

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

Школа **Инженерная школа новых производственных технологий**  
 Отделение школы (НОЦ) **Научно-образовательный центр Н.М. Кижнера**  
 Направление подготовки **18.03.01 Химическая технология**  
 Профиль **Машины и аппараты химических производств**

### БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
<b>Проектирование газогенераторной установки для получения электроэнергии в удаленных условиях</b>

УДК 621.181:621.31.031

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4Г7Б	Анисимова Анастасия Александровна		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Горлушко Д.А.	доцент		

### КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Спицына Л.Ю.	к.э.н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Черемискина М.С.	-		

По разделу «Механический расчет оборудования»

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

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

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

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

**Инженерная школа новых производственных технологий**  
**Научно-образовательный центр Н.М.Кижнера**  
**Направление подготовки 18.03.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии**  
**Профиль Машины и аппараты химических производств**

**УТВЕРЖДАЮ:**

Руководитель НОЦ Н.М. Кижнера

\_\_\_\_\_ Е.А.Краснокутская  
(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ**

**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Бакалаврской работы
---------------------

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

Студенту:

Группа	ФИО
4Г7Б	Анисимовой Анастасии Александровне

Тема работы:

Проектирование газогенераторной установки для получения электроэнергии в удаленных условиях
---

Утверждена приказом директора (дата, номер)	№ 29-64 от 29.01.2021
---	-----------------------

Срок сдачи студентом выполненной работы:	08.06.2021
--	------------

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<p><b>Исходные данные к работе</b></p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Расчет газогенераторной установки малой мощности для получения электроэнергии в удаленных условиях пиролизным окислением твердого древесного топлива с использованием полученной газовой смеси в двигателе внутреннего сгорания.</p> <p>Топливо: древесный уголь.</p>
---	--

	Мощность двигателя внутреннего сгорания: 4 л.с.
<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<p>1 Технологический расчет газогенераторной установки</p> <p>1.1 Расчет газогенератора</p> <p>1.2 Расчет циклона</p> <p>1.3 Расчет теплообменника-очистителя</p> <p>2 Конструктивно-механический расчет</p> <p>2.1 Расчет газогенератора</p> <p>2.1.1 Расчет на прочность обечаек газогенератора</p> <p>2.1.2 Расчет на прочность днищ и крышек газогенератора</p> <p>2.1.3 Расчет укрепления отверстий</p> <p>2.2 Расчет циклона</p> <p>2.2.1 Расчет на прочность обечайки циклона</p> <p>2.2.2 Расчет на прочность днищ и крышек циклона</p> <p>2.3 Расчет теплообменника-очистителя</p> <p>2.3.1 Расчет на прочность обечаек теплообменника-очистителя</p> <p>2.3.2 Расчет на прочность трубной решетки теплообменника-очистителя</p> <p>2.3.3 Расчет на прочность днищ и крышек теплообменника-очистителя</p> <p>2.3.4 Расчет очистительной трубы</p> <p>3 Социальная ответственность</p> <p>4 Финансовый менеджмент</p>
<p>Перечень графического материала</p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>Лист 1 – Общий вид установки А0</p> <p>Лист 2 – Технологическая схема А1</p> <p>Лист 3 – Выносные элементы А1</p> <p>Лист 4 – Выносные элементы А1</p>
<p>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</p> <p><i>(с указанием разделов)</i></p>	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Спицына Л.Ю.
Социальная ответственность	Черемискина М.С.
Конструктивно-механический раздел	Беляев В.М.
<p>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</p>	
<p> </p>	
<p> </p>	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной	
---	--

квалификационной работы по линейному графику	
--	--

**Задание выдал руководитель:**

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

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4Г7Б	Анисимова Анастасия Александровна		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
4Г7Б	Анисимова Анастасия Александровна

<b>Школа</b>	<b>Инженерная школа новых производственных технологий</b>	<b>Отделение (НОЦ)</b>	<b>НОЦ Н. М. Кижнера</b>
<b>Уровень образования</b>	Бакалавриат	<b>Направление/специальность</b>	18.03.01 «Химическая технология»

Тема ВКР:

<b>Проектирование газогенераторной установки для получения электроэнергии в удаленных условиях</b>					
<b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>					
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	<table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 50%;">Объект исследования:</td> <td>газогенераторная установка.</td> </tr> <tr> <td>Область применения:</td> <td>электроэнергетика.</td> </tr> </table>	Объект исследования:	газогенераторная установка.	Область применения:	электроэнергетика.
Объект исследования:	газогенераторная установка.				
Область применения:	электроэнергетика.				
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:					
<b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>– специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul>	<p>Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 27.12.2018)</p> <p>ГОСТ 12.2.049-80 ССБТ. Оборудование производственное. Общие эргономические требования.</p> <p>ГОСТ Р ИСО 14738-2007. Безопасность машин. Антропометрические требования при проектировании рабочих мест машин.</p> <p>ГОСТ Р ИСО 6385-2016. Эргономика. Применение эргономических принципов при проектировании производственных систем.</p>				
<b>2. Производственная безопасность:</b> 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	<p>Вредные факторы:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- повышенная или пониженная температура воздуха рабочей зоны;</li> <li>- загрязнение воздушной среды в зоне дыхания и аэрозольный состав воздуха.</li> </ul> <p>Опасные факторы:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- чрезмерно высокая температура материальных объектов производственной среды, способная вызвать ожоги тканей организма человека;</li> <li>- тепловое излучение окружающих поверхностей, зон горения.</li> </ul>				
<b>3. Экологическая безопасность:</b>	<p>Атмосфера: выброс газа;</p> <p>Гидросфера: выброс сточных вод;</p> <p>Литосфера: лесные пожары.</p>				
<b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b>	Возможные ЧС: ураганы,				

	наводнения, лесные пожары. Наиболее типичная ЧС: лесной пожар.
--	---

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

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Черемискина Мария Сергеевна	-		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4Г7Б	Анисимова Анастасия Александровна		

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

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
4Г7Б	Анисимовой Анастасии Александровне

<b>Школа</b>	<b>ИШНПТ</b>	<b>Отделение школы (НОЦ)</b>	<b>НОЦ Н.М. Кижнера</b>
Уровень образования	бакалавр	Направление/специальность	18.03.01 Химическая технология

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Бюджет проекта – не более 500 тыс. руб., в т.ч. затраты по оплате труда – не более 340 тыс. руб.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Значение показателя интегральной ресурсоэффективности – не менее 4 баллов из 5
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Отчисления во внебюджетные фонды 30 % согласно Федеральному закону «О страховых взносах в Пенсионный фонд Российской Федерации, Фонд социального страхования Российской Федерации, Федеральный фонд обязательного медицинского страхования» от 24.07.2009 №212-ФЗ (последняя редакция).

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

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Расчет конкурентоспособности SWOT-анализ
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	Расчет бюджетной стоимости НИ
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	Интегральный показатель ресурсоэффективности

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

1. Оценка конкурентоспособности технических решений
2. Матрица SWOT
3. Диаграмма Ганта
4. Бюджет НИ
5. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ

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

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
доцент ОСГН ШБИП ТПУ	Спицына Любовь Юрьевна	к.э.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
4Г7Б	Анисимова Анастасия Александровна		

## ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОСВОЕНИЯ ООП

Код компетенции	Наименование компетенции
<b>Универсальные компетенции</b>	
УК(У)-1	Способность осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач
УК(У)-2	Способность определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений
УК(У)-3	Способность осуществлять социальное взаимодействие и реализовывать свою роль в команде
УК(У)-4	Способность осуществлять деловую коммуникацию в устной и письменной формах на государственном языке Российской Федерации и иностранном(-ых) языке(-ах)
УК(У)-5	Способность воспринимать межкультурное разнообразие общества в социально-историческом, этическом и философском контекстах
УК(У)-6	Способность управлять своим временем, выстраивать и реализовывать траекторию саморазвития на основе принципов образования в течение всей жизни
УК(У)-7	Способность поддерживать должный уровень физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности
УК(У)-8	Способность создавать и поддерживать безопасные условия жизнедеятельности, в том числе при возникновении чрезвычайных ситуаций
<b>Дополнительная универсальная компетенция университета</b>	
УК(У)-9	Способность проявлять предприимчивость в профессиональной деятельности, в т.ч. в рамках разработки коммерчески перспективного продукта на основе научно-технической идеи
<b>Общепрофессиональные компетенции</b>	
ОПК(У)-1	Способность и готовность использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности
ОПК(У)-2	Готовность использовать знания о современной физической картине мира, пространственно-временных закономерностях, строении вещества для понимания окружающего мира и явлений природы
ОПК(У)-3	Готовность использовать знания о строении вещества, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире
ОПК(У)-4	Владеет пониманием сущности и значения информации в развитии современного информационного общества, осознания опасности и угрозы, возникающих в этом процессе, способностью соблюдать основные требования информационной безопасности, в том числе защиты государственной тайны
ОПК(У)-5	Владеет основными методами, способами и средствами получения, хранения, переработки информации, навыками работы с компьютером как средством управления информацией
ОПК(У)-6	Владеет основными методами защиты производственного персонала и населения от возможных последствий аварий, катастроф, стихийных бедствий

<b>Профессиональные компетенции</b>	
ПК(У)-1	Способность и готовность осуществлять технологический процесс в соответствии с регламентом и использовать технические средства для измерения основных параметров технологического процесса, свойств сырья и продукции
ПК(У)-2	Готовность применять аналитические и численные методы решения поставленных задач, использовать современные информационные технологии, проводить обработку информации с использованием прикладных программных средств сферы профессиональной деятельности, использовать сетевые компьютерные технологии и базы данных в своей профессиональной области, пакеты прикладных программ для расчета технологических параметров оборудования
ПК(У)-3	Готовность использовать нормативные документы по качеству, стандартизации и сертификации продуктов и изделий, элементы экономического анализа в практической деятельности
ПК(У)-4	Способность принимать конкретные технические решения при разработке технологических процессов, выбирать технические средства и технологии с учетом экологических последствий их применения
ПК(У)-5	Способность использовать правила техники безопасности, производственной санитарии, пожарной безопасности и нормы охраны труда, измерять и оценивать параметры производственного микроклимата, уровня запыленности и загазованности, шума, и вибрации, освещенности рабочих мест
ПК(У)-6	Способность налаживать, настраивать и осуществлять проверку оборудования и программных средств
ПК(У)-7	Способность проверять техническое состояние, организовывать профилактические осмотры и текущий ремонт оборудования, готовить оборудование к ремонту и принимать оборудование из ремонта
ПК(У)-8	Готовность к освоению и эксплуатации вновь вводимого оборудования
ПК(У)-9	Способность анализировать техническую документацию, подбирать оборудование, готовить заявки на приобретение и ремонт оборудования
ПК(У)-10	Способность проводить анализ сырья, материалов и готовой продукции, осуществлять оценку результатов анализа
ПК(У)-11	Способность выявлять и устранять отклонения от режимов работы технологического оборудования и параметров технологического процесса
ПК(У)-21	Готовность разрабатывать проекты в составе авторского коллектива
ПК(У)-22	Готовность использовать информационные технологии при разработке проектов
ПК(У)-23	Способность проектировать технологические процессы с использованием автоматизированных систем технологической подготовки производства в составе авторского коллектива
<b>Дополнительная компетенция университета</b>	
ДПК(У)-1	Способность проводить стандартные испытания материалов и изделий, проводить физические и химические эксперименты, проводить обработку и анализ результатов

## Реферат

В бакалаврской работе спроектирована газогенераторная установка для получения электроэнергии в удаленных условиях пиролизным окислением твердого древесного топлива.

Произведены технологические и конструктивно-механические расчеты элементов проектируемой установки.

В разделе «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» приведен анализ конкурентных технических решений, проведено планирование научноисследовательских работ, определена структура работ в рамках научного исследования, выполнено определение трудоемкости выполнения работ, разработан график проведения научного исследования, рассчитаны затраты, определена ресурсная, финансовая, бюджетная, социальная и экономическая эффективности исследования.

Раздел «Социальная ответственность» включает в себя определение вредных и опасных производственных факторов, предложения способов снижения негативного воздействия на организм человека.

Дипломный проект содержит расчетно-пояснительную записку из 123 страниц текста, 23 таблиц, 25 рисунков, 36 источников и графическую часть из 1 листа формата А0, 2 листов формата А1 и 3 листов формата А4.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	12
1 ТОПЛИВО ДЛЯ ГАЗОГЕНЕРАТОРА.....	14
1.1 Древесина.....	15
1.2 Древесный уголь.....	17
1.3 Твердое ископаемое топливо.....	19
2 МЕТОДЫ ГАЗИФИКАЦИИ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА.....	21
2.1 Прямой процесс газификации.....	21
2.2 Обратный или опрокинутый процесс газификации.....	23
2.3 Горизонтальный процесс газификации.....	24
3 ОХЛАЖДЕНИЕ ГЕНЕРАТОРНЫХ ГАЗОВ.....	26
4 СИСТЕМЫ ОЧИСТКИ ГЕНЕРАТОРНОГО ГАЗА.....	28
5 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ГАЗОГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ.....	33
5.1 Расчет газогенератора.....	33
5.1.1 Материальный баланс процесса газификации.....	33
5.1.2 Определение основных размеров генератора.....	38
5.2 Расчет циклона.....	42
5.3 Расчет теплообменника-очистителя.....	46
5.3.1 Тепловой расчет теплообменника.....	49
5.3.2 Расчет ориентировочной площади поверхности теплообмена.....	50
6 МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ГАЗОГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ.....	58
6.1 Конструктивно-механический расчет газогенератора.....	58
6.1.1 Расчет на прочность цилиндрических обечаек газогенератора.....	60
6.1.2 Расчет на прочность круглой плоской крышки газогенератора.....	64
6.1.3 Расчет конического днища, нагруженного внутренним избыточным давлением.....	66
6.1.4 Расчет укрепления отверстия в цилиндрической обечайке.....	68
6.2 Расчет циклона.....	71
6.2.1 Расчет цилиндрической части циклона.....	73
6.2.2 Расчет конического днища циклона.....	74
6.2.3 Расчет толщины плоской круглой приварной крышки циклона.....	76
6.3 Расчет теплообменника-очистителя.....	78
6.3.1 Расчет обечайки теплообменника.....	82

6.3.2 Расчет трубной решетки теплообменника.....	82
6.3.3 Расчет плоского круглого приварного днища теплообменника.....	84
6.3.4 Расчет очистительной трубы в теплообменнике-очистителе.....	86
6.3.5 Расчет приварной плоской круглой крышки теплообменника.....	87
<b>7 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ.....</b>	<b>90</b>
7.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.....	91
7.1.1 Специальные правовые нормы трудового законодательства.....	91
7.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.....	92
7.2 Производственная безопасность.....	93
7.3 Экологическая безопасность.....	99
7.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	100
7.5 Выводы по разделу.....	101
<b>8 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ.....</b>	<b>102</b>
8.1 Потенциальные потребители результатов исследования.....	102
8.2 Анализ конкурентных технических решений.....	103
8.3 SWOT-анализ.....	105
8.4 Планирование научно-исследовательских работ.....	107
8.5 Бюджет научного исследования.....	111
8.6 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.....	117
8.7 Выводы по разделу.....	118
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>	<b>120</b>
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....</b>	<b>122</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на то, что в настоящее время технический прогресс облегчил жизнь огромному количеству людей новыми научными и техническими решениями, все равно остаются удаленные территории, которые не снабжены электричеством. Например, такими территориями являются мелкие деревни, снабжение которых электричеством может быть не выгодно государству, или домики лесничих и охотников вне доступа электросетей. Так же проблемой являются перебои в обеспечении электричеством некоторых населенных пунктов.

Практика использования газогенераторов для получения энергии известна достаточно давно и широко использовалась в 1930-х годах в двигателях тракторов и сельскохозяйственного оборудования.

При сжигании в генераторной печи твердого топлива при определенных условиях образуется смесь горючих газов  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$  и  $\text{CH}_4$ , которые после очистки и охлаждения можно использовать в качестве топлива для двигателя внутреннего сгорания. Благодаря двигателю энергия сгорания смеси горючих газов переходит в электрическую.

В качестве твердого топлива могут выступать древесина и древесные отходы, древесный, бурый или каменный уголь, торф [1].

Существует три основных метода газификации твердого топлива в газогенераторных установках: метод прямой, опрокинутой и горизонтальной газификации [1].

Для эффективной работы двигателя необходимо охладить газ до температуры от  $+20$  до  $+30$  °С, так как при данной температуре уменьшается расстояние между молекулами газа и больше молекул горючего газа поместится в объем цилиндра двигателя.

В рамках данной дипломной работы проектируется газогенераторная установка обратной газификации древесного угля для двигателя внутреннего сгорания максимальной мощностью 4 л.с.

## 1 ТОПЛИВО ДЛЯ ГАЗОГЕНЕРАТОРА

Топливо для газогенераторов отличается по химическому составу, а следовательно отличается и состав и калорийность генераторного газа. В зависимости от состава генераторного газа выбирается метод газификации твердого топлива, а так же методы и оборудование для очистки газовой смеси.

Существует ряд требований, предъявляемых к топливу для газогенераторов [2]:

- высокая реакционная способность, благодаря которой обеспечивается быстрый пуск в ход и устойчивость процесса газификации;
- невысокая стоимость по сравнению с привычными жидкими топливами;
- определенный процент влажности, который допустим в условиях работы в конкретных конструкциях газогенераторов;
- малая зольность и значительная тугоплавкость золы;
- минимальное содержание серы;
- определенные размеры кусков;
- наиболее возможная насыпная масса и теплотворная способность;
- достаточная механическая прочность топлива, которая предотвращает измельчение его при встряхивании в процессе транспортировки.

Наиболее распространенным видом твердого топлива в настоящее время является древесина, древесный уголь и древесноугольные брикеты, однако также в качестве топлива для газификации используются торф, торфяной кокс, бурый и каменный уголь [1,2].

Все виды твердого топлива содержат, кроме горючих частей, также и негорючие, которые называют балластом. Горючая часть топлива состоит из органических соединений, содержащих углерод, водород, кислород, азот и

летучую серу. Негорючая часть топлива состоит из влаги, золы и нелетучей серы.

Углерод является наиболее важной горючей частью топлива. при любом соединении углерода с другими элементами, при сгорании его, будет выделено такое же количество тепла, которое выделилось при сгорании свободного углерода.

## 1.1 Древесина

Газификация древесины является наиболее экономически выгодным решением, так как в настоящее время Россия является самой богатой лесными ресурсами страной [3]. К тому же, древесина считается возобновляемым ресурсом в отличие от минеральных топлив.

Наиболее ценной для газификации частью древесины является заболонь и ядро ствола [1], так как в основном они состоят из клетчатки и целлюлозы.

Кроме целлюлозы в древесине содержится связующее вещество для скрепления клеток, называемое лигнином.

В древесине свежесрубленного дерева целлюлоза и лигнин составляют около 45 % всего веса, остальная же часть приходится на древесный сок (вода) и минеральные вещества.

Горючей частью древесины являются именно целлюлоза и лигнин. При этом состав древесины древесных пород отличается за счет отличий в составе лигнина, в то время как большую часть древесины составляет именно целлюлоза, имеющая постоянный состав. В связи с этим составы древесины разных пород деревьев отличаются незначительно.

В среднем в состав древесины входят углерод С (50,0 %), водород Н (6,0 %), кислород О (43,1 %), азот N (0,3 %) и зола (0,6 %) [4].

Теплотворная способность древесины колеблется в значительных пределах для древесины разных пород. Так, например, для ольхи

теплотворная способность будет составлять 17300 Дж/кг, а для сосны 19000 Дж/кг [1].

Генератор и вся установка должна проектироваться под определенный вид топлива.

На основании эксплуатационных данных сделан вывод о том, что лучшим топливом для газогенераторов считается древесина твердых лиственных пород (дуб, ясень, береза и др.), так как при газификации такой древесины образуется минимальное количество смол, осложняющих процесс очистки генераторного газа.

Применение хвойных пород в качестве топлива для газификации возможно, однако конструкция газогенератора должна предусматривать, что при сжигании такой вид топлива дает большое количество смол в газе и большое количество мелкого угля, проваливающегося через колосниковую решетку [1].

Влага содержится в древесине в трех видах:

- в виде главной части древесного сока, питающего клетки растения;
- в виде поглощенной стенками клеток;
- в виде наполняющей пустот клеток.

Различают относительную и абсолютную влажность. Относительная представляет собой отношение веса влаги к весу сырой древесины:

$$W_{\text{отн}} = \frac{G_1 - G_2}{G_1} \cdot 100 .$$

Абсолютная влажность представляет собой отношении веса влаги к весу абсолютно сухой древесины:

$$W_{\text{аб}} = \frac{G_1 - G_2}{G_2} \cdot 100 .$$

Здесь  $G_1$  – вес сухого образца;  $G_2$  – вес сухого образца, высушенное при температуре 105 °С до постоянного веса [1].

Описанные выше формулы взаимосвязаны между собой следующей формулой:

$$W_{аб} = \frac{W_{от}}{100 - W_{от}} \cdot 100 .$$

Наибольшее количество влаги имеют хвойные породы деревьев.

Влажность древесины зависит от периода вырубki: для хвойных пород наибольшее количество влаги выпадает на январь, май, июнь, июль, а наименьшее – на апрель, октябрь и ноябрь; для лиственных пород наибольшее количество влаги выпадает на январь, февраль, а наименьшее – на апрель, июнь и ноябрь.

Древесное топливо для газогенераторов должно иметь не больше 15-20 % абсолютной влажности. Высушить древесину естественным способом до данного уровня влажности невозможно, поэтому древесину сушат искусственно.

## 1.2 Древесный уголь

При нагревании древесины выше 350 °С получается древесный уголь. Количество получаемого древесного угля, химический состав, механическая прочность, его теплотворная способность зависят, главным образом, от температуры, скорости обугливания, качества и породы древесины.

С повышением температуры выжигает угля:

- 1) количество содержащегося углерода в органической массе древесного угля увеличивается;
- 2) количество кислорода и водорода в угле уменьшается;
- 3) весовой выход угля из обугливаемой древесины уменьшается.

Увеличение содержания углерода в органической массе древесного угля происходит сравнительно быстро в пределах температур от +250 до +300 °С, а при температурах выше +600 °С содержание углерода в угле увеличивается незначительно.

Кроме того, при повышении температуры выжигает угля уменьшается способность поглощения углем кислорода воздуха. Эти свойства древесного

угля, при различных температурах выжига, являются особенно важными при газификации угля в газогенераторах, однако этот вопрос изучен не очень хорошо.

При повышении температуры обугливания вначале механическая прочность угля уменьшается, имея минимальную величину при температуре от +325 до +375 °С, при дальнейшем повышении температуры выжига механическая прочность угля возрастает.

С увеличением скорости обугливания в пределах температур от +400 до +500 °С механическая прочность угля уменьшается, а также уменьшается количество получаемого угля и смолы.

При большой скорости обугливания древесины малый выход угля может быть объяснен тем, что при быстром нагревании угля, вследствие малой его теплопроводности, наружные слои успеют уже накалиться, тогда как внутри остается еще влага, которая, проходя через раскаленную наружную часть, сгорает с выделением  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$  и небольшой части  $\text{CH}_4$ , следовательно, чем больше будет содержать влаги обугливаемая древесина, тем меньше будет весовой выход угля.

При малой скорости обугливания древесины выход угля будет больше. Это объясняется медленным повышением температуры, обеспечивает большее соединение кислорода древесины с водородом в виде  $\text{H}_2\text{O}$ , а также больший процент выхода  $\text{CO}_2$  за счет соединения кислорода древесины с углеродом.

Наиболее ценным для процесса газификации угля является нелетучий углерод. Этот углерод не выделяется из древесины при обугливании, а сохраняется в угле в том случае, когда уголь прокален до высоких температур; следовательно, нелетучий углерод поступит в восстановительную зону газогенератора и там произведет восстановление углекислоты и водяных паров. Чем выше температура выжига угля, тем больше в единице веса такого угля содержится нелетучего углерода. Уголь,

выжженный при температуре +700 °С, содержит нелетучего углерода больше на 2-3 %, чем уголь, выжженный при температуре +400 °С.

Древесный уголь обладает характерной особенностью вступать в химическое и физическое соединение с кислородом воздуха при нормальных температурах. В случае химического поглощения углем кислорода воздуха кислород не может быть выделен обратно в чистом виде, а выделяется, главным образом, в виде  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$  и  $\text{H}_2\text{O}$ . При физическом поглощении кислород и газы  $\text{CO}$ ,  $\text{N}_2$  могут быть выделены без изменения их состава путем разрежения. интенсивность поглощения углем кислорода воздуха от следующих причин:

- 1) от температуры среды, окружающей уголь;
- 2) конечной температуры выжигания;
- 3) содержания влажности в угле (влажный уголь поглощает на 20 % больше кислорода воздуха);
- 4) размера куска и давления, при котором происходит обугливание;
- 5) качества породы и способа обугливания древесины.

Таким образом, наиболее желательным для процессов газификации топливом будет уголь из здоровой древесины, выжженный при малых скоростях при конечной температуре обугливания от +600 до +800 °С.

Древесный уголь, применяемый для газогенераторов, должен иметь размеры от 15×15 до 50×50 мм. Чем меньше уголь, тем большие сопротивления прохождению газов, а уголь больших размеров образует большое количество пустот, что в результате уменьшает теплотворную способность генераторного газа [1].

### 1.3 Твердое ископаемое топливо

К ископаемым топливам относятся торф, бурый уголь, каменный уголь, антрацит и горючие сланцы.

Влажность торфа в сыром виде колеблется от 60 до 90 %. Воздушно-сухой торф содержит влаги 20-30 %.

Зольность торфа колеблется от 2 до 10 % и зависит от места образования и глубины залегания. Чем больше глубина залегания, тем выше содержание золы [1].

Содержание серы в торфе колеблется от 0.12 до 0.4 %.

В зависимости от температуры торфококсования получается кокс двух видов: черный и бурый, химический состав которых различается.

Применение бурого угля в газогенераторах без термической или механической обработки практически невозможно, так как он при контакте с воздухом рассыпается на мелкие частицы и имеет большую влажность.

При сухой перегонке бурого угля получается 65-70 % буроугольного кокса, который содержит около 1 % серы, влаги 3-4 % и золы 5-7 %.

Каменный уголь по происхождению старше, чем торф и бурый уголь, поэтому их состав сильно колеблется от близкого к бурому углю до антрацитов, представляющих из себя почти чистый углерод.

Влажность каменных углей различается от места добычи. Подмосковный уголь имеет влажность 16-25 %. Донецкие каменные угли содержат влаги от 1 до 7 %.

Зольность подмосковных углей 10-25 %, а донецких 4-12 %.

Антрацит представляет собой последнюю стадию в образовании угля и содержит малое количество кислорода и водорода. Следовательно, выход летучих газов при горении будет незначительным.

Влажность антрацита может быть принята от 3 до 5 %, зольность от 2 до 12 %.

Сера содержится в антраците в количестве 1-3 %.

Однако перечисленные виды твердого топлива не являются предпочтительными, так как в газе образуется некоторое количество серы, влияющей на качество генераторного газа, а также большое количество золы.

## 2 МЕТОДЫ ГАЗИФИКАЦИИ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

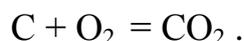
Превращение твердого топлива в горючий газ, происходящее при взаимодействии с кислородом и водяным паром при определенной температуре, называется газификацией.

Существует три основных метода газификации твердого топлива [5]:

- метод прямого процесса газификации;
- метод опрокинутого (обратного) процесса газификации;
- метод горизонтальной газификации.

### 2.1 Прямой процесс газификации

Твердое топливо загружено в камеру цилиндрической формы (рис. 1), имеющую снизу колосниковую решетку, через которую поступает воздух. Кислород воздуха, соединяясь с углеродом топлива, выделяет тепло: Происходит окисление топлива, образуется углекислый газ по формуле:



Пространство, в котором происходит это соединение, называется зоной горения. Высота зоны лежит в пределах 120-150 мм с температурой от +1200 до +1300 °С [5].

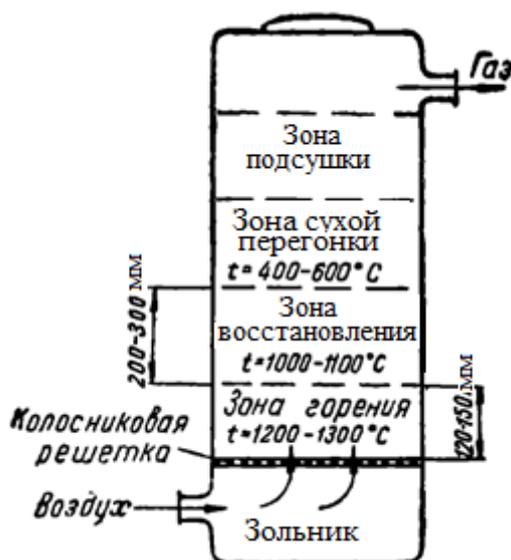
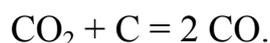


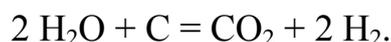
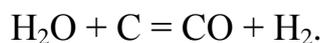
Рисунок 1 – Схема газогенератора прямого процесса газификации

Раскаленные газы, поднимающиеся вверх, нагревают вышележащие слои топлива до температуры от +1000 до +1100 °С, где происходит соединение углекислого газа с раскаленным углеродом и восстановление его в окись углерода. Эта реакция происходит с поглощением тепла. Полученный газ является основной горючей составляющей генераторного газа.

Процесс происходит по формуле:



Одновременно с этим пары воды, содержащиеся в топливе, проходя слой раскаленного углерода, вступают с ним в соединение по формулам:



Зона, где происходит восстановление углекислого газа до окиси углерода в образование водорода, называется восстановительной зоной и занимает по высоте 200-800 мм [5]. Еще выше лежит так называемая зона сухой перегонки, где под влиянием температуры от +400 до +600 °С топливо подвергается сухой перегонке без доступа кислорода воздуха. В ходе этих процессов образуется смесь, состоящая из окиси углерода, водорода, углекислоты, азота, метана и др. Верхние слои топлива, прогреваясь потоком проходящих газов, подсушиваются; поэтому эта зона носит название зоны подсушивания. Топливо, по мере сгорания, перемещается сверху вниз, обеспечивая непрерывное получение газа.

В результате всех этих химических преобразований получаем газ, который, будучи смешан с кислородом воздуха, пригоден для дальнейшего использования как горючее в двигателях внутреннего сгорания.

Данный процесс носит название прямого процесса. Его существенным недостатком является получение газа, сильно загрязненного смолами, являющимися продуктами сухой перегонки топлива. Смолы вызывают засмоление двигателя, поэтому газ должен быть предварительно тщательно очищен. Очистка газа от смол требует сложного оборудования, вследствие

чего прямой процесс газификации применяется лишь в случае использования бессмольного топлива (древесного угля, кокса, антрацита и т. п.).

## 2.2 Обратный или опрокинутый процесс газификации

Обратный процесс газификации значительно отличается от прямого процесса. Сущность его сводится к следующему (рис. 2).

Воздух поступает не снизу через колосниковую решетку (как в предыдущем случае), а сбоку, в среднюю часть генератора, через фурменные отверстия. Таким образом, зона восстановления находится под зоной горения, зоны сухой перегонки и подсушки находятся выше зоны горения [5].

Отбор газа происходит в нижней части генератора, через колосниковую решетку.

Таким образом, продукты сухой перегонки топлива попадают прежде всего в зону горения, где они разлагаются и частично выгорают. В результате получается газ, почти полностью лишенный смолистых примесей. Это преимущество обуславливает широкое распространение (во всех случаях, где используется топливо) генераторов с обратным процессом газификации.

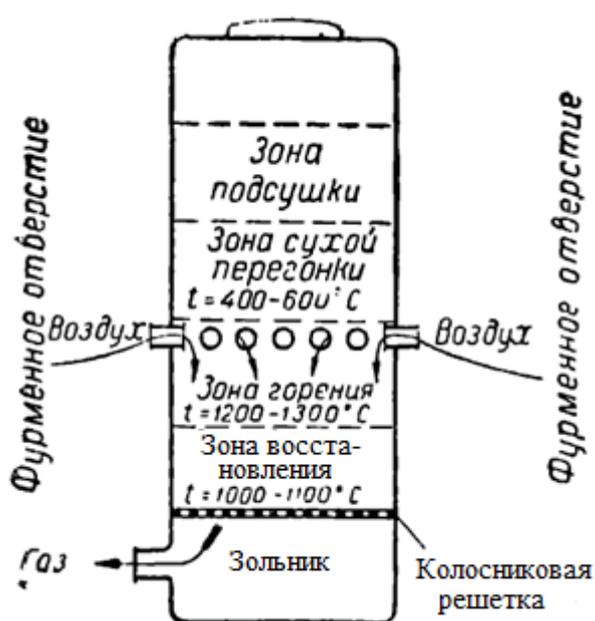


Рисунок 2 – Схема газогенератора обратного процесса газификации

## 2.3 Горизонтальный процесс газификации

Существует еще один вид газификации, получивший название горизонтального процесса газификации (рис. 3).

В этом случае воздух подается в горизонтально расположенную фурму, размещенную в нижней части генератора. Отбор газа происходит через патрубок, установленный на стороне, противоположной входу воздуха, несколько выше или ниже входного отверстия.

Процесс газификации топлива проходит на небольшом участке между концом фурмы и патрубком отбора газа. Благодаря небольшому диаметру фурмы воздух подается с большой скоростью, значительно превышающей скорости воздуха в газогенераторах других типов, вследствие чего в месте подачи воздуха получается окись углерода (CO). Это вызвало предположение, что в газогенераторах горизонтального процесса находится зона неполного горения с непосредственным получением в ней окиси углерода и отсутствует зона восстановления [5].

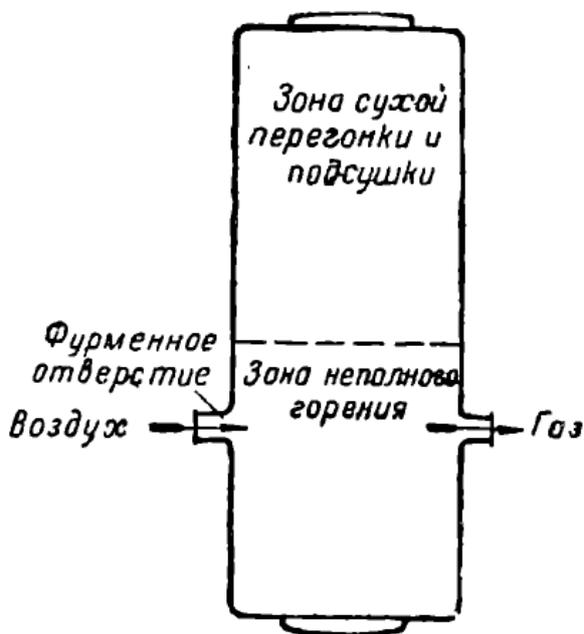


Рисунок 3 – Схема газогенератора с горизонтальным процессом газификации

Зоны сухой перегонки и подсушки находятся в верхней части генератора. Газогенераторы с горизонтальным процессом газификации• годятся для газификации бессмольного топлива, просты по конструкции и удобны в эксплуатации. Однако топливо, содержащее смолы, не может быть в них применимо из-за трудности получения бессмольного газа.

Процесс газификации происходит при высоких температурах, превышающих +1000 °С, вследствие этого получаемый газ имеет температуру от +200 до +800 °С, меняющуюся в зависимости от конструкции генератора. Газ с высокой температурой совершенно непригоден для использования в двигателях внутреннего сгорания, так как концентрация газа будет слишком низкой (вследствие увеличения объема газа при высокой температуре), а отсюда развиваемая двигателем мощность будет недостаточной.

Следовательно, газ должен быть охлажден до возможно низкой температуры.

Многочисленные опыты показали, что температура охлажденного газа не должна превышать температуру окружающего воздуха более чем 15—20 °С [5]. Это обеспечит работу двигателя с минимальными потерями мощности.

### 3 ОХЛАЖДЕНИЕ ГЕНЕРАТОРНЫХ ГАЗОВ

Охлаждатели, применяемые для легких газогенераторов, разделяются на следующие типы [5]:

- 1) батарейно-трубчатый воздушный;
- 2) батарейнотрубчатый водяной,
- 3) водоиспарительный.

Охлаждение в первых двух типах происходит за счет прохождения газа по трубам, омываемым воздухом или водой.

Для улучшения процесса охлаждения стремятся увеличить площадь труб путем комбинирования отдельных отрезков их в батареи (рис. 4).

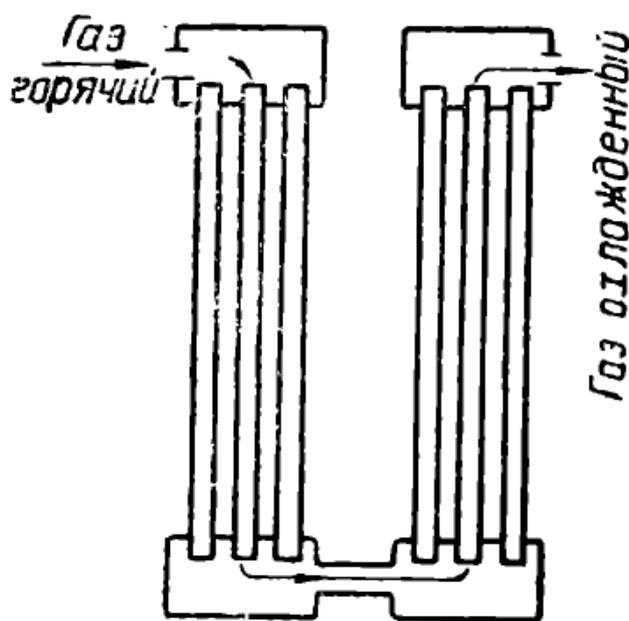


Рисунок 4 – Батарейно-трубчатый охладитель

Водоиспарительный тип основан на понижении температуры газа за счет испарения влаги и чрезвычайно просто решает вопросы охлаждения газа (рис. 5). Газ с температурой от +200 до +800 °С, поступаая из генератора, проходит над поверхностью воды, интенсивно испаряя ее, тем самым охлаждаясь до температуры пара. Дальнейшее охлаждение происходит при

прохождении газа через очистительные устройства за счет прикосновения его к большим поверхностям фильтрующих материалов. В зависимости от размеров очистителя температура газа, поступающего в двигатель, на 5-20 °С выше температуры окружающего воздуха, что является допустимым значением.

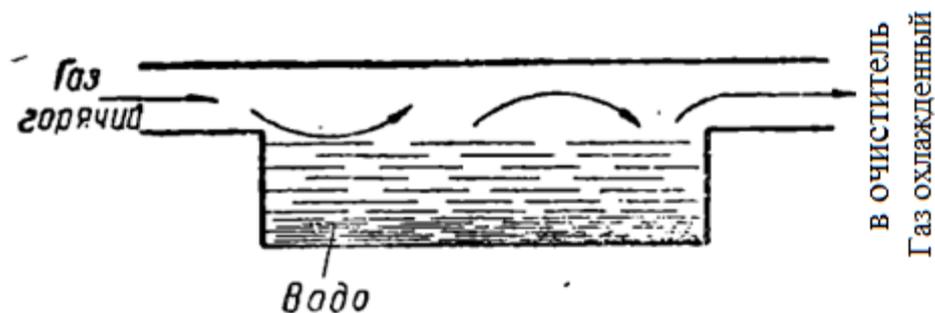


Рисунок 5 – Схема водоиспарительного испарителя

#### 4 СИСТЕМЫ ОЧИСТКИ ГЕНЕРАТОРНОГО ГАЗА

Прежде чем поступить в цилиндр двигателя внутреннего сгорания, газ должен быть тщательно очищен от находящихся в нем примесей (частиц золы, угля, влаги, смолы), которые даже в небольших количествах вредно влияют на работу двигателя, осаждаясь на стенках его цилиндров, поршнях, клапанах и т. п., вызывая тем самым износ двигателя. Очистка газа от смол с помощью специальных очистителей связана с большими трудностями и должна проходить в самом газогенераторе. Достигается это правильно выбранной конструкцией генератора, обеспечивающей почти полное разложение и выгорание смол в процессе газификации (например, газогенератор с обратным процессом газификации). Очистка газа от частиц угля, золы, водяных паров и т. п. не представляет особенного труда. Обычно применяются два способа очистки газа: грубая очистка от крупных частиц и тонкая очистка от мельчайших примесей и водяных паров.

К грубым очистителям относятся отстойниковый, центробежный и инерционно-ударный.

К тонким очистителям—поверхностный и матерчатый.

Одним из наиболее простых по своей конструкции грубых очистителей является очиститель отстойникового типа. Действие его состоит в том, чтобы, используя малую скорость газа до 0,1 м/сек., заставить тяжелые частицы выпасть на дно отстойника. Одна из конструкций такого очистителя приведена на рис. 6.



Рисунок 6 – Очиститель-отстойник

Газ поступает через отверстие, расположенное в левом нижнем углу отстойника, в камеру. Большое сечение последней резко замедляет скорость движения, в результате чего тяжелые примеси осаждаются на дно.

Основным недостатком является громоздкость установки.

Грубым очистителем центробежного типа является так называемый циклон (рис. 7), в котором грубые частицы примесей под действием центробежной силы ударяются о стенки очистителя, теряя при этом скорость, и падают на дно. Поток газа, вошедший с большой скоростью в камеру «Циклона» через патрубок 1, двигается по спирали, приобретая при этом вращательное движение. Тяжелые частицы примесей, ударяясь о стенки «Циклона», падают на дно, и очищенный таким образом газ выходит через патрубок 2. Дно «Циклона» делается отъемным для возможности очистки. Качество работы такого прибора вполне удовлетворительно, вследствие чего он получил широкое распространение.

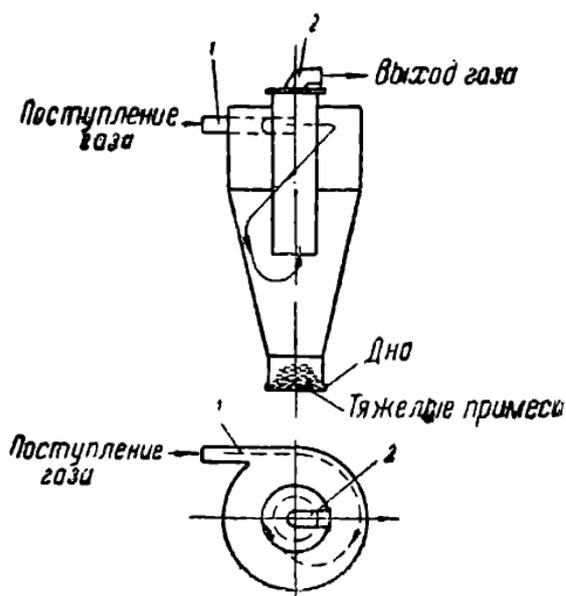


Рисунок 7 – Схема газоочистителя «Циклон»

Действие инерционно ударных очистителей основано на разнице в весе частиц газа и примесей. Газ пропускается по извилистому пути, резко меняющему свое направление, в результате чего грубые примеси, обладающие относительно большим весом, продолжая двигаться по инерции, ударяются о стенки очистителя и падают на дно прибора. На рис. 8 дана одна из конструкций инерционного очистителя. Газ поступает через патрубок 1 в короб 2 с находящимися в нем пластинами 3, имеющими на своей поверхности отверстия, расположенные в шахматном порядке с таким расчетом, чтобы в двух рядом стоящих пластинах отверстия были смещены относительно друг друга. Поток газов, устремляющийся в отверстия пластины, ударяется о пластины 3 и меняет свое направление для того, чтобы пройти через отверстия пластины 4. При этом грубые частицы, двигаясь по инерции, не в состоянии следовать за быстрыми изменениями направления движения газа и падают на дно короба.

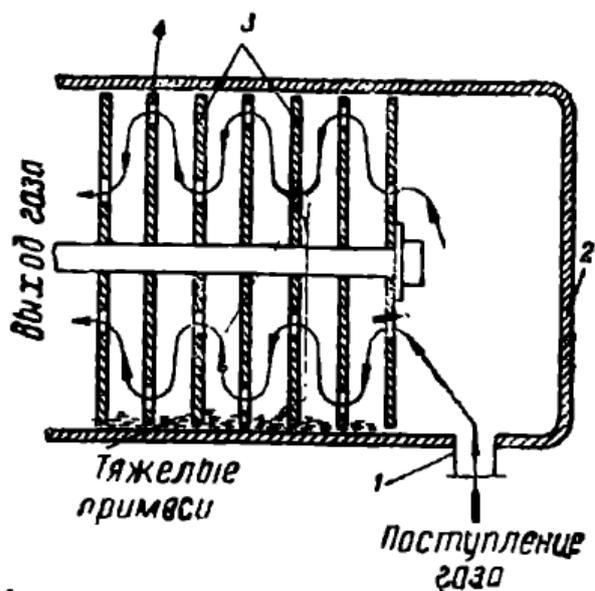


Рисунок 8 – Схема инерционно-ударного газоочистителя

Очищенный от грубых примесей газ не может быть использован для работы, так как содержащееся в нем большое количество мелких примесей и влаги вредно отразится на работе двигателя. Дальнейшая очистка газа выполняется приборами, называемыми тонкими очистителями.

Одним из наиболее часто встречающихся типов тонкого очистителя является поверхностный очиститель. Сущность его работы заключается в том; что газ пропускается через толщу какого-либо материала, обладающего большой поверхностью. Примеси, содержащиеся в газе, задерживаются этим материалом, а водяные шары в результате охлаждения от соприкосновения с большой поверхностью материала конденсируются. Наличие влаги способствует вымыванию и улавливанию тончайших примесей. К материалам с большой поверхностью относятся: металлические или древесные стружки, кольца Рашига, сено, щебенка, уголь, кокс, древесные чурки и т. п.

На рис. 9 дана схема поверхностного очистителя.

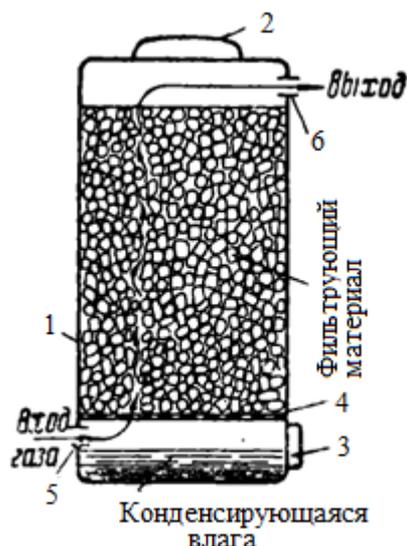


Рисунок 9 – Схема поверхностного очистителя

Металлический цилиндр 1, имеющий сверху люк 2 для загрузки очищающих материалов, а снизу люк 3 для удаления примесей и конденсата, загружен фильтрующим материалом, например, кольцами Рашига, которые представляют собой маленькие металлические или фарфоровые цилиндрики и лежат на решетке 4. Газ, поступающий через патрубок 5, проходит через извилистые каналы, образованные массой колец Рашига, оставляя все примеси на их стенках. Для отбора газа служит патрубок 6. Благодаря большой поверхности засыпанных колец Рашига ( $1 \text{ м}^3$  колец имеет поверхность около  $250 \text{ м}^2$ ) очистка газа весьма совершенна. Вместо колец Рашига с неменьшим успехом может быть использован любой из перечисленных выше материалов.

## 5 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ГАЗОГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Необходимо выполнить технологический расчет газогенераторной установки. Генераторный газ очищается, охлаждается и подается в двигатель внутреннего сгорания мощностью от 1 до 4 кВт.

### 5.1 Расчет газогенератора

#### 5.1.1 Материальный баланс процесса газификации

Целью данного расчета является определение следующих параметров:

- выход генераторного газа из 1 кг топлива;
- содержание паров в газе по выходе из газогенератора;
- количество воздуха, расходуемое на образование 1 м<sup>3</sup> газа;
- расход воздуха на газификацию 1 кг топлива;
- вес полученного генераторного газа;
- низшая теплотворная способность газа и коэффициент полезного

действия газогенератора.

1 кг древесного угля, обугленного при конечной температуре 700 °С, влажностью  $W_{отн} := 4\%$ , в рабочем состоянии имеет элементный состав, приведенный в таблице 1 [6].

Таблица 1 – Элементный состав древесного угля в рабочем состоянии

Составляющие	Содержание, кг
Углерод С	$C := 0.8061$
Водород Н	$H := 0.0260$
Кислород О	$O := 0.1202$
Азот N	$N := 0.0029$
Зола А	$A := 0.0048$

Влажность топлива  $W_{отн} := 4\%$

$$C + H + O + N + W_{\text{отн}} \cdot 0.01 + A = 1 \text{ кг}$$

Молекулярный вес элементов приведен в таблице 2.

Таблица 2 – Молекулярный вес элементов, входящих в состав топлива в рабочем состоянии

Элемент	Молекулярная масса, г/моль
Углерод С	$M_C := 12$
Водород Н	$M_H := 1$
Кислород О	$M_O := 16$
Азот N	$M_N := 14$
Вода H <sub>2</sub> O	$M_{H_2O} := 18$

Объем 1 моля газа в м<sup>3</sup> при температуре 0 °С и 760 мм рт. ст.

$$V_{1m} := 22.4 \text{ м}^3/\text{моль}$$

Состав генераторного газа, полученного из древесного угля, обугленного при конечной температуре 700 °С, влажностью  $W_{\text{влага}} := 4$  %, опрокинутым способом газификации [5], % по объему:

Таблица 3 – Состав генераторного газа, полученного из древесного угля

Полученный газ	Содержание, % об.
Азот, N <sub>2</sub>	$N_2 := 59.4$
Монооксид углерода, CO	$CO := 31.5$
Водород, H <sub>2</sub>	$H_2 := 5$
Диоксид углерода, CO <sub>2</sub>	$CO_2 := 2$
Метан, CH <sub>4</sub>	$CH_4 := 2$
Кислород, O <sub>2</sub>	$O_2 := 0.1$

Примем, что в провале и уносе в виде сажи и пыли уходит  $C_{\text{п}} := 0.020$  кг/кг топлива. Тогда количество углерода, перешедшего в газ из 1 кг древесного угля:

$$C_1 := C - C_{\text{п}} = 0.786 \text{ кг},$$

где  $C_{\text{п}}$  – содержание углерода в провале и уносе, кг/кг;  $C$  – содержание углерода в составе древесного угля в рабочем состоянии, кг.

Содержание углерода в кубическом метре генераторного газа [3]:

$$C_2 := \frac{M_{\text{C}} \cdot (\text{CO} + \text{CO}_2 + \text{CH}_4)}{V_{1\text{м}} \cdot 100} = 0.19 \text{ кг/м}^3,$$

где  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  – содержание одноименных газов в генераторном газе, % об.;  $M_{\text{C}}$  – молекулярная масса углерода, г/моль;  $V_{1\text{м}}$  – объем 1 моля газа в  $\text{м}^3$  при н.у,  $\text{м}^3/\text{моль}$ .

Тогда из 1 кг топлива получим следующее количество сухого генераторного газа [3]:

$$V_{\text{г}} := \frac{C_1}{C_2} = 4.133 \text{ м}^3/\text{кг}$$

Рассчитаем количество воздуха, необходимого для образования 1  $\text{м}^3$  сухого генераторного газа [3]:

Для расчета пренебрегаем незначительным количеством азота, содержащегося в твердом топливе, и учитываем только азот, содержащийся в воздухе.

В воздухе содержится 79 % азота ( $N_{2\text{В}} := 0.79$  доли).

$$L_{\text{в}} := \frac{N_2}{100N_{2\text{В}}} = 0.752 \text{ м}^3/\text{м}^3,$$

где  $N_2$  – содержание азота в генераторном газе, % об.

Тогда расход воздуха на газификацию 1 кг древесного угля будет равен:

$$L_1 := L \cdot V_{\text{г}} = 3.108 \text{ м}^3/\text{кг},$$

где  $L$  – количество воздуха, необходимое для образования 1 кубометра сухого генераторного газа,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;  $V_{\text{г}}$  – количество сухого генераторного газа из 1 кг топлива,  $\text{м}^3/\text{кг}$ .

Источниками влаги в газе являются:

- гигроскопическая влага топлива;
- влага от сгорания водорода топлива;
- пары, поданные с дутьем.

Рассчитаем количество влаги на 1 кг топлива в рабочем состоянии.

$$W_{\text{отн}} := 4\%$$

Примем среднюю влажность воздуха Западной Сибири 75 %, тогда при температуре воздуха 20 °С 1 м<sup>3</sup> воздуха будет содержать влаги

$$G := 13.0 \text{ г/м}^3$$

$$G_{\text{в}} := \frac{G}{1000} \cdot L_1 = 0.04 \text{ кг,}$$

где  $L_1$  – расход воздуха на газификацию 1 кг древесного угля, м<sup>3</sup>/кг.

Количество гигроскопической влаги от сгорания водорода и от паров, вводимых с воздухом, составит [7]:

$$\frac{W_{\text{отн}}}{100 \cdot M_{\text{H}_2\text{O}}} + \frac{H}{M_{\text{H}}} + \frac{G_{\text{в}}}{M_{\text{H}_2\text{O}}} = 0.03 \text{ моль/кг,}$$

где  $W_{\text{отн}}$  – относительная влажность топлива, %;  $M_{\text{H}_2\text{O}}$ ,  $M_{\text{H}}$  – молярные массы воды и водорода, г/моль;  $H$  – содержание водорода в твердом топливе, кг.

Однако часть водяных паров расходуется на образование  $\text{H}_2$  и  $\text{CH}_4$ , тогда количество оставшейся в газе воды найдем следующим образом [7]:

$$\frac{W_{\text{отн}}}{100 \cdot M_{\text{H}_2\text{O}}} + \frac{H}{M_{\text{H}}} + \frac{G_{\text{в}}}{M_{\text{H}_2\text{O}}} - \frac{(\text{H}_2 + 2 \cdot \text{CH}_4) \cdot V_{\text{г}}}{V_{1\text{м}} \cdot 100} = 0.014 \text{ моль/кг,}$$

где  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$  – содержание газов в генераторном газе, % об.;  $V_{1\text{м}}$  – объем 1 моля газа в м<sup>3</sup> при н.у, м<sup>3</sup>/моль.

В массовых единицах:

$$\text{H}_2\text{O} := \frac{1}{V_{\text{г}}} \cdot (0.01 \cdot W_{\text{отн}} + 9 \cdot H + G_{\text{в}}) - 0.00804 \cdot (\text{H}_2 + 2 \cdot \text{CH}_4) = 3.703 \times 10^{-3} \text{ кг/м}^3$$

Вес 1 м<sup>3</sup> сухого генераторного газа в н.у. составит [7]:

$$\gamma_{\text{г}} := 0.0125 \cdot \text{CO} + 0.0009 \cdot \text{H}_2 + 0.0072 \cdot \text{CH}_4 + 0.0143 \cdot \text{O}_2 + 0.0198 \cdot \text{CO}_2 + 0.0125 \cdot \text{N}_2 = 1.196 \text{ кг/м}^3$$

Низшая теплотворная способность газа в н.у. рассчитывается по формуле [7]:

$$H_u := 30.35 \cdot CO + 25.7 \cdot H_2 + 85.70 \cdot CH_4 = 1.256 \times 10^3 \text{ кал/м}^3$$

$$H_u := 0.0053 \text{ МДж/м}^3$$

Теплотворная способность угля, полученного методом обугливания в кучах при конечной температуре обугливания от +600 до +800 °С, согласно [1]

$$Q_H := 0.0314 \text{ МДж/кг}$$

Рассчитаем коэффициент полезного действия газогенератора по следующей формуле [7]:

$$\eta_{\Gamma} := V_{\Gamma} \cdot \frac{H_u \cdot 100}{Q_H} = 69.769 \%$$

Исходя из представленных расчетов, материальный баланс газификации древесного угля выглядит следующим образом:

<i>Приход (в кг)</i>	
Масса топлива в рабочем состоянии,	1.0000
Масса сухого воздуха ( $L_1 \cdot (\text{плотность воздуха н.у.})$ )	4.0093
<hr/>	
Итого	5.0093
<i>Расход (в кг)</i>	
Масса сухого газа ( $V_{\Gamma} \cdot \eta_{\Gamma}$ )	4.9430
Содержание воды в газе ( $H_2O \cdot V_{\Gamma}$ )	0.0153
Масса золы	0.0048
Потери углерода в провале и уносе	0.0020
<hr/>	
Итого	4.9651

Невязка между приходом и расходом составляет ( $5.0093 - 4.9651 = 0.0445$  кг), что составляет 0.9 %, обусловлена неточностью анализов топлива и газа.

### 5.1.2 Определение основных размеров генератора

Производительность газогенератора зависит от параметров двигателя, для которого рассчитывается газогенераторная установка. Возьмем двигатель внутреннего сгорания (Lifan 160F) мощностью 4 л.с. четырехтактный с параметрами согласно руководству пользователя:

Диаметр поршня, м	$D := 0.06$
Ход поршня, м	$S := 0.042$
Число цилиндров	$i := 1$
Частота вращения коленчатого вала, об/мин	$n := 3600$

Коэффициент наполнения  $\eta_u$  для газогенераторных двигателей колеблется от 0.65 до 0.75 [7]. Примем  $\eta_u := 0.70$

Рассчитаем расход газозвдушной смеси для четырехтактного двигателя [7]:

$$Q_{см} := \frac{(\pi \cdot D^2)}{4} \cdot S \cdot i \cdot \eta_u \cdot \frac{n}{2} \cdot 60 = 8.978 \text{ м}^3/\text{час}$$

Теоретическое количество воздуха для сгорания газа, [7]:

$$L_0 := \frac{1}{21} \cdot [0.5 \cdot (\text{CO} + \text{H}_2) + 2 \cdot \text{CH}_4 - \text{O}_2] = 1.055 \text{ м}^3/\text{м}^3$$

Коэффициент избытка воздуха рассчитывается по формуле [7]:

$$\alpha := \frac{L}{L_0} = 0.713$$

где  $L$  – количество воздуха, необходимое для образования 1кубометра сухого генераторного газа,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;  $L_0$  - количество воздуха, которое необходимо для полного сгорания топлива  $\text{м}^3/\text{м}^3$ .

Рассчитаем расход газа двигателем при нормальных физических условиях по следующей формуле [7]:

$$Q_{газ} := \frac{Q_{см}}{1 + L_0 \cdot \alpha} = 5.125 \text{ м}^3/\text{час},$$

где  $Q_{см}$  – расход газовой смеси для четырехтактного двигателя,  $м^3/час$ ;  $L_0$  – количество воздуха, которое необходимо для полного сгорания топлива  $м^3/м^3$ ;  $\alpha$  – коэффициент избытка воздуха.

Тогда расход твердого топлива составит:

$$G := \frac{Q_{газ}}{V_r} = 1.24 \text{ кг/час,}$$

где  $V_r$  – количество сухого генераторного газа из 1 кг топлива,  $м^3/кг$ .

Будем считать, что максимальное число работы газогенератора на одной загрузке равно  $z := 2.5$  часа.

Насыпной вес древесного угля принимаем в интервале от 120 до 200  $кг/м^3$  [1].

$$\gamma_T := 150 \text{ кг/м}^3$$

Объем бункера рассчитаем по формуле [7]:

$$V_б := G \cdot \frac{z}{\gamma_T} = 0.021 \text{ м}^3,$$

где  $G$  — расход твердого топлива,  $кг/час$ ;  $z$  — максимальное число часов работы на одной загрузке;  $\gamma_T$  — насыпной вес топлива,  $кг/м^3$ .

Эффективная мощность двигателя определяется следующим образом:

Крутящий момент двигателя,  $кгм$ :

$$M_e := 0.61183$$

$$N_e := \frac{M_e \cdot n}{716.2} = 3.075 \text{ л.с.}$$

Тогда удельный расход твердого топлива будет равен:

$$g := \frac{G}{N_e} = 0.403 \text{ кВт/час}$$

Основными размерами камеры газификации являются ее высота и диаметр. Высота камеры определяет собой необходимую и достаточную для завершения процесса толщину слоя топлива. Диаметр камеры определяет возможную производительность газогенератора.

Так как реакции газификации протекают на поверхности топлива, а не во внутренней области частиц, то производительность процесса пропорциональна не объему слоя, а его поверхности.

Примем средний размер частиц древесного угля [1]  $d_{\text{ч}} := 0.045$  м.

Тогда величина удельной поверхности слоя  $b_y$  для древесного угля [7]:

$$b_y := 1.2 \cdot \frac{\pi}{d_{\text{ч}}} = 83.776 \text{ м}^2/\text{м}^3$$

Для генераторов обращенного процесса для топлива стандартной влажности температура кислородной зоны равна 1200 °С, тогда высота активной зоны рассчитывается по формуле [7]:

$$H_T := \frac{32.4}{b_y} = 0.387 \text{ м}$$

Высота активной зоны определяет высоту камеры газификации.

Диаметр камеры газификации рассчитывается следующим образом [7]:

Для древесного угля напряженность горения составляет от 200 до 500 кг/м<sup>3</sup>. Примем  $q := 200$  кг/м<sup>3</sup>.

$$D_1 := 1.12 \cdot \sqrt{\frac{V_6}{H_T}} = 0.259 \text{ м,}$$

где  $V_6$  – объем бункера, м<sup>3</sup>;  $H_T$  – высота активной зоны газогенератора, м.

Для обращенного генераторного процесса число фурм принимается в интервале от 5 до 12, действительная скорость входа воздуха от 20 до 30 м/сек (примем  $v := 27$  м/сек)[7].

Рассчитаем часовой расход воздуха через фурмы, учитывая поправку на температуру подогрева [7]:

Примем температуру подогрева  $t := 400$  °С.

$$L_{\text{час}} := Q_{\text{газ}} \cdot L_0 \cdot \frac{(273 + t)}{273} = 13.325 \text{ м}^3/\text{час}$$

где  $Q_{\text{газ}}$  — расход газа, отнесенный к нормальным физическим условиям,  $\text{м}^3/\text{час}$ ;  $L_0$  — количество воздуха, необходимое на образование  $1 \text{ м}^3$  газа,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ .

Тогда суммарное проходное сечение фурм будет равно [7]:

$$f := 2.78 \cdot \frac{L_{\text{час}}}{v} = 1.372 \text{ см}^2,$$

где  $v$  — действительная скорость входа воздуха в фурмах,  $\text{м}/\text{сек}$ ;  $L_{\text{час}}$  — часовой расход воздуха через фурмы,  $\text{м}^3/\text{час}$ .

Диаметр газопровода при заданных условиях будет равен:

Допустимая скорость газового потока будет принята  $v_1 := 10 \text{ м}/\text{с}$

$$d_{\text{гп}} := 0.14 \cdot \sqrt{Q_{\text{газ}} \cdot \frac{(273 + t)}{v_1}} = 2.6 \text{ см},$$

где  $Q_{\text{газ}}$  — расход газа, отнесенный к нормальным физическим условиям,  $\text{м}^3/\text{час}$ ;  $t$  — температура подогрева,  $^{\circ}\text{C}$ .

Корпус газогенератора изготовлен в виде цилиндра из металлической трубы. К корпусу в нижней части приварено коническое днище с отверстием для очистки зольниковой камеры, а в верхней части — плоская приварная крышка с отверстием для бункера. На плоскую приварную крышку корпуса приварен внутренний цилиндр со съемной крышкой крышкой. Верхняя часть внутреннего цилиндра выполняет роль загрузочного бункера, нижняя — камеры горения. В средней части корпуса камеры горения расположено по окружности четыре фурмы для подвода воздуха. Колосниковая решетка, расположенная в нижней части бункера газогенератора, поддерживает слой раскаленного угля под камерой горения. Зола через колосниковую решетку проваливается в зольную камеру и удаляется. Для отбора газа в верхней части корпуса газогенератора приварен патрубок, к которому присоединен газоотводящий трубопровод. При таком расположении патрубка газ, отсасываемый из зоны восстановления, проходит по кольцевой полости, образованной стенками корпуса и бункера, обогревая бункер и улучшая в нем подсушку топлива, а сам при этом частично охлаждается до  $400 - 500 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Дальнейшее охлаждение газа до 20 – 30 °С и очистка происходят в последующих аппаратах установки.

## 5.2 Расчет циклона

В генераторном газе в интервале температур от +700 до +450 °С происходят обратные реакции, в результате которых горючий СО переходит в негорючий СО<sub>2</sub>, а так же образуется сажа, что неблагоприятно сказывается на качестве трубопровода. Благодаря предложенной конструкции газогенератора температура газа на выходе из него будет равна от +400 до +500 °С, газ закален.

Так как расход генераторного газа в час малый, принято решение подавать в циклон газовоздушную смесь для получения приемлемых размеров циклона и теплообменника.

Примем минимальный медианный диаметр частиц пыли 5 мкм.

$$d_m := 5 \text{ мкм}$$

Количество очищаемого газа

$$Q_{см} = 8.978 \text{ м}^3/\text{час}$$

Температуру воздуха примем средней

$$t_{ср} := \frac{(500 + 400)}{2} = 450 \text{ °С}$$

Унос с газом пыли и сажи может достигать от 7 до 10 % от веса сухого топлива [8].

Начальная концентрация пыли  $C_H := 0.6 \text{ г/м}^3$

Плотность угольной пыли  $\rho_{п} := 700 \text{ кг/м}^3$

Допустимое содержание пыли в очищенном газе составляет от 0.02 до 0.03 г/м<sup>3</sup> [1].

Так как пыль угольная, выберем тип циклона СК-ЦН-34 с удлиненной конической поверхностью для улавливания сажи. Оптимальная скорость

движения газа для данного типа циклонов от 1.4 до 1.7 м/с. Примем  $v_0 := 1.4$  м/с [9].

Определим необходимую площадь сечения циклона при заданном количестве газа:

$$F := \frac{Q_{\text{см}}}{3600 \cdot v_0} = 1.781 \times 10^{-3} \text{ м}^2$$

Определим диаметр циклона:

$$D_{\text{ц}} := 1.13 \cdot \sqrt{F} = 0.048 \text{ м}$$

Примем

$$D_{\text{б}} := 0.05 \text{ м}$$

Тогда действительная скорость газа в циклоне:

$$v_{\text{д}} := 1.27 \cdot \frac{Q_{\text{см}}}{3600 \cdot D_{\text{ц}}^2} = 1.267 \text{ м/с}$$

Действительная скорость в циклоне не должна отличаться от оптимальной более чем на 15 %. В данном случае отличается на 15 %.

Бункеры конических циклонов имеют цилиндрическую форму диаметром  $D_{\text{б}} := 1.2 \cdot D_{\text{ц}} = 0.06$  м, высота цилиндрической части бункера составляет  $H_{\text{б}} := 0.8 \cdot D_{\text{ц}} = 0.04$  м [10].

Коэффициент гидравлического сопротивления [10]:

Примем поправочные коэффициенты, зависящие от диаметра циклона  $D_{\text{ц}}$  и входной концентрации пыли  $C_{\text{в}}$ , а так же коэффициент гидравлического сопротивления  $R_{500}$  при диаметре циклона 500 мм [10].

$$k_1 := 1$$

$$k_2 := 1$$

$$R_{500} := 2000$$

$$R := k_1 \cdot k_2 \cdot R_{500} = 2 \times 10^3$$

Плотность газа при заданной средней температуре:

$$\rho_{\text{г}} := \gamma_{\text{г}} \left( \frac{273}{t_{\text{ср}} + 273} \right) = 0.397 \text{ кг/м}^3$$

Значение гидравлического сопротивления рассчитывается по формуле [10]:

$$\Delta P := R \cdot \rho_T \cdot \frac{v_1}{2} = 502.671$$

Для циклона типа СК-ЦН-34 примем  $d_{150} := 1.95$

Определим значение  $d_{50}$

$$d_{50} := d_{150} \cdot \sqrt{\frac{D_{Ц} \cdot \rho_{чТ} \cdot \mu_T \cdot v_0}{D_T \cdot \rho_{п} \cdot \mu \cdot v_1}}$$

где параметры с индексом Т - типовое значение для параметров для данного вида циклона.

$$D_T := 6 \text{ м}$$

$$\rho_{чТ} := 1930 \text{ кг/м}^3$$

$$\mu_T := 22.2 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$$

$$\mu := 31.7 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$$

$$d_{50} := d_{150} \cdot \sqrt{\frac{D_{Ц} \cdot \rho_{чТ} \cdot \mu_T \cdot v_0}{D_T \cdot \rho_{п} \cdot \mu \cdot v_1}} = 0.26$$

Рассчитаем параметр  $x$ , в зависимости от которого получим значение табличной функции для расчета определения эффективности очистки [10]:

$$x := 0.8 \cdot \log\left(\frac{d_{50}}{d_{150}}\right) = -0.7$$

Значение табличного параметра при значении  $x = -0.7$  [10]:

$$\Phi(x) := 0.243$$

Тогда коэффициент очистки будет равен

$$\eta_{оч} := 0.5 \cdot (1 + \Phi(x)) = 0.621$$

Так как в составе установки после циклона предусмотрен теплообменный аппарат с насадками для очистки газов, допустим такое значение.

Далее рассчитаем конструкционные размеры циклона по общей формуле  $x := k \cdot D_{Ц}$ , где  $x$  - параметр циклона (диаметр, ширина, высота);  $k$  - коэффициент пропорциональности (табл. 4) [10].

Таблица 4 – Значение коэффициента k для циклона СК-ЦН-34

Параметр	Тип циклона
	СК-ЦН-34
Диаметр выхлопной трубы <b>d</b>	0.34
Диаметр пылевывпускного отверстия <b>d<sub>1</sub></b>	0.23
Диаметр входного патрубка <b>b</b>	0.214
Длина входного патрубка <b>l</b>	0.6
Высота входного патрубка <b>a</b>	0.515
Высота выхлопной трубы (ВТ) <b>h<sub>т</sub></b>	0.515
Высота внешней части (ВТ) <b>h<sub>в</sub></b>	0.2 – 0.3
Высота цилиндрической части <b>H<sub>ц</sub></b>	0.515
Высота конуса <b>H<sub>к</sub></b>	2.11
Высота установки фланца <b>h<sub>фл</sub></b>	0.1
Общая высота циклона <b>H</b>	2.925

Диаметр выхлопной трубы:

$$d := 0.34 \cdot D_{ц} = 0.017 \text{ м}$$

Диаметр пылевывпускного отверстия:

$$d_1 := 0.23 \cdot D_{ц} = 0.012 \text{ м}$$

Диаметр входного патрубка:

$$b := 0.214 \cdot D_{ц} = 0.011 \text{ м}$$

Длина входного патрубка:

$$l := 0.6 \cdot D_{ц} = 0.03 \text{ м}$$

Высота выходного патрубка:

$$a := 0.515 \cdot D_{ц} = 0.026 \text{ м}$$

Высота выхлопной трубы внутри корпуса:

$$h_t := 0.515 \cdot D_{ц} = 0.026 \text{ м}$$

Высота внешней части выхлопной трубы:

$$h_v := 0.3 \cdot D_{ц} = 0.015 \text{ м}$$

Высота цилиндрической части:

$$H_{ц} := 0.515 \cdot D_{ц} = 0.026 \text{ м}$$

Высота конуса:

$$H_{к} := 2.11 \cdot D_{ц} = 0.106 \text{ м}$$

Высота установки фланца:

$$h_{фл} := 0.1 \cdot D_{ц} = 5 \times 10^{-3} \text{ м}$$

Общая высота циклона:

$$H_{цикл} := 2.925 \cdot D_{ц} = 0.146 \text{ м}$$

Радиус улитки рассчитаем с учетом  $\phi := 135 \cdot \text{deg}$  рад [10].

$$\rho := \frac{D_{ц}}{2} + b \cdot \frac{\phi}{2 \cdot \pi} = 0.029 \text{ м}$$

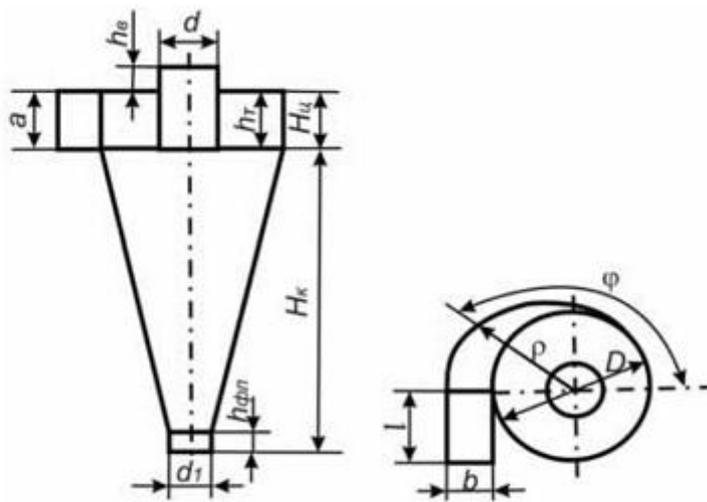


Рисунок 10 – Расчетная схема конического циклона

Для газогенераторного процесса, в результате которого требуется очистка горячей газовой смеси, необходим циклон нестандартных размеров.

### 5.3 Расчет теплообменника-очистителя

Теплообменник-очиститель представляет из себя вертикальный кожухотрубный теплообменник с трубой по центру, заполненной кольцами Рашига, коксом и люфой.

Теплообменник-очиститель представляет из себя цилиндр из трубы. В верхней и нижней частях цилиндра находятся камеры. Середину цилиндра занимает труба, разделенная решетчатыми перегородками, которые служат для размещения фильтрующих материалов (колец Рашига, слоя кокса и слоя люфа). В верхней части трубы расположен люк для очистки и загрузки очистителя, а также патрубок для отбора газа. Камеры соединены между собой газовыми теплообменными трубами, омываемыми охлаждающей водой.

Необходимо посчитать теплообменник для охлаждения газовой смеси водой. Начальная температура газовой смеси 400 °С, конечная температура 20 °С. Начальная температура охлаждающей воды 10 °С, конечная 30 °С. Давление, оказываемое газовой смесью, 0.1 МПа, а давление, оказываемое охлаждающей водой, 0.2 МПа.

Целью технологического расчета теплообменного аппарата является определение его геометрических параметров, а именно его высоты и диаметра.

Исходные данные:

Начальная температура смеси газов (горячего теплоносителя):

$$t_{1Н} := 400^{\circ}\text{C}$$

Конечная температура смеси газов (горячего теплоносителя):

$$t_{1К} := 20^{\circ}\text{C}$$

Начальная температура воды (холодного теплоносителя):

$$t_{2Н} := 10^{\circ}\text{C}$$

Конечная температура воды (холодного теплоносителя):

$$t_{2К} := 30^{\circ}\text{C}$$

Давление газовой смеси (горячего теплоносителя):

$$P_1 := 0.1 \text{ МПа}$$

Давление воды (холодного теплоносителя):

$$P_2 := 0.2 \text{ МПа}$$

Примем среднюю температуру газа в теплообменнике

$$t_{\text{ср.}} := \frac{(400 + 20)}{2} = 210 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Теплофизические свойства газов при 210 °С представлены в таблице 5 [11]:

Таблица 5 – Теплофизические свойства газов при 210 °С

	$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	Дж/(кг*град)	$\frac{\text{Н}\cdot\text{с}}{\text{м}^2}$	$\frac{\text{г}}{\text{моль}}$
Азот, N <sub>2</sub>	$\rho_{\text{N}_2} := 0.715$	$c_{p\text{N}_2} := 1064$	$\mu_{\text{N}_2} := 24.6 \cdot 10^{-6}$	$M_{\text{N}_2} := 28$
Монооксид углерода, CO	$\rho_{\text{CO}} := 0.716$	$c_{p\text{CO}} := 1060$	$\mu_{\text{CO}} := 24.8 \cdot 10^{-6}$	$M_{\text{CO}} := 28$
Водород, H <sub>2</sub>	$\rho_{\text{H}_2} := 0.0503$	$c_{p\text{H}_2} := 14495$	$\mu_{\text{H}_2} := 12.25 \cdot 10^{-6}$	$M_{\text{H}_2} := 2$
Диоксид углерода, CO <sub>2</sub>	$\rho_{\text{CO}_2} := 1.1252$	$c_{p\text{CO}_2} := 1125$	$M_{\text{CO}_2} := 44$	$\mu_{\text{CO}_2} := 22.73 \cdot 10^{-6}$
Метан, CH <sub>4</sub>	$\rho_{\text{CH}_4} := 0.421$	$c_{p\text{CH}_4} := 2843.6$	$\mu_{\text{CH}_4} := 16.13 \cdot 10^{-6}$	$M_{\text{CH}_4} := 16$
Кислород, O <sub>2</sub>	$\rho_{\text{O}_2} := 0.770$	$c_{p\text{O}_2} := 972$	$\mu_{\text{O}_2} := 30.33 \cdot 10^{-6}$	$M_{\text{O}_2} := 32$
Воздух, В	$\rho_{\text{В}} := 0.760$	$c_{p\text{В}} := 1028.2$	$\mu_{\text{В}} := 26.28 \cdot 10^{-6}$	$M_{\text{В}} := 29$

После смесителя 43 % газовой смеси составляет воздух. Пересчитаем процентное содержание газов в газовой смеси.

Таблица 6 – Состав газовой смеси

Газ	Содержание, доли
Азот, N <sub>2</sub>	$y_{\text{N}_2} := 0.3386$
Монооксид углерода, CO	$y_{\text{CO}} := 0.1796$
Водород, H <sub>2</sub>	$y_{\text{H}_2} := 0.0285$
Диоксид углерода, CO <sub>2</sub>	$y_{\text{CO}_2} := 0.0114$
Метан, CH <sub>4</sub>	$y_{\text{CH}_4} := 0.0114$

Продолжение таблицы 6

Кислород, O <sub>2</sub>	$y_{O_2} := 0.0006$
Воздух, В	$y_B := 0.43$

Плотность смеси газов рассчитывается по формуле [12]:

$$\rho_{см} := y_{N_2} \cdot \rho_{N_2} + y_{CO} \cdot \rho_{CO} + y_{H_2} \cdot \rho_{H_2} + y_{CO_2} \cdot \rho_{CO_2} + y_{CH_4} \cdot \rho_{CH_4} + y_{O_2} \cdot \rho_{O_2} + y_B \cdot \rho_B = 0.717 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Удельная теплоемкость газовой смеси рассчитывается по формуле [12]:

$$c_{p,см} := y_{N_2} \cdot c_{pN_2} + y_{CO} \cdot c_{pCO} + y_{H_2} \cdot c_{pH_2} + y_{CO_2} \cdot c_{pCO_2} + y_{CH_4} \cdot c_{pCH_4} + y_{O_2} \cdot c_{pO_2} + y_B \cdot c_{pB} = 1.452 \times 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$$

Массовый расход газовой смеси:

$$G_1 := Q_{см} \cdot \frac{\rho_{см}}{3600} = 1.788 \times 10^{-3} \text{ кг/с}$$

### 5.3.1 Тепловой расчет теплообменника

Определение тепловой нагрузки [12]:

$$Q_1 := G_1 \cdot c_{p,см} \cdot (t_{1H} - t_{1K})$$

$$Q_1 = 986.396 \text{ Вт}$$

Для расчета расхода холодного теплоносителя воспользуемся формулой теплового баланса, на потери тепла отнесем 5%.

Количество тепла, передаваемое горячим теплоносителем холодному за 1 с:

$$Q_2 := 1.05 \cdot Q_1 = 1.036 \times 10^3 \text{ Вт}$$

Теплофизические свойства воды (холодного теплоносителя) при 30 °С [5]:

$$c_2 := 4174 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$$

$$\rho_2 := 995.7 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Тогда массовый расход холодного теплоносителя [7]:

$$G_2 := \frac{Q_2}{c_2} \cdot (t_{2к} - t_{2н}) = 4.963 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

Объемные расходы газовой смеси и воды:

$$V_1 := \frac{G_1}{\rho_{см}} = 2.494 \times 10^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

$$V_2 := \frac{G_2}{\rho_2} = 4.984 \times 10^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

### 5.3.2 Расчет ориентировочной площади поверхности теплообмена

Далее, используя уравнение теплопередачи, находим ориентировочную поверхность теплообмена.

Определим ориентировочно значение площади поверхности теплообмена, приняв ориентировочно коэффициент теплопередачи при теплообмене от газа к жидкости [12]:

$$K_{ор.min} := 10 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

$$K_{ор.max} := 60 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

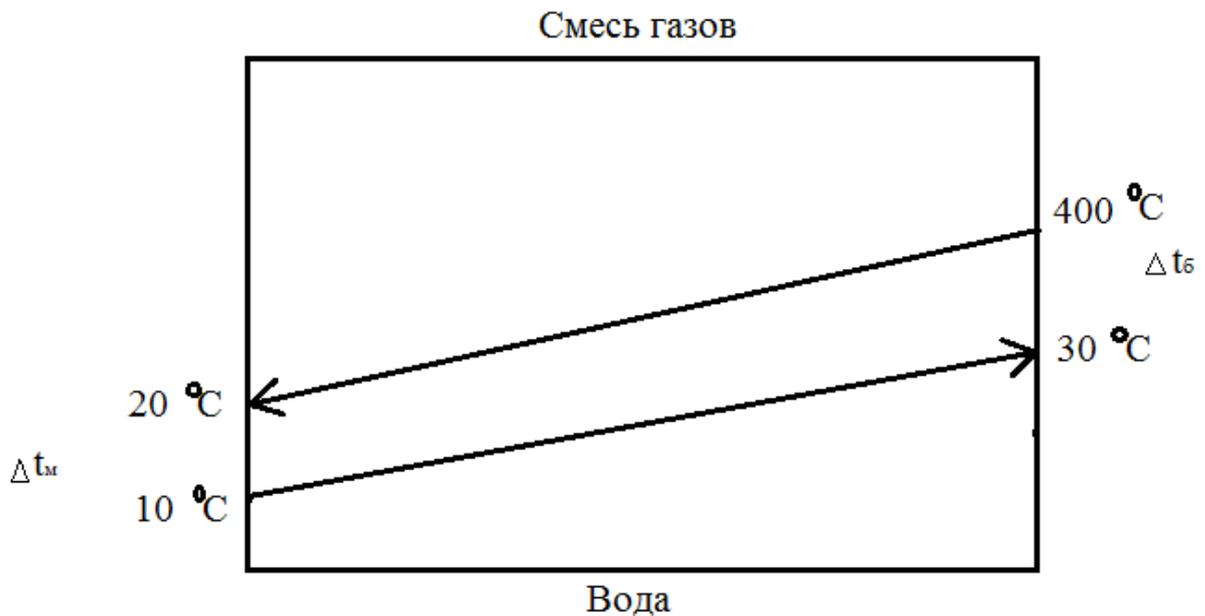


Рисунок 11 – Температурная схема процесса  
Разности температур:

$$\Delta t_{\text{б}} := t_{1\text{н}} - t_{2\text{к}}$$

$$\Delta t_{\text{б}} = 370 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_{\text{м}} := t_{1\text{к}} - t_{2\text{н}}$$

$$\Delta t_{\text{м}} = 10 \text{ } ^\circ\text{C}$$

где  $\Delta t_{\text{б}}$  – наибольшая разность температур,  $^\circ\text{C}$  ;

$\Delta t_{\text{м}}$  – наименьшая разность температур,  $^\circ\text{C}$ .

Так как  $\frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}} > 2$ , то среднюю разность температур найдем по уравнению [12]:

$$\Delta t_{\text{ср}} := \frac{\Delta t_{\text{б}} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln\left(\frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}}\right)}$$

$$\Delta t_{\text{ср}} = 99.698 \text{ } ^\circ\text{C}$$

где  $\Delta t_{\text{ср}}$  – средняя разность температур теплоносителей,  $^\circ\text{C}$ ;

Найдем среднюю температуру каждого теплоносителя [12]:

$$t_{1\text{ср}} := \frac{t_{1\text{н}} + t_{1\text{к}}}{2} = 210 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_{2\text{ср}} := \frac{t_{2\text{н}} + t_{2\text{к}}}{2} = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$$

где  $t_{1\text{ср}}$  – средняя температура смеси газов,  $^\circ\text{C}$ ;

$t_{2\text{ср}}$  – средняя температура воды,  $^\circ\text{C}$ ;

Вычисляем ориентировочную площадь поверхности теплообмена при принятом ориентировочно коэффициенте теплопередачи [12]:

$$F_{\text{оп.мин}} := \frac{Q_1}{K_{\text{оп.макс}} \cdot \Delta t_{\text{ср}}} = 0.165 \text{ м}^2$$

$$F_{\text{оп.макс}} := \frac{Q_1}{K_{\text{оп.мин}} \cdot \Delta t_{\text{ср}}} = 0.989 \text{ м}^2$$

Для эффективного теплообмена подбираем аппарат с турбулентным режимом течения теплоносителей.

$$Re := 10000$$

Так как расход газовой смеси мал, принять стандартный кожухотрубчатый теплообменник нельзя. Исходя из необходимой поверхности теплообмена, конструктивно примем диаметр и длину теплообменных труб соответственно

$$d_1 := 0.01 \text{ м}$$

$$l := 0.31 \text{ м}$$

При таких размерах труб для обеспечения достаточной поверхности теплообмена потребуется 8 трубок.

Так как в центре конструкции предусмотрена труба для тонкой очистки газовой смеси, конструктивно примем ее диаметр  $d_o := 0.084 \text{ м}$ , тогда диаметр корпуса теплообменника-очистителя конструктивно примем  $d_k := 0.260 \text{ м}$ . Для расчета теплообменного процесса будем использовать эквивалентный диаметр межтрубного пространства (корпуса)  $d_3 := 0.245 \text{ м}$ .

Коэффициент динамической вязкости газовой смеси при  $210 \text{ }^\circ\text{C}$  [12]:

$$M_{см} := y_{N_2} \cdot M_{N_2} + y_{CO} \cdot M_{CO} + y_{H_2} \cdot M_{H_2} + y_{CO_2} \cdot M_{CO_2} + y_{CH_4} \cdot M_{CH_4} + y_{O_2} \cdot M_{O_2} + y_B \cdot M_B = 27.74$$

$$\begin{aligned} \text{Otn} := & \frac{(y_{N_2} \cdot M_{N_2})}{\mu_{N_2}} + \frac{(y_{CO} \cdot M_{CO})}{\mu_{CO}} + \frac{(y_{H_2} \cdot M_{H_2})}{\mu_{H_2}} + \frac{(y_{CO_2} \cdot M_{CO_2})}{\mu_{CO_2}} + \\ & + \frac{(y_{CH_4} \cdot M_{CH_4})}{\mu_{CH_4}} + \frac{(y_{O_2} \cdot M_{O_2})}{\mu_{O_2}} + \frac{(y_B \cdot M_B)}{\mu_B} = 1.101 \times 10^6 \end{aligned}$$

$$\mu_{см} := \frac{M_{см}}{\text{Otn}} = 2.519 \times 10^{-5} \frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}^2}$$

Коэффициент динамической вязкости воды при  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  [11]:

$$\mu_2 := 801.5 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}^2}$$

Скорость газовой смеси в трубе для обеспечения турбулентного режима должна превышать:

$$\omega_{11} := \frac{Re \cdot \mu_{см}}{d_1 \cdot \rho_{см}} = 35.128 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Примем число параллельно работающих труб равным 8. Тогда скорость и критерий Рейнольдса для газа [12]:

$$n := 8$$

$$\omega_1 := \frac{V_1}{0.785 \cdot d_1^2 \cdot n} = 3.971 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$\text{Re}_1 := \frac{(\omega_1 \cdot d_1 \cdot \rho_{\text{см}})}{\mu_{\text{см}}} = 1.13 \times 10^3$$

Так как критерий Рейнольдса для газовой смеси в трубном пространстве 1130, режим движения теплоносителя ламинарный [12]. Обеспечить турбулентный режим движения теплоносителей не представляется возможным.

Тогда для холодного теплоносителя (воды) в межтрубном пространстве [12]:

$$\omega_2 := \frac{V_2}{0.785 \cdot d_3^2 \cdot n} = 0.013 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$\text{Re}_2 := \frac{\omega_2 \cdot d_3 \cdot \rho_2}{\mu_2} = 4.024 \times 10^3$$

Так как критерий Рейнольдса для воды в межтрубном пространстве 4287, режим течения жидкости в межтрубном пространстве ламинарный [12].

Для потока газа в трубном пространстве и потока охлаждающей воды в межтрубном (ламинарный режим движения теплоносителя) нет надежных расчетных формул. Приблизенно расчет с запасом можно выполнить по графику (рисунок 12) [12].

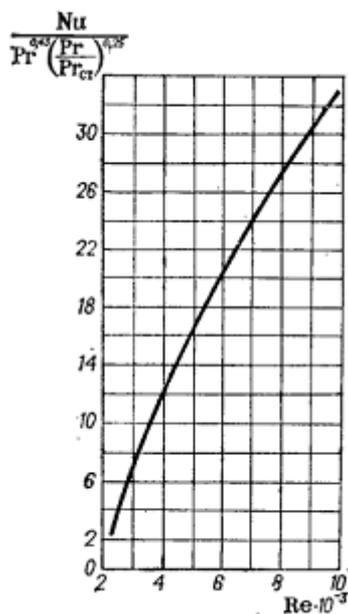


Рисунок 12 – Зависимость  $\frac{Nu}{Pr^{0.43} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_{от}}\right)^{0.25}}$  от критерия Re при значении  $(Gr \cdot Pr) < 8 \cdot 10^5$

Газовая постоянная:

$$R := 8.31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$$

Значение удельной теплоемкости при постоянном объеме связано с удельной теплоемкостью при постоянном давлении следующим образом [12]:

$$c_{v,см} := c_{p,см} - R$$

Коэффициент теплопроводности газа рассчитывается следующим образом [12]:

$$\lambda_{см} := 0.25 \cdot \left( 9 \cdot \frac{c_{p,см}}{c_{v,см}} - 5 \right) \cdot c_{p,см} \cdot \mu_{см} = 0.037 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$$

Тогда критерий Прандтля равен [12]:

$$Pr := c_{p,см} \cdot \frac{\mu_{см}}{\lambda_{см}} = 0.987$$

Для расчета критерия Грасгофа необходимо знать критерий Галилея и критерий Фруда [12].

Ускорение свободного падения:

$$g_0 := 9.81 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$$

Определяющий (характерный) размер (примем длину теплообменной трубы):

$$l = 0.31 \text{ м}$$

$$Fr := \frac{(g \cdot l)}{\omega_1^2} = 0.193$$

$$Ga := \frac{Re_1^2}{Fr} = 6.626 \times 10^6$$

Примем коэффициент объемного расширения близкий к табличным данным каждого чистого газа [11]:

$$\beta := 3.7 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$$

$$\text{Gr} := \text{Ga} \cdot \beta \cdot (t_{1\text{H}} - t_{1\text{K}}) = 9.316 \times 10^6$$

$$\text{Gr} \cdot \text{Pr} = 9.197 \times 10^6$$

Так как произведение  $(\text{Gr} \cdot \text{Pr}) > 8 \cdot 10^5$ , то использовать график нельзя.

Для горизонтального расположения труб при  $(\text{Gr} \cdot \text{Pr}) > 8 \cdot 10^5$  и  $3500 < \text{Re} < 10000$  [12]:

$$\text{Nu} := 0.037 \cdot \text{Re}_1^{0.75} \cdot \text{Pr}^{0.4} \cdot \left( \frac{\mu_{\text{см}}}{\mu_{\text{ст}}} \right)^n$$

$n := 0.25$  при охлаждении.

Для газов  $\left( \frac{\mu_{\text{см}}}{\mu_{\text{ст}}} \right)$  не учитывают [12].

$$\text{Nu} := 0.022 \cdot \text{Re}_1^{0.8} \cdot \text{Pr}^{0.4} \cdot 1 = 6.064$$

Коэффициент теплоотдачи от газовой смеси стенке [12]:

$$\alpha_1 := \text{Nu} \cdot \frac{\lambda_{\text{см}}}{d_1} = 22.461 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Для охлаждающей воды в межтрубном пространстве:

Значение удельной теплоемкости при постоянном объеме связано с удельной теплоемкостью при постоянном давлении следующим образом [12]:

$$c_{v,2} := c_2 - R$$

$$c_2 := 4180 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$$

Коэффициент теплопроводности воды:

$$\lambda_2 := 0.613 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$$

Тогда критерий Прандтля равен [12]:

$$\text{Pr}_2 := c_2 \cdot \frac{\mu_2}{\lambda_2} = 5.465$$

Для расчета критерия Грасгофа необходимо знать критерий Галилея и критерий Фруда [12].

$$Fr_2 := \frac{(g \cdot l)}{\omega_2^2} = 1.74 \times 10^4$$

$$Ga_2 := \frac{Re_2^2}{Fr_2} = 930.984$$

Примем коэффициент объемного расширения воды [11]:

$$\beta_2 := 3.02 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$$

$$Gr_2 := Ga_2 \cdot \beta_2 \cdot (t_{2к} - t_{2н}) = 5.623$$

$$Gr_2 \cdot Pr_2 = 30.733$$

Так как произведение  $Gr_2 \cdot Pr_2 < 8 \cdot 10^5$ , то используем график (Рисунок 12). Согласно графику, при данных значениях:

$$\frac{Nu_2}{Pr_2^{0.43} \cdot \left(\frac{Pr_2}{Pr_{cr2}}\right)^{0.25}} := 15$$

Так как охлаждающая вода в процессе теплообмена нагревается,

примем  $\left(\frac{Pr_2}{Pr_{cr2}}\right)^{0.25} := 1$ . Тогда

$$Nu_2 := \frac{15}{Pr^{0.43}} = 15.083$$

Коэффициент теплоотдачи от воды стенке [12]:

$$\alpha_2 := Nu_2 \cdot \frac{\lambda_2}{d_3} = 37.739 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Термическое сопротивление стенки и загрязнений ([12], таблица XXXI).

Для газовой смеси:

$$r_{зarp1} := 11.6 \times 10^3 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Для воды среднего качества:

$$r_{\text{загр}2} := 1.860 \times 10^3 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Принимаем трубки изготовленные из стали 17ГС [1]:

$$\lambda_{\text{стали}} := 51 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$$

$$\delta_{\text{стенки}} := 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Общее термическое сопротивление рассчитывается по формуле [7]:

$$\Sigma r_{\text{ст}} := \frac{1}{r_{\text{загр}1}} + \frac{\delta_{\text{стенки}}}{\lambda_{\text{стали}}} + \frac{1}{r_{\text{загр}2}} = 7.023 \times 10^{-4}$$

Рассчитаем ориентировочный коэффициент теплопередачи с учетом загрязнений стенки

$$K_{\text{ор}} := \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \Sigma r_{\text{ст}} + \frac{1}{\alpha_2}} = 13.943 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

$$F_{\text{расчет}} := \frac{Q_1}{K_{\text{ор}} \cdot \Delta t_{\text{ср}}}$$

$$F_{\text{расчет}} = 0.71 \text{ м}^2$$

Поверхность теплообмена входит в допустимый интервал. Таким образом, примем нестандартный "кольцевой" теплообменник с внутренним диаметром кожуха 260 мм с 8-ю теплообменными трубками диаметром 10 мм.

## 6 МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ГАЗОГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Целью механического расчета является обеспечение механических надежности, прочности проектируемой установки в заданных условиях работы. Такие критерии, как прочность, жаропрочность, жаростойкость, жесткость, герметичность и др., являются показателями механической надежности. Благодаря их высоким показателям обеспечивается сохранение механических свойств оборудования во времени, в результате чего оборудование работает стабильно и выполняет требуемые функции. Каждый из этих критериев в рабочих условиях не должен превышать допустимого значения этого критерия.

### 6.1 Конструктивно-механический расчет газогенератора

Корпус газогенератора изготовлен в виде цилиндра из металлической трубы. К корпусу в нижней части приварено коническое днище с отверстием для очистки зольниковой камеры, а в верхней части – плоская приварная крышка с отверстием для бункера. На плоскую приварную крышку корпуса приварен внутренний цилиндр со съемной крышкой крышкой. Верхняя часть внутреннего цилиндра выполняет роль загрузочного бункера, нижняя – камеры горения. В средней части корпуса камеры горения расположено по окружности четыре фурмы для подвода воздуха. Колосниковая решетка, расположенная в нижней части бункера газогенератора, поддерживает слой раскаленного угля под камерой горения. Зола через колосниковую решетку проваливается в зольную камеру и удаляется. Для отбора газа в верхней части корпуса газогенератора приварен патрубок, к которому присоединен газоотводящий трубопровод. При таком расположении патрубка газ, отсасываемый из зоны восстановления, проходит по кольцевой полости, образованной стенками корпуса и бункера, обогревая бункер и улучшая в

нем подсушку топлива, а сам при этом частично охлаждается до 400 – 500 °С. Дальнейшее охлаждение газа до 20 – 30 °С и очистка происходят в последующих аппаратах установки.

По аналогии со сварными банными печами, рассмотрим два варианта используемых материалов: нержавеющая котельная сталь 12Х18Н10Т и серый жаропрочный чугун.

Каждый из предложенных материалов имеет ряд достоинств и недостатков для газогенераторного процесса. Характеристики приведены в таблице 7.

Таблица 7 - Характеристики материалов

Материал	Достоинства	Недостатки
Нержавеющая котельная сталь 12Х18Н10Т	Высокая устойчивость материала к прогоранию (практически не вступает в реакцию с кислородом при нагревании).	Постоянные температурные расширения приводят к ускоренному разрушению сварных швов.
	Невысокая теплопроводность (быстрый теплообмен с окружающей средой).	
	Относительно низкая стоимость.	
Серый жаропрочный чугун	Инертен к воздуху, не возникает проблем с окислением стенок.	Высокая плотность материала, в результате большой вес аппарата, что требует укрепления фундамента.
		Высокая стоимость.
		Высокая теплоёмкость (установка долго не остывает).
		Высокий коэффициент теплового излучения, совместно с хорошей теплопроводностью

Исходя из приведенных данных можно сделать вывод, что для настоящего проекта целесообразно использование нержавеющей котельной

стали 12X18H10T, так как она устойчива к окислению в условиях повышенных температур, а так же обладает невысокой теплопроводностью, что позволит с большей эффективностью проводить естественных теплообмен с окружающей средой для первичного охлаждения отбираемой газовой смеси.

### 6.1.1 Расчет на прочность цилиндрических обечаек газогенератора

Произведем расчет толщины стенок цилиндрических обечаек газогенератора. Для расчета примем рабочую температуру равной максимальной температуре для данного материала.

Исходные данные:

Внутренний диаметр аппарата, мм

$$D := 260$$

Высота цилиндрической обечайки, мм

$$H := 390$$

Марка стали: 12X18H10T

Максимальная температура среды, °C

$$t_c := 700$$

Плотность среды в аппарате, кг/м<sup>3</sup>

$$\rho := 1000$$

Давление в аппарате, МПа

$$P := 0.1$$

Сумма прибавок к расчетной толщине стенки, мм

$$c_{\text{сум}} := 1$$

$g$  - ускорение свободного падения,  $\frac{\text{м}}{\text{с}^2}$

$$g := 9.81$$

$\sigma_{20}$  - допускаемое напряжение для стали 12X18H10T при температуре 20 °C, МПа

$$\sigma_{20} := 184 \text{ МПа}$$

Допускаемое напряжение для стали 12Х18Н10Т при рабочей температуре равно [13]:

$$\sigma := 30 \text{ МПа}$$

Для аппаратов, изготавливаемых из листового проката, поправочный коэффициент  $\eta$  для допускаемого напряжения равен единице.

$$\eta := 1$$

$$\sigma_d := \eta \cdot \sigma$$

$$\sigma_d = 30 \text{ МПа}$$

При гидравлических испытаниях предел прочности при температуре 20 °С зависит от предела текучести.

Расчетное значение предела текучести для стали 12Х18Н10Т при температуре гидравлического испытания 20 °С принимаем согласно [13]:

$$R_{e20} := 276 \text{ МПа}$$

Тогда для гидравлических испытаний предел прочности при 20 °С:

$$\sigma_H := \text{Floor}\left(\frac{R_{e20}}{1.1}, 0.5\right) = 250.5 \text{ МПа}$$

Расчетное давление внутри аппарата примем равным:

$$P_p := P = 0.1 \text{ МПа}$$

Давление при гидро испытаниях [14]:

$$P_H := 1.25 \cdot P \cdot \frac{\sigma_H}{\sigma_d} = 1.044 \text{ МПа}$$

Примем коэффициент запаса устойчивости [13]:

Для рабочих условий  $n_y := 2.4$ .

Для условий испытания  $n_{yn} := 1.8$ .

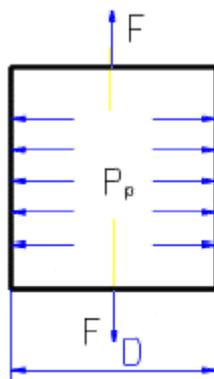
Расчетное значение модуля продольной упругости для стали марки 12Х18Н10Т при +700 °С и при +20 °С соответственно равны [13]:

$$E := 1.32 \cdot 10^5 \text{ МПа} \quad E_H := 2.0 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Коэффициент прочности сварных швов  $\varphi := 0.9$  при указанных в исходных данных способах исполнения. Длина контролируемых швов от общей длины составляет 100% [13].

Исходя из условия задания, примем суммарную прибавку к расчетным толщинам стенок цилиндрической обечайки и дна равную  $c := 1 \text{ мм}$ .

На рисунке 13 представлена расчетная схема цилиндрической обечайки, нагруженной внутренним давлением.



для внутрен-  
него давления

Рисунок 13 - Расчетная схема для действия внутреннего давления.

Исполнительную толщину стенки вычисляют по формуле [15]:

$$s \geq s_p + c.$$

Максимальная расчетная толщина стенки из условия прочности вычисляют по формуле [15]:

$$s_p := P_p \cdot \frac{D}{2 \cdot \varphi \cdot \sigma_d - P_p}$$

$$s_p = 0.482 \text{ мм}$$

Исполнительная толщина стенки обечайки с учетом суммы прибавок определяется по формуле ГОСТ [13] и составляет:

$$s_{н1} := \text{Ceil}(s_p + c, 1)$$

$$s_{н1} = 2 \text{ мм}$$

Проверка условий применимости формул безмоментной теории [14]:

$$\text{Проверка}_1 := \begin{cases} \text{"Условия применения формул безмомент. теории выполняются"} & \text{if } \frac{s_{н1} - c}{D} \leq 0.1 \\ \text{"Условия применения формул НЕ выполняются"} & \text{if } \frac{s_{н1} - c}{D} > 0.1 \end{cases}$$

Проверка<sub>1</sub> = "Условия применения формул безмомент. теории выполняются"

Расчет допускаемого внутреннего избыточного давления в рабочих условиях и в условиях испытания соответственно[15]:

$$P_{д1} := \frac{2 \cdot \sigma_{д} \cdot \varphi \cdot (s_{н1} - c)}{D + (s_{н1} - c)} = 0.207 \text{ МПа}$$

$$P_{д\_исп1} := \frac{2 \cdot \sigma_{н} \cdot \varphi \cdot (s_{н1} - c)}{D + (s_{н1} - c)} = 1.728 \text{ МПа}$$

Проверка условия прочности стенок цилиндрической обечайки от действия внутреннего давления:

$$\text{Проверка}_2 := \begin{cases} \text{"Условие прочности стенки выполняется"} & \text{if } \begin{cases} P_{д\_исп1} > P_{н} \\ P_{д1} > P_{р} \end{cases} \\ \text{"Условие прочности НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Проверка<sub>2</sub> = "Условие прочности стенки выполняется"

Точно такой же расчет проведем для цилиндрического корпуса газогенератора.

Диаметр внешнего корпуса примем конструктивно.

$$D_{к} := 300 \text{ мм.}$$

Максимальная расчетная толщина стенки из условия прочности:

$$s_{рк} := P_{р} \cdot \frac{D_{к}}{2 \cdot \varphi \cdot \sigma_{д} - P_{р}}; \quad s_{рк} = 0.557 \text{ мм.}$$

Исполнительная толщина стенки обечайки с учетом суммы прибавок:

$$s_{н1к} := \text{Ceil}(s_{р} + c, 1); \quad s_{н1к} = 2 \text{ мм.}$$

Проверка условий применимости формул безмоментной теории:

$$\text{Проверка}_3 := \begin{cases} \text{"Условия применения формул безмомент. теории выполняются"} & \text{if } \frac{s_{н1к} - c}{D_{к}} \leq 0.1 \\ \text{"Условия применения формул НЕ выполняются"} & \text{if } \frac{s_{н1к} - c}{D_{к}} > 0.1 \end{cases}$$

Проверка<sub>3</sub> = "Условия применения формул безмомент. теории выполняются"

Расчет допускаемого внутреннего избыточного давления в рабочих условиях и условиях испытания:

$$P_{д1к} := \frac{2 \cdot \sigma_{д} \cdot \varphi \cdot (s_{и1к} - c)}{D_{к} + (s_{и1к} - c)} = 0.179 \text{ МПа,}$$
$$P_{д\_исп1к} := \frac{2 \cdot \sigma_{и} \cdot \varphi \cdot (s_{и1к} - c)}{D_{к} + (s_{и1к} - c)} = 1.498 \text{ МПа.}$$

Проверка условия прочности стенок внешнего корпуса от внутреннего давления:

$$\text{Проверка}_4 := \begin{cases} \text{"Условие прочности стенки выполняется"} & \text{if } \begin{cases} P_{д\_исп1} > P_{и} \\ P_{д1} > P_{р} \end{cases} \\ \text{"Условие прочности НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Проверка<sub>4</sub> = "Условие прочности стенки выполняется"

Таким образом, толщины стенок бункера и внешнего корпуса с учетом прибавок равны 2 мм. При такой толщине с запасом выполняются условия прочности.

### 6.1.2 Расчет на прочность круглой плоской крышки газогенератора

Произведем расчет толщины плоской приварной крышки. На рисунке 14 приведена расчетная схема плоской приварной крышки.

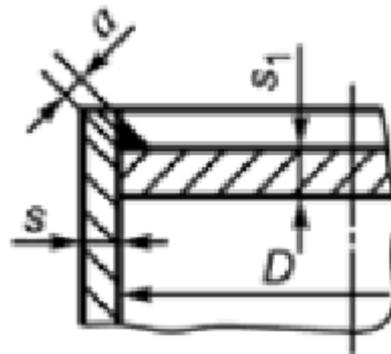


Рисунок 14 – Расчетная схема плоской приварной крышки

В крышке теплообменника предусмотрено отверстие для вваривания бункера  $d_k := 261$  мм.

Толщина плоских круглых крышек рассчитывается по следующей формуле [15]:

$$s_{ц} \geq s_{цр} + c,$$

где  $s_{цр} := K \cdot K_{01} \cdot D_p \cdot \sqrt{\frac{P_p}{\phi_1 \cdot \sigma_d}}$  мм.

Для приведенной конструкции днищ коэффициенты  $K$  и  $D_p$  равны [15]:

$$K := 0.53 ;$$

$$D_p := D_{кмм}.$$

Для днищ, изготовленных из одной заготовки, коэффициент  $\phi_1 := 1$  [15].

Для днищ и крышек, имеющих одно отверстие,  $K_0$  вычисляют по формуле [15]:

$$K_{01} := \sqrt{1 + \frac{d_k}{D_k} + \left(\frac{d_k}{D_k}\right)^2} = 1.621.$$

Тогда расчетная толщина плоской круглой крышки будет равна:

$$s_{цр} := K \cdot K_{01} \cdot D_p \cdot \sqrt{\frac{P_p}{\phi_1 \cdot \sigma_d}} = 14.878 \text{ мм}.$$

Исполнительная толщина плоской круглой крышки в таком случае будет равна:

$$s_{ц} := s_{цр} + c = 15.878 \text{ мм}.$$

Примем 16 мм.

Для плоской круглой крышки в рабочем состоянии величина допускаемого давления [15]:

$$P_{д3} := \left( \frac{s_{ц} - c}{K \cdot K_{01} \cdot D_{к}} \right)^2 \sigma_{д} \cdot \varphi; \quad P_{д3} = 0.09 \text{ МПа.}$$

При гидравлических испытаниях [15]:

$$P_{и3} := \left( \frac{s_{ц} - c}{K \cdot K_{01} \cdot D_{к}} \right)^2 \sigma_{и} \cdot \varphi; \quad P_{и3} = 0.752 \text{ МПа.}$$

$$Usl_3 := \begin{cases} \text{"Условие прочности в рабочих условиях и при условиях испытания выполняются"} & \text{if } \begin{cases} P_p \leq P_{д3} \\ P_p \leq P_{и3} \end{cases} \\ \text{"Условие прочности НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_3 = \text{"Условие прочности в рабочих условиях и при условиях испытания выполняются"}$$

Таким образом, толщина приварной плоской круглой крышки равна 16 мм. При данной толщине выполняются условия прочности в рабочих условиях и в условиях испытания.

### 6.1.3 Расчет конического днища, нагруженного внутренним избыточным давлением

Произведем расчет на прочность конического днища газогенератора. На рисунке 15 представлены основные размеры конического перехода.

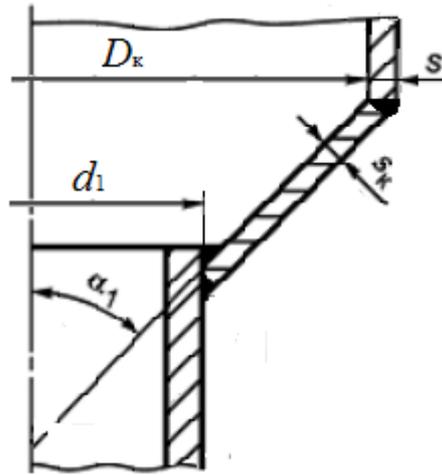


Рисунок 15 - Основные размеры конического перехода

Рассчитаем толщину стенки конусного днища газогенератора.

Примем конструктивно высоту конуса  $H_K := 58 \text{ мм}$ .

Угол конусности примем равным  $\alpha := 30 \cdot \text{deg}$  радиан.

Расчетную толщину стенки конического днища емкости рассчитывают по формуле [15]:

$$s_K := \frac{P_p \cdot D_K}{(2 \cdot \varphi \cdot \sigma_d - P_p) \cdot \cos(\alpha)} = 0.643 \text{ мм.}$$

Исполнительная толщина стенки конического днища с учетом суммы прибавок составляет:

$$s_{K.И} := \text{ceil}(s_K + c) = 2 \text{ мм.}$$

Проверка условий применимости формул безмоментной теории:

$$\text{Проверка}_7 := \begin{cases} \text{"Условия применения формул безмомент. теории выполняются"} & \text{if } 0.001 \leq \frac{s_{K.И} \cdot \cos(\alpha)}{D_K} \leq 0.01 \\ \text{"Условия применения формул НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Проверка7 = "Условия применения формул безмомент. теории выполняются"

Расчет допускаемого внутреннего избыточного давления в рабочих условиях и условиях испытания [15]:

$$P_{\text{доп}} := \frac{[2 \cdot (\sigma_{\text{д}} \cdot \varphi) \cdot (s_{\text{к.и}} - c)]}{\frac{D_{\text{к}}}{\cos(\alpha)} + (s_{\text{к.и}} - c)} = 0.155 \quad \text{МПа,}$$

$$P_{\text{д\_испк}} := \frac{1.8 [(\sigma_{\text{и}} \cdot \varphi) \cdot (s_{\text{к.и}} - c)]}{\frac{D_{\text{к}}}{\cos(\alpha)} + (s_{\text{к.и}} - c)} = 1.168 \quad \text{МПа.}$$

Проверка условия прочности стенок конического днища от действия внутреннего давления:

$$\text{Проверка8} := \begin{cases} \text{"Условие прочности стенки выполняется"} & \text{if } \begin{cases} P_{\text{д\_испк}} > P_{\text{и}} \\ P_{\text{доп}} > P_{\text{р}} \end{cases} \\ \text{"Условие прочности НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Проверка8 = "Условие прочности стенки выполняется"

Таким образом, толщина стенки конического днища 2 мм. При данной толщине выполняются условия прочности в рабочих условиях и в условиях испытания.

#### 6.1.4 Расчет укрепления отверстия в цилиндрической обечайке

В газогенераторе предусмотрен патрубок для отвода газогенераторного газа. Диаметр патрубка равен  $d_{\text{л}} := 26$  мм. Рассчитаем необходимость дополнительного укрепления отверстия в цилиндрической обечайке.

Для цилиндрической обечайки расчетные диаметры укрепляемых элементов вычисляют по формуле [16]:

$$D_p := D_k \text{ мм.}$$

Расчетный диаметр отверстия в стенке обечайки найдем по формуле [16]:

$$d_p := d_{\text{л}} + 2 \cdot c = 28 \text{ мм.}$$

Проверим выполнение условий применимости формул.

$$\text{Прим} := \begin{cases} \text{"Отношение диаметров НЕ выполняется"} & \text{if } \left( \frac{d_{\text{л}} - 2 \cdot c}{D_k} > 1 \right) \\ \text{"Отношение толщины к диаметру НЕ выполняется"} & \text{if } \left( \frac{s_{\text{нлк}} - c}{D_k} > 0.1 \right) \\ \text{"Условия применения формул выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Прим = "Условия применения формул выполняются"

Расчетная толщина стенки штуцера вычисляется следующим образом [16]:

$$s_{\text{шп}} := \frac{P \cdot (d_{\text{л}} + 2 \cdot c)}{2 \cdot \sigma_{\text{д}} \cdot \phi_1 - P}; \quad s_{\text{шп}} = 0.047 \text{ мм.}$$

Примем исполнительную толщину стенки штуцера  $s_{\text{ши}} := 2 \text{ мм.}$

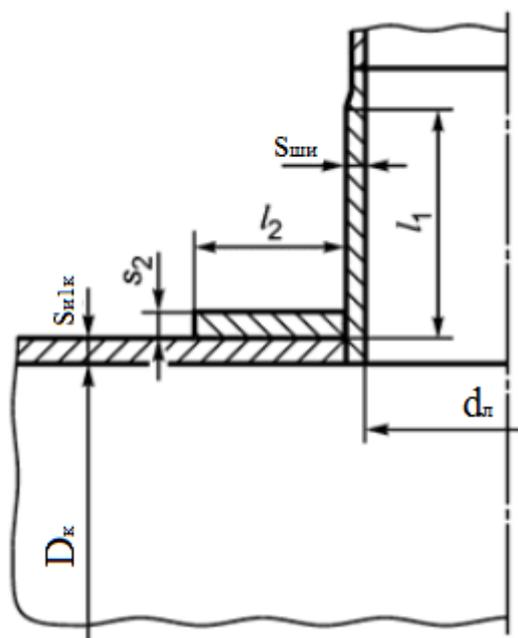


Рисунок 16 – Расчетная схема укрепления отверстия накладным кольцом

Конструктивно примем исполнительную длину внешней части штуцера  $l_1 := 30$  мм.

Расчетная длина внешней части штуцера равна, согласно [16]:

$$l_{1p} := \min\left[l_1, 1.25 \cdot \sqrt{(d_{\text{л}} + 2 \cdot c) \cdot (s_{\text{ши}} - c)}\right] = 6.614 \text{ мм}$$

Расчетная длина внутренней части штуцера равна 0, т.к. укрепление производится с помощью накладного кольца. В таком случае внутренняя часть штуцера отсутствует [16].

$$l_{3p} := 0 \text{ мм}$$

Примем толщину внутренней части штуцера равной  $s_3 := 2$  мм.

Расчетная ширина зоны укрепления в обечайках и днищах при отсутствии торообразной вставки или вварного кольца рассчитывается следующим образом [16]:

$$l_p := \sqrt{D_p \cdot (s_{\text{н1к}} - c)} = 17.664 \text{ мм}$$

Тогда примем ширину накладного кольца равную  $l_{2p} := 18$  мм.

Так как штуцер и накладное кольцо изготовлен из того же материала, что и обечайка, примем допускаемые напряжения в нем  $\sigma_{д1} := \sigma_{дн}$   $\sigma_{д2} := \sigma_{д}$ .

Отношения допускаемых напряжений:

- для внешней части штуцера:

$$\chi_1 := \min\left(1, \frac{\sigma_{д1}}{\sigma_{д}}\right); \quad \chi_1 = 1 ;$$

- для накладного кольца:

$$\chi_2 := \min\left(1, \frac{\sigma_{д}}{\sigma_{д}}\right); \quad \chi_2 = 1 ;$$

- для внутренней части штуцера:

$$\chi_3 := \min\left(1, \frac{\sigma_{д1}}{\sigma_{д}}\right); \quad \chi_3 = 1 .$$

Расчетный диаметр отверстия, не требующего укрепления при отсутствии избыточной толщины стенки сосуда и при наличии штуцера:

$$d_{0p} := 0.4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s_{\text{н1к}} - c)}; \quad d_{0p} = 6.928 \text{ мм}$$

Расчетный диаметр одиночного отверстия, не требующий дополнительного укрепления при наличии избыточной толщины стенки сосуда:

$$d_0 := 2 \cdot \left[ \left( \frac{s_{н1к} - c}{s_{рк}} \right) - 0.8 \right] \cdot \sqrt{D_p \cdot (s_{н1к} - c)} ; \quad d_0 = 34.526 \text{ мм}$$

Пров1 :=  $\begin{cases} \text{"необходимо укрепление отверстия"} & \text{if } d_0 < d_p \\ \text{"укрепление отверстия не требуется"} & \text{otherwise} \end{cases}$

Пров1 = "укрепление отверстия не требуется"

## 6.2 Расчет циклона

Циклон условно представляет из себя сопряжение цилиндрической обечайки с коническим днищем. Материалом для циклона примем 12Х18Н10Т. Циклон работает при температуре 500 °С.

На рисунке 17 представлена расчетная схема конического циклона.

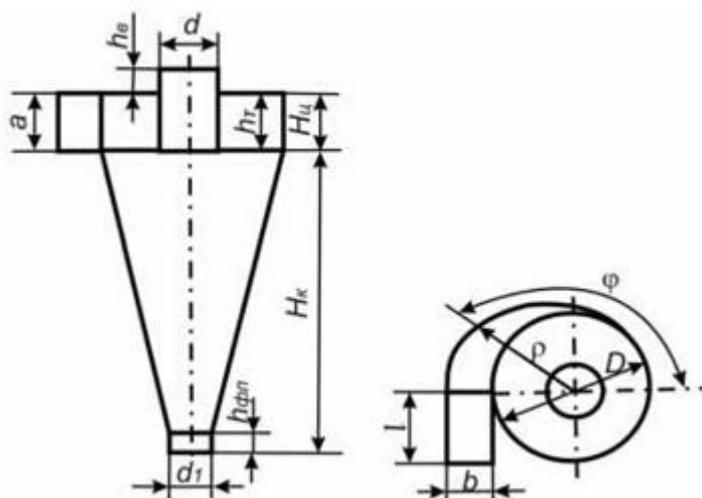


Рисунок 17 – Расчетная схема конического циклона

Согласно технологическому расчету, исходные данные для механического расчета:

Диаметр циклона (D), мм

$$D_{ц} := 50$$

Высота цилиндрической части циклона, мм

$$H_{\text{ц}} := 26$$

Высота конуса конического днища, мм

$$H_{\text{к}} := 106$$

Диаметр отверстия в днище, мм

$$d_1 := 12$$

Диаметр выхлопной трубы, мм

$$d := 17$$

Рабочая температура, °С

$$t_p := 500$$

Материал: 12Х18Н10Т

Допускаемое напряжение для стали 12Х18Н10Т при рабочей температуре равно по ГОСТ [13]:

$$\sigma_1 := 127 \text{ МПа}$$

Для аппаратов, изготавливаемых из листового проката, поправочный коэффициент  $\eta$  для допускаемого напряжения равен единице.

$$\eta := 1$$

$$\sigma_{\text{д1}} := \eta \cdot \sigma_1$$

$$\sigma_{\text{д1}} = 127 \text{ МПа}$$

При гидравлических испытаниях предел прочности при температуре 20 °С зависит от предела текучести.

Расчетное давление внутри аппарата примем равным давлению в газогенераторе.

$$P_{\text{ф}} := P = 0.1 \text{ МПа}$$

Давление при гидро испытаниях [14]:

$$P_{\text{г}} := 1.25 \cdot P \cdot \frac{\sigma_{\text{н}}}{\sigma_{\text{д1}}} = 0.247 \text{ МПа}$$

Расчетное значение модуля продольной упругости для стали марки 12Х18Н10Т при +400 °С и при +20 °С соответственно равны [13]:

$$E_1 := 1.8 \cdot 10^5 \text{ МПа} \text{ и } E_{\text{ст}} := 2.0 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Исходя из условия задания, примем суммарную прибавку к расчетным толщинам стенок цилиндрической обечайки и днища равную  $s_{\text{с}} := 1 \text{ мм}$ .

### 6.2.1 Расчет цилиндрической части циклона

На рисунке 18 представлены основные размеры конического перехода.

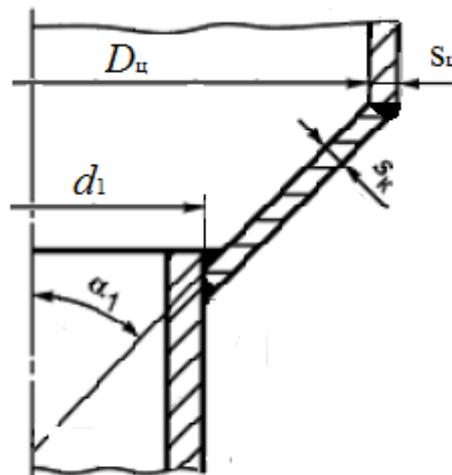


Рисунок 18 – Основные размеры конического перехода

Рассчитаем толщину стенки цилиндрической части циклона.

Исполнительную толщину стенки вычисляют по формуле [15]:

$$s_{\text{ц}} \geq s_{\text{рц}} + c,$$

Максимальная расчетная толщина стенки из условия прочности вычисляют по формуле [15]:

$$s_{\text{рц}} := P_p \cdot \frac{D_{\text{ц}}}{2 \cdot \varphi \cdot \sigma_{\text{д1}} - P_p}$$

$$s_{\text{р}} = 0.482 \text{ мм}$$

Исполнительная толщина стенки обечайки с учетом суммы прибавок определяется по формуле ГОСТ [13] и составляет:

$$s_{\text{нц}} := \text{Ceil}(s_{\text{р}} + c, 1)$$

$$s_{н1ц} = 2 \text{ мм}$$

Проверка условий применимости формул безмоментной теории [14]:

$$\text{Проверка}_5 := \begin{cases} \text{"Условия применения формул безмомент. теории выполняются"} & \text{if } \frac{s_{н1ц} - c}{D_{ц}} \leq 0.1 \\ \text{"Условия применения формул НЕ выполняются"} & \text{if } \frac{s_{н1ц} - c}{D_{ц}} > 0.1 \end{cases}$$

Проверка<sub>5</sub> = "Условия применения формул безмомент. теории выполняются"

Расчет допускаемого внутреннего избыточного давления в рабочих условиях и условиях испытания соответственно[15]:

$$P_{д1ц} := \frac{2 \cdot \sigma_{д1} \cdot \varphi \cdot (s_{н1ц} - c)}{D_{ц} + (s_{н1ц} - c)} = 4.482 \text{ МПа}$$

$$P_{д\_исп1ц} := \frac{2 \cdot \sigma_{н} \cdot \varphi \cdot (s_{н1ц} - c)}{D_{ц} + (s_{н1ц} - c)} = 8.841 \text{ МПа}$$

Проверка условия прочности стенок цилиндрической обечайки от действия внутреннего давления:

$$\text{Проверка}_6 := \begin{cases} \text{"Условие прочности стенки выполняется"} & \text{if } \begin{cases} P_{д\_исп1ц} > P_{н} \\ P_{д1ц} > P_{р} \end{cases} \\ \text{"Условие прочности НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Проверка<sub>6</sub> = "Условие прочности стенки выполняется"

## 6.2.2 Расчет конического днища циклона

Далее рассчитаем толщину стенки конуса. Для этого найдем угол конического днища  $\alpha$  (угол В на рисунке 19).

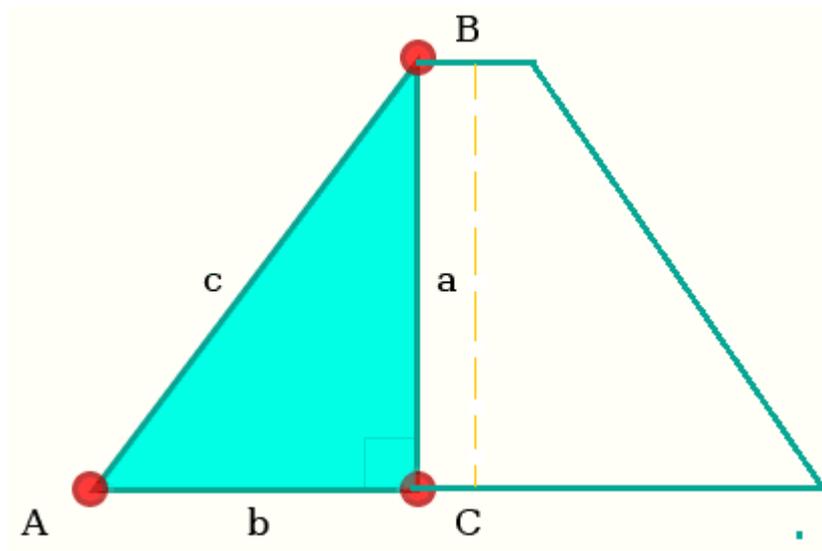


Рисунок 19 – Расчетная схема конуса

По двум известным катетам  $a := H_k = 106$  мм и  $b := \frac{D_{ц}}{2} - \frac{d_1}{2} = 19$  мм найдем угол А:

$$\operatorname{tg} A := \frac{a}{b} = 5.579$$

Тогда угол А равен  $A := 79.84$  градусов.

Исходя из того, что сумма углов треугольника равна 180 градусам, найдем угол В:

$$B := 180 - 90 - A = 10.16 \text{ градусов.}$$

Для расчета примем искомый угол равным

$$\alpha := 10.16 \text{-deg.}$$

Расчетную толщину стенки конического днища емкости рассчитывают по формуле [15]:

$$s_k := \frac{P_p \cdot D_{ц}}{(2 \cdot \varphi \cdot \sigma_{д1} - P_p) \cdot \cos(\alpha)} = 0.022 \text{ мм.}$$

Исполнительная толщина стенки конического днища с учетом суммы прибавок составляет:

$$s_{к.и} := \operatorname{ceil}(s_k + c) = 2 \text{ мм.}$$

Проверка условий применимости формул безмоментной теории [14]:

$$\text{Проверка}_7 := \begin{cases} \text{"Условия применения формул безмомент. теории выполняются"} & \text{if } 0.001 \leq \frac{s_{\text{к.и}} \cdot \cos(\alpha)}{D_{\text{ц}}} \leq 0.05 \\ \text{"Условия применения формул НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Проверка<sub>7</sub> = "Условия применения формул безмомент. теории выполняются"

Расчет допускаемого внутреннего избыточного давления в рабочих условиях и условиях испытания соответственно [15]:

$$P_{\text{доп}} := \frac{[2 \cdot (\sigma_{\text{д1}} \cdot \varphi) \cdot (s_{\text{к.и}} - c)]}{\frac{D_{\text{ц}}}{\cos(\alpha)} + (s_{\text{к.и}} - c)} = 4.413 \quad \text{МПа;}$$

$$P_{\text{д\_испк}} := \frac{1.8 [(\sigma_{\text{и}} \cdot \varphi) \cdot (s_{\text{к.и}} - c)]}{\frac{D_{\text{ц}}}{\cos(\alpha)} + (s_{\text{к.и}} - c)} = 7.835 \quad \text{МПа.}$$

Проверка условия прочности стенок конического днища от действия внутреннего давления:

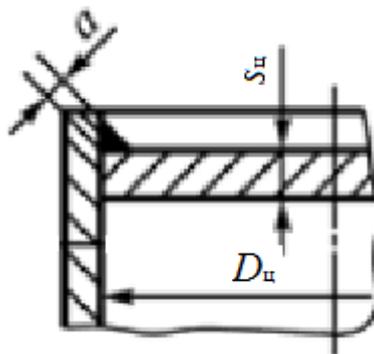
$$\text{Проверка}_8 := \begin{cases} \text{"Условие прочности стенки выполняется"} & \text{if } \begin{cases} P_{\text{д\_испк}} > P_{\text{и}} \\ P_{\text{доп}} > P_{\text{р}} \end{cases} \\ \text{"Условие прочности НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Проверка<sub>8</sub> = "Условие прочности стенки выполняется"

Таким образом, толщина стенок цилиндрической обечайки и конического днища 2 мм. При данной толщине выполняются условия прочности в рабочих условиях и в условиях испытания.

### 6.2.3 Расчет толщины плоской круглой приварной крышки циклона

Произведем расчет толщины плоской приварной крышки циклона. На рисунке 20 приведена расчетная схема приварной плоской крышки.



## Рисунок 20 - Расчетная схема приварной плоской крышки

В крышке циклона предусмотрено отверстие для выходной трубы  $d_{ц} := 21$  мм.

Толщина плоских круглых днищ и крышек рассчитывается по следующей формуле [15]:

$$s_{ц} \geq s_{цр} + c$$

где  $s_{цр} := K \cdot K_{01} \cdot D_p \cdot \sqrt{\frac{P_p}{\phi_1 \cdot \sigma_d}}$

Для приведенной конструкции днищ коэффициенты  $K$  и  $D_p$  равны [15]:

$$K := 0.53$$

$$D_p := D_{ц}$$

Для днищ, изготовленных из одной заготовки, коэффициент  $\phi_1 := 1$  [15].

Для днищ и крышек, имеющих одно отверстие,  $K_0$  вычисляют по формуле [15]:

$$K_{01} := \sqrt{1 + \frac{d_{ц}}{D_{ц}} + \left(\frac{d_{ц}}{D_{ц}}\right)^2} = 1.263$$

Тогда расчетная толщина плоского круглого днища будет равна:

$$s_{цр} := K \cdot K_{01} \cdot D_p \cdot \sqrt{\frac{P_p}{\phi_1 \cdot \sigma_d}} = 1.933 \text{ мм}$$

Исполнительная толщина плоской круглой крышки в таком случае будет равна:

$$s_{ц} := s_{цр} + c = 2.933 \text{ мм}$$

Примем  $s_{ав} := 4$  мм.

Для плоского круглого днища в рабочем состоянии величина допускаемого давления [15]:

$$P_{д3} := \left(\frac{s_{ц} - c}{K \cdot K_{01} \cdot D_{ц}}\right)^2 \sigma_d \cdot \varphi;$$

$$P_{д3} = 0.217 \text{ МПа.}$$

При гидравлических испытаниях [15]:

$$P_{иЗ} := \left( \frac{s_{ц} - c}{K \cdot K_{01} \cdot D_{ц}} \right)^2 \sigma_{и} \cdot \varphi ;$$

$$P_{иЗ} = 1.81 \text{ МПа}$$

$$Usl_3 := \begin{cases} \text{"Условие прочности в рабочих условиях и при условиях испытания выполняются"} & \text{if } \begin{cases} P_p \leq P_{дЗ} \\ P_p \leq P_{иЗ} \end{cases} \\ \text{"Условие прочности НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_3 = \text{"Условие прочности в рабочих условиях и при условиях испытания выполняются"}$$

Таким образом, толщина приварной плоской круглой крышки равна 4 мм. При данной толщине выполняются условия прочности в рабочих условиях и в условиях испытания.

### 6.3 Расчет теплообменника-очистителя

Теплообменник-очиститель представляет из себя вертикальный кожухорубчатый теплообменник с 8-ю теплообменными трубками, расположенными по окружности вокруг центральной трубы большего диаметра с очистительными насадками в виде колец Рашига, кокса и люфы. На рисунке 21 представлен эскиз аппарата.

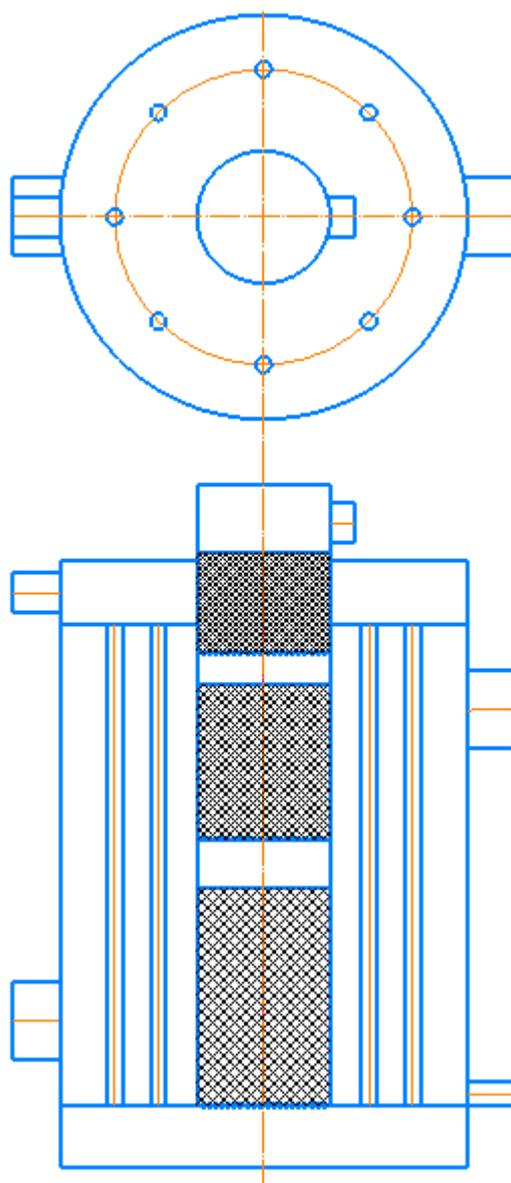


Рисунок 21 – Теплообменник-очиститель

Исходные данные:

Внутренний диаметр, мм

$$D_{\text{вн}} := 260$$

Высота цилиндрической части, мм

$$H_{\text{ц}} := 310$$

Рабочее давление, МПа

$$P_{\text{раб}} := 0.1$$

Температура среды, °С

$$t_c := 210$$

Материал обечайки: листовой прокат из стали Ст3

Скорость коррозии,  $\frac{\text{мм}}{\text{год}}$

$$\Pi := 0.1$$

Срок эксплуатации, лет

$$\tau := 5$$

Плотность стали при 20,  $\text{кг/м}^3$

$$\rho_s := 7850$$

Плотность среды в трубном пространстве  $\text{кг/м}^3$

$$\rho_{c1} := 0.676$$

Плотность среды в межтрубном пространстве  $\text{кг/м}^3$

$$\rho_{c2} := 997$$

Ускорение свободного падения,  $\text{м/с}^2$

$$g := 9.8$$

Максимальная температура горячего теплоносителя,  $^{\circ}\text{C}$

$$t_T := 210$$

Максимальная температура холодного теплоносителя,  $^{\circ}\text{C}$

$$t_K := 30$$

Горячий теплоноситель находится в трубном пространстве, холодный  
- в межтрубном.

Примем в качестве расчетной температуры горячего теплоносителя  
наибольшую температуру среды:

$$t_T = 210 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

Допускаемое напряжение  $\sigma$  для стали Ст3 при температуре 210  $^{\circ}\text{C}$   
найдем аппроксимацией [13]:

$$t := \begin{pmatrix} 200 \\ 250 \end{pmatrix}$$

$$\sigma_{\text{ww}} := \begin{pmatrix} 142 \\ 131 \end{pmatrix}$$

$$\sigma := \text{Floor}(\text{linterp}(t, \sigma, t_T), 0.5)$$

$$\sigma = 139.5 \text{ МПа}$$

Расчетное значение предела текучести при 20 °С для стали Ст3 [13]:

$$R_e = 250 \text{ МПа}$$

Допускаемое напряжение для стали Ст3 при температуре 20 °С гидравлического испытания [13]

$$\sigma_{\text{н}} := \text{Floor}\left(\frac{R_e}{1.1}, 0.5\right)$$

$$\sigma_{\text{н}} = 227 \text{ МПа}$$

Допускаемое напряжение для стали Ст3 [13] при  $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

$$\sigma_{20} := 154 \text{ МПа}$$

Так как аппарат изготавливается из листового проката, поправочный коэффициент принимаем в соответствии с рекомендациями [13]:

$$\eta := 1$$

$$\sigma_{\text{д}20} := \eta \cdot \sigma_{20}$$

$$\sigma_{\text{д}20} := 1 \cdot 196 = 196 \text{ МПа}$$

Определим коэффициент прочности сварных швов.

Для бесшовных элементов сосудов по [13]:

$$\varphi := 1$$

Так как теплообменник вертикальный, давление в аппарате примем как сумму внутреннего давления среды и давление гидростатическое, обусловленное столбом жидкости.

$$P_{\text{г}} := \frac{(\rho \cdot 2 \cdot 9.81 \cdot H_{\text{ж}})}{10^6};$$

$$P_{\text{г}} = 3.032 \text{ МПа};$$

$$P := P_{\text{раб}} + P_{\text{г}} = 3.132 \text{ МПа}$$

Давление испытаний:

$$P_{\text{исп}} := 1.25 \cdot P \cdot \frac{\sigma_{\text{д}20}}{\sigma} = 5.501 \text{ МПа}$$

Прибавка для компенсации коррозии обечайки:

$$c_1 := \Pi \cdot \tau = 0.5 \text{ мм}$$

Расчетную прибавку к толщинам примем:

$$c_{\text{д.д.}} := 2 \text{ мм.}$$

### 6.3.1 Расчет обечайки теплообменника

Расчетная толщина стенки обечайки по формуле [15]:

$$s_p := \max\left(\frac{P \cdot D}{2 \cdot \sigma \cdot \varphi - P}, \frac{P_H \cdot D}{1.8 \cdot \sigma_H \cdot \varphi - P_H}\right) = 3.548 \text{ мм.}$$

Исполнительная толщина стенки обечайки с учетом суммы прибавок составляет по формуле [15]:

$$s_{\text{д.д.}} := \text{ceil}(s_p + c) = 6 \text{ мм.}$$

Принимаем толщину стенки обечайки равной  $s_{\text{д.д.}} = 6$  мм.

Допускаемые напряжения в рабочих условиях и условиях испытания соответственно равны:

$$p1 := 2 \cdot \sigma \cdot \varphi \cdot \frac{(s - c)}{[D + (s - c)]} = 4.227 \text{ МПа;}$$

$$p1H := 1.8 \cdot \sigma_H \cdot \varphi \cdot \frac{(s - c)}{[D + (s - c)]} = 6.191 \text{ МПа.}$$

Проверка условия прочности выполняется следующим образом [15]:

$$P_{\text{гов}} := \begin{cases} \text{"Условие выполняется"} & \text{if } \begin{cases} P \leq p1 \\ P_H \leq p1H \end{cases} \\ \text{"Условие не выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

**$P_{\text{гов}} = \text{"Условие выполняется"}$**

Из расчетов, представленных выше, можно сделать вывод, что при толщине стенки 6 мм обеспечивается прочность кожуха как в рабочем состоянии, так и при гидравлических испытаниях.

### 6.3.2 Расчет трубной решетки теплообменника

Произведем расчет на прочность трубной решетки теплообменника. Схема расположения труб в трубной решетке представлена на рисунке 22.

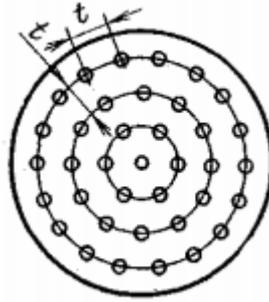


Рисунок 22 – Схема расположения труб по концентрическим окружностям

Принимаем трубы 13x1.5 мм. Тогда наружный диаметр труб равен:

$$d_T := 13_{\text{мм}}$$

В силу особенностей аппарата примем шаг расположения труб конструктивно равным  $t_p := 72$ .

Коэффициент заполнения трубной решетки при таком расположении труб примем  $\eta := 0.7$ .

Определяем число труб по [18]:

$$i := \eta \cdot \left[ \left( \frac{D}{1.1 \cdot t_p} \right)^2 \right] = 7.544$$

Округлим число труб:

$$i_{\text{окр}} := 8$$

Рассчитаем коэффициент ослабления трубной решетки отверстиями по формуле [18]:

$$\phi := \frac{(D - d_{\text{сум}})}{D},$$

где  $d_{\text{сум}}$  - сумма диаметров отверстий в трубной решетке.

Диаметр отверстия для очистительной трубы равен внешнему диаметру этой трубы (конструктивно принят  $d_{\text{от}} := 84$  мм). Диаметр отверстий для теплообменных труб при условии, что они закреплены вальцовкой, диаметр отверстия равен внешнему диаметру трубы. Тогда

$$d_{\text{сум}} := i \cdot d_T + d_{\text{от}} = 188 \text{ мм}$$

$$\phi := \frac{(D - d_{\text{сум}})}{D} = 0.277$$

Толщина трубной решетки рассчитывается по формуле [18]:

$$s_{\text{реш}} := K \cdot D \cdot \sqrt{\frac{P}{\sigma_{\text{изд}} \text{ ММ}}}$$

где  $K$  - параметр, зависящий от конструкции трубной решетки (приведен в таблице в [18]);

$\sigma_{\text{изд}}$  - допускаемое напряжение на изгиб для материала решетки,  $\text{МН/м}^2$ .

Для данной конструкции трубной решетки имеем [18]:

$$K := 0.47$$

Для Ст3 допускаемые напряжения на изгиб:

$$\sigma_{\text{изд}} := 150 \text{ МН/м}^2$$

$$s_{\text{реш}} := K \cdot D \cdot \sqrt{\frac{P}{\sigma_{\text{изд}}}} = 17.658 \text{ мм}$$

Примем  $s_{\text{реш}} := 18$  мм.

### 6.3.3 Расчет плоского круглого приварного днища теплообменника

Произведем расчет толщины плоского приварного днища. На рисунке 23 приведена расчетная схема приварного плоского днища.

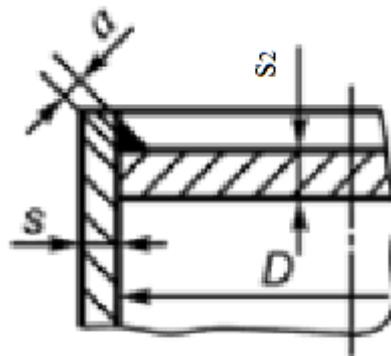


Рисунок 23 – Расчетная схема приварного плоского днища

В днище теплообменника-очистителя предусмотрено отверстие для спуска конденсата диаметром  $d_{\text{ном}} := 18$  мм.

Толщина плоских круглых днищ рассчитывается по следующей формуле [15]:

$$s_2 \geq s_{2p} + c,$$

где  $s_{2p} := K \cdot K_0 \cdot D_p \cdot \sqrt{\frac{P_p}{\phi_1 \cdot \sigma_d}}$ .

Для приведенной конструкции днищ коэффициенты  $K$  и  $D_p$  равны [15]:

$$K := 0.53;$$

$$D_p := D.$$

Для днищ, изготовленных из одной заготовки, коэффициент  $\phi_1 := 1$  [15].

Для днищ и крышек, имеющих одно отверстие,  $K_0$  вычисляют по формуле [15]:

$$K_0 := \sqrt{1 + \frac{d_{\text{НОМ}}}{D_p} + \left(\frac{d_{\text{НОМ}}}{D_p}\right)^2} = 1.036$$

Тогда расчетная толщина плоского круглого днища будет равна:

$$s_{2p} := K \cdot K_0 \cdot D_p \cdot \sqrt{\frac{P_p}{\phi_1 \cdot \sigma_d}} = 8.245 \text{ мм}$$

Исполнительная толщина плоского круглого днища в таком случае будет равна:

$$s_2 := s_{2p} + c = 10.245 \text{ мм}.$$

Примем  $s_2 := 12$  мм.

Для плоского круглого днища в рабочем состоянии величина допускаемого давления [15]:

$$P_{д2} := \left(\frac{s_2 - c}{K \cdot K_0 \cdot D}\right)^2 \sigma_d \cdot \psi;$$

$$P_{д2} = 0.147 \text{ МПа}.$$

При гидравлических испытаниях [15]:

$$P_{и2} := \left(\frac{s_2 - c}{K \cdot K_0 \cdot D}\right)^2 \sigma_{и} \cdot \psi;$$

$$P_{и2} = 1.113 \text{ МПа.}$$

$$Usl_2 := \begin{cases} \text{"Условие прочности в рабочих условиях и при условиях испытания выполняются"} & \text{if } \begin{cases} P_p \leq P_{д2} \\ P_p \leq P_{и2} \end{cases} \\ \text{"Условие прочности НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_2 = \text{"Условие прочности в рабочих условиях и при условиях испытания выполняются"}$$

Таким образом, толщина приварного плоского круглого днища равна 10 мм. При данной толщине выполняются условия прочности в рабочих условиях и в условиях испытания.

#### 6.3.4 Расчет очистительной трубы в теплообменнике-очистителе

Рассчитаем толщину стенки цилиндрической трубы с очистительными насадками. По трубе проходит газ через три насыпных фильтра, расположенных на решетках.

Конструктивно примем внутренний диаметр трубы  $d_{оч} := 80$  мм.

Исполнительную толщину стенки вычисляют по формуле [15]:

$$s_3 \geq s_{p3} + c.$$

Максимальная расчетная толщина стенки из условия прочности вычисляют по формуле [15]:

$$s_{p3} := P_p \cdot \frac{d_{оч}}{2 \cdot \varphi \cdot \sigma_d - P_p};$$

$$s_{p3} = 0.134 \text{ мм.}$$

Исполнительная толщина стенки обечайки с учетом суммы прибавок определяется по формуле ГОСТ [13] и составляет:

$$s_{и3} := \text{Ceil}(s_{p3} + c, 1)$$

$$s_{и3} = 2 \text{ мм.}$$

Проверка условий применимости формул безмоментной теории [14]:

$$\text{Проверка}_o := \begin{cases} \text{"Условия применения формул безмомент. теории выполняются"} & \text{if } \frac{s_{и3} - c}{d_{оч}} \leq 0.1 \\ \text{"Условия применения формул НЕ выполняются"} & \text{if } \frac{s_{и3} - c}{d_{оч}} > 0.1 \end{cases}$$

Проверка<sub>8</sub> = "Условия применения формул безмомент. теории выполняются"

Расчет допускаемого внутреннего избыточного давления в рабочих условиях и условиях испытания соответственно [15]:

$$P_{дз} := \frac{2 \cdot \sigma_{д} \cdot \varphi \cdot (s_{из} - c)}{d_{оч} + (s_{из} - c)} = 0.741 \text{ МПа};$$

$$P_{д\_испз} := \frac{2 \cdot \sigma_{и} \cdot \varphi \cdot (s_{из} - c)}{d_{оч} + (s_{из} - c)} = 5.605 \text{ МПа};$$

Проверка условия прочности стенок цилиндрической обечайки от действия внутреннего давления:

$$\text{Проверка}_9 := \begin{cases} \text{"Условие прочности стенки выполняется"} & \text{if } \begin{cases} P_{д\_испз} > P_{и} \\ P_{дз} > P_{р} \end{cases} \\ \text{"Условие прочности НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Проверка<sub>9</sub> = "Условие прочности стенки выполняется"

Таким образом, толщина стенки очистительной трубы с учетом прибавок равна 2 мм. При такой толщине с запасом выполняются условия прочности.

### 6.3.5 Расчет приварной плоской круглой крышки теплообменника

Произведем расчет толщины плоской приварной крышки теплообменника. На рисунке 24 приведена расчетная схема плоской приварной крышки.

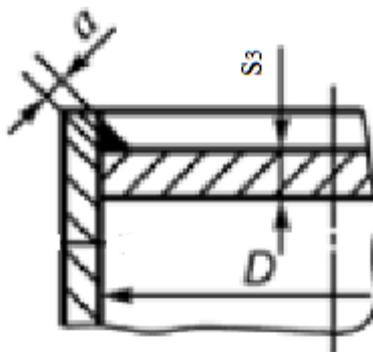


Рисунок 24 - Расчетная схема плоской приварной крышки

В крышке теплообменника предусмотрено отверстие для выходной трубы  $d_{\text{отч}} := 84$  мм.

Толщина плоских круглых днищ и крышек рассчитывается по следующей формуле [15]:

$$s_3 \geq s_{3p} + c,$$

где 
$$s_{3p} := K \cdot K_{01} \cdot D_p \cdot \sqrt{\frac{P_p}{\phi_1 \cdot \sigma_d}}.$$

Для приведенной конструкции днищ коэффициенты  $K$  и  $D_p$  равны [15]:

$$K := 0.53;$$

$$D_p := D.$$

Для днищ, изготовленных из одной заготовки, коэффициент  $\phi_1 := 1$  [15].

Для днищ и крышек, имеющих одно отверстие,  $K_0$  вычисляют по формуле [15]:

$$K_{01} := \sqrt{1 + \frac{d_{\text{отч}}}{D_p} + \left(\frac{d_{\text{отч}}}{D_p}\right)^2} = 1.195.$$

Тогда расчетная толщина плоского круглого днища будет равна:

$$s_{3p} := K \cdot K_{01} \cdot D_p \cdot \sqrt{\frac{P_p}{\phi_1 \cdot \sigma_d}} = 9.505 \text{ мм}.$$

Исполнительная толщина плоского круглого днища в таком случае будет равна:

$$s_{3v} := s_{3p} + c = 10.245 \text{ мм}.$$

Примем  $s_{3v} := 12$  мм.

Для плоского круглого днища в рабочем состоянии величина допускаемого давления [15]:

$$P_{\text{д3}} := \left(\frac{s_3 - c}{K \cdot K_{01} \cdot D}\right)^2 \sigma_d \cdot \psi;$$

$$P_{\text{д3}} = 0.111 \text{ МПа}.$$

При гидравлических испытаниях [15]:

$$P_{и3} := \left( \frac{s_3 - c}{K \cdot K_{01} \cdot D} \right)^2 \sigma_{и} \cdot \varphi ;$$

$$P_{и3} = 0.837 \text{ МПа}$$

$$U_{sl_3} := \begin{cases} \text{"Условие прочности в рабочих условиях и при условиях испытания выполняются"} & \text{if } \begin{cases} P_p \leq P_{д3} \\ P_p \leq P_{и3} \end{cases} \\ \text{"Условие прочности НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$U_{sl_3} = \text{"Условие прочности в рабочих условиях и при условиях испытания выполняются"}$$

Таким образом, толщина приварной плоской круглой крышки равна 12 мм. При данной толщине выполняются условия прочности в рабочих условиях и в условиях испытания.

## 7 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

Производственная безопасность представляет собой систему организационных мероприятий и технических средств, уменьшающих вероятность воздействия на персонал опасных производственных факторов, вредных воздействий технологических процессов, энергии, средств, предметов, условий и режимов труда до приемлемого уровня. Необходимо выявить вредные и опасные производственные факторы, которые могут возникать при разработке и эксплуатации данных аппаратов.

В данной работе спроектирована газогенераторная установка для получения электроэнергии в удаленных условиях путем пиролизного разложения твердого древесного топлива. В работе рассмотрено воздействие вредных факторов на человека и окружающую среду в процессе получения генераторного газа и далее электроэнергии и предложены различные организационные мероприятия, направленные на снижение уровня воздействия этих факторов на человека.

К вредным факторам, возникающим в процессе газификации твердого топлива можно отнести: недостаточную освещённость рабочей зоны; наличие в воздухе вредных химических веществ, обладающих канцерогенными, мутагенными и раздражающими действиями; отклонение показателей микроклимата. Так как работы проводятся на открытом воздухе, в холодное время года возможен риск переохлаждения. Воздействие опасных производственных факторов может привести к травме или внезапному резкому ухудшению здоровья. Так же опасные производственные факторы могут стать источниками ЧС, оказывают негативное влияние на экологию.

Газогенераторная установка для получения электроэнергии в удаленных условиях проектируется в интересах АО «НПП «ЭТАЛОН» (г. Омск).

## 7.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Согласно Конституции Российской Федерации каждый гражданин РФ имеет право на труд, а также создание условий занятости, отвечающих технике безопасности и санитарно-гигиеническим нормативам.

### 7.1.1 Специальные правовые нормы трудового законодательства

Социальная оценка условий труда проводится не реже, чем 1 раз в 5 лет [19] на основе некоторых факторов (оборудование, материалы, случаи производственного травматизма и др.). По результатам специальной оценки назначается класс условий труда. Условия труда могут быть в частности оптимальные; допустимые; вредные; опасные.

Работа с пиролизными процессами на производстве имеет ряд угроз для жизни и здоровья человека. В данной работе рассмотрены условия труда оператора газогенераторной установки. Данный вид работ относится к работам 3 класса (вредные условия труда), при которых уровни воздействия вредных и (или) опасных производственных факторов превышают уровни, установленные нормативами (гигиеническими нормативами) условий труда [19]. Данному виду работ присваивается 1 степень вредности. Таким образом, оператор газогенераторной установки работает в вредных условиях труда 1 степени (класс 3, подкласс 3.1).

Для снижения влияния вредных факторов на здоровье работника необходимо использование средств индивидуальной и коллективной защиты, строгое соблюдение техники безопасности и предусмотренные места отдыха в регламентированное для него время, а также дополнительные льготы. В частности, на законодательном уровне установлены следующие льготы: дополнительный отпуск; сокращенная норма часов труда в неделю; доплата в процентном соотношении к окладу либо часовой ставке; проведение медицинских обследований; досрочный выход на пенсию; выдача

специального питания; страхование от несчастных случаев; запрет на совместительство должностей [20].

### 7.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны

Для обеспечения наиболее безопасной и эффективной работы сотрудников необходимо предусмотреть оптимальную компоновку рабочего места с учётом специфики работ [19].

При организации производственного процесса следует учитывать антропометрические и психофизиологические особенности человека, его возможности в отношении величины усилий, темпа и ритма выполняемых операций, а также анатомо-физиологические различия между мужчинами и женщинами [21].

Для сохранения высокой работоспособности на протяжении долгосрочного промежутка времени необходимо предусматривать чередование периода труда и отдыха. Данное чередование осуществляется посредством введения обеденного перерыва и регламентированных перерывов на протяжении рабочего дня, продолжительность и частота перерывов предусматриваются из учёта специфики работ [22].

Работа оператора газогенераторной установки связана с физическими усилиями в связи с периодической загрузкой твердого топлива в бункер газогенератора. Это вызывает нагрузку на опорно-двигательный аппарат и функциональные системы организма (сердечно-сосудистую, дыхательную и др.), обеспечивающие его деятельность [23].

Так как в технологии получения генераторного газа преобладают стадии нагрева до высоких температур, необходимо учитывать влияние микроклимата на здоровье работников. На рабочем месте необходимо контролировать: интенсивность теплового излучения от нагретых поверхностей, влажность, скорость движения воздуха и температуру.

## 7.2 Производственная безопасность

Производственная безопасность представляет собой систему организационных мероприятий и технических средств, уменьшающих вероятность воздействия на персонал опасных производственных факторов, вредных воздействий технологических процессов, энергии, средств, предметов, условий и режимов труда до приемлемого уровня. Выявленные факторы перечислены в таблице 8 [24].

Таблица 8 – Опасные и вредные факторы при эксплуатации газогенераторной установки

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015 [24])	Этапы работ			Нормативные документы
	Разработка	Изготовление	Эксплуатация	
1 Недостаточная освещенность рабочей зоны	+	+		<ul style="list-style-type: none"> <li>СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95* [26]</li> </ul>
2 Повышенная температура материальных объектов рабочей зоны		+	+	<ul style="list-style-type: none"> <li>ГОСТ 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 [27]</li> <li>ГОСТ 12.4.011-89 (ССБТ) Система стандартов безопасности труда. Средства защиты работающих. Общие требования и классификация [28]</li> </ul>

Продолжение таблицы 8

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015 [24])	Этапы работ			Нормативные документы
	Разработка	Изготовление	Эксплуатация	
3 Низкие температуры в рабочей зоне на открытом воздухе			+	<ul style="list-style-type: none"> <li>• МР 2.2.7.2129-06 Режимы труда и отдыха работающих в холодное время на открытой территории или в неотапливаемых помещениях [29]</li> </ul>
4 Повышенная загазованность воздуха рабочей зоны		+	+	<ul style="list-style-type: none"> <li>• СанПиН 1.2.3685-21 "Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания" [30]</li> </ul>
5 Пожаро- и взрывоопасные вещества			+	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ГОСТ 12.1.010-76 Система стандартов безопасности труда. Взрывобезопасность. Общие требования [31]</li> <li>• ГОСТ 12.1.004-91 Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования [32]</li> </ul>

Причиной недостатка освещения может являться недостаточное количество оконных проемов в помещении рабочей зоны, а также источников искусственного света.

Неудовлетворительное освещение рабочей зоны приводит к утомляемости зрительного органа работника и, как следствие, снижение работоспособности, самочувствия работника, а также может привести к неспособности работника различить окраску на кабелях, баллонах, отличительные знаки и др [25]. В таблице 9 приведены нормируемые показатели естественного, искусственного и совмещенного освещения в соответствии с [26].

Таблица 9 – Нормируемые показатели естественного, искусственного и совмещенного освещения

Помещения	Рабочая поверхность и плоскость нормирования КЕО и освещенности (Г – горизонтальная, В – вертикальная) и высота плоскости над полом, м	Естественное освещение		Совмещенное освещение	
		КЕО $e_n$ , %		КЕО $e_n$ , %	
		При верхнем или комбинированном освещении	При боковом освещении	При верхнем или комбинированном освещении	При боковом освещении
Кабинеты, рабочие комнаты, офисы, представительства	Г – 0,8	3,0	1,0	1,8	0,6
Помещения	Искусственное освещение				
	Освещенность рабочей поверхности, лк				
	При комбинированном освещении		При общем освещении	Показатель дискомфорта, М, не более	Коэффициент пульсации освещенности $K_p$ , %, не более
	Всего	От общего			
	400	200	300	40	15

Искусственное освещение в помещениях для эксплуатации ПК должно осуществляться системой общего равномерного освещения. Если проводится работа с документами, рекомендуется применять системы комбинированного освещения с использованием источников местного освещения. Окна в помещениях, где эксплуатируется вычислительная техника, преимущественно должны быть ориентированы на север и северо-восток[25].

Горячие поверхности материальных объектов могут привести к ожогам разной степени, а также влиянию теплового излучения на работников,

находящихся рядом. Это приводит к ухудшению самочувствия и снижению работоспособности [25].

Для снижения вредного влияния горячих поверхностей материальных объектов необходимо сконструировать генератор таким образом, чтобы стенка газогенератора не нагревалась до температуры зоны горения, а также использовать изолирующий материал. Температура на поверхности изоляции при температуре окружающего воздуха 25 °С должна быть не выше 45 °С. Окраска, условные обозначения, размеры букв и расположение надписей должны соответствовать правилам устройства и безопасной эксплуатации трубопроводов горячих газов [27].

Для работы с материальными объектами с горячей поверхностью работники должны быть обеспечены средствами индивидуальной защиты [28] и проинструктированы.

Так как установка эксплуатируется на открытом воздухе, в холодное время года существует вредное влияние низких температур, которые могут привести к обморожению при длительном нахождении на улице.

Работы, выполняемые оператором газогенераторной установки, относятся к классу работ Пб, работы выполняются в климатическом регионе II [29]. В таблице 10 приведены нормы режима работы в зависимости от температуры воздуха и скорости ветра.

Таблица 10 – Режим работ на открытой территории в климатическом регионе II (работа категории Па-Пб)

Температура воздуха	Скорость ветра, м/с											
	≤1		2		4		6		8		10	
	а	б	а	б	а	б	а	б	а	б	а	б
-10	не регламентируется*						168	1	121	1	92	2
-20	117	1	104	1	84	2	71	2	58	3	49	3
-30	65	3	60	3	52	3	45	4	39	4	34	5
-40	44	4	41	4	37	4	32	5	29	5	25	6

\* Отдых по причине физической усталости вследствие возможного перегревания следует проводить в теплом помещении

Примечание: а – продолжительность непрерывного пребывания на холоде, мин; б – число 10-минутных перерывов для обогрева за 4-часовой период рабочей смены.

Для обеспечения безопасных условий труда работники должны быть обеспечены средствами индивидуальной защиты, которые регламентируются МУК 4.3.1901-04 «Методика определения теплоизоляции средств индивидуальной защиты головы, стоп, рук на соответствие гигиеническим требованиям».

В процессе газификации твердого топлива образуются газы, вредные для организма человека. При недостаточной герметизации оборудования газовая смесь может загрязнять воздух в рабочей зоне.

В состав получаемого газа входят азот  $N_2$ , угарный газ  $CO$ , углекислый газ  $CO_2$ , метан  $CH_4$ , водород  $H_2$ . Азот и водород безвредны для организма человека. Метан и азот вредны для организма человека только при повышенных давлениях, так как в таком случае эти газы вытесняют из воздуха кислород, что вызывает кислородное голодание. В таблице 11 приведены предельно допустимые концентрации этих газов [30].

Таблица 11 – Предельно-допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны

Наименование вещества	Формула	Величина ПДК, мг/м <sup>3</sup>	Преимущественное агрегатное состояние в воздухе в условиях производства	Класс опасности	Особенности воздействия на организм
Угарный газ*	$CO$	20	п	4	О
Углекислый газ	$CO_2$	27000/9000	п	4	
Метан	$CH_4$	7000	п	4	

\* При длительности работы в атмосфере, содержащей оксид углерода, не более 1 ч предельно допустимая концентрация оксида углерода может быть повышена до 50 мг/м, при длительности работы не более 30 мин - до 100 мг/м, при длительности работы не более 15 мин - 200 мг/м. Повторные работы при условиях повышенного содержания оксида углерода в воздухе рабочей зоны могут проводиться с перерывом не менее, чем в 2 ч.

Примечание: в таблице "п" - пары и (или) газы; 4 класс опасности – малоопасные; "О" - вещества с остронаправленным механизмом действия, требующие автоматического контроля за их содержанием в воздухе.

Для снижения влияния вредного фактора необходимо применение средств индивидуальной защиты органов дыхания. Трубопроводы вредных веществ должны быть герметичны. В местах возможных утечек (краны, вентили, фланцевые соединения) должны быть установлены защитные кожухи, а при необходимости - специальные устройства со сливом из них продуктов утечек в безопасное место [33].

Образующаяся газовая смесь пожаро- и взрывоопасна. При возникновении пожара или взрыва опасность представляют пламя и искры, повышенная температура окружающей среды, дым, осколки оборудования, недостаток кислорода [32].

Системы пожарной безопасности в данном случае должны обеспечивать безопасность людей и материальных ценностей одновременно. Требуемый уровень обеспечения пожарной безопасности людей с помощью указанных систем должен быть не менее 0,999999 предотвращения воздействия опасных факторов в год в расчете на каждого человека, а допустимый уровень пожарной опасности для людей должен быть не более 10 воздействия опасных факторов пожара, превышающих предельно допустимые значения, в год в расчете на каждого человека [32].

Для обеспечения пожарной безопасности установка должна быть установлена вдали от легко воспламеняющихся материалов (сухих веток, травы и т.п.) на пожаробезопасной площадке. Трубопровод, по которому движется горючая смесь, должен быть герметичен и защищен от воздействия огня и искр [32]. Рабочая зона должна быть обеспечена средствами пожаротушения, окрашенными согласно [27]. Безопасность работников должна обеспечиваться применением средств коллективной и индивидуальной защиты людей от опасных факторов пожара и применением средств противодымной защиты [32].

Трубопроводы агрессивных, легковоспламеняющихся, горючих, взрывоопасных или вредных веществ должны быть герметичными [33].

### 7.3 Экологическая безопасность

Благодаря конструкции установки концентрация углекислого газа в газовой смеси мала, что позволяет ей пренебречь.

Для функционирования газогенераторной установки необходимо твердое древесное топливо (древесина, древесный уголь и др.), что приведет к вырубке лесных насаждений. Это приносит вред биосфере и экосистеме леса [34], так как лес является источником кислорода на планете и выступает в качестве среды обитания для многих растений и животных.

Для снижения рисков возникновения экологической катастрофы необходимо поддерживать баланс между вырубаемыми лесными массивами и посаженными [34], а также рационально использовать древесное сырье. Например, в качестве топлива для газогенераторной установки может выступать щепа или опилки (отходы других производств).

В составе газогенераторной установки присутствует теплообменный аппарат, использующий в качестве хладагента воду. Так как вода используется в чистом виде и в результате теплообмена избавляется от солей кальция и магния, в ее составе не образуются вредные вещества. Дополнительная очистка не требуется. Сточные воды можно сбрасывать в поверхностные только после получения в установленном порядке разрешения, выдаваемого компетентными органами [35].

Возможен риск возникновения лесных пожаров, так как газификация происходит в результате горения твердого топлива. Это приведет к уничтожению лесных насаждений, образованию большого количества углекислого газа, пагубно влияющего на биосферу, а также нанесет вред экосистеме [36].

Для предотвращения распространения пожара необходимо принять противопожарные меры: газогенераторная установка должна монтироваться на заранее подготовленной площадке (бетон, цемент и др.), обеспечивающей пожарную безопасность; по периметру рабочей зоны должны быть

установлены препятствия со средствами пожаротушения; препятствием для распространения огня по сухой траве может являться вырытая траншея [36].

#### 7.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

При эксплуатации газогенераторной установки возможен риск возникновения следующих ЧС: наводнение, ураган, пожар.

С учетом условий работы газогенератора наиболее возможной чрезвычайной ситуацией является возникновение пожара.

Причинами возникновения пожара могут являться:

- искра из бункера газогенератора;
- взрыв горючей газовой смеси из-за негерметичности установки и/или трубопровода при образовании источника зажигания.

В связи с этим при эксплуатации оборудования необходимо соблюдать следующие нормы пожарной безопасности согласно [32]:

- все крышки оборудования, трубопровод и места их соединения должны быть герметичны;
- эксплуатировать оборудование можно только при полной его исправности;
- рабочая зона должна быть обеспечена средствами пожаротушения;
- рабочая зона должна быть очищена от легковоспламеняющихся материалов (пух, сухая трава и др.);
- установка должна быть смонтирована на твердой негорючей поверхности (бетон, цемент и др) на открытом пространстве на расстоянии от лесных насаждений.

Оборудование должно быть обеспечено надежными прокладками в местах соединений трубопроводов и крышек, что позволит исключить разгерметизацию установки.

Работники должны быть ознакомлены с техникой пожарной безопасности, а также с действиями, которые они обязаны предпринять в

случае возникновения пожара, обеспечены средствами индивидуальной и коллективной защиты [32].

При возникновении возгорания любой, ставший свидетелем происшествия, обязан немедленно обратиться в пожарную службу по телефону 01 или 112, покинуть опасную зону и соблюдать покой.

Для предотвращения распространения пожара по сухой траве рекомендуется при монтаже оборудования на пожаробезопасной поверхности также вырыть на расстоянии от нее траншею в земле шириной 0.7-1 м.

### 7.5 Выводы по разделу

В ходе разработки раздела «Социальная ответственность» выяснили, что данный вид работ относится к работам 3 класса 1 степени вредности.

Выявили, что при разработке, исследовании и эксплуатации установки существуют такие вредные и опасные факторы как недостаточная освещенность рабочей зоны, повышенная температура материальных объектов рабочей зоны, низкие температуры в рабочей зоне на открытом воздухе, повышенная загазованность воздуха рабочей зоны, пожаро- и взрывоопасные вещества, а также рассмотрели причины их возникновения, нормативные значения и методы предупреждения их возникновения.

Самой вероятной чрезвычайной ситуацией при эксплуатации оборудования на открытом воздухе является возникновение пожара. Для предотвращения данного вида ЧС необходимы герметичность установки, монтаж установки на пожаробезопасной поверхности на расстоянии от лесных насаждений, очистка рабочей зоны от легковоспламеняющихся материалов (пух, сухая трава и др.), организация траншеи на расстоянии от рабочей зоны для предотвращения распространения огня. Рабочие должны быть обеспечены средствами индивидуальной и коллективной защиты, проинструктированы.

## 8 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ

В данной работе представлен расчет газогенераторной установки для получения электроэнергии пиролизическим методом из твердого древесного топлива. Основной задачей установки является получение горючей смеси газов ( $H_2$ ,  $CO$ ,  $CH_4$ ) из древесного угля, далее охлаждение и очистка для использования этой смеси в двигателе внутреннего сгорания.

Целью раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является проектирование и создание конкурентоспособных разработок, технологий, отвечающих современным требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

### 8.1 Потенциальные потребители результатов исследования

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

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

Сегментирование – это разделение покупателей на однородные группы, для каждой из которых может потребоваться определенный товар (услуга).

Потенциальными потребителями данной разработки являются люди, временно или постоянно проживающие в зданиях, не обеспеченных бесперебойным электричеством от крупных электростанций. Установка имеет небольшие размеры, отчего является мобильной, а топливом для нее являются твердые древесные материалы (древесный уголь, щепа, ветки, древесина и др.).

Завод котельного оборудования «ИНТЕРРЕММАШ» является производителем крупных газогенераторов, работающих на твердом древесном топливе, однако размеры данных газогенераторов составляют от 3,8 × 2,0 × 2,05 м до 3,5 × 2,5 × 2,05 м, а вес от 1.5 т до 6.3 т. Установка является стационарной.

Американская компания «Briggs&Stratton» производит генераторы, работающие на газовом или жидком топливе. Установки мобильные, небольших размеров, но используют бензины в качестве топлива.

Проектируемая установка является мобильной и использует в качестве топлива общедоступные материалы: твердое древесное топливо.

Таблица 12 – Сегментирование рынка

		Потребитель		
		Промышленность	Туристические агентства (кемпинг)	Частное лицо
Размер компании	Крупные	♠	♠	
	Средние		♦	♦
	Мелкие			

Примечание: ♠ - «ИНТЕРРЕММАШ»; ♦ - «Briggs&Stratton».

Из анализа сегментирования рынка можно сделать вывод, что наиболее перспективными потребителями разрабатываемого проекта являются туристические агентства (кемпинги и др.). Однако конкуренция ниже для частных лиц. Проектируемая установка в силу экономичности используемого топлива и небольших размеров востребована для частного использования в загородных домах и др.

## 8.2 Анализ конкурентных технических решений

Основными техническими решениями, помимо газогенератора,

работающего на твердом древесном топливе, являются газогенераторы, работающие на газовом и жидком топливах. Текущий проект имеет ряд существенных преимуществ перед конкурентами, а именно:

1. Цена разработки;
2. Экономичность используемого топлива;
3. Мобильность установки.

Представленные на рынке газогенераторы работают на невозобновляемом топливе (дизельное, газовое и др.), к тому же имеющим более высокую стоимость. Производство мобильных газогенераторов практикуется за границей.

Результат оценки конкурентоспособности представлен в таблице 13.

Таблица 13 – Карта оценки конкурентоспособности технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б <sub>ф</sub>	Б <sub>к1</sub>	Б <sub>к2</sub>	К <sub>ф</sub>	К <sub>к1</sub>	К <sub>к2</sub>
<b>Технические критерии оценки ресурсоэффективности</b>							
Удобство в эксплуатации	0.1	4	3	5	0.16	0.12	0.2
Надежность	0.1	4	3	5	0.16	0.12	0.2
Безопасность эксплуатации	0.1	4	4	3	0.16	0.16	0.12
Материалоемкость	0.1	4	4	5	0.16	0.16	0.2
Простота эксплуатации	0.1	5	3	4	0.2	0.12	0.16
Стабильность работы	0.1	4	4	5	0.16	0.16	0.2
<b>Экономические критерии оценки эффективности</b>							
Цена	0.1	5	4	5	0.2	0.16	0.2
Предполагаемый срок эксплуатации	0.1	5	5	4	0.2	0.2	0.16
Экономичность используемого топлива	0.1	5	5	3	0.2	0.2	0.12
Уровень проникновения на рынок	0.1	4	4	5	0.16	0.16	0.2
<b>Итого</b>	<b>1</b>	<b>44</b>	<b>39</b>	<b>44</b>	<b>1.76</b>	<b>1.36</b>	<b>1.76</b>

Примечание: ф – текущий проект; К1 – газогенератор на твердом древесном

топливе от завода «ИНТЕРРЕММАШ»; К2 – газогенератор на жидком топливе от компании «Briggs&Stratton».

Из этой таблицы можно сделать вывод, что текущий проект является равноценным газогенераторам на жидком топливе от компании «Briggs&Stratton», однако позволяет использовать в качестве топлива твердое древесное топливо, которое является возобновляемым, к тому же текущий проект позволяет утилизировать древесные отходы производств (опилки, щепы, ветки и др.). Таким образом, проектирование настоящей газогенераторной установки целесообразно.

### 8.3 SWOT-анализ

Качественный подход к описанию рисков заключается в детальном и последовательном рассмотрении содержательных факторов, несущих неопределенность, и завершается формированием причин основных рисков и мер по их снижению. Одной из методик анализа сильных и слабых сторон предприятия, его внешних, благоприятных возможностей и угроз является SWOT-анализ. Результаты SWOT-анализа представлены в таблице 14.

Таблица 14 – Матрица SWOT-анализа

	<b>Сильные стороны проекта</b> С1. Невысокая стоимость аппарата С2. Простота изготовления С3. Относительно дешевые топливные материалы	<b>Слабые стороны проекта</b> Сл1. Сложность очистки межтрубного пространства теплообменника-очистителя Сл2. Использование нестандартного оборудования. Сл3. Высокие температуры газа
--	---	--

Продолжение таблицы 14

<p><b>Возможности</b>          В1. Возможность использовать в качестве топлива любое твердое древесное          В2. Возможность перемещения установки          В3. Выход на международный рынок</p>	<p>Любое древесное топливо распространено на территории РФ, а также имеет низкую стоимость по сравнению с жидкими и газовыми аналогами. Из-за конструкции газогенератора можно использовать как древесный уголь, так и щепу и др.</p>	<p>Из-за малой производительности газогенератора для очистки требуется циклон нестандартного размера, однако это позволяет сделать установку мобильной, благодаря чему она становится более доступна потребителю и более востребована.</p>
<p><b>Угрозы:</b>          У1. Угроза восстановления горючих составляющих газа в негорючие вследствие медленного охлаждения          У2. Угроза уменьшения коэффициента теплопроводности вследствие загрязнения наружной поверхности труб теплообменника-очистителя          У3. Угроза негерметичности трубопровода и потери газовой смеси</p>	<p>Благодаря конструкторским решениям и простоте установки газовая смесь первично охлаждается сразу при отборе газа при взаимодействии с внешней стенкой газогенератора. Это позволяет «закалить» газ и дальнейшее оборудование в установке не подвергается воздействию температур выше 400 °С. Необходимо использование подходящих соединений трубопровода и прокладок.</p>	<p>Для более надежной «закалки» газовой смеси рассматриваются варианты более резкого охлаждения водой непосредственно в трубопроводе. Для очистки межтрубного пространства от накипи, образовавшейся при охлаждении газа, можно использовать подкисленную воду.</p>

По результатам SWOT-анализа, основными преимуществами настоящего проекта являются мобильность установки и вариативность в

используемом топливе. Перечисленные сильные стороны позволяют расширить потенциальные возможности применения разрабатываемого оборудования, а также сократить его стоимость.

#### 8.4 Планирование научно-исследовательских работ

Для выполнения научных исследований формируется рабочая группа, в чей состав входят: бакалавр в качестве инженера проекта, научный руководитель выпускной квалификационной работы. Составим перечень этапов и работ в рамках проведения научного исследования и проведем распределение исполнителей по видам работ (таблица 15).

Таблица 15 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Научный руководитель (НР), инженер (И)
Выбор направления исследований	2	Выбор направления исследований	НР, И
	3	Подбор и изучение материалов по теме	НР, И
	4	Календарное планирование дел по теме газогенераторная установка	НР, И
Теоретические исследования	5	Проведение теоретических расчетов с использованием ПО MathCAD	И
Обобщение и оценка результатов	6	Оценка эффективности полученных результатов	НР, И
	7	Определение целесообразности проведения ВКР	НР, И
<b>Проведение ВКР</b>			
Разработка технической документации и проектирование	8	На основе расчетов проектирование модели аппарата в КОМПАС	И
	9	Проверка чертежей	НР
Оформление комплекта	10	Составление пояснительной записки, оформление чертежей	И

документации по ВКР			
---------------------	--	--	--

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов.

Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости  $t_{ожі}$  используется формула:

$$t_{ожі} = \frac{3 \cdot t_{\min i} + 2 \cdot t_{\max i}}{5},$$

где  $t_{ожі}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения  $i$  – ой работы, чел. – дн.;

$t_{\min i}$  – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$  – ой работы, чел. – дн.;

$t_{\max i}$  – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$  – ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел. – дн.

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях  $T_{pi}$ , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями:

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i},$$

где  $T_{pi}$  – продолжительность выполнения одной работы, раб.дн.;

$t_{ожі}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел. – дн.;

$Ч_i$  – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

На выполнение работ в рамках проекта дано четыре месяца (февраль-май), что в обще сложности дает 97 дней. В таблице 16 показана минимальная, максимальная и ожидаемая продолжительность работ, согласно которой максимальная продолжительность составила 94 дня, минимальная – 67 дней, ожидаемая – 79 дней.

Таблица 16 – Минимальная, максимальная и ожидаемая трудоемкость выполнения работ

											Всего дней
Номер работ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Минимальная трудоемкость	2	1	10	2	15	2	1	15	2	17	67
Максимальная трудоемкость	3	2	14	4	20	3	2	21	4	21	94
Ожидаемая трудоемкость	2	2	12	3	17	2	2	17	3	19	79

Для построения графика Ганта переведем рабочие дни в календарные по следующей формуле:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}},$$

где  $T_{ki}$ – продолжительность выполнения  $i$ -й работы в календарных днях;

$T_{pi}$ – продолжительность выполнения  $i$ -й работы в рабочих днях;

$k_{\text{кал}}$ – коэффициент календарности, который рассчитывается по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}},$$

где  $T_{\text{кал}}$ – количество календарных дней в году;

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

$T_{\text{пр}}$ – количество праздничных дней в году.

Таким образом:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} = \frac{365}{365 - 67} = 1.22.$$

В таблице 17 представлены временные показатели работ с округлением до целых:

Таблица 17 – Временные показатели работ

№	Трудоемкость			Исполнители	Длительность работы, дней	Длительность работы, кал. дней
	min	max	Ожидаемая			
1	2	3	2	Научный руководитель (НР), инженер (И)	2	2
2	1	2	2	НР, И	2	2
3	10	14	12	НР, И	12	15
4	2	4	3	НР, И	2	2
5	15	20	17	И	17	21
6	12	3	2	НР, И	1	1
7	1	2	2	НР, И	1	1
8	15	21	17	И	17	21
9	2	4	3	НР	3	4
10	17	21	19	И	19	23
Σ	60	90	72		76	93

С учетом временных показателей работ, проведенных в рамках проекта, построим график Ганта (рисунок 25).

Диаграмма Ганта – это горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

Номер работ	Содержание работ	Исполнитель	Февраль			Март			Апрель			Май		
			10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30
1	Составление и утверждение технического задания	НР, И	■											
2	Выбор направления исследований	НР, И	■											
3	Подбор и изучение материалов по теме	НР, И		■	■									
4	Календарное планирование дел по теме газогенераторная установка	НР, И			■									
5	Проведение теоретических расчетов с использованием ПО MathCAD	И			■	■	■							
6	Оценка эффективности полученных результатов	НР, И					■	■						
7	Определение целесообразности проведения ВКР	НР, И					■	■						
8	На основе расчетов проектирование модели аппарата в КОМПАС	И						■	■	■				
9	Проверка чертежей	НР								■				
10	Составление пояснительной записки, оформление чертежей	И								■	■	■		

Рисунок 25 – План-график работ:

■ - научный руководитель, ■ - инженер

## 8.5 Бюджет научного исследования

В процессе формирования бюджета НТИ используется следующая группировка затрат по статьям:

- материальные затраты НТИ;
- затраты на оборудование;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- накладные расходы.

В таблице 18 рассмотрим подробнее статьи материальных затрат.

Таблица 18 – Сырье, материалы, комплектующие изделия и покупные полуфабрикаты

Наименование	Количество, шт	Цена за единицу, руб	Сумма, руб
Тетрадь	2	50	100
Ручка	3	50	150
Карандаш	2	20	40
Картридж для принтера	1	1280	1280
Бумага	1	250	250
Итого по статье			1920

Для проведения расчетов, проектирования и оформления чертежей необходимо соответствующее оборудование. Данные статьи расходов отражены в таблице 19.

Таблица 19 – Расчет затрат по статье «Спецоборудование для научных работ»

Наименование	Количество, шт	Цена за единицу, тыс руб	Сумма, тыс руб
ПЭВМ acer	1	25.0	25.0
ПО Microsoft office	1	2.5	2.5
Mathcad Application	1	27.0	27.0
КОМПАС 3D	1	1.4	1.4
Итого			54.9

Затраты по таблице 19 не учитываются по причине того, что оборудование и программное обеспечение было приобретено ранее.

Норма амортизации определяется по следующей формуле:

$$H_A = \frac{1}{n},$$

где n – срок полезного использования в количестве лет.

Амортизация оборудования рассчитывается по формуле:

$$A = \frac{H_A \cdot И}{12} \cdot m,$$

где  $I$  – итоговая сумма, тыс. руб.;

$m$  – время использования, мес.

В процессе проектирование использовался ПЭВМ асер, срок полезного использования которого составляет 6 лет.

Норма амортизации составит:

$$N_A = \frac{1}{6} = 0.167.$$

Амортизация оборудования составит:

$$A = \frac{0.167 \cdot 25}{12} \cdot 4 = 1.39 \text{ тыс руб.}$$

Статья заработной платы исполнителей темы включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НИИ, (включая премии и доплаты) и дополнительную заработную плату. Также включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20 – 30 % от тарифа или оклада:

$$Z_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп},$$

где  $Z_{осн}$  – основная заработная плата;

$Z_{доп}$  – дополнительная заработная плата (12-20 % от  $Z_{осн}$ ).

Основная заработная плата ( $Z_{осн}$ ) руководителя от предприятия рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_p,$$

где  $Z_{осн}$  – основная заработная плата одного работника;

$T_p$  – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d},$$

где  $Z_m$  – месячный должностной оклад работника, руб.;

$M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года: для шестидневной недели  $M = 10.4$  месяца.

$F_d$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб.дн.

В таблице 20 приведен баланс рабочего времени каждого работника НТИ.

Таблица 20 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество не рабочих дней: выходные дни праздничные дни	67	67
Издержки рабочего времени: отпуск невыходы по болезни	56	28
Действительный фонд рабочего времени	242	270

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_m = Z_{тс} \cdot (1 + k_{пд} + k_d) \cdot k_p,$$

где  $Z_{тс}$  – заработная плата по окладу, руб.;

$k_{пр}$  – премиальный коэффициент, равный 0,3 (т.е. 30% от  $Z_{тс}$ );

$k_d$  – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2 – 0,5 (в НИИ и на промышленных предприятиях – за расширение сфер обслуживания, за профессиональное мастерство, за вредные условия: 15-20 % от  $Z_{тс}$ );

$k_p$  – районный коэффициент, равный 1,3 для Томска.

Расчет основной заработной платы приведен в таблице 21.

Основная заработная плата руководителя (преподавателя ТПУ) с учетом должности доцента и степени кандидата технических наук, и заработная плата инженера в роли студента без районного коэффициента, руб.:

- руководителя: 26000 руб.;

- инженера: 15000 руб.

Таблица 21 – Расчет основной заработной платы

Исполнитель	З <sub>тс</sub> , руб	k <sub>пр</sub>	k <sub>д</sub>	k <sub>р</sub>	З <sub>м</sub> , руб	З <sub>дн</sub> , руб	T <sub>р</sub> , раб. дн	З <sub>осн</sub> , руб
Руководитель	26000	0.3	0.2	1.3	50700	2179	90	196110
Инженер	15000	0.3	0.2	1.3	29250	1127	90	101430

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций (при исполнении государственных и общественных обязанностей, при совмещении работы с обучением, при предоставлении ежегодного оплачиваемого отпуска и т.д.).

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$Z_{\text{доп}} = Z_{\text{осн}} \cdot k_{\text{доп}},$$

где  $k_{\text{доп}}$  – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,12).

Дополнительная заработная плата для руководителя:

$$Z_{\text{доп1}} = 196110 \cdot 0.12 = 23533.2 \text{ руб.}$$

Дополнительная заработная плата для инженера:

$$Z_{\text{доп2}} = 101430 \cdot 0.12 = 12171.6 \text{ руб.}$$

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$Z_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}),$$

где  $k_{\text{внеб}}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

Общая ставка взносов в 2021 году составляет 30% (ст. 425, 426 НК РФ), из которых:

- 22 % – на пенсионное страхование;

- 5.1 % – на медицинское страхование;
- 2.9 % – на социальное страхование.

При этом сумма взносов к уплате зависит от того, превысил доход установленный лимит или нет.

Величина отчислений во внебюджетные фонды для руководителя:

$$Z_{\text{внеб1}} = 0.3 \cdot (196110 + 23533.2) = 65892.96 \text{ руб.}$$

Величина отчислений во внебюджетные фонды для инженера:

$$Z_{\text{внеб2}} = 0.3 \cdot (101430 + 12171.6) = 34080.48 \text{ руб.}$$

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов, а именно печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов и т.д. Их величина определяется по следующей формуле:

$$Z_{\text{накл}} = (\text{сумма статей}) \cdot k_{\text{нр}},$$

где  $k_{\text{нр}}$  – коэффициент, учитывающий накладные расходы.

Величину коэффициента накладных расходов примем в размере 16%.

$$Z_{\text{накл}} = (1910 + 1390 + 23533.2 + 12171.6 + 65892.96 + 34080.48) \cdot 0.16;$$

$$Z_{\text{накл}} = 22236.4 \text{ руб.}$$

Результаты представлены в таблице 22.

Таблица 22 – Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект

Наименование статьи	Сумма, руб	Примечание
	Текущий проект	
1 Материальные затраты НТИ	1920	Таблица 18
2. Затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	-	-
3. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	297540	Таблица 21
4. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	35704.8	-
5. Отчисления во внебюджетные	99973.44	-

фонды		
6. Затраты на научные и производственные командировки	-	-
7. Контрагентские расходы	-	-

Продолжение таблицы 11

Наименование статьи	Сумма, руб	Примечание
	Текущий проект	
8. Накладные расходы	22236.4	-
9. Бюджет затрат НИИ	457974.64	Сумма статей 1÷8

### 8.6 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Для определения эффективности исследования рассчитан интегральный показатель эффективности научного исследования путем определения интегрального показателя ресурсоэффективности.

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов выполнения НИР ( $I_{pi}$ ) определен путем сравнительной оценки их характеристик, распределенных с учетом весового коэффициента каждого параметра (таблица 23).

Таблица 23 – Сравнительная оценка характеристик вариантов НИР

Объект иссл. Критерии	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Исп. 1
1 Безопасность при эксплуатации	0.15	3	3
2 Стабильность работы	0.2	4	4
3 Экономичность используемого топлива	0.2	5	3
4 Механические свойства	0.3	5	4
5 Материалоемкость	0.15	4	5
ИТОГО	1	4.35	3.8

Примечание: текущий проект – мобильная газогенераторная установка для получения электроэнергии пиролизным окислением древесного топлива; исп. 1 – предлагаемый на рынке стационарный газогенератор на газовом топливе.

Интегральный показатель ресурсоэффективности рассчитывается по формуле:

$$I_{pi} = \sum a_i + b_i,$$

где  $I_{pi}$  – интегральный показатель ресурсоэффективности для  $i$ -го варианта исполнения разработки;

$a_i$  – весовой коэффициент  $i$ -го варианта исполнения разработки;

$b_i^a$ ,  $b_i^p$  – бальная оценка  $i$ -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

$n$  – число параметров сравнения;

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности рекомендуется проводить в форме таблицы (табл. 23).

Для текущего проекта:

$$I_{p-тп} = 0.15 \cdot 3 + 0.2 \cdot 4 + 0.2 \cdot 5 + 0.3 \cdot 5 + 0.15 \cdot 4 = 4.35.$$

Для исполнения 2:

$$I_{p-исп1} = 0.15 \cdot 3 + 0.2 \cdot 4 + 0.2 \cdot 3 + 0.3 \cdot 4 + 0.15 \cdot 5 = 3.8.$$

Сравнение значений интегрального показателя ресурсоэффективности позволяет понять и выбрать более эффективный вариант решения поставленной в бакалаврской работе технической задачи с позиции финансовой и ресурсной эффективности.

## 8.7 Выводы по разделу

В ходе анализа рынка было выявлено, что в продаже существуют газогенераторы больших размеров, использующих жидкое и газовое невозобновляемое топливо, следовательно, мобильные установки на твердом

древесном топливе (в т.ч. и древесных отходах) будут пользоваться спросом для обеспечения электричеством удаленных районов.

Анализ сильных и слабых сторон работы, а также показателей эффективности возможных исполнений проекта показал, что одним из главных преимуществ проекта является использование в качестве топлива общедоступные древесные материалы, а также мобильность газогенераторной установки.

Разработан план-график проекта, состоящий из 10 пунктов.

Бюджет проекта не превышает 500 тысяч рублей.

По результатам оценки эффективности НИР значение интегрального показателя ресурсоэффективности ИР составило 4.35, по сравнению с 3.8.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы ознакомились с литературой, касающейся темы, а именно ознакомились с существующими видами твердого древесного топлива и рассмотрели их характеристики, достоинства и недостатки для данного процесса газификации. Рассмотрели разные методы газификации топлива и выбрали наиболее подходящий метод для проектирования. Ознакомились с особенностями преобразования генераторного газа в электроэнергию.

В процессе выполнения дипломной работы произвели технологические и механические расчеты элементов газогенераторной установки. При выполнении технологических расчетов определили необходимые размеры газогенератора исходя из материального баланса процесса газификации твердого древесного топлива; подобрали тип циклона в зависимости от вида твердых частиц в газе, рассчитали его размеры; спроектировали теплообменник-очиститель, провели тепловой расчет, рассчитали ориентировочную поверхность теплообмена, выяснили расход холодного теплоносителя.

Также при выполнении дипломной работы произвели механические расчеты элементов газогенераторной установки, а именно рассчитали на прочность цилиндрические обечайки и плоскую приварную крышку газогенератора, рассчитали укрепление отверстия в корпусе газогенератора; рассчитали на прочность цилиндрическую обечайку и коническое днище циклона, а также плоскую круглую приварную крышку, ослабленную одним отверстием; рассчитали на прочность цилиндрическую обечайку теплообменника и очистительной трубы, трубную решетку, плоское приварное днище, ослабленное отверстием для слива конденсата, а также плоскую приварную крышку, ослабленную одним отверстием для

очистительной трубы. При всех расчетных значениях выполняются условия прочности конструкции.

Таким образом, в процессе выполнения дипломной работы была спроектирована газогенераторная установка, состоящая из газогенератора для газификации твердого топлива, циклона для очистки генераторного газа от твердых крупных частиц, теплообменника-очистителя для охлаждения и тонкой очистки генераторного газа.

Подобные конструкции реализовывались некоторыми научными деятелями. Опыты показали положительные результаты в получении электроэнергии в двигателе внутреннего сгорания из генераторного газа.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Артамонов, М. Д. Автотракторные газогенераторы [Текст] / Артамонов М. Д. - М. : Сельхозгиз, 1937 г. – 169 с.
- 2 Кочнев, А. М. Лесотранспортные машины : учебное пособие для спо / А. М. Кочнев, Г. М. Анисимов ; под общей редакцией Г. М. Анисимова. — Санкт-Петербург : Лань, 2020. — 448 с.
- 3 Николаева, О. Н. Картографическое обеспечение рационального природопользования региона : монография / О. Н. Николаева. — Новосибирск : СГУГиТ, 2018. — 170 с.
- 4 Глебов, И. Т. Гнутье древесины и древесных материалов : учебное пособие / И. Т. Глебов, В. Г. Новоселов. — Санкт-Петербург : Лань, 2020. — 68 с.
- 5 Дорфман, М.Е. Газогенераторная установка для двигателей малой мощности : учебное пособие / М.Е. Дорфман ; под редакцией Н.В. Шишакова. — Москва : Заготиздат, 1945. — 75 с.
- 6 Подлесный, Д.Н. : Фильтрационное горение бидисперсных топливных систем и высокодисперсных топлив : Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / Д.Н. Подлесный ; Черноголовка : 2018 – 112 с.
- 7 Анисимов, Г. М. Лесотранспортные машины : учебное пособие для вузов / Г. М. Анисимов, А. М. Кочнев. — 2-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2021. — 448 с.
- 8 Гинзбург Д.Б. Газогенераторные установки. Ч.2. : учебник / Д.Б. Гинзбург ; под редакцией Б.С. Швецова. — Государственное издательство легкой промышленности : Москва-Ленинград :1936. — 603 с.
- 9 Расчет циклона : методические указания по выполнению расчетно-графической работы для студентов 5 и 6 курсов специальности 1-70 04 02 "Теплогазоснабжение, вентиляция и охрана воздушного бассейна" /

сост. В. Д. Сизов, В. Н. Короткий, И. С. Бракович. - Минск : БНТУ, 2010. - 21 с.

10 Кобзарь И.Г., Козлова В.В. Процессы и аппараты защиты окружающей среды: Сборник практических работ по дисциплине "Процессы и аппараты защиты окружающей среды". - Ульяновск: УлГТУ, 2007. - 27 с

11 Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. / Н.Б. Варгафтик. М.: Наука, 1972. 720 с.

12 Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А.. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. - Л.: Химия, 1981. - 560с

13 ГОСТ 34233.1 – 2017 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Общие требования. - М.: Изд-во стандартов, 2017.

14 Конструирование и расчет элементов оборудования отрасли. Ч. I. Тонкостенные сосуды и аппараты химических производств: учебное пособие / сост. В.М. Беляев, В.М. Миронов; ТПУ. – 3-е изд., доп. и испр. – Томск: Изд-во ТПУ, 2016. – 314 с.

15 ГОСТ 34233.2 – 2017 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет цилиндрических и конических обечаек, выпуклых и и плоских днищ и крышек. - М.: Издво стандартов, 2017.

16 ГОСТ 34233.3 – 2017 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Укрепление отверстий в обечайках и днищах при внутреннем и наружном давлениях. Расчет на прочность обечаек и днищ при внешних статических нагрузках на штуцер. - М.: Изд-во стандартов, 2017.

17 ГОСТ 34233.4 – 2017 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет на прочность и герметичность фланцевых соединений. - М.: Изд-во стандартов, 2017.

18 Лацинский А.А., Толчинский А.Р. Основы конструирования и расчета химической аппаратуры: Справочник. 3-е изд., стереотипное

19 Федеральный закон №426-ФЗ от 28 декабря 2013 г

20 "Трудовой кодекс Российской Федерации" от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 01.04.2019)

21 ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТРУДОВОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА. [Электронный ресурс]: Эффективность трудовой деятельности человека в значительной степени зависит от предмета и орудий труд, 2014. Режим доступа: <https://lektsii.com/1-7041.html> (дата обращения: 17.05.21).

22 А. Т. Смирнов, А. Дурнев, Крючек, Шахраманьян. Безопасность жизнедеятельности: учебное пособие. – М.: Просвещение, 2005 г.

23 А-92 Оценка тяжести и напряженности трудового процесса при проведении специальной оценки условий труда: лаборат. практ./ Сост.: И.И. Бузуев, И.А. Сумарченкова, Л.В. Сорокина.- Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2016 г. 96 с.

24 ГОСТ 12.0.003-2015 Система стандартов безопасности труда. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация

25 Либерман, Я. Л. Безопасность жизнедеятельности : учебное пособие / Я. Л. Либерман, Л. Н. Горбунова. — Красноярск : СФУ, 2019. — 316 с. — ISBN 978-5-7638-4233-3. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/157540> (дата обращения: 09.05.2021). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

26 СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95\*

27 ГОСТ 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

28 ГОСТ 12.4.011-89 (ССБТ). Средства защиты работающих. Общие требования и классификация

29 МР 2.2.7.2129-06 Режимы труда и отдыха работающих в холодное время на открытой территории или в неотапливаемых помещениях

30 СанПиН 1.2.3685-21 "Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания"

31 ГОСТ 12.1.010-76 Система стандартов безопасности труда. Взрывобезопасность. Общие требования.

32 ГОСТ 12.1.004-91 Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования.

33 Назаренко О. Б. Безопасность жизнедеятельности: учебное пособие / О. Б. Назаренко, Ю. А. Амелькович; Томский политехнический университет. – 3-е изд., перераб. и доп. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 178 с

34 Де, В. А. Экологическая безопасность производств лесопромышленного комплекса : учебное пособие / В. А. Де. — Санкт-Петербург : СПбГЛТУ, 2019. — 128 с. — ISBN 978-5-9239-1134-3. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/128904> (дата обращения: 10.05.2021). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

35 ГОСТ 17.1.3.13-86 Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к охране поверхностных вод от загрязнения.

36 Природные пожары и борьба с ними : учебное пособие / О. Г. Удалова, М. А. Козаченко, Д. А. Колганов, А. В. Егупова ; под редакцией Д. А. Соловьева. — Саратов : Саратовский ГАУ, 2019. — 124 с. — ISBN 978-5-00140-322-7. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/137491> (дата обращения: 10.05.2021). — Режим доступа: для авториз. пользователей.