комнате отдыха необходимо установить радиационное охлаждение посредством автоматической фреоновой холодильной установки, кондиционирование воздуха, звукоизоляцию стен и потолка [43].

### **5.3 Региональная безопасность**

Данное производство не оказывает негативного влияния на экологию окружающей среды. Сырьем производства являются натуральные качественные фрукты и ягоды. В процессе создания готовой продукции не используются искусственные красители, ароматизаторы, консерванты и другие химические соединения. Поэтому установка является экологически безопасной.

### **5.4 Пожаро- и взрывобезопасность**

Основные требования к пожарной безопасности объектов (зданий, сооружений, промышленным объектам), продукции общего назначения и пожарно-технической продукции регулируют Федеральный закон Российской Федерации от 22 июля 2008 г. N 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» [26] и Правила противопожарного режима в Российской Федерации [30].

Лица, работающие на объекте, должны пройти обучение мерам пожарной безопасности: противопожарный инструктаж и пожарно-технический минимум. Должны быть ознакомлены с основными требованиями пожарной безопасности и мерами личной предосторожности, которые необходимо соблюдать при возникновении пожара, а также планом эвакуации людей из помещения.

Руководитель обязан на всей территории предприятия обеспечить наличие табличек с номером телефона для вызова пожарной охраны, наличие планов эвакуации людей, огнезащитную обработку и заделку негорючими материалами образовавшихся отверстий и зазоров в местах пересечения противопожарных преград различными инженерными и технологическими

коммуникациями. Обеспечить исправное состояние лестничных пролетов и ограждений, источников наружного противопожарного водоснабжения и внутреннего противопожарного водопровода, вентиляционных камер и воздухоотводов, систем и средств противопожарной защиты объекта. Необходима регулярная очистка аппаратов, оборудования и помещения от пожароопасных отложений, исправное состояние систем защиты на технологическом оборудовании и трубопроводах. Контроль за соблюдением мер предосторожности при ремонтных работах, эксплуатации электроприборов, электроустановок и отопительных систем.

На территории предприятия для оказания первой помощи всегда должны быть: бинты, гигроскопическая вата, 3% раствор йода, 2% раствор борной кислоты, 2% раствор уксусной кислоты, 3-5% раствор двууглекислого натрия (пищевой соды).

Для осуществления противопожарной защиты необходимо:

- применять средства пожаротушения и соответствующих видов пожарной техники;
- использовать автоматические установки пожарной сигнализации и пожаротушения;
- использовать основные строительные конструкции и материалы с нормированными показателями пожарной опасности;
- устанавливать устройства, обеспечивающие ограничение распространения пожара;
- иметь в наличии средства коллективной и индивидуальной защиты, которые должны обеспечивать безопасность людей в пожароопасной ситуации [35].

#### **5.4.1 Первичные средства пожаротушения**

Учитывая площадь производственных помещений и установок, пожароопасные свойства горючих веществ и их взаимодействие с

огнетушащими веществами, требования технических паспортов на оборудование подбирают виды и количество первичных средств пожаротушения.

К первичным средствам пожаротушения относятся:

- огнетушители;
- пожарные щиты;
- ящики для песка объемом 0,5 м<sup>3</sup> укомплектованные лопатой,
- бочки для хранения воды объемом 0,2 м<sup>3</sup> укомплектованные ведрами;
- покрывала и полотна из негорючего материала.

Определение необходимого количества первичных средств пожаротушения для защиты производственных помещений выполняется согласно главе XIX «Обеспечение объектов первичными средствами пожаротушения» Правил противопожарного режима [30].

## **5.5 Безопасность при чрезвычайных ситуациях**

«Чрезвычайная ситуация - это обстановка на определенной территории, сложившаяся в результате аварии, опасного природного явления, катастрофы, стихийного или иного бедствия, которые могут повлечь или повлекли за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей или окружающей среде, значительные материальные потери и нарушение условий жизнедеятельности людей» [27].

К ЧС относятся: крупные аварии, взрывы, катастрофы, стихийные бедствия, природные пожары, военные конфликты.

О введении режима чрезвычайной ситуации сообщают сигналом тревоги – электрической сиреной с уровнем сигнала 60-85 дБ.

При возникновении аварии на опасном объекте необходимо, в первую очередь, использовать СИЗ, эвакуировать людей из зоны заражения, соблюдать режимы защиты на территории. При начале пожара необходимо отключить

электричество, закрыть вентиляцию, убрать огнеопасные вещества в безопасное место, попытаться потушить его используя первичные средства пожаротушения. Если пожар потушить не удалось – покинуть здание, соблюдая спокойствие. При повреждении помещения взрывом, убедиться в отсутствии значительных повреждений строения на пути к выходу и эвакуироваться из него соблюдая осторожность. При возникновении военного конфликта нужно эвакуировать людей из здания или спуститься в подвал (бомбоубежище) [44].

К чрезвычайной ситуации в данной установке может привести аппарат, работающий под разряжением. Источниками аварийного роста давления в аппаратах могут являться внезапные, не предусмотренные рабочим процессом случаи. Для исключения роста давления по правилам эксплуатации тепловые установки должны иметь предохранительные клапаны, которые работают по принципу сброса из аппарата излишнего количества среды.

При поступлении сигнала об угрозе ЧС все работники предприятия должны надеть средства индивидуальной защиты, после чего удалиться в убежище согласно плану эвакуации из помещения.

## **Глава 6. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

Вакуум-выпарная установка омического нагрева предназначена для выпаривания сырья, полученного из овощных и фруктовых масс для производства концентратов.

В выпарной аппарат поступает сок прямого отжима – сок, полученный механическим путем из спелых, свежих или сохраненных свежими благодаря охлаждению фруктов или ягод, несброженный, но способный к брожению, предназначенный для непосредственного употребления в пищу или для промышленной переработки. Из фруктов и овощей удаляется влага, путём омического нагрева исходного сырья, и получается полностью натуральный продукт – концентрированный сок [45]. Концентрированные соки не предназначены для непосредственного употребления в пищу и используются для изготовления восстановленных соков, нектаров и сокосодержащих напитков, а также для изготовления других продуктов, например, фруктовых желе, начинок, муссов, изготовления хлебобулочных изделий и т.п. Добавляются по вкусу в чай, в каши, творог, мороженое, молочные коктейли.

### **6.1 Оценка коммерческого и инновационного потенциала инженерных решений**

#### **6.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования**

Сок является популярным напитком практически во всех странах мира. Особым спросом пользуются фруктовые и ягодные соки.

По итогам 2016 года, среднее потребление сока в России на душу населения составило порядка 25 литров, что практически в два раза меньше, чем в странах Европы [68].

В условиях продовольственного эмбарго возрождение отечественного садоводства и производство собственной продукции — ключевое направление развития агропромышленного комплекса России.

Вопрос импортозамещения встал перед российскими садоводами после введенных ответных санкций Россией в августе 2014 года и последовавшим за этим запретом на ввоз большинства продуктов сельского хозяйства. Тем самым, у отечественных садоводов появилась возможность закрыть образовавшуюся нишу собственными плодами и продуктами их переработки.

Объем сокового рынка в России в 2016 году составил 3,5 млрд литров или 180 млрд рублей. Крупнейшими игроками на соковом рынке России являются ООО «Лебедянский», ЗАО «Мултон» и ОАО «Сады Придонья» (рис. 38) [67].

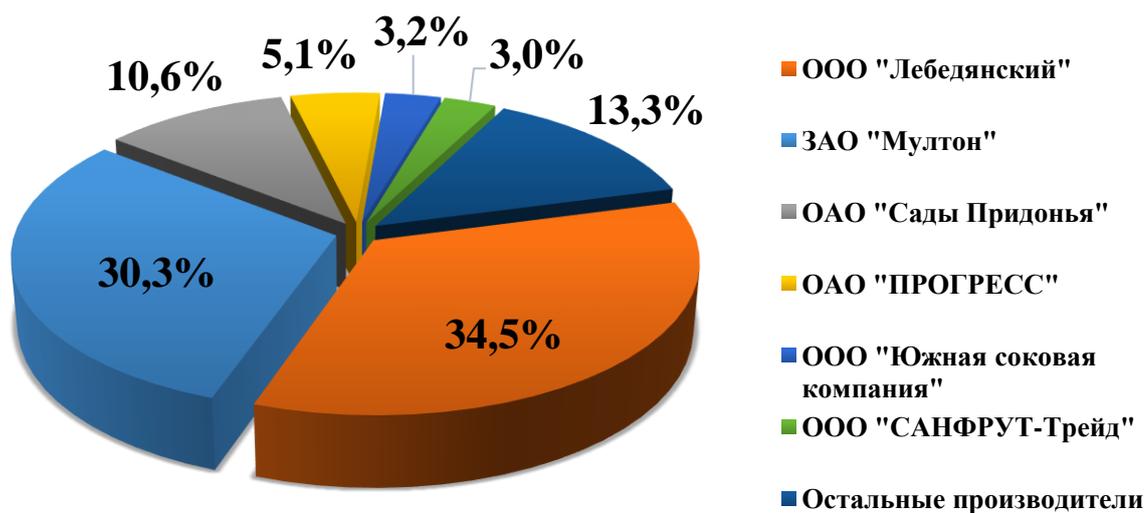


Рисунок 38. Топ 6 производителей соков в России в 2016 году

По расчётам специалистов Министерства сельского хозяйства России, для того чтобы обеспечить населения страны отечественной плодово-ягодной продукцией по рекомендуемой медицинской норме (75 килограммов на человека в год в свежем виде) необходимо производить 10,7–11 миллионов тонн плодов и ягод, однако при этом в 2015 г. было собрано 2,98 миллиона тонн ягод и фруктов [66], что составляет всего 27 % от потребности. Таким образом, целесообразно в

каждом регионе рассмотреть возможности применения стратегии импортозамещения, развития собственного садоводства и создание заводов по переработке плодовоовощной продукции.

На сегодняшний день импортный концентрированный сок является сырьевой базой производства соков в стране. Объем импортной продукции превышает отечественное производство промышленных соковых концентратов примерно в 2 раза. Но тем не менее есть предприятия, которые могут стать примером для производителей в этой отрасли. Одна из таких компаний – концерн «Сады Придонья». Более десяти лет назад, когда фирма только начинала свое развитие в плодосовхозе «Первомайский» Волгоградской области, продукцию фирмы покупали только местные жители. Сейчас концерт имеет огромные площади, занятые садами. Благодаря чему в России возможно приобрести различные ягодные концентраты, произведенные без использования импортного сырья:

- ежевичный;
- брусничный;
- виноградный;
- вишневый;
- голубичный;
- земляничный;
- клубничный;
- клюквенный;
- малиновый;
- облепиховый;
- черничный;
- черноплоднорябиновый.

Сейчас средняя цена за ягодный концентрат по России составляет 200 рублей за литр (55-70 brix) (табл. 54) [66].

Таблица 54 – Данные о средней цене и потреблении ягодного концентрата по России за период с 2011 по 2016 годы

Год	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Цена, руб/л	130	130	140	160	170	200
Потребление, млн л	342	312	321	325	234	239

Целевыми потребителями, которым будет поставляться в будущем разрабатываемая вакуум-выпарная установка, являются предприятия, на которых непосредственно ведется производство фруктовых, овощных и ягодных концентратов, а также переработка плодоовощной продукции.

Проектируемая выпарная установка может использоваться как крупными предприятиями по переработке фруктового сырья в непрерывном или периодическом процессе, так и небольшими компаниями для проведения промежуточного процесса.

### 6.1.2 Анализ конкурентных технических решений

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить направления для ее будущего повышения.

В качестве конкурирующих разработок можно рассмотреть:

1) змеевиковый выпарной аппарат германской компании «GEA Wiegand» (конкурент 1), [http://www.gea-wiegand.com/geawiegand/cmsresources.nsf/filenames/Evaporation\\_Technology\\_GEA\\_Wiegand\\_ru.pdf/\\$file/Evaporation\\_Technology\\_GEA\\_Wiegand\\_ru.pdf](http://www.gea-wiegand.com/geawiegand/cmsresources.nsf/filenames/Evaporation_Technology_GEA_Wiegand_ru.pdf/$file/Evaporation_Technology_GEA_Wiegand_ru.pdf);

2) вакуум-выпарную установку МЗ-2С-241АМ с рубашкой, оборудованную перемешивающим устройством, российской компании ОАО

Анализ конкурентных технических разработок проведем с помощью оценочной карты, представленной в таблице 2.

Данный анализ определяется по формуле:

$$K = \sum V_i * B_i \quad (538)$$

где  $K$  – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

$V_i$  – вес показателя (в долях единицы);

$B_i$  – балл  $i$ -го показателя.

Таблица 55 - Оценочная карта для сравнения конкурентных технических разработок

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б <sub>у</sub>	Б <sub>к1</sub>	Б <sub>к2</sub>	К <sub>у</sub>	К <sub>к1</sub>	К <sub>к2</sub>
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>
<b>Технические критерии оценки ресурсоэффективности</b>							
1. Удобство и простота эксплуатации	0,05	5	5	4	0,25	0,25	0,2
2. Энергоэкономичность	0,05	5	4	3	0,25	0,2	0,15
3. Надежность	0,05	4	5	4	0,2	0,25	0,2
4. Безопасность	0,05	4	5	4	0,2	0,25	0,2
5. Потребляемая мощность	0,05	5	4	3	0,25	0,2	0,15
6. Возможность подключения в сеть ЭВМ	0,05	5	5	5	0,25	0,25	0,25
7. Производительность по выпаренной воде	0,05	4	4	3	0,2	0,2	0,15
8. Габаритные размеры	0,05	5	5	4	0,25	0,25	0,2
9. Качество продукции	0,3	5	5	5	1,5	1,5	1,5
<b>Экономические критерии оценки эффективности</b>							
1. Конкурентоспособность по уровню технологии	0,2	5	4	4	1	0,8	0,8
2. Предполагаемый срок эксплуатации	0,05	4	4	4	0,2	0,2	0,2
3. Послепродажное обслуживание	0,05	4	3	4	0,2	0,15	0,2
<b>Итого</b>	<b>1</b>	<b>55</b>	<b>53</b>	<b>47</b>	<b>4,75</b>	<b>4,5</b>	<b>4,2</b>

где  $B_V$  и  $K_V$  – баллы и конкурентоспособность проектируемой установки;  
 $B_{K1}$ ,  $B_{K2}$ ,  $K_{K1}$ ,  $K_{K2}$  – баллы и конкурентоспособность конкурента 1 и конкурента 2.

Самым распространённым типом выпарного аппарата считается аппарат, обогреваемый водой или паром через рубашку (2 конкурент). Аппараты малопроизводительны из-за ограничений размеров поверхности нагрева. Низкая производительность и высокая удельная металлоемкость препятствуют применению таких аппаратов для выпаривания больших количеств раствора. Существенным недостатком является также наличие значительной высоты слоя выпариваемой жидкости в аппарате. Чем больше слой жидкости, тем больше понижение температуры из-за гидростатического эффекта.

Вторым типом по распространенности идёт змеевиковый выпарной аппарат (1 конкурент). В аппаратах с нагревательными змеевиками поверхность нагрева увеличена по сравнению с аппаратами с рубашкой. Основные недостатки змеевиковых аппаратов — накопление конденсата внутри змеевиков, неинтенсивная циркуляция выпариваемого раствора, труднодоступность внутренней поверхности для очистки. Относительно большие размеры аппаратов при малой поверхности нагрева.

Главным конкурентным преимуществом рассчитываемой установки является уровень технологии – применение омического нагрева. Выпарные аппараты электродного типа характеризуются высокой теплопроизводительностью, простотой конструкции и компактностью установки, равномерностью прогрева раствора по всему объему греющей камеры, плавностью регулирования теплового режима и высоким коэффициентом полезного превращения электрической энергии в тепловую (до 95%).

Омический нагрев обладает рядом экономических преимуществ перед другими общеизвестными методами концентрации жидкостей, основные из которых [71]:

1. Ток непосредственно преобразуется в тепло, проходя через обрабатываемый продукт, минуя промежуточные носители в виде пара или твердых поверхностей теплообмена.
2. Отсутствуют вращающиеся узлы установки омического нагрева, что уменьшает экономические затраты на оборудование и обслуживание.
3. Малое количество применяемого металла в общей конструкции линии.
4. Отсутствие необходимости существенно термически изолировать производственную линию от влияния внешней среды.

### **6.1.3 SWOT-анализ**

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта (табл. 56). SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта.

Применение омического нагрева по мимо преимуществ, перечисленных в разделе «Анализ конкурентных технических решений», имеет ещё две важные конструктивные особенности.

В процессе нагрева сахаросодержащих жидкостей (овощных, ягодных и фруктовых соков) возникает явление карамелизации – пригорания сахаров на участках локального перегрева жидкости. Чтобы избежать карамелизацию сахаров и пригорание продукта, скорость теплообмена должна быть как можно большей, что зависит от вязкости, плотности и удельной теплоемкости сока, а также от конструкции концентрационного аппарата: отсутствие локальных участков перегрева на поверхности нагрева или нагревателях.

В случае омического нагрева сахаросодержащих жидкостей явления карамелизации практически не наблюдается, т.к. отсутствуют участки соприкосновения жидкости с любым нагретым металлом емкости или источников тепла. Протекающий через объем жидкости электрический ток

нагревает жидкость непосредственным преобразованием энергии в тепло, электроды не являются источником тепла и нагреваются от жидкости.

Таблица 56 - SWOT-анализ

<i>SWOT</i>	<i>Внутренние факторы</i>	
	<b>Сильные стороны проекта:</b> С1. Заявленная экономичность и энергоэффективность технологии. С2. Экологичность технологии. С3. Конструктивные преимущества. С4. Наличие конкурентных преимуществ.	<b>Слабые стороны проекта:</b> Сл1. Необходимы точные системы управления процессом. Сл2. Непрерывный контроль работы установки. Сл3. Изменение потребности потребителя.
<i>Внешние факторы</i>		
<b>Возможности:</b> В1. Имеющиеся возможности переработки дикорастущего ягодного сырья. В2. Растущие потребности рынка переработки фруктов и овощей. В3. Переработка различных видов пищевого сырья.	1. Использование энергоэффективной, экологичной и экономически более выгодной технологии для переработки различных видов пищевого сырья. 2. Конструктивные преимущества и растущие потребности рынка переработки выделяют установку среди конкурентов.	1. Возможность использования установки для переработки дикорастущего ягодного сырья и различных видов пищевого сырья выделяют установку среди конкурентов.
<b>Угрозы:</b> У1. Низкий спрос на новые технологии производства. У2. Конкуренция с развитыми технологиями производства.	1. По сравнению с развитыми технологиями производства, проектируемая установка имеет более низкую стоимость, обеспечивает экологичность производственного процесса, энергоэффективна и имеет конструктивные преимущества.	1. Изменение потребностей у потребителя может вызвать интерес к новым видам технологий.

Главным положительным свойством омического нагрева является антисептическое влияние на продукт. Как и термическая обработка, омический нагрев инактивирует микроорганизмы под воздействием тепла. По результатам микробиологических исследований сока не было обнаружено молочнокислых

организмов, дрожжей, а также плесневых грибов. Срок годности омически обработанных пищевых продуктов является сравнимым с консервированными и стерильно и асептически переработанными продуктами [71].

#### **6.1.4 Оценка готовности проекта к коммерциализации**

Коммерциализация представляет собой процесс разработки и реализации ряда мероприятий, с помощью которых результаты научных исследований и опытно-конструкторских разработок можно предложить на рынках товаров и услуг с коммерческими целями.

Необходимо проводить сквозную оценку готовности проекта для коммерциализации на разных этапах вплоть до внедрения с использованием единой специальной формы (табл. 57).

Анализ данных таблицы 57 показывает, что суммарное количество баллов по направлению степени проработанности научного проекта составляет 48. Что входит в категорию перспективности коммерциализации выше среднего (от 59 до 45). Направление уровня имеющихся знаний у разработчика составляет 37 баллов, что говорит о средней перспективности.

Вывод: для реализации данного проекта, необходимо более тщательная проработка информации по данной теме. Возможно привлечение более опытных партнеров, для совместной доработки и дальнейшего улучшения показателей. Необходимо инвестирование со стороны научно-исследовательских объединений и промышленных организаций.

Таблица 57 — Оценка степени готовности научного проекта к коммерциализации

№ п/п	Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
1	Определен имеющийся научно-технический задел	4	3
2	Определены перспективные направления коммерциализации научно-технического задела	4	3
3	Определены отрасли и технологии для предложения на рынке	4	4
4	Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынке	4	2
5	Определены авторы и осуществлена охрана их прав	5	3
6	Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	4	3
7	Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	3	3
8	Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	3	2
9	Определены пути продвижения научной разработки на рынок	2	2
10	Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	4	3
11	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	2	1
12	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	2	2
13	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	3	2
14	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	1	1
15	Прорабатывается механизм реализации научного проекта	3	3
<b>ИТОГО БАЛЛОВ</b>		48	37

### **6.1.5 Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования**

Правильный выбор метода коммерциализации научных разработок существенно влияет на время продвижения товара на рынок.

Различают следующие методы коммерциализации научных разработок: торговля патентными лицензиями, передача ноу-хау, инжиниринг, франчайзинг, организация собственного предприятия, передача интеллектуальной собственности, организация совместного предприятия, организация совместных предприятий.

Для успешного продвижения проектируемой установки подходит метод инжиниринга. Инжиниринг как самостоятельный вид коммерческих операций предполагает предоставление на основе договора инжиниринга одной стороной, именуемой консультантом, другой стороне, именуемой заказчиком, комплекса или отдельных видов инженерно-технических услуг, связанных с проектированием, строительством и вводом объекта в эксплуатацию, с разработкой новых технологических процессов на предприятии заказчика, усовершенствованием имеющихся производственных процессов вплоть до внедрения изделия в производство и даже сбыта продукции.

Анализ конкурентных технических решений показал преимущества перед используемыми в России выпарными установками. Внедрение инновационного оборудования способствует модернизации существующих производств.

Вопросом применения омического нагрева для переработки органического сырья совместно занимаются кафедра ОХХТ Томского политехнического университета и кафедра прикладной механики Кемеровского технологического института пищевой промышленности. Реализация промышленного выпарного-аппарата омического нагрева способствует развитию данной технологии, получению новых данных, поможет усовершенствовать процесс.

## 6.2 Инициация проекта

Группа процессов инициации состоит из процессов, которые выполняются для определения нового проекта. Данная информация закрепляется в Уставе проекта. Устав проекта документирует бизнес-потребности, текущее понимание потребностей заказчика проекта, а также новый продукт, услугу или результат, который планируется создать.

Устав научного проекта магистерской работы имеет следующую структуру:

1) Цели и результат проекта. В данном разделе приведена информация о заинтересованных сторонах проекта, иерархии целей проекта и критериях достижения целей.

В таблице 58 представлены заинтересованные стороны проекта.

Таблица 58 — Заинтересованные стороны проекта

<b>Заинтересованные стороны проекта</b>	<b>Ожидание заинтересованных сторон</b>
Научное объединение кафедр НИ ТПУ и КемТИПП (преподаватели, студенты)	Развить применение аппаратов электродного типа. Исследовать влияние технологических параметров на закономерности концентрирования. Подробно изучить влияние омического нагрева на свойства продукта.
Промышленные организации	Получить более перспективный способ концентрирования органических жидкостей, который позволит интенсифицировать процесс, гарантирует качество получаемой продукции, будет экономически более эффективным.

Таблица 59 содержит информацию о иерархии целей проекта и критериях достижения целей.

Таблица 59 — Цели и результат проекта

<b>Цели проекта:</b>	Разработать наиболее технически совершенный метод концентрирования органических жидкостей.
<b>Ожидаемые результаты проекта:</b>	Получить метод концентрирования, который будет прост и удобен в эксплуатации, будет экономически эффективным.
<b>Критерии приемки результата проекта:</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Соответствие требованиям к действующим промышленным процессам;</li> <li>2) Универсальность в составе перерабатываемого сырья;</li> <li>3) Гарантия качества получаемой продукции;</li> <li>4) Простота и компактность конструкции.</li> </ol>
<b>Требование к результату проекта:</b>	Соответствие критериям приемки результата проекта.

2) Организационная структура проекта. Информация о том, кто входит в рабочую группу проекта, роль каждого участника и функции, выполняемые каждым из участников представлена в таблице 60.

Таблица 60 — Рабочая группа проекта

№ п/п	ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функция	Трудозатраты за 2 года, час.
1	Тихонов Н.В., доцент кафедры ОХХТ НИ ТПУ	Руководитель проекта	Координирование деятельности, консультирование	1750
2	Рассанова К.А., магистрант кафедры ОХХТ НИ ТПУ	Исполнитель по проекту	Сбор и анализ литературных данных, выполнение научных опытов на лабораторной установке, оформление результатов	4224
3	Попов А.М., профессор кафедры прикладной механики КемТИПП	Эксперт проекта	Консультирование	280
<b>ИТОГО</b>				6254

3) Ограничения и допущения проекта. Факторы, которые могут послужить ограничением степени свободы участников команды проекта, а также «границы проекта» - параметры проекта или его продукта, которые не будут реализованных в рамках данного проекта (табл. 61).

Таблица 61 — Ограничения проекта

Фактор	Ограничения/допущения
Бюджет проекта	Отсутствие источников финансирования, материальная база кафедры
Сроки завершения проекта	Июнь 2017 года
Прочие ограничения и допущения	Сбор опытных данных с лабораторной установки

### 6.3 Планирование управления научно-техническим проектом

#### 6.3.1 Иерархическая структура работ проекта

Иерархическое разбиение работы, которую необходимо выполнить для реализации выпарного аппарата омического нагрева органического сырья представлено на рисунке 39.



Рисунок 39. Иерархическая структура работ

### 6.3.2 План проекта

В рамках планирования научного проекта необходимо построить календарный план проекта. План строится в виде таблицы с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период выполнения выпускной работы. Календарный план-график представлен в приложении Б.

### 6.3.3 Контрольные события проекта

В таблице 62 представлены ключевые события проекта, определены их даты и результаты.

Таблица 62 — Контрольные события проекта

№ п/п	Контрольное событие	Дата	Результат (подтверждающий документ)
1.	Определение темы выпускной работы	До 1 декабря 2016 г.	Задание на выполнение выпускной работы
2.	Разработка основных разделов	До июня 2017 г.	Реферат (аннотация)
3.	Разработка раздела социальная ответственность	До июня 2017 г.	Подпись титульного листа работы
4.	Разработка раздела финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	До июня 2017 г.	Подпись титульного листа работы
5.	Разработка раздела на иностранном языке	До июня 2017 г.	Подпись титульного листа работы
6.	Проверка выпускной работы	Июнь 2017 г.	Рецензия
7.	Защита выпускной работы	14 июня 2017 г.	Оценка в зачетной книжке

### 6.3.4 Бюджет научного исследования

Научное исследование предполагает различного рода затраты. Для отражения всех видов планируемых расходов необходимо распланировать бюджет.

Расчет стоимости материальных затрат представлен в таблице 63.

Таблица 63 — Сырье, материалы, комплектующие изделия и покупные полуфабрикаты

Наименование	Марка, размер	Кол-во	Цена за единицу, руб	Сумма, руб
Бумага	A4, 500 листов	1 упак	360	360
Картридж для принтера	ОСР	4 шт	700	2800
Тетрадь	A5, 80 листов	1 шт	45	45
Ручка		3 шт	15	45
Карандаш		2 шт	10	30
Линейка		1 шт	25	25
Мультифора	A4	10 шт	2,4	24
Сырьё для опытов		7 кг	100	700
Емкости для хранения	30 мл	10 шт	5	50
Всего за материалы				4079
Транспортно-заготовительные расходы (3-5%)				150
<b>Итого по статье</b>				<b>4229</b>

Все затраты, связанные с приобретением специального оборудования (приборов, контрольно-измерительной аппаратуры, стендов, устройств и механизмов), необходимого для проведения работ по конкретной теме представлены в таблице 64.

Таблица 64 — Расчет затрат по статье «Спецоборудование для научных работ»

№ п/п	Наименование оборудования	Кол-во единиц оборудования	Цена единицы оборудования, руб	Общая стоимость оборудования, руб
1	Лабораторная емкость для выпаривания	1	5600	5600
2	Электроды стальные	2	65	130
3	Электроды графитовые	2	500	1000
4	Контрольно-измерительный стенд	1	3000	3000
<b>Итого</b>				9730

Основная заработная плата участвующих в выполнении работ по данной теме представлена в таблице 65.

Таблица 65 — Расчет основной заработной платы

№ п/п	Исполнитель по категориям	Трудоемкость, чел.-дн.	Зарплата, приходящаяся на один чел.-дн., тыс.руб.	Всего заработная плата по тарифу (окладам), тыс.руб.
1	Руководитель	80	0,3	23,3
2	Исполнитель	200	0,07	14,9
3	Эксперт	25	1,2	29,7

Баланс рабочего времени представлен в таблице 66.

Таблица 66 — Баланс рабочего времени за два года

Показатели рабочего времени	Руководитель	Исполнитель	Эксперт
Календарное число дней	730	730	730
Количество нерабочих дней -выходные и праздничные дни	131	131	131
Потери рабочего времени -отпуск -невыходы по болезни	48 14	48 7	48 0
Действительный годовой фонд рабочего времени	537	544	551

Данные расчета основной заработной платы по методике, изложенной в учебном пособии [61] представлен в таблице 67.

Таблица 67 — Расчет основной заработной платы

Исполнители	$Z_{б,}$ руб.	$k_p$	$Z_{м,}$ руб.	$Z_{дн,}$ руб.	$T_{раб,}$ раб. дн.	$Z_{осн,}$ руб.
Руководитель	23264,86	1,3	30244,32	782,3	80	62584
Исполнитель	14874,45	1,3	19336,78	492,2	200	98440
Эксперт	29744,67	1,3	38668,07	968,7	25	24217,5

Дополнительная заработная плата рассчитывается исходя из 10-15% от основной заработной платы (табл. 68).

Таблица 68 — Заработная плата исполнителей НТИ (в рублях)

Заработная плата	Руководитель	Исполнитель	Эксперт
Основная зарплата	62584	98440	24217,5
Дополнительная зарплата	9387,6	14766	3632,6
Итого по статье $C_{зп}$	71971,6	113206	27850,1

На основании полученных данных по отдельным статьям затрат калькуляция плановой себестоимости проекта составляет 223986,7 руб.

### 6.3.5 Организационная структура проекта

Проектная организационная структура научного проекта приведена на рисунке 40.

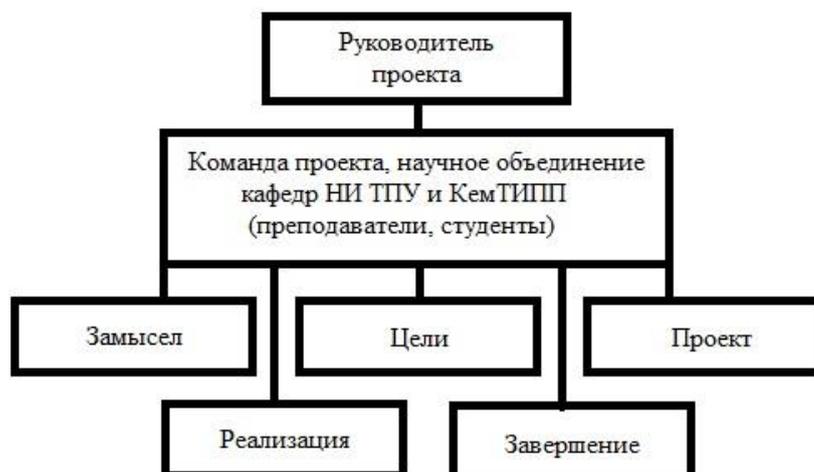


Рисунок 40. Проектная организационная структура проекта

### 6.3.6 Матрица ответственности

Для распределения ответственности между участниками проекта формируется матрица ответственности (табл. 69).

Степень участия в проекте характеризуется следующим образом:

Ответственный (О) – лицо, отвечающее за реализацию этапа проекта и контролирующее его ход.

Исполнитель (И) – лицо, выполняющее работы в рамках этапа проекта.

Утверждающее лицо (У) – лицо, осуществляющее утверждение результатов этапа проекта.

Согласующее лицо (С) – лицо, осуществляющее анализ результатов проекта и участвующее в принятии решения о соответствии результатов этапа требованиям.

Таблица 69 — Матрица ответственности

Этапы проекта	Руководитель	Исполнитель	Эксперт
Выбор направления исследований	У	И	О
Выбор методики исследований	О	И	С
Сбор и обработка литературы, нормативно-технической документации	С	О	С
Получение опытных данных на лабораторной установке в ходе экспериментов	С	О	С
Анализ теоретических и практических данных	О	И	С
Оформление данных	У	И	У

## 6.4 Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

### 6.4.1 Оценка сравнительной эффективности исследования

Для определения эффективности исследования текущий проект сравнивают с аналогами, рассмотренными в пункте 1.2. Сравнительную оценку характеристик вариантов исполнения установок проводят по наиболее важным критериям, представленным в таблице 70.

Таблица 70 — Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения установки

Критерии	Объект исследования	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Аналог 1	Аналог 2
1. Способствует росту производительности труда пользователя		0,10	4	5	3
2. Удобство в эксплуатации		0,15	5	5	4
3. Надежность		0,20	5	4	3
4. Энергосбережение (потребляемая мощность)		0,30	4	3	5
5. Материалоемкость разработки		0,15	5	4	4
6. Ремонтно-пригодность		0,10	4	5	3
<b>ИТОГО</b>		1			

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

$$I_m = \sum_{i=1}^n a_i b_i^a, \quad (539)$$

где  $I_m$  – интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов;

$a_i$  – весовой коэффициент  $i$ -го параметра;

$b_i^a$  – бальная оценка  $i$ -го параметра для аналога и разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

$n$  – число параметров сравнения.

$$I_{m \text{ тек.пр.}} = 0,10 * 4 + 0,15 * 5 + 0,20 * 5 + 0,30 * 4 + 0,15 * 5 + 0,10 * 4 = 4,5 \quad (540)$$

$$I_{m \text{ аналог 1}} = 0,10 * 5 + 0,15 * 5 + 0,20 * 4 + 0,30 * 3 + 0,15 * 4 + 0,10 * 5 = 4,05 \quad (541)$$

$$I_{m \text{ аналог 2}} = 0,10 * 3 + 0,15 * 4 + 0,20 * 3 + 0,30 * 5 + 0,15 * 4 + 0,10 * 3 = 3,9 \quad (542)$$

Эффективность разработки можно определить сравнением интегрального показателя ресурсоэффективности текущего проекта с аналогами:

$$\mathcal{E}_{cp1} = \frac{I_{m \text{ тек.пр.}}}{I_{m \text{ аналог 1}}} = \frac{4,5}{4,05} = 1,11 \quad (543)$$

$$\mathcal{E}_{cp2} = \frac{I_{m \text{ тек.пр.}}}{I_{m \text{ аналог 2}}} = \frac{4,5}{3,9} = 1,15 \quad (544)$$

По критериям, предъявляемым к установкам для выпаривания органического сырья текущий проект является наиболее эффективным по сравнению с его аналогами.

## Заключение

Согласно поставленным в исследовании задачам в выпускной квалификационной работе была проведена оптимизация конструкции вакуум-выпарного аппарата омического нагрева, а также спроектирован теплообменный аппарат типа холодильник конденсатор для утилизации, выпаренной из пищевого сырья влаги.

В ходе работы были произведены исследования процесса омического нагрева в лабораторных условиях, что позволило произвести перерасчет материального и теплового балансов выпарного аппарата. Оптимизирована мощность электродной группы. Выявлены закономерности начала процесса кипения, произведена оптимизация.

Произведен конструктивный расчёт цилиндрической обечайки, выпуклого днища, плоской отбортованной крышки. Выполнен расчет укрепления отверстий и расчет плоского фланцевого соединения. Посчитан вес аппарата и подобраны для данного веса опоры.

На основании полученных данных посчитаны новые материальные и тепловые балансы процесса. Для утилизации вторичного пара произведен расчет теплообменного аппарата типа холодильник конденсатор. Выполнен расчёт цилиндрической обечайки, выпуклого днища, плоской отбортованной крышки, трубной решетки. Выполнен расчет укрепления отверстий и расчет плоского фланцевого соединения. Посчитан вес аппарата и подобраны для данного веса опоры. Аппарат интегрирован в процесс и технологическую схему.

Разработаны разделы социальная ответственность и финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение для выпарной установки.

## Список использованных источников

1. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: учебник для вузов – 15-е изд. М.: «ООО ИД Альянс», 2009 г. -753 с.
2. Основные процессы и аппараты химической технологии: пособие по проектированию. - 2-е изд./ Под ред. Ю.И. Дытнерского. - М.: Химия, 1991. – 496с.
3. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. - 9-е изд.- Л.: Химия, 1981. -560с.
4. Пищулин В.П. Исследование процесса выпаривания в электродном аппарате: учебное пособие - Северск: Северская государственная технологическая академия, 2009 г. – 53с.
5. Шульгин Л.П.. Электрохимические процессы на переменном токе. Л.: Наука, 1974. - 71 с.
6. Михайловский Ю.Н. Электрохимический механизм коррозии металлов под действием переменного тока //Коррозия металлов и сплавов: Сборник, - М.: Metallurgizdat, 1963. -С. 222-242.
7. Михайловский Ю.Н., Лоповок Г.Г., Струков Н.М. Метод исследования электрохимического механизма растворения металлов под действием переменных токов синусоидальной и прямоугольной формы // Коррозия металлов и сплавов: Сборник. -М.: Metallurgizdat, 1963. - С.243-256.
8. Томашов Н.Д., Струков. Н.М, Исследование электрохимического и коррозионного поведения титана при поляризации его переменным током различной частоты //Коррозия и защита конструкционных сплавов: Сборник.- М.:Наука,.1966.-С.83-96
9. Kallmann F.E. Corrosion, v 17, № 3, 34, 1961.
10. Рязанов А. И., Петренко Т.Д., Доманова Е.Г. Электрохимическое растворение никеля в растворах соляной кислоты при наложении переменного тока //ЖПХ. - 1970. - Т. 43. № 4. С. 838-842.

11. Попов Ю.А., Гринина В. В., Полукаров Ю.М. Морфология поверхности осадков кадмия; полученных на периодическом токе при различных условиях размешивания растворов // Электрохимия. - 1983. Т. 19. № 6. С. 847-849.
12. Шульгин Л.П. Изменение вязкости растворов при прохождении переменного тока //ЖФХ. – 1978. Т. 52. № 10. С. 2585-2588.
13. Томашов Н.Д., Струков Н.М., Михайловский Ю.Н. Влияние частоты переменного тока на скорость коррозии титана в серной кислоте //Докл. АН СССР. - 1963. - Т. 150. - № 4. С. 186.
14. Пьянков А.Г. Исследование прямого электрического нагрева при упаривании растворов химически чистых сульфатов меди и никеля.: Дисс. канд. техн. наук. – Томск. - 1979. – 145 с.
15. Кошелев А.М., Григорьева Э.П., Кудрявцев Ю.Д., Семченко Д.П. Разрушение платины при электролизе переменным током //Тр. ин-та/Новочеркасск. политехи. ин-т. 1969.Т. 197. С. 79-84.
16. Машовец В.П. Влияние непроводящих включений на электропроводность электролита //ЖПХ. - 1951. - Т. 24. - № 4. - С. 353-360.
17. Гельперин Н.И. Выпарные аппараты. М.: Химиздат, 1947. – 406 с.
18. Пищулин В.П., Косинцев В.И., Евтеев Б.Б. и др. Исследование электрических полей в аппаратах электродного типа. //Химия и химическая технология: Сб. трудов молодых ученых. Томск, ТГУ, 1973. С. 237-238.
19. Форсблом Г.В., Машовец В.П. Зависимость величины электрохимической и омической составляющих падения напряжения в электрохимической ячейке от ее геометрии //ЖПХ. 1953. Т. 26. -№ 10. С. 1020-1025.
20. Смайт В. Электростатика и электродинамика. М.: И.Л., 1954. 604 с.
21. Каневский Л.С, Синявский Б.С. Углеродистая теплообменная аппаратура. М.: Машиностроение, 1970. 100 с.
22. Косинцев Ф.И., Пронович А. С., Косинцев В.И., Новиков В.Г и др. Исследование материалов для электродов прямого электронагрева в

производстве фтористого водорода // Тр. ин-та / ВНИИЛюминофоров. 1983. Вып. 25. С. 96-102.

23. Корсак СП. Электрические водонагреватели и паровые котлы. –М.-Л.: Госэнергоиздат,. 1954. 346.

24. Федеральный закон от 28.12.2013 N 426-ФЗ. О специальной оценке условий труда. (Редакция от 01.05.2016 N 136-ФЗ) // Собрание законодательства РФ – 2016 г. – № 52 (ч.1) – Ст. 6991.

25. Федеральный закон от 28.12.2013 N 421-ФЗ. О внесении изменений в отдельные законодательные акты российской федерации в связи с принятием федерального закона «о специальной оценке условий труда». (Редакция от 03.07.2016 N 250-ФЗ) // Собрание законодательства РФ – 2016 г. – № 52 (ч.1) – Ст. 6986.

26. Федеральный закон от 22.07.2008 N 123-ФЗ. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности. (Редакция от 03.07.2016 N 301-ФЗ) // Собрание законодательства РФ – 2016 г. – № 30 – Ст. 3579.

27. Федеральный закон от 21.12.1994 N 68-ФЗ. О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера (с изменениями на 23 июня 2016 года). (Редакция от 23.06.2016 N 309-ФЗ) // Собрание законодательства РФ – 2016 г. – № 35 – Ст. 3648.

28. Министерство труда и социальной защиты российской федерации приказ от 24 июля 2013 г. № 328н об утверждении правил по охране труда при эксплуатации электроустановок. – Утверждено постановлением Правительства Российской Федерации от 19 июня 2012 г. № 610.

29. ПОТ Р М-016-2001 «Межотраслевые правила по охране труда (правила безопасности) при эксплуатации электроустановок». – РД 153-34.0-03.150–00 – Утверждено министерством труда и социального развития Российской Федерации постановление от 05 января 2001 г. № 3

30. Правила противопожарного режима в Российской Федерации № 390. О противопожарном режиме (с изменениями на 21 марта 2017 года).

(Редакция от 21.03.2017 N 301-ФЗ) // Собрание законодательства РФ – 2017 г. – № 19 – Ст. 2415.

31. ОНТП 14-93. Нормы технологического проектирования предприятий машиностроения, приборостроения и металлообработки. (Редакция от 01.01.1995) // Роскоммаш – 1995 г.

32. Генеральное соглашение между общероссийскими объединениями профсоюзов, общероссийскими объединениями работодателей и Правительством Российской Федерации на 2014 – 2016 годы. (с изменениями от 29.12.2016)

33. ГОСТ 12.0.002-80. Система стандартов безопасности труда. Термины и определения. – Взамен ГОСТ 12.0.002-74; Введен 01.01.1982 г.; Переиздание 01.09.1990 г. – Москва: издательство стандартов 1990 г. – 6 с.

34. ГОСТ 12.1.003-2014. Система стандартов безопасности труда. Шум. Общие требования безопасности. – Взамен ГОСТ 12.1.003-83, ГОСТ 12.1.023-80; Введен 01.11.2015 г. – Москва: стандартиформ 2015 г. – 24 с.

35. ГОСТ 12.1.004-91. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования. – Взамен ГОСТ 12.1.004-85; Введен 30.06.1992 г.; Переиздание 01.09.2006 г. – Москва: издательство стандартов 2006 г. – 68 с.

36. ГОСТ 12.1.005-88. Система стандартов безопасности труда. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. – Взамен ГОСТ 12.1.005-76; Введен 01.01.1989 г.; Поправка от 01.04.2004 г. – Москва: издательство стандартов 2008 г. – 49 с.

37. ГОСТ Р 12.1.009-2009. Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Термины и определения. – Введен 01.01.2011 г. – Москва: издательство стандартов 2010 г. – 16 с.

38. ГОСТ Р 12.1.019-2009. Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты. – Введен 01.01.2011 г. – Москва: стандартиформ 2010 г. – 28 с.

39. ГОСТ 12.2.003-91. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Оборудование производственное. Общие требования безопасности. – Взамен ГОСТ 12.2.003-74; Введен 01.01.1992 г.; Переиздание 01.08.2008 г. – Москва: издательство стандартов 2001 г. – 11 с.

40. ГОСТ 12.4.011-89. Система стандартов безопасности труда. Средства защиты работающих. Общие требования и классификация. – Взамен ГОСТ ГОСТ 12.4.011-87; Введен 30.06.1990 г.; Переиздание 01.08.2004 г. – Москва: издательство стандартов 2004 г. – 8 с.

41. ОСТ 12.4.026-2015. Система стандартов безопасности труда. Цвета сигнальные, знаки безопасности и разметка сигнальная. Назначение и правила применения. Общие технические требования и характеристики. Методы испытаний. – Введен 01.03.2017 г. – Москва: стандартиформ 2016 г. – 77 с.

42. СанПиН 2.2.4.548-96. 2.2.4. Физические факторы производственной среды. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. Санитарные правила и нормы. (утв. Постановлением Госкомсанэпиднадзора РФ от 01.10.1996 N 21).

43. СП 52.13330.2011. Свод правил. Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95. (утв. Приказом Минрегиона РФ от 27.12.2010 N 783).

44. Дашковский А.Г., Романцов И.Г. Безопасность жизнедеятельности. Защита населения в чрезвычайных ситуациях. – Томск: изд-во Томского политехнического университета. – 2008 г. – 19 с.

45. ГОСТ Р 51398-99. Консервы. Продукция соковая. Соки, нектары и сокосодержащие напитки. Термины и определения (с Изменениями N 1, 2). – Введен 01.01.2001 г.; Переиздание 01.07.2011 г. – Москва: стандартиформ 2011 г. – 10 с.

46. ГОСТ 5862-79. Изоляторы и покрышки керамические на напряжение свыше 1000 В. Общие технические условия. – Взамен ГОСТ 5862-68; Введен 01.01.1980 г.; Переиздание 01.05.2058 г. – Москва: издательство стандартов 2005 г. – 7 с.

- 47.ГОСТ 6533-78. Днища эллиптические отбортованные стальные для сосудов, аппаратов и котлов. Основные размеры. – Взамен ГОСТ 6533-68; Введен 01.01.1970 г.; Переиздание 01.03.1985 г. – Москва: издательство стандартов 2005 г. – 39 с.
- 48.ГОСТ 9931-85. Корпусы цилиндрические стальных сварных сосудов и аппаратов. Типы, основные параметры и размеры. – Взамен ГОСТ 9931-79; Введен 01.01.1987 г.; Переиздание 01.10.1987 г. – Москва: издательство стандартов 2000 г. – 23 с.
- 49.ГОСТ 12623-78. Днища плоские неотбортованные. Основные размеры. – Взамен ГОСТ 12626-67; Введен 01.01.1979 г.; Переиздание 01.10.1992 г. – Москва: издательство стандартов 1992 г. – 6 с.
- 50.ГОСТ 12816-80. Фланцы арматуры, соединительных частей и трубопроводов на Ру от 0,1 до 20,0 МПа (от 1 до 200 кгс/см кв.). Общие технические требования. – Взамен ГОСТ 6972-67; Введен 01.01.1983 г.; Переиздание 01.07.2003 г. – Москва: издательство стандартов 2003 г. – 22 с.
- 51.ГОСТ 12820-80. Фланцы стальные плоские приварные на Ру от 0,1 до 2,5 МПа (от 1 до 25 кгс/см кв.). Конструкция и размеры. – Взамен ГОСТ 12828-67; Введен 01.01.1983 г.; Переиздание 01.07.2003 г. – Москва: издательство стандартов 2003 г. – 11 с.
- 52.ГОСТ 14245-79. Теплообменники кожухотрубчатые с U-образными трубами. Основные параметры и размеры. – Взамен ГОСТ 14245-69; Введен 19.03.1979 г. – Москва: издательство стандартов 1979 г. – 16 с.
- 53.ГОСТ 17133-83. Пластины резиновые для изделий, контактирующих с пищевыми продуктами. Технические условия. – Взамен ГОСТ ГОСТ 17133-71; Введен 01.01.1984 г. – Москва: издательство стандартов 1900 г. – 23 с.
- 54.ГОСТ 28759.1-90. Фланцы сосудов и аппаратов. Типы и параметры. – Взамен ОСТ 26-425-79; Введен 01.01.1992 г.; Переиздание 01.10.2005 г. – Москва: издательство стандартов 2005 г. – 6 с.

- 55.ГОСТ 28759.6-90. Прокладки из неметаллических материалов. Конструкция и размеры. Технические требования. – Взамен ОСТ 26-430-79; Введен 01.01.1992 г.; Переиздание 01.10.2005 г. – Москва: издательство стандартов 2005 г. – 46 с.
- 56.ГОСТ Р 52857.1-2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Общие требования. – Введен 31.03.2008 г.; Переиздание 01.05.2009 г. – Москва: издательство стандартов 2009 г. – 27 с.
- 57.ГОСТ Р 52857.2-2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет цилиндрических и конических обечаек, выпуклых и плоских днищ и крышек. – Введен 31.03.2008 г. – Москва: издательство стандартов 2009 г. – 45 с.
- 58.ГОСТ Р 52857.3-2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Укрепление отверстий в обечайках и днищах при внутреннем и внешнем давлениях. Расчет на прочность обечаек и днищ при внешних статических нагрузках на штуцер. – Введен 31.03.2008 г. – Москва: издательство стандартов 2008 г. – 30 с.
- 59.ГОСТ Р 52857.4-2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет на прочность и герметичность фланцевых соединений. – Введен 31.03.2008 г.; Переиздание 20.05.2009 г. – Москва: издательство стандартов 2009 г. – 41 с.
60. ГОСТ Р 52857.5-2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет обечаек и днищ от воздействия опорных нагрузок. – Введен 31.03.2008 г.; Переиздание 20.05.2009 г. – Москва: издательство стандартов 2009 г. – 27 с.
61. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие / Н.А. Гаврикова, Л.Р. Тухватулина, И.Г. Видяев, Г.Н. Серикова, Н.В. Шаповалова; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 73 с.

62. Статья: Исследование технологических процессов для концентрирования и стерилизации соков методом прямого нагрева / А. М. Попов, Н. В. Тихонов, И. Н. Тихонова // Техника и технология пищевых производств. — 2013. — Т. 1. — С. 81-87

63. Статья: Влияние омического нагрева на интенсивность экстракции сахарозы из ягодного сырья / К. А. Рассанова; науч. рук. Н. В. Тихонов // Химия и химическая технология в XXI веке: материалы XVII Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых имени профессора Л.П. Кулёва, посвященной 120-летию Томского политехнического университета, 17–20 мая 2016 г., г. Томск. — Томск: Изд-во ТПУ, 2016. — [С. 187-188].

64. Статья: Обоснование применения лопастного перемешивающего устройства для выпарного аппарата омического нагрева, основанного на графитовых электродах с неполным погружением / К. А. Рассанова; науч. рук. Н. В. Тихонов // Научно-практическая конференция «Современная наука. Теория, методология и практические результаты исследований», 2017 г., г. Кемерово. — Кемерово: Изд-во «Технология науки», 2017 г.

65. Статья: Processing Food Using an Electric Current. [Электронный ресурс] // «International Union of Food Science and Technology». 2013 - 2017 г. — Режим доступа: <http://worldfoodscience.com/article/processing-food-using-electric-current> (дата обращения: 01.05.2017).

66. Статья: Рынок соков в России - 2017. Показатели и прогнозы. [Электронный ресурс] // Tebiz Group – Режим доступа: <http://tebiz.ru/mi/marketjuice.php> (дата обращения: 26.03.2017).

67. Статья: Производство соков в 2016 году снизилось почти на 6%. [Электронный ресурс] // Журнал «Агроинвестор», ООО «Москоутаймс» 2017 г. – Режим доступа: <http://www.agroinvestor.ru/markets/news/26309-proizvodstvo-sokov-v-2016-godu-snizilos-pochti-na-6/>

68. Беляев В.М. Расчет и проектирование средств защиты оборудования. [Электронный ресурс] / НИ ТПУ: электронный курс. – 2017 г. – Режим доступа: <http://stud.lms.tpu.ru/course/view.php?id=1394>.

69. Гарант-Сервис: Закон о специальной оценке условий труда, или что стало с аттестацией рабочих мест [Электронный ресурс]: статья Алины Михайловой от 17 февраля 2014. – Режим доступа: <http://www.garant.ru/action/interview/525921/> (дата обращения: 10.04.2017).

70. Мамонтов В. В. Интенсификация процессов нагревания и выпаривания электропроводных растворов под воздействием прямого электронагрева: дис. НИИТПУ – Томск, 2004г. – 150стр.

71. Тихонов Н. В. Исследование процессов концентрирования и ультрапастеризации соков методом прямого электронагрева: дис. ФГБОУ ВПО КемТИПП – Кемерово, 2013г. – 109 стр.

72. Hosahalli S. Ramaswamy, Michele Marcotte, Sudhir Sastry, Khalid Abdelrahim. Ohmic Heating in Food Processing. Electro-Technologies for Food Processing Series. - CRC Press, 2014 y. -753 s.

73. de Alwis, A.A.P. and Fryer, P.J. 1988. Preliminary experiments on heat transfer during the ohmic heating of foods, in: Proceedings of the 2nd UK National Heat Transfer Conference, 14–16 September, University of Strathclyde, Glasgow, UK, Vol. I, IMechE, pp. 229–239.

74. Sastry, S.K. and Salengke, S. 1998. Ohmic heating of solid–liquid mixtures: A comparison of mathematical models under worst-case heating conditions. *Journal of Food Process Engineering* 21:441–458.

75. Sastry, S.K. and S. Palaniappan. 1991. Ohmic heating of liquid–particle mixtures. *Food Technology* 45(12):64–67.

76. Zareifard, M.R., Ramaswamy, H.S., Trigui, M., and Marcotte, M. 2003. Ohmic heating behavior and electrical conductivity of two-phase food systems. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 4:45–55.

77. Castro, I., Teixeira, J.A., Salengke, S., Sastry, S.K., and Vicente, A.A. 2004. Ohmic heating of strawberry products: Electrical conductivity measurements and ascorbic acid degradation kinetics. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 5(1):27–36.

78. Halden, K., de Alwis, A.A.P., and Fryer, P.J. 1990. Changes in the electrical conductivity of foods during Ohmic heating. *International Journal of Food Science Technology* 25:9–25.
79. Piette, G. and Brodeur, C. 2003. Ohmic cooking for meat products: The heat is on Website: [http://sci.agr.ca/crda/pubs/art10\\_e.htm](http://sci.agr.ca/crda/pubs/art10_e.htm), 1–3.
80. Özkan, N., Ho, I., and Farid, M. 2004. Combined Ohmic and plate heating of hamburger patties: Quality of cooked patties. *Journal of Food Engineering* 63(2): 141–145.
81. Matsubara, H., Tanaka, J., Narita, S., and Seki, N. 2007. Application of Ohmic heating for improving the quality of salted-dried salmon. *Nippon Suisan Gakkaishi* 73(3): 470–477.
82. Bozkurt, H. and Icier, F. 2010. Electrical conductivity changes of minced beef-fat blends during Ohmic cooking. *Journal of Food Engineering* 96(1): 86–92.
83. Castro, I., Teixeira, J.A., Salengke, S., Sastry, S.K., and Vicente, A.A. 2004. Ohmic heating of strawberry products: Electrical conductivity measurements and ascorbic acid degradation kinetics. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 5(1), 27–36.
84. Leizeron, S. and E. Shimoni. 2005. Effect of ultrahigh-temperature continuous Ohmic heating treatment on fresh orange juice. *J Agr Food Chem* 53: 3519–3524.
85. Wang, C.S. and Wu, J.S.B. 1999. Ohmic heating of fluid containing apple particulates. *Food Science and Agricultural Chemistry*, 1(2), 154–161.
86. Wang, W.C. and Sastry, S.K. 2002. Effects of moderate electrothermal treatments on juice yield from cellular tissue. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 3(4), 371–377.
87. Vikram, V.B., Ramesh, M.N., and Prapulla, S.G. 2005. Thermal degradation kinetics of nutrients in orange juice heated by electromagnetic and conventional methods. *Journal of Food Engineering* 69(1), 31–40.

88. Eliot, S.C., Zuber, F., and Goullieux, A. 2001. Processing and stabilisation of cauliflower by Ohmic heating technology. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 2(4), 279–287.
89. Sensoy, I. and Sastry, S.K. 2004. Ohmic blanching of mushrooms. *Journal of Food Process Engineering* 27(1), 1–15.
90. Icier, F., Yildiz, H., and Baysal, T. 2006. Peroxidase inactivation and colour changes during Ohmic blanching of pea puree. *Journal of Food Engineering* 74, 424–429.
91. Skudder, P.J., 1988. Development of the Ohmic heating process for continuous sterilization of particulate food products. *Proc. Int. Symp. on Progress in Food Preservation Process, Brussels, Belgium*, 1, 271–280.
92. Cho, W.I., Pyun, Y.R., Lee, Y.S., and Kwon, I.B. 1996. Dewatering of soybean milk residue by hydraulic press with Ohmic heating. *Korean Journal of Food Science and Technology*, 28(2), 324–329.
93. Cho, H.-Y., Sastry, S.K., and Yousef, A.E. 1999. Kinetics of inactivation of *Bacillus subtilis* spores by continuous or intermittent Ohmic and conventional heating. *Biotechnology Bioengineering* 62(3): 368–372.
94. Palaniappan, S., Sastry, S.K., and Richter, E.R. 1992. Effects of electroconductive heat treatment and electrical pretreatment on thermal death kinetics of selected microorganisms. *Biotechnology and Bioengineering* 39: 225–232.
95. Castro, I., Teixeira, J.A., Salengke, S., Sastry, S.K., and Vicente, A.A. 2004. Ohmic heating of strawberry products: Electrical conductivity measurements and ascorbic acid degradation kinetics. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 5(1), 27–36.
96. Sun, H.X., Kawamura, S., Himoto, JI, Itoh, K., Wada, T., and Kimura, T. 2008. Effects of Ohmic heating on microbial counts and denaturation of proteins in milk. *Food Sci. Technol. Res.* 14(2):117–123.

## Список публикаций

1. Влияние омического нагрева на интенсивность экстракции сахарозы из ягодного сырья / К. А. Рассанова; науч. рук. Н. В. Тихонов // Химия и химическая технология в XXI веке: материалы XVII Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых имени профессора Л.П. Кулёва, посвященной 120-летию Томского политехнического университета, 17–20 мая 2016 г., г. Томск. — Томск: Изд-во ТПУ, 2016. — [С. 187-188].

2. Подбор метода расчёта предохранительного клапана вакуум-выпарного аппарата омического нагрева растительного сырья с использованием программы Wolfram Mathematica 10.4. / К. А. Рассанова; науч. рук. Беляев В.М. // Научно-практическая конференция «Направления и тенденции развития современной науки», 2016 г., г. Кемерово. — Кемерово: Изд-во «Технология науки», 2016 г.

3. Обоснование применения лопастного перемешивающего устройства для выпарного аппарата омического нагрева, основанного на графитовых электродах с неполным погружением / К. А. Рассанова; науч. рук. Н. В. Тихонов // Научно-практическая конференция «Современная наука. Теория, методология и практические результаты исследований», 2017 г., г. Кемерово. — Кемерово: Изд-во «Технология науки», 2017 г.

**Приложение А**  
**(справочное)**

Раздел (Глава 1)  
(Литературный обзор)

---

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4КМ51	Рассанова Карина Александровна		

Консультант кафедры иностраных языков физико-технического института:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Игна Ольга Николаевна	Доктор педагогических наук, доцент		

Консультант – лингвист кафедры иностраных языков физико-технического института:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Игна Ольга Николаевна	Доктор педагогических наук, доцент		

## Chapter 1. Literary Review

### Introduction

Electric current can create heat. This is because it is the flow of electrons through matter. A substance is called a conductor. Conductors with varying degrees of ease pass the flow of electrons, but in each conductor there is some degree of resistance to flow. In the process of how electrons are "pushed" through a conductor, their heating occurs. Part of the energy in electrons is converted into thermal energy.

There is always a search for new ways of processing products. Over the past 200 years, technology, from the simple heating of products in metal containers, has advanced to the use of much more complex methods.

High-pressure treatment eliminated the need for excessive heating and destruction at the molecular level of the beneficial microorganisms present in food. Microwave radiation subjects the product to an oscillating electromagnetic field and creates heat by the friction of polar water molecules. Another very interesting process occurs by passing an electric current directly through the food material to heat and destroy unwanted microorganisms that may be present.

Most of us are familiar with the principle of the toaster or heating elements in devices such as hair dryers. During the transfer of electric current through the metal wire, resistance occurs, and the wire heats frequently up to a glowing red color. This principle can be applied to the heating of a food product. The process is known by the term "ohmic heating", since it is based on the resistance measured in ohms. This concept originated back in the 1840s, when James Prescott Joule showed that the water would be heated when an electric current passed through it [72].

The Joule-Lenz law is the theoretical basis for applying an electric current to the heating process. According to the law, the heat effect is calculated by the formula:

$$Q = R \times I^2 \times \tau = (U^2 / R) \cdot \tau \quad (1)$$

Where Q is the amount of heat released (J),

R electrical conductor resistance ( $\Omega$ ),

I is the current strength (A),

U is the voltage (V),

$\tau$  is duration of current passing through the conductor (s).

Ohmic heating is not a new technology. It was used as a commercial process in the early twentieth century for the pasteurization of milk. However, the use of this process was terminated between the late 1930 and 1960, allegedly because of the too high cost of electricity and the lack of suitable electrode materials. Interest in ohmic heating was renewed in the 1980, when researchers were searching for viable methods for effective sterilization of mixtures of liquid and large particles, for which the use of aseptic treatment alone was unsatisfactory [72].

In Europe, the most common process of ohmic heating using a plastic tube, through which the upward flow of food is fed (Figure 1). This allows you to keep the tube in a uniformly filled state, excluding the air gaps that could occur during the downward flow. Figures of different shapes in Figure 1 help to represent various solids that may be present in the product mixture.

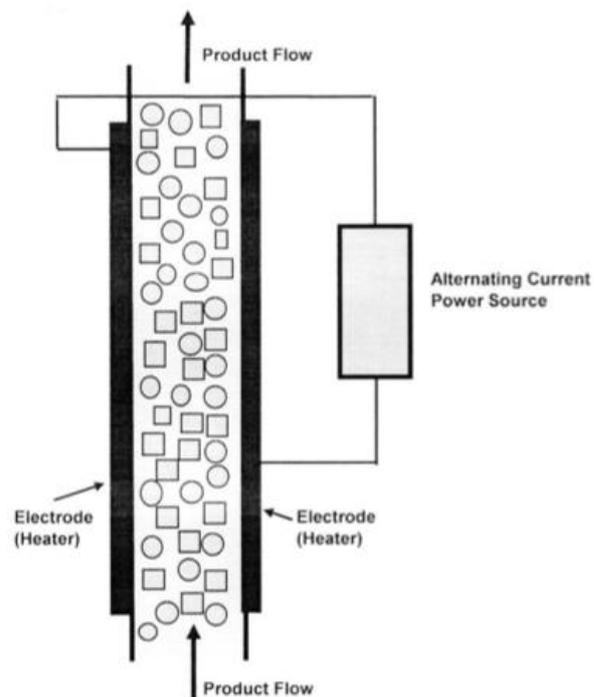


Figure 1. Diagram of the heating unit in the process of ohmic heating.

Electrodes are metal plates located along opposite sides of a plastic tube. The electric current passes from one plate to the other through the product, heating it. Using a high voltage with a corresponding number of pairs of electrodes, by regulating the supply of the product with a pump, it is possible to heat the product to the desired final temperature [65].

Ohmic heating occurs both for constant and alternating current. Nevertheless, in the food industry, the use of alternating current is preferred. This is dictated by the appearance of electrolysis in food.

The rate of heat release in the material is characterized by the following equation:

$$u''' = E^2 * \sigma \quad (2)$$

Where  $u''$  is the heat generation rate per unit volume ( $V / m^3$ ),

$E$  is the electrical field strength ( $V / m$ ),

$\sigma$  is the electrical conductivity of the material ( $S / \mu m$ ).

The above expression is the basis for designing devices and processing products by means of ohmic heating. The electric field strength ( $E = U / l$ ) can be varied by the designer by changing either the applied voltage  $U$ , or the interelectrode gap  $l$ . The effective electrical conductivity  $\sigma$  is a function of the temperature, frequency and composition of the product and can be increased by adding ionic compounds such as salts or acids or reduced by adding non-polar components such as emulsified lipids. This suggests that for a product with a known electrical conductivity range, it is possible to design a heater so that it can successfully heat it ohmically. Conversely, for a given heater design and operating parameters, it is possible to modify the product so as to ensure its heating.

An important point is that the electrical conductivity of the product must be different from zero for ohmic heating. This means that completely non-polar materials, such as oils that do not conduct electricity, cannot be heated ohmically. However, most food materials are aqueous and have some electrical conductivity (albeit low), and therefore they can be heated. Water materials with low electrical conductivity can be

heated using devices with small electrode gaps, increasing the strength of the electric field [65].

Another important feature of ohmic heating is that the electrical conductivity of food products usually increases with increasing temperature, as the viscosity decreases with increasing temperature, and therefore resistance to moving ions at high temperatures decreases.

The electrical conductivity for liquids is often a linear function of temperature and can be written down by the equation:

$$\sigma = \sigma_0 * (1 + m * T) \quad (3)$$

Where  $\sigma_0$  is the electrical conductivity of the material at 0 °C (S / m),  
m is exponent or temperature coefficient of electrical conductivity (cm / S),  
T is the temperature (° C).

For solid materials, especially those in which there is no cellular structure, electrical conductivity is not necessarily linear, it also depends on the strength of the electric field. This is due to the destruction of cells by electrotransport.

The general results of numerous studies of electrical conductivity are as follows. Electrical conductivity is a function of food components: ionic components (salt), acid and moisture content increase electrical conductivity, while fats, lipids and alcohol reduce it. The electrical conductivity linearly correlates with the temperature when the electric field is sufficiently high (at least 60 V / cm) [72]. The electrical conductivity increases with increasing temperature and applied voltage, but decreases with increasing solids content; Reducing the frequency of the alternating current during ohmic heating increases the electrical conductivity. Electrical conductivity increases due to heating: pre-heated samples show increased electrical conductivity compared to untreated samples.

Features and benefits of ohmic heating:

1. *Uniformity of heating.* Since ohmic heating is based on internal energy production, solid particles in the solid-liquid mixture can be heated at the same rate as the fluid. This is a significant advantage over conventional heating, in which heat is

transferred from the external medium through the heat exchange walls and the carrier fluid before reaching the solid phase. Ohmic heating also has significant advantages in the uniformity of heating compared to microwave and radiofrequency heating, since both methods are associated with the use of complex electric fields that are difficult to localize in a multicomponent material. Thus, these methods lead to uneven heating, in which cold spots change locations and are difficult to characterize.

2. *There is no theoretical upper temperature limit.* Unlike conventional methods of heat exchange, where the medium temperature is the highest that can be achieved, ohmic (as well as microwave and radio frequency) heating includes internal generation of energy and can reach temperatures much higher than usual processes. Although there is no theoretical temperature limit, in practice, heat losses increase as the temperature rises to a steady state.

This function has both positive and negative consequences. On the positive side, ohmic heating can be used for rapid heating in the temperature range, eliminating undesirable reactions, which is impossible with ordinary heating. However, if the process is not properly controlled, the temperature can rise to a level of boiling that cannot be withheld by the back pressure of the system.

3. *Adjustable heating rate.* As shown in formula 2, the rate of heat generation is controlled by changing the electric field strength. This is usually done by controlling the applied voltage. It is also possible to realize continuous power control or direct current control. One of the control methods is to determine if the temperatures measured at the outputs of the ohmic heater are accurate: the measured power must be compared with that required for heating the product to determine if a corresponding increase in temperature has been reached. Another control option: the use of current for temperature monitoring. As shown in Equation 3, the electrical conductivity usually has a linear temperature dependence. Thus, for a given product and geometry, the current (directly proportional to electrical conductivity) can be used to control product temperature without using temperature sensors. The temperature measured in this way characterizes the average temperature of the product.

4. *Cost.* When in the 80's they began to use ohmic heating, the cost was a problem for many potential buyers. To operate at power supply frequencies, large power supplies with relatively low power were needed. These devices had large sizes and low throughput, making the choice less attractive.

Over the past 10 years, the cost of ohmic heaters has significantly decreased. This is partly due to the appearance of less expensive solid-state power supplies and an increase in the number of manufacturers in this industry.

5. *Energy efficiency.* The main advantage of ohmic heating is that almost all the energy transferred to food is used. The overall efficiency of ohmic heating is 90% or higher. For comparison: microwave heating has about 50% efficiency. Thus, in the long term, the use of ohmic heating is likely to be an attractive option in industrial environments.

6. *Wide range of designs and sizes of heaters.* The ohmic heaters can be constructed in various ways. In addition, the dimensions can vary widely - from large to microscale. For food products, limit values are usually determined by operating limitations. At the highest level, the main factor is the availability of capacity; At the lower end, the main obstacle is the dielectric strength of water solutions and the contamination of the electrodes.

7. *Non-thermal effects of an electric field.* Electrothermal heating methods attract great attention due to their ability to heat products in bulk. An analysis of the growing amount of data shows that bacterial spores show increased inactivation during ohmic heating compared to conventional heat treatment methods at the same temperature. Products subjected to direct electric heating have a shelf life comparable to canned, sterile and aseptically processed [72].

*Relevance of the research topic.* In recent years, the use of electric current in food technologies has been actively developing for the processing of raw materials and products, namely: electrohydraulic shock, electroporation (destruction of cell membranes), and heating due to Joule heat - direct electric heating (ohmic heating).

Ohmic heating is used for thermal preservation of food products, which uses the passage of an alternating electric current through a food material, where the latter serves as an electrical resistor, and this leads to the release of heat. The instrumentation consists of electrodes in contact with food material, where the electrodes pass electricity through food material, using various combinations of voltage and current. Electric energy is dissipated into heat, which leads to rapid and uniform heating without the use of hot heat transfer surfaces.

These methods of processing food raw materials, when energy is the energy, can replace traditional heating due to thermal conductivity, convection and radiation. Since the generation of heat in this process occurs in the product itself, which significantly increases the energy efficiency of production processes.

Electroheating has several advantages over traditional heating methods, namely: homogeneous and rapid heating, increasing the degree of sterilization at lower processing temperatures, high product quality, the possibility of processing products with a high content of coarse and solid particles, the continuity of the production process, the ability to control the parameters Flow of the process.

Calculation of an electrode-type heating chamber, investigation of the effect of electrode material for the concentration of organic liquids, development of optimal operating conditions is an urgent task due to the lack of a unified system for calculating similar devices, the lack of small-scale serial domestic production devices for processing food products.

*Objective.* Investigation of the features of the process of processing organic raw materials in heating cells of the electrode type. Calculation of equipment for the processing of organic raw materials with the participation of a heating chamber of the electrode type.

*Publications.* The topic of the thesis published 3 articles. The master's thesis consists of six chapters, basic calculations and conclusions, a list of literature and applications. The main text is stated on 247 pages of typewritten text, there are annexes, 5 sheets of graphic material. References include 96 titles.

### **1.3.2 Concentration by ohmic heating**

Ohmic heating, also known as Joule heating, electric resistance heating, direct electrical heating resistance, electric heating and electrically conductive heating, is a process in which an alternating electric current is passed through a food material. Heat is generated inside the material because of its resistance to the applied electric current. With ordinary heating, heat transfer occurs from the heated surface to the inside of the product by convection and conductivity and takes a long time, especially with longer convection paths that may occur during heating. Electro-resistive or ohmic heating has a three-dimensional character and, therefore, has the potential to reduce the reprocessing of the product due to its internal heat transfer [72].

To connect the food product to the electrical circuit, use electrodes - plates that are under electric voltage, immersed in a product layer (liquid or solid consistency).

An electrical circuit is characterized by three physical quantities, namely voltage, amperage, and resistance. Voltage (volts) is the electrical pressure supplied by a main AC supply, battery, alternator, or generator. Resistance (ohms) is the opposition to the current flow caused by the circuit (e.g., wires, electrical components, or food [in the case of Ohmic heating]) while amperage (amperes) is the current flow through the wires, electrical components, or food. As these physical quantities are quite abstract so, the analogy of a garden hose connected to a tap is often used to assist in their visualization. When the tap is opened fully, there is good water pressure (electrical pressure [voltage]) and a substantial water flow (current flow [amperage]) through the hose (wires, electrical components, or food). Squeezing the hose (increasing resistance) will decrease the water flow (decrease electrical current) but will not change water pressure (electrical pressure [voltage]). If on the other hand the water is allowed to flow through the hose normally but the tap is closed to the half-way position, the water pressure (electrical pressure [voltage]) in the hose will decrease as will the water flow (current flow [amperage]), though no change in the resistance will occur. The

mathematical relationship between these three fundamental electrical quantities is one of the most important, basic laws of electricity and is known as Ohm's law:

$$U = I \times R \quad (6)$$

where  $V$  is the voltage (V),

$I$  is the amperage (A),

and  $R$  is the resistance ( $\Omega$ ).

The amount of heat released in the process of ohmic heating is determined according to the Joule-Lenz law and is calculated by the formula 1.

The ohmic heating can be used for uniform heating in a short time for homogeneous and heterogeneous products. Consequently, it has many advantages: reducing the thermal damage to the product, reducing the residence time and preserving the characteristics of the incoming fresh material. Thus, it is possible to stabilize the product without significantly changing the quality criteria (color, loss of vitamins, texture, flavor) and nutritional characteristics, or in other words: ohmic heating makes it possible to control reactions at low activation and reaction energies at high activation energies.

The advantages of using ohmic heating before the evaporation process were considered by me in [48]. The influence of the processes of ohmic heating and surface heating (evaporation) on the intensity of extraction of sucrose from berry raw materials was considered. According to the results of the data, the content of sucrose from the volume of evaporated water during ohmic heating is 2-3% more.

**ПРИЛОЖЕНИЕ А**  
(справочное)

Таблица А - Календарный план-график проведения работ по теме

№ п/п	Вид работ	Исполнитель	Т <sub>к</sub> кал. дн.	Продолжительность выполнения работ																													
				сент.			окт.			ноя.			дек.			январь			февр.			март			апрель			май			июнь		
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	
1	Выбор направления исследований	Руководитель	7	■																													
2	Составление технического задания	Руководитель	2	■																													
3	Планирование работ по проекту	Исполнитель	4			■																											
4	Сбор и обработка литературы, нормативно-технической документации	Руководитель, исполнитель	90			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
5	Получение опытных данных на лабораторной установке в ходе экспериментов	Исполнитель	60									■												■									
6	Сопоставление результатов экспериментов с теоретическими исследованиями	Руководитель, исполнитель, эксперт	40																					■	■	■	■						
7	Анализ теоретических и практических данных	Исполнитель	50																								■						
8	Оценка полученных результатов	Руководитель, эксперт	15																								■	■	■	■			
9	Оформление магистерской диссертации	Исполнитель	50																														
10	Проверка работы на соответствие требованиям, получение рецензии	Руководитель, исполнитель	10																														
11	Подготовка к защите магистерской диссертации	Руководитель, исполнитель	14																														
12	Защита дипломной работы	Исполнитель	1																														

Обозначения: ■ - Руководитель - ■ - Исполнитель - ■ - Эксперт - ■

Формат	Зона	Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание
				<u>Документация</u>		
A2			ФЮРА.000001.009.ТЗ	Технологическая схема	1	
A0			ФЮРА.000002.009.В0	Чертеж общего вида выпарного аппарата	1	
A1			ФЮРА.000003.009.ВЗ	Выносные элементы выпарного аппарата	1	
A1			ФЮРА.000004.009.В0	Чертеж теплообменного аппарата	1	
A4			ФЮРА.000005.009.СП	Спецификация	1	
A2			ФЮРА.000005.009.ТБ	Таблица экономическая	1	
A4				Пояснительная записка	1	
				<u>Детали выпарного аппарата</u>		
		1	Крышка-800-6 ГОСТ 12622-78	Крышка	1	
		2	Прокладка 1-800-0,3 ГОСТ 28759.6-90	Прокладка	1	
		3	Фланец 2-800-0,3-12Х19Н10Т Р ГОСТ 28759.2-90	Фланец	1	
		4	Фланец 3-800-0,3-12Х19Н10Т Р ГОСТ 28759.2-90	Фланец	1	
		5	Фланец 1-20-1 12Х19Н10Т ГОСТ 12820-80	Фланец	2	
		6	Фланец 1-40-1 12Х19Н10Т ГОСТ 12820-80	Фланец	1	
		7		Изолятор керамический	4	
		8	ГАКК 55/40	Электрод	4	
		9	Днище 800-4-200 ГОСТ 6533-78	Днище	1	
		10	Опора ОВ-1-А-4000 ОН 26-01-69-68	Опора	4	
				ФЮРА.000005.009.СП		
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		
Разраб.		Рассанова К.А.			Лит.	Лист
Провер.		Тихонов Н.В.				Листов
Н. Контр.					НИТПУ ИФВТ	
Утверд.						
					Разработка процесса переработки органического сырья в греющих камерах электродного типа. Спецификация.	



