

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

Исследовательская школа химических и биомедицинских технологий
Направление подготовки 18.04.01 Химическая технология

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Интеграция процесса Фишера-Тропша и совместного высокотемпературного электролиза CO ₂ и H ₂ O с получением синтез-газа

УДК 662.76:544.64

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
9ДМ91	Кузнецов Максим Тарасович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Научный сотрудник	Болдырев Станислав	К.Т.Н		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Якимова Татьяна Борисовна	К.Э.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

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

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП 18.04.01 Химическая технология	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Пестряков А.Н.	Д.Х.Н.		

**Планируемые результаты освоения ООП
«Перспективные химические и биомедицинские технологии»**

Код компетенции	Наименование компетенции
Общекультурные (универсальные) компетенции	
УК(У)-1	Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий
УК(У)-2	Способен управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла
УК(У)-3	Способен организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной цели
УК(У)-4	Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном (-ых) языках (-ах), для академического и профессионального взаимодействия
УК(У)-5	Способен анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия
УК(У)-6	Способен определить и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки
Общепрофессиональные компетенции	
ОПК(У)-1	Готовность к коммуникации в устной и письменной формах на русском и иностранном языках для решения задач профессиональной деятельности;
ОПК(У)-2	Готовность руководить коллективом в сфере своей профессиональной деятельности, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия;
ОПК(У)-3	Способность к профессиональной эксплуатации современного оборудования и приборов в соответствии с направлением и профилем подготовки
ОПК(У)-4	Готовность к использованию методов математического моделирования материалов и технологических процессов, к теоретическому анализу и экспериментальной проверке теоретических гипотез;
ОПК(У)-5	Готовность к защите объектов интеллектуальной собственности и коммерциализации прав на объекты интеллектуальной собственности
Профессиональные компетенции выпускников	
ПК(У)-1	Способность организовывать самостоятельную и коллективную научно-исследовательскую работу, разрабатывать планы и программы проведения научных исследований и технических разработок, разрабатывать задания для исполнителей
ПК(У)-2	Готовность к поиску, обработке, анализу и систематизации научно-технической информации по теме исследования, выбору методик и средств решения задачи
ПК(У)-3	Способность использовать современные приборы и методики, организовывать проведение экспериментов и испытаний, проводить их обработку и анализировать их результаты
ПК(У)-18	Способность и готовность к созданию новых экспериментальных установок для проведения лабораторных практикумов
ПК(У)-19	Готовность к разработке учебно-методической документации для реализации образовательных программ
ДПК(У)-1	Готовность к созданию химических соединений, материалов и изделий биомедицинского назначения и (или) их физико-химического анализа с учетом требований охраны здоровья и безопасности труда, защиты окружающей среды.

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

Исследовательская школа химических и биомедицинских технологий
Направление подготовки 18.04.01 Химическая технология

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП
18.04.01 Химическая технология
_____ А.Н. Пестряков
15.03.2021 г.

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
9ДМ91	Кузнецову Максиму Тарасовичу

Тема работы:

Интеграция процесса Фишера-Тропша и совместного высокотемпературного электролиза
CO₂ и H₂O с получением синтез-газа

Утверждена приказом директора (дата, номер)

112-29/с от 22.04.2021

Срок сдачи студентом выполненной работы:

11.06.2021 г.

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе</p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Объектом исследования является установка получения синтез-газа совместным высокотемпературным электролизом CO₂ и H₂O</p>
<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной</i></p>	<ol style="list-style-type: none">1 Литературный обзор2 Объект и методология исследования3 Результаты и их обсуждение4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение5 Социальная ответственность <p>Заключение</p>

<i>работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i>	
Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i>	
Раздел	Консультант
Социальная ответственность	Романова Светлана Владимировна, старший преподаватель
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Якимова Татьяна Борисовна, доцент
Раздел ВКР на иностранном языке	Кобзева Надежда Александровна, доцент
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Литературный обзор	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	15.03.2021 г.
--	---------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Научный сотрудник	Болдырев Станислав	к.т.н.		15.03.2021 г.

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
9ДМ91	Кузнецов Максим Тарасович		15.03.2021 г.

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

Исследовательская школа химических и биомедицинских технологий
Направление подготовки 18.04.01 Химическая технология
Уровень образования магистратура
Период выполнения весенний семестр 2020/2021 учебного года

Форма представления работы:

магистерская диссертация

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	11.06.2021 г.
--	---------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
22.03.2021 г.	Разработка раздела «Введение»	10
05.04.2021 г.	Разработка раздела «Литературный обзор»	10
19.04.2021 г.	Разработка раздела «Объект и методология исследования»	10
10.05.2021 г.	Разработка разделов «Результаты и их обсуждение»	10
24.05.2021 г.	Разработка разделов «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» и «Социальная ответственность»	10
04.06.2021 г.	Оформление ВКР	10
16.06.2021 г.	Представление ВКР	40

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Научный сотрудник	Болдырев Станислав	к.т.н.		15.03.2021

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП 18.04.01 Химическая технология	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Пестряков А.Н.	д.х.н.		15.03.2021

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

Студенту:

Группа	ФИО
9ДМ91	Кузнецов Максим Тарасович

Школа	ИШХБМТ	Отделение школы (НОЦ)	-
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	18.04.01 Химическая технология

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

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	- стоимость материалов и оборудования; - квалификация исполнителей; - трудоёмкость работы.
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	- районный коэффициент- 1,3; - накладные расходы – 16%; - норма амортизации 20%.
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	- страховые взносы во внебюджетные фонды 30%

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	Анализ конкурентных технических решений, проведение SWOT-анализа, оценка готовности проекта к коммерциализации
2. <i>Разработка устава научно-технического проекта</i>	Определение целей и результатов проекта, организационной структуры проекта
3. <i>Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	Формирование плана и графика проекта: - определение структуры работ; - определение трудоемкости работ; - разработка диаграммы Ганта. Формирование бюджета затрат проекта.
4. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	Расчет показателей сравнительной эффективности проекта, интегрального показателя ресурсоэффективности

Перечень графического материала

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

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	15.03.2021
---	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Якимова Татьяна Борисовна	К.Э.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
9ДМ91	Кузнецов Максим Тарасович		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
9ДМ91	Кузнецов Максим Тарасович

Школа	ИШХБМТ	Отделение (НОЦ)	-
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	18.04.01 Химическая технология

Тема ВКР:

Интеграция процесса Фишера-Тропша и совместного высокотемпературного электролиза CO ₂ и H ₂ O с получением синтез-газа	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объект исследования – Установка получения синтез-газа Рабочая зона – Закрытая/открытая площадка Область применения – Нефтехимическая промышленность
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	- Федеральный закон «О специальной оценке условий труда»; - Федеральный закон «О промышленной безопасности опасных производственных объектов»; - Федеральный закон «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности»; Федеральный закон «Об основах охраны труда в РФ» - Трудовой кодекс РФ.
2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	Вредные факторы: 1. Повышенный уровень общей вибрации; 2. Повышенный уровень шума; 3. Недостаточная освещенность рабочей зоны. Опасные факторы: 4. Высокая температура поверхности оборудования.
3. Экологическая безопасность:	- Анализ воздействия объекта на атмосферу (тепловые загрязнения); - Анализ воздействия объекта на гидросферу (техническая вода); - Анализ воздействия объекта на литосферу (техническая вода).
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	Возможные ЧС: землетрясения, утечка газа, пожарная и взрывная опасность, ураганы. Наиболее типичная ЧС: пожарная и взрывная опасность.
Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
15.03.2021	

Задание выдал консультант:

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

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
9ДМ91	Кузнецов Максим Тарасович		

Реферат

Выпускная квалификационная работа содержит 113 страниц машинописного текста, 30 рисунков, 27 таблиц, 65 источника литературы.

Ключевые слова: синтез-газ, высокотемпературный электролиз, пинч-анализ, теплообменная сеть, процесс Фишера-Тропша.

Объектом исследования является установка получения синтез-газа совместным высокотемпературным электролизом CO_2 и H_2O .

Цель работы – исследование теплообменной сети установки совместного высокотемпературного электролиза CO_2 и H_2O с учетом интеграции процесса Фишера-Тропша.

В процессе исследования была произведена экстракция данных установки получения синтез-газа, разработана ее имитационная модель, а также были разработаны технологические схемы с учетом топлива различного типа.

Разработанные технологические схемы установки получения синтез-газа располагают печью, а также 10 рекуперативными и 5 утилитными теплообменными аппаратами общей площадью 3450 м², что позволяет им потреблять не более 4575 кВт тепла извне.

Область применения: химическая промышленность, нефтехимическая промышленность.

В разделе «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» описана ресурсоэффективность разработанных схем и определены их слабые и сильные стороны.

В разделе «Социальная ответственность» описаны мероприятия по безопасному ведению технологического процесса.

Содержание

Введение	12
1 Литературный обзор.....	13
1.1 Основные установки получения синтез-газа	14
1.2 Методы синтеза энергоэффективных теплообменных сетей	26
2 Объект и методология исследования	31
2.1 Объект исследования	31
2.2 Моделирование установки получения синтез-газа.....	33
2.3 Методология определения минимальной разности температур с учетом изменения целевой температуры потоков	35
2.4 Методология определения параметров горения топлива.....	40
3 Результаты и их обсуждение	44
3.1 Результаты предварительного анализа исследуемого процесса	44
3.2 Результаты моделирования установки получения синтез-газа.....	47
3.3 Результаты исследования теплообменной сети «сценарий I»	49
3.4 Результаты исследования теплообменной сети «сценарий II»	53
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение ...	61
4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения исследования с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	61
4.2 Планирование научно-исследовательских работ	67
4.3 Бюджет научно-исследовательской работы.....	70
4.4 Определение ресурсосберегающей, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности проекта	75
5 Социальная ответственность	78
5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	78
5.2 Производственная безопасность	80
5.3 Экологическая безопасность	85
5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	88
Заключение	91

Список публикаций студента	92
Список использованных источников	93
Приложение А	100
Приложение Б.....	101
Приложение В	103

Введение

Для современной промышленности синтез-газ является основным сырьем в производстве метанола, аммиака, а также при производстве синтетических жидких углеводородов (СЖУ) [1]. Снижение денежных затрат на производство синтез-газа может существенно удешевить продукты его конверсии. Особенно сильно от цены на синтез-газ зависит рентабельность производства СЖУ [2], а значит удешевление производства первого может сделать технологию получения СЖУ более рентабельной. Данный факт особенно важен для стран, в которых нет собственных нефтяных месторождений.

На сегодняшний день существует множество способов получения синтез-газа, но большая их часть была разработана еще в 90-х годах XX века. Несомненно, с развитием технологии данные методы подвергались изменениям с целью повышения их энергоэффективности и ресурсосбережения, однако аппаратное оформление установок получения синтез-газа практически не изменилось. Одним из основных пунктов неэффективного использования энергии на них является увеличение степеней рекуперации тепловой энергии технологического процесса.

Одним из наиболее эффективных и экологически чистых способов получения синтез-газа является совместный высокотемпературный электролиз CO_2 и H_2O . Однако действующих промышленных установок, основанных на данной технологии на сегодняшний день, не существует. Поэтому исследование влияния структуры теплообменной сети на потребление энергии в производстве синтез-газа может существенно помочь при проектировании энергоэффективной и экологически безопасной установки по его производству совместным высокотемпературным электролизом CO_2 и H_2O .

1 Литературный обзор

Трудно представить современное общество без автомобилей, гаджетов или обыкновенной лампы, которая позволяет освещать улицы или дома ночью. А ведь все эти предметы, делающие нашу жизнь легче и безопаснее, поглощают огромное количество энергии. На некоторые из них энергия затрачивается только в момент создания самого предмета, другие же продолжают поглощать энергию в течении всего жизненного цикла. Таким образом, современное общество только за 2019 год использовало около 14 млрд. т. нефтяного эквивалента [3] и данная цифра продолжает расти. Поэтому проблема энергопотребления является одной из важнейших проблем современности.

Источники энергии подразделяются на возобновляемые и невозобновляемые. К возобновляемым источникам относятся ветер, солнце, геотермальные источники и многое другое [4]. Невозобновляемые источники в основной своей массе представляют собой углеводороды [5]. Ввиду того, что генерация энергии, а особенно тепла, с использованием возобновляемых источников энергии малорентабельна, а технологии только развиваются, то более 70 % электроэнергии производится с использованием невозобновляемых источников энергии [6]. Однако стоит отметить, что доля энергии, получаемой с использованием возобновляемых источников энергии, постоянно увеличивается, так, например, за период 2019 – 2020 гг. данная доля увеличилась на 1,5 % [7].

Не стоит забывать, что невозобновляемые источники энергии, а именно углеводороды, используются не только для получения энергии. Из различных соединений, входящих в состав нефти, газа и угля получают как наполные покрытия и корпуса для телефонов, так и элементы высокоточных приборов и составные части космического корабля. Однако все это может привести к нехватке углеводородного сырья. Поэтому в последнее время ученые стали все чаще обращать свое внимание на создание синтетической нефти при

помощи процесса Фишера-Тропша [8]. Для повышения эффективности данного процесса, а также его рентабельности необходимо не только улучшать саму технологию, а именно модифицировать катализаторы [9], модернизировать установку в целом [10], но и удешевлять стоимость сырья, а также снижать его зависимость от нефти и газа [11].

Сырьем для процесса Фишера-Тропша является синтез-газ, который на сегодняшний момент производится в огромных количествах. Однако большая его часть идет на производство метанола [12], СЖУ [13], бутиловых и др. спиртов [14] и аммиака [15], это связано с большой рентабельностью данных процессов. Ввиду огромного потребления синтез-газа и возможности его использования для производства синтетической нефти необходимо существенно повысить энергоэффективность установок по его синтезу. Это в первую очередь связано с тем, что данные установки не отвечают современным энергетическим требованиям, т.к. были построены еще в прошлом веке. Поэтому снижение энергопотребления, за счет модернизации установки, и использование неуглеводородного сырья для производства синтез-газа является ключевой целью данной работы.

1.1 Основные установки получения синтез-газа

В данном разделе приведен обзор основных установок получения синтез-газа и их технологических схем, а также разобран новый способ получения синтез газа путем совместного высокотемпературного электролиза CO_2 и H_2O .

1.1.1 Паровая конверсия природного газа

Паровая конверсия метана или, как его принято называть, одноступенчатый риформинг является наиболее старым способом производства синтез-газа, а как следствие, он менее энергоэффективен в

отличие от других способов его получения. Суть данной технологии заключается в конверсии природного газа в трубчатой печи при высокой температуре и сравнительно низком давлении [16]. Одним из основных недостатков одноступенчатого риформинга можно выделить большой размер радиационной камеры в печи риформинга, что приводит к значительному объему образующихся топочных газов. В результате образовавшийся избыток тепла приводит к перепроизводству пара, что существенно снижает энергоэффективность данной технологии. Далее мы рассмотрим 2 наиболее современные технологии получения синтез-газа одноступенчатым риформингом.

1.1.1.1 Классическая паровая конверсия природного газа

Несмотря на то, что установка паровой конверсии природного газа является энергозатратной, она способна использовать в качестве сырья не только природный газ, но и газовый конденсат, а также пропан-бутановые смеси. Универсальность сырья рассматриваемой установки является несомненным ее достоинством, однако на сегодняшний день это скорее норма, чем какая-то выдающаяся черта технологии производства синтез-газа.

На рисунке 1.1 приведена обобщенная технологическая схема одноступенчатого риформинга природного газа. Данная технологическая схема включает блок предварительной очистки сырья, блок предварительной конверсии, блок паровой конверсии углеводородов, с возможностью возвращения CO_2 в реактор для повышения степени конверсии синтез-газа, блок удаления CO_2 , а также блок низкотемпературной очистки или блок короткоциклового адсорбции.

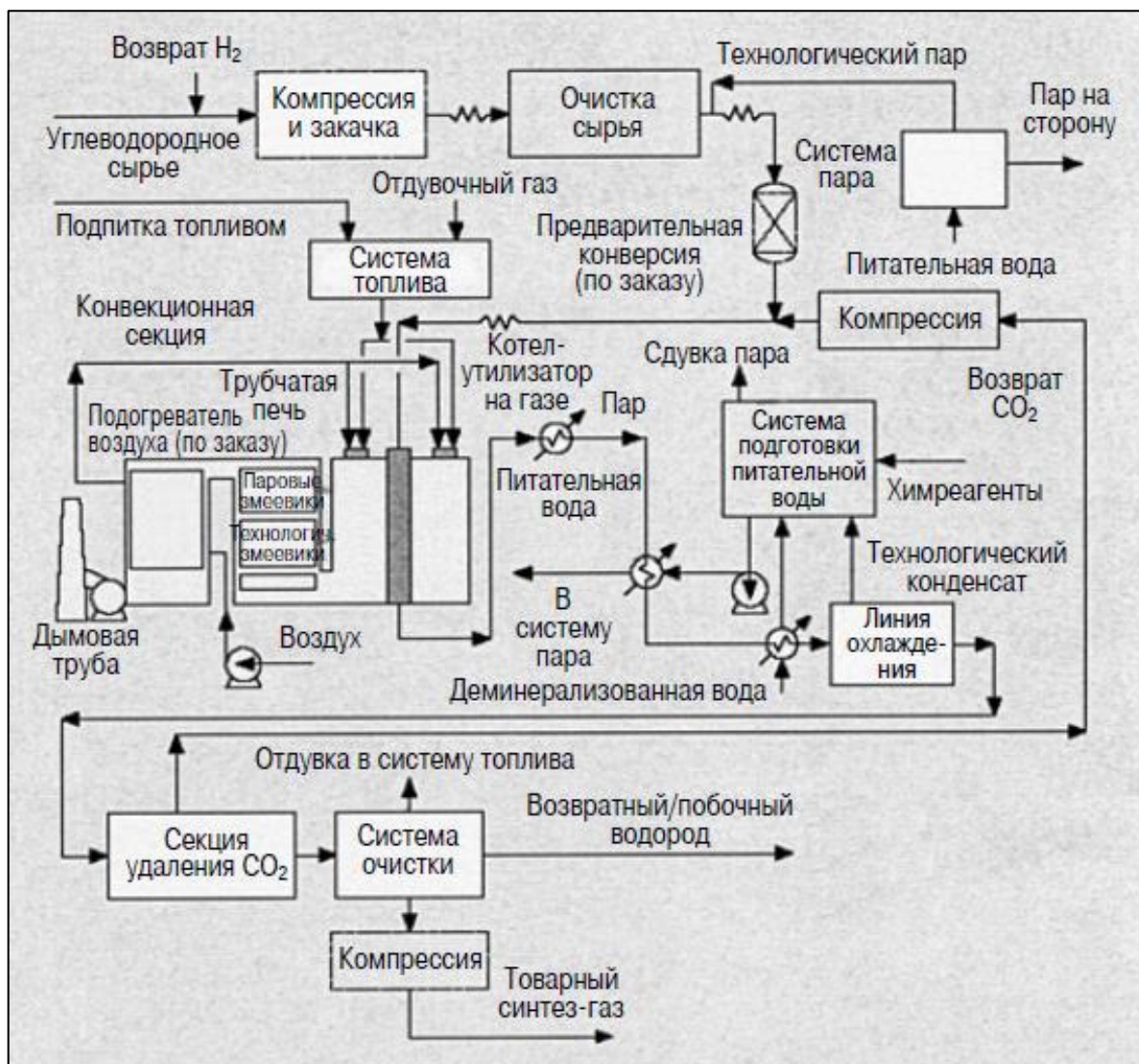


Рисунок 1.1 – Обобщенная технологическая схема паровой конверсии природного газа [17]

Углеводородное сырье попадает в блок очистки, где очищается не только от механических примесей, но и от каталитических ядов. Очищенное сырье смешивается с рециркулирующим CO_2 из блока удаления CO_2 и с технологическим паром. Образовавшаяся газовая смесь нагревается и поступает в трубчатую печь, где и происходит ее конверсия в синтез-газ. По заказу покупателей данная установка может быть оснащена реактором предварительной конверсии, который устанавливается непосредственно перед трубчатой печью. Избыточное тепло конвертированного газа стараются максимально утилизировать путем выработки пара. После

трубчатой печи охлажденный синтез-газ направляется в блок удаления CO_2 и последующую очистку для получения товарного синтез-газа заданного качества.

1.1.1.2 Усовершенствованная паровая конверсия природного газа

Основным отличием усовершенствованной паровой конверсии природного газа, от простой паровой конверсии является использование трубчатого реактора с боковым расположением горелок, использование нового катализатора фирмы Topsoe [17], а также в энергоэффективной утилизации тепла, что предотвращает избыточную выработку технологического пара.

На рисунке 1.2 представлена технологическая схема усовершенствованной паровой конверсии природного газа.

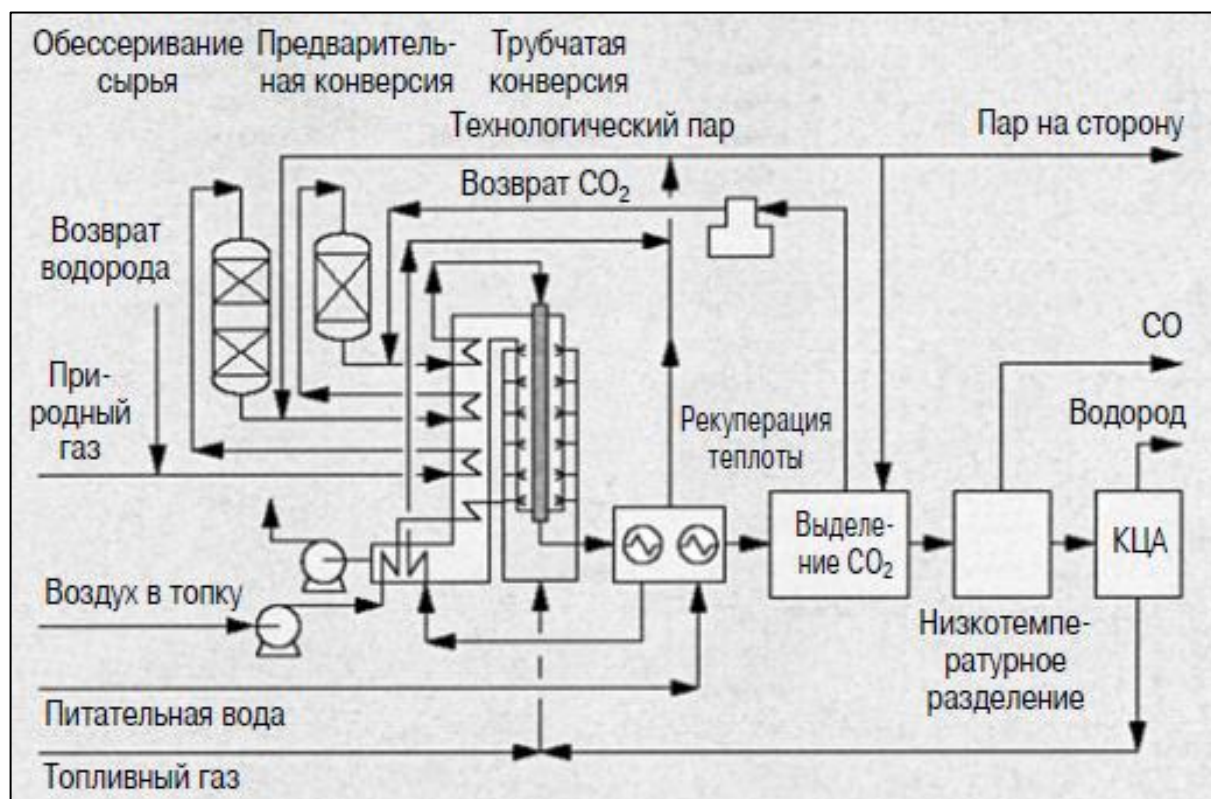


Рисунок 1.2 – Технологическая схема усовершенствованной паровой конверсии метана [17]

Реактор предварительной конверсии, как и в случае обычной паровой конверсии, используется если сырьем являются тяжелые углеводороды. Использование CO_2 , образовавшегося в ходе получения синтез-газа, существенно сокращает экономические затраты на его покупку на стороне. Очистка синтез-газа от других продуктов реакции осуществляется при помощи мембранного разделения, низкотемпературного разделения или при помощи короткоциклового адсорбции, выбор того или иного метода зависит от конечного качества товарного продукта.

1.1.2 Автотермический риформинг природного газа

Под автотермическим риформингом подразумевается процесс получения синтез-газа, состоящего из водорода и монооксида углерода, методом частичного окисления углеводородного сырья кислородом и паром с последующим каталитическим риформингом [18]. Основным сырьем установок автотермического риформинга является природный газ, а также газовый конденсат. Далее мы рассмотрим 2 технологические схемы получения синтез-газа путем автотермической конверсии природного газа и выделим их основные особенности.

1.1.2.1 Автотермический риформинг (Uhde)

Данная технологическая схема предназначена для производства синтез-газа необходимого в дальнейшем производстве аммиака, метанола, синтетического топлива по способу Фишера-Тропша и продуктов оксосинтеза [19]. Сырьем может служить как природный газ, так и непосредственно сам метан, пропан-бутановая смесь, газовый конденсат или вовсе их газовые смеси, это является одним из основных преимуществ

данной технологической схемы. На рисунке 1.3 приведена технологическая схема автотермического риформинга фирмы Uhde.

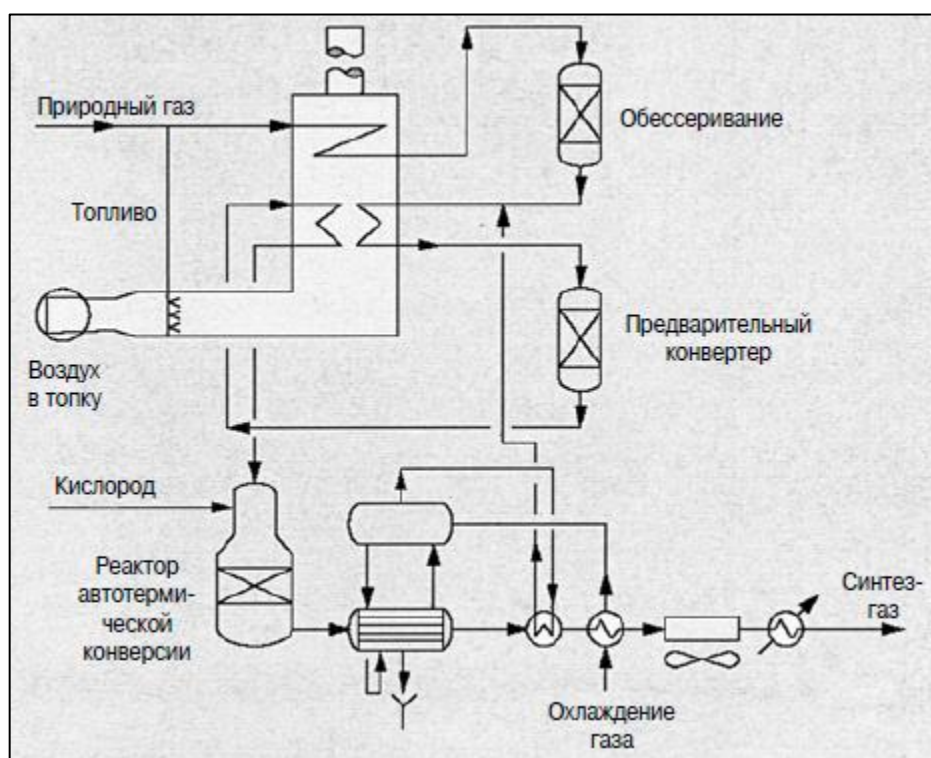


Рисунок 1.3 – Технологическая схема автотермического риформинга фирмы Uhde [19]

Технология автотермического риформинга (Uhde) служит альтернативой обычной паровой конверсии природного газа при получении синтез-газа. Анализируя данную технологическую схему, мы видим, что сырье (природный газ) предварительно нагревается в печи, а затем направляется на сероочистку в обессериватель, затем нагревается повторно и отправляется в адиабатический реактор автотермической конверсии (АТР). АТР является изюминкой данного процесса, т.к. благодаря ему данный процесс обладает таким широким диапазоном «перевариваемого» сырья. Особенность данного реактора заключается в охлаждаемых водой кислородных соплах, находящихся под крышкой реактора [12]. Именно благодаря им АТР осуществляет полное смешение компонентов в зоне горения без применения каких-либо внутренних металлических устройств, к

тому же это не только существенно улучшает вход продукта, но и уменьшает металлоемкость данного реактора, а как следствие и капитальные затраты по сравнению с конкурентами. Пройдя через слой никелевого катализатора, сырье превращается в синтез-газ и выходит из АТР разогретым до 1000-1100 °С, образовавшееся тепло используется для выработки пара высокого давления. После охлаждения образовавшийся синтез-газ направляется на очистку от CO₂ и паров воды. Также существуют технологические схемы, где отфильтрованный CO₂ возвращается в реактор, для повышения степени конверсии природного газа или иного сырья [12]. Данная технология хорошо зарекомендовала себя в Словакии, где на протяжении 10 лет ее тестировали на установке мощностью 12000 м³/ч синтез-газа.

1.1.2.2 Автотермический риформинг (Lurgi)

Технологическая схема автотермического риформинга (Lurgi) представлена на рисунке 1.4.

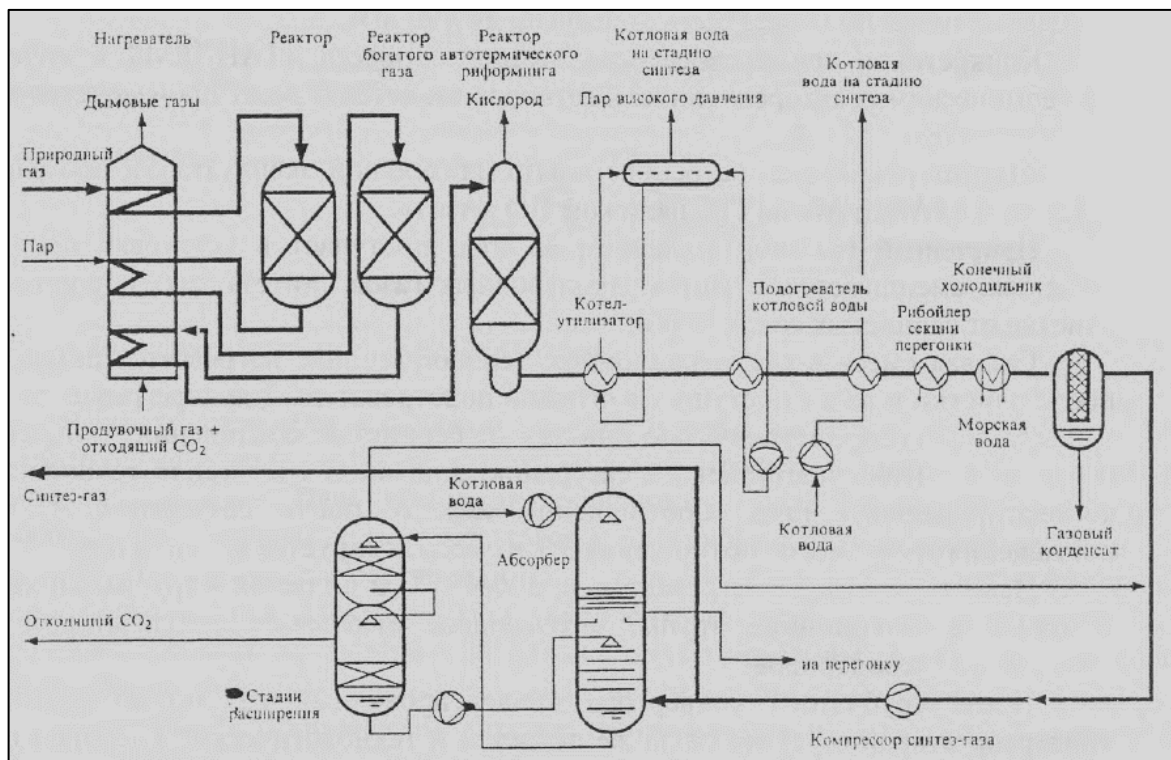


Рисунок 1.4 – Автотермический риформинг (Lurgi) [20]

Сырье проходит через нагреватель, где нагревается путем рекуперативного теплообмена, затем нагретое сырье последовательно попадает в каждый реактор реакторного блока автотермического риформинга, предварительно нагреваясь перед каждым реактором в нагревателе. После реактора образовавшийся синтез-газ проходит ряд рекуперативных теплообменников, где отдает свое тепло котловой воде и попадает в конечный холодильник, где его температура сильно снижается для конденсации части газов, которые образовались в ходе конверсии природного газа. После газового конденсатора синтез-газ направляет в абсорбер, где окончательно очищается от примесей.

Автотермический риформинг фирмы Lurgi практически повторяет технологическую схему фирмы Uhde, однако и обладает рядом отличий. Одним из ярко выраженных отличий является более развитая теплообменная сеть, а также усовершенствованный процесс очистки синтез-газа от CO_2 и паров воды путем абсорбции последних в абсорберах.

1.1.3 Комбинированный риформинг (Lurgi)

Комбинированный риформинг является симбиозом парового риформинга и автотермического.

На первой стадии процесса, комбинированного риформинга, сырьевой поток газа после обессеривания подвергается риформингу в присутствии пара или при высоком давлении (3,5 - 4,0 МПа) и относительно низкой температуре (750 - 780 °С) [20]. Затем подвергнутый риформингу газ смешивают с остальным сырьевым газом в автотермическом реактора при высоком давлении с использованием кислорода. Это существенно повышает выход синтез-газа и снижает энергетические затраты установки в целом. На рисунке 1.5 приведена технологическая схема комбинированного риформинга фирмы Lurgi.

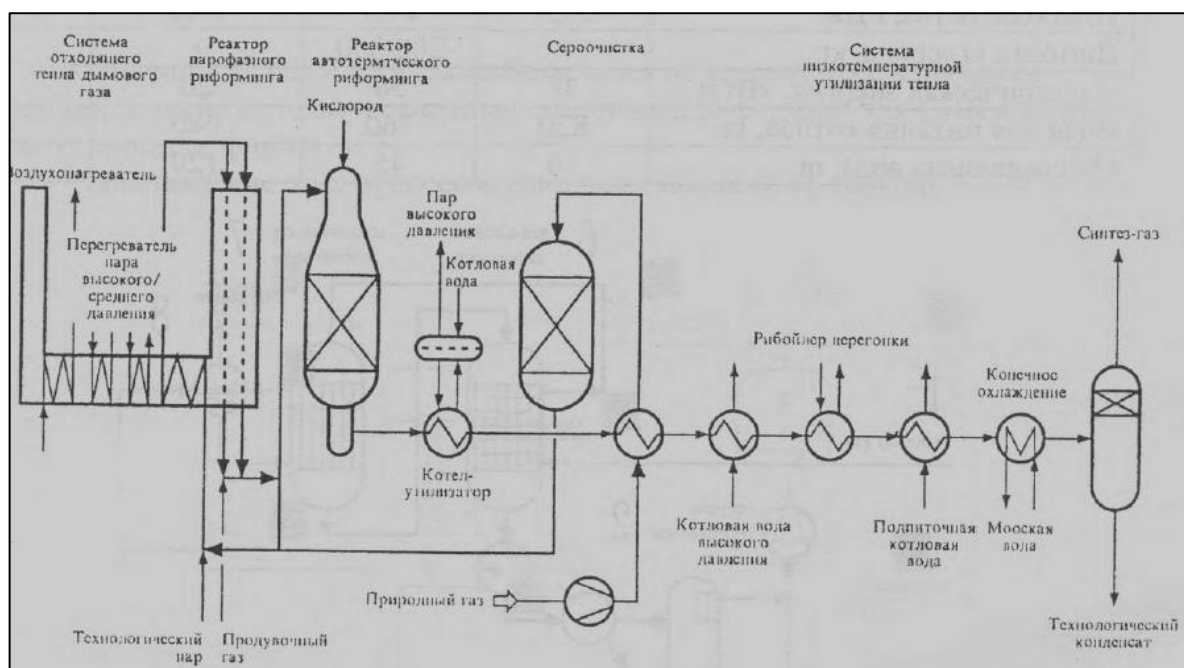


Рисунок 1.5 – Принципиальная схема комбинированного риформинга фирмы «Lurgi» [20]

В таблице 1.1 приведены значение ТЭП для комбинированного и автотермического риформинга.

Таблица 1.1 – ТЭП процессов получения синтез-газа [16]

Схема процесса	Комбинированный риформинг	Автотермический риформинг
Природный газ (сырье + топливо), ГДж	29,3	32,6
Диоксид углерода, кг	-	-
Электрическая энергия, кВт/ч	20	20
Вода для питания котлов, кг	680	620
Охлаждающая вода, м ³	120	120

Из таблицы 1.1 видно, что комбинированный риформинг обладает более низкими энергитическими затратами, что делает его более выгодным и совершенным в сравнении с атотермическим риформингом.

1.1.4 Совместный высокотемпературный электролиз

На сегодняшний момент способ получения синтез-газа из CO_2 и воды путем их совместного высокотемпературного электролиза является наиболее экономичным и энергоэффективным. Данные установки могут располагаться как непосредственно вблизи установок, описанных ранее, так и отдельно от них в местах, где производится избыток CO_2 .

Совместный высокотемпературный электролиз предполагается использовать для получения синтез-газа, который затем будет направляться на производство метанола, СЖУ, бутиловых спиртов и аммиака. Вследствие того, что реакционную массу необходимо разогреть перед подачей в реактор до температуры $800\text{ }^\circ\text{C}$, то существуют технологические схемы, которые основываются на различных источниках тепловой энергии. Одним из ее источников является тепловая энергия АЭС, такая технологическая схема характеризуется низкими операционными затратами. Другим источником тепловой энергии является углеводородное топливо, которое может быть как побочным продуктом производства [21], так и топливом, покупаемым извне.

1.1.4.1 Совместный высокотемпературный электролиз с использованием горячих утилит АЭС

Как обговаривалось ранее при производстве синтез-газа путем совместного высокотемпературного электролиза воды и диоксида углерода сырье необходимо нагревать до высоких температур. Одним из наиболее дешевых и простых способов это сделать является использование тепловых утилит АЭС. Однако данный способ можно назвать экстравагантным, т.к. появляется необходимость совместного расположения установки по производству синтез-газа и АЭС, что существенно повышает опасность такого производства. Использование дешевых горячих утилит с АЭС существенно снизит цену на получаемый синтез-газ и продукты его

конверсии, что может нивелировать высокие транспортные расходы по доставке готового продукта в отдаленные районы России или других стран.

На рисунке 1.6 представлена технологическая схема производства синтез-газа путем совместного высокотемпературного электролиза вода и диоксида углерода с использованием горячих утилит АЭС.

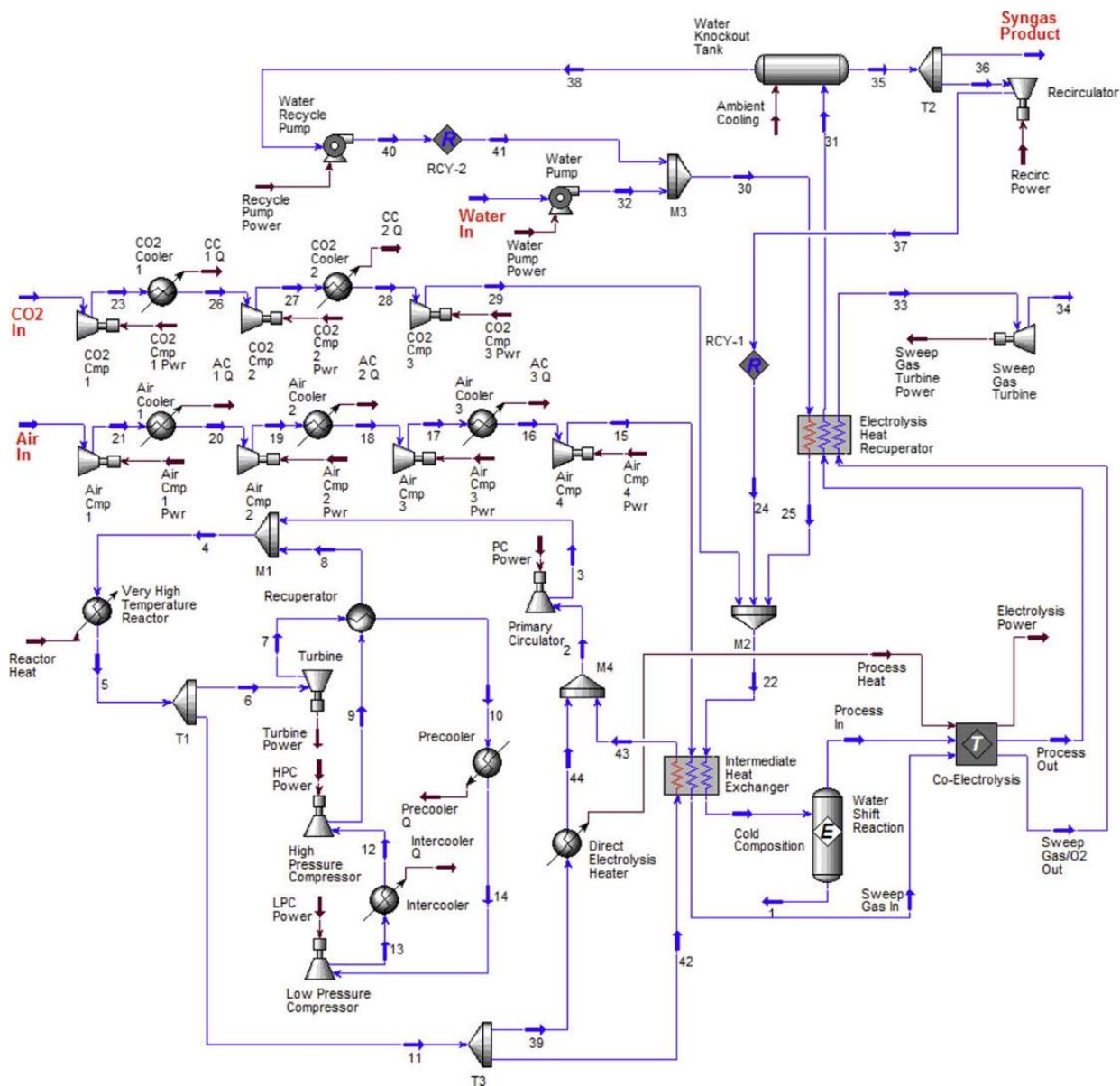


Рисунок 1.6 – Технологическая схема установки совместного высокотемпературного электролиза с использованием горячих утилит АЭС

[22]

Входящий на установку поток воды сжимается до рабочего давления в 3,5 МПа при помощи насоса, затем в смесителе М3 он перемешивается с потоком рециркулирующей воды из водосборного резервуара. После смесителя М3 поток воды направляется в рекуператор электролиза, где испаряется и нагревается за счет тепла процесса электролиза и тепла отводимого потока продувочного воздуха. Далее образовавшийся пар смешивается в смесителе М2 с диоксидом углерода, а также с рециркулирующим синтез-газом из разделителя Т2. Рециркулирующий синтез-газ необходим для обеспечения условия восстановления на паровом / водородном электроде. После смесителя М2 газовая смесь поступает в промежуточный теплообменник (ИХ), где происходит окончательный нагрев парогазовой смеси до рабочей температуры реактора с использованием тепла, получаемого с ядерного реактора. Реакция сдвига вода-газ происходит с нагретой парогазовой смесью в реакторе Water shift reaction. Затем технологический поток поступает в электролизер, где кислород электролитически удаляется из системы с образованием водорода и оксида углерода. Образовавшийся синтез-газ проходит через рекуператор электролиза охлаждаясь, путем нагрева и испарения воды.

1.1.4.2 Совместный высокотемпературный электролиз с использованием тепла углеводородного топлива

Технологическая схема производства синтез-газа на установке совместного высокотемпературного электролиза с использованием тепла углеводородного топлива похожа на предыдущую технологическую схему, однако в качестве генератора тепловой энергии используются печи и/или горелки. Несмотря на схожесть данных схем следует отметить, что использование углеводородного топлива в качестве источника тепла является более безопасным, а также дает возможность производить синтез-газ из CO_2 и H_2O на газоперерабатывающих заводах (ГПЗ) или нефтеперерабатывающих

заводах (НПЗ). Еще одним преимуществом данного способа получения тепла является то, что вместо углеводородного топлива, можно использовать побочные продукты, которые нецелесообразно разделять на составные компоненты или утилизировать иными способами [21].

Среди всех представленных способов получения синтез-газа, способ, рассматриваемый в данном подразделе, является наиболее интересным, т.к. его реализация возможна практически на любом ГПЗ и НПЗ. Также необходимо учесть тот факт, что диоксид углерода, используемый в качестве сырья, может быть получен газификацией угля. Это делает установки совместного высокотемпературного электролиза очень гибкими, т.к. их можно внедрять не только на НПЗ или ГПЗ, но и располагать рядом с электростанциями, что дополнительно позволит снизить выбросы CO_2 в атмосферу.

Также следует отметить большой интерес научного сообществе к данному способу получения синтез-газа. Так, например, некоторые ученые борются со снижением температуры в электрохимическом реакторе. В этом им помогает замена графитовых электродов на металлические электроды различного состава [23]. Другие ученые модифицируют состав электродов для увеличения скорости протекания электрохимических реакций [24].

1.2 Методы синтеза энергоэффективных теплообменных сетей

В данном подразделе разобраны основные способы синтеза энергоэффективных теплообменных сетей.

1.2.1 Пинч-анализ

Одним из лучших инструментов по синтезу теплообменных сетей является пинч-анализ. Он позволяет определять количество теплообменников, их поверхность, движущую силу теплообмена (разность

температур теплоносителей на входе и выходе в теплообменнике), а также позволяет определять топологию теплообменной сети [25]. Основное отличие пинч-анализа от других методов синтеза теплообменных сетей заключается в том, что в его основе лежат термодинамические законы, а также то, что он способен одновременно учитывать как особенности исследуемой установки (ограниченность пространства, коксуемость технологических потоков и т.д.) и различные параметры, влияющие на ее работу, (непостоянство температуры, гидравлическое сопротивление, зависимость теплоемкости от температуры и т.д.), так и взаимное влияние данных параметров друг на друга.

Основным достоинством пинч-анализа при синтезе теплообменных сетей является то, что решения, полученные с его помощью, можно считать глобально оптимальными [26]. Это означает, что такие теплообменные сети обладают экономически целесообразной рекуперацией энергии. Однако данный результат возможно достичь только в том случае, если проектировщик, использующий пинч-анализ, обладает большим количеством опыта в составлении теплообменных сетей [27].

Для упрощения синтеза теплообменных сетей, с использованием пинч-анализа предлагается использовать, помимо составной кривой (СК) и большой составной кривой (БСК), график зависимости температуры потока от энтальпии (СТЕР) [28]. График СТЕР отображает температуры и тепловые нагрузки для каждого технологического потока по отдельности, а не для составного потока, как это отображается на графике СК. Т.к. на графике СТЕР представлены отдельные потоки, то проектировщик может изменять их технологические параметры (если это допустимо технологическим процессом) для повышения энергоэффективности. Например, проектировщик может изменить температуру конкретного горячего потока для того, чтобы увеличить рекуперацию тепла. В общем случае график СТЕР оперирует отдельными потоками, что позволяет уменьшить количество однотипных расчетов при проектировании теплообменной сети и подборе утилит.

Эффективность данного метода подтверждается тем, что при использовании графика STEP удалось дополнительно снизить затраты горячих утилит на 18,4 % на нефтеперерабатывающем заводе по сравнению с использованием только пинч-анализа [28].

Основным недостатком пинч-анализа является то, что его результатом является область оптимальных решений (конфигураций теплообменной сети). Это в свою очередь существенно усложняет выбор единственного решения, которое одновременно характеризуется минимальными общими годовыми затратами и полностью удовлетворяет всем требованиям установки, для которой спроектирована теплообменная сеть.

1.2.2 Машинные методы синтеза

Машинные методы синтеза теплообменных сетей лишены недостатков пинч-анализа, однако они в основном используются для оптимизации уже существующих теплообменных сетей [29]. Основным недостатком данных методов является сложность достижения глобально оптимальных решений [30], а также невозможность вычислительных операций при существенном усложнении программ. Последний недостаток с каждым годом становится все менее значим, это связано с быстрым развитием вычислительных мощностей компьютеров. Использование машинных методов в основном для оптимизации уже существующих теплообменных сетей связано с тем, что они способны учитывать по отдельности или совместно различные цели оптимизации [27]: минимизация общих приведенных затрат, максимизация рекуперации энергии, минимизация вредных выбросов и т.д.

При написании программ по синтезу теплообменных сетей приходится учитывать огромное количество параметров [27], например, гидравлическое сопротивление в теплообменнике, зависимость температуры пара от перепада давления, загрязнение стенок теплообменных трубок и т.д. Так,

например, авторы [31] интегрировали в свою модель ступенчатой суперструктуры возможность определения теплоемкости технологических потоков в зависимости от температуры с полиномиальным приближением.

Другие авторы [32] сконцентрировали свое внимание на возможности изменения расположения утилитных теплообменников и размещении их в альтернативных местах с целью снижения общих годовых затрат. Однако данная модель используется только для модернизации уже существующих теплообменных сетей и не способна синтезировать их с нуля. Как уже говорилось ранее, для создания модели, которая будет синтезировать глобально оптимальные теплообменные сети, необходимо учитывать большое количество различных факторов, которые могут коррелировать друг с другом. Авторы [33] создали модель для оптимизации теплообменных сетей, которая учитывает непостоянство технологических параметров потока, а именно колебания температуры на входе и выходе из теплообменного аппарата. Начальная теплообменная сеть строится на сеточной диаграмме с учетом критериев выполнимости, колебаний температур, размеров теплообменников и размещения байпаса. После этого определяется площадь технологических и утилитных теплообменников, необходимая для предотвращения критических температурных колебаний и в их отсутствии. Далее используется анализ безубыточности для определения наиболее оптимальной теплообменной сети. Критериями оптимальности в данном случае служат [33]: максимальная рекуперация тепла, размеры теплообменников, потребление утилит и их стоимость.

Другие же авторы используют замену алгоритма решения или надстроек в своих моделях для повышения качества генерируемых теплообменных сетей. Так, например, авторы [34] модифицировали модель ступенчатой надстройки в неструктурную модель с разделением потоков и с неизотермическим слиянием ответвляющихся потоков. Это позволило им добиться синтеза теплообменных сетей с более низкими показателями общегодовых затрат.

При увеличении количества переменных, влияющих на теплообменную сеть, модель существенно усложняется. Это связано с увеличением количества возможных топологий теплообменной сети и с необходимостью определения экономических показателей для каждой из них. Все это в совокупности приводит к существенному увеличению времени расчета. Однако не стоит забывать о том, что данные переменные могут коррелировать между собой, что в свою очередь ведет к еще большему увеличению времени расчета такой модели [35]. Поэтому основным сдерживающим фактором развития машинных методов синтеза теплообменных сетей является вычислительная мощность современных компьютеров на предприятиях и в научно-исследовательских центрах.

2 Объект и методология исследования

Методология исследования взаимного влияния и синергетических эффектов процесса Фишера-Тропша и совместного высокотемпературного электролиза основывается на использовании основных принципов интеграции процессов [35]. Разработка и оптимизация системы рекуперации тепловой энергии производится на основании правил пинч-анализа. Для определения физико-химических свойств технологических потоков и верификации основных соотношений термодинамического равновесия использовано ПО UniSim Design [36].

Основываясь на данных, полученных при анализе исходной технологической схемы исследуемой установки, и, разработанной далее математической модели, проводится определение целевых энергетических значений и тепловых нагрузок горячих и холодных утилит, а также минимальной разности температур (ΔT_{\min}). Далее используя инструменты пинч-анализа, синтезируется теплообменная сеть и проводится ее оптимизация с целью минимизации общегодовых затрат (ТАС).

В данном разделе описаны особенности объекта исследования, а также основные этапы методологии по разработке оптимальной теплообменной сети.

2.1 Объект исследования

На рисунке 2.1 приведена принципиальная технологическая схема производства синтез-газа путем совместного высокотемпературного электролиза CO_2 и H_2O , предложенная в [21].

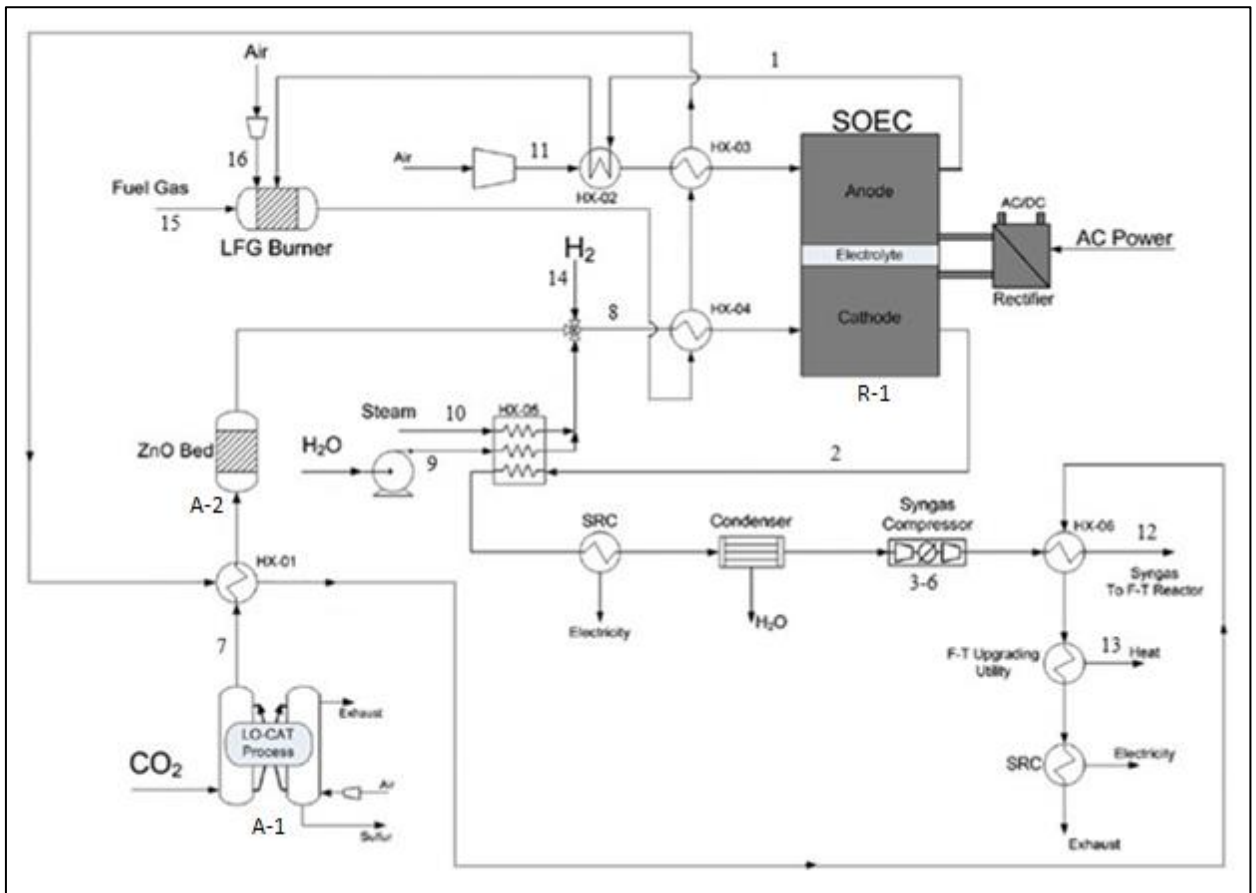


Рисунок 2.1 – Принципиальная технологическая схема установки совместного высокотемпературного электролиза CO_2 и H_2O [21]

Исходный поток диоксида углерода поступает в абсорбер А-1, где очищается от основной массы сероводорода. После абсорбера А-1 CO_2 попадает в теплообменник НХ-01, где нагревается до $375\text{ }^\circ\text{C}$ путем теплообмена с дымовыми газами, которые поступают от горелки В-1. Далее газовый поток диоксида углерода направляется в адсорбер А-2, где доочищается от сероводорода (в конечном CO_2 сероводорода менее 1 ppm). После адсорбера А-2 CO_2 смешивается с паром и водородом. Основная часть пара для реактора R-1 поступает из процесса Фишера-Тропша. Оставшийся пар получают за счет рекуперации тепла с продуктовым потоком реактора R-1 в теплообменнике НХ-05. Полученная парогазовая смесь направляется в теплообменник НХ-04, где нагревается до $800\text{ }^\circ\text{C}$ при помощи теплообмена с дымовыми газами горелки В-1. После теплообменника НХ-04 парогазовая смесь направляется на катод реактора R-1. Продувочный воздух для

анодного пространства реактора R-1 сначала сжимается в компрессоре С-1, а затем последовательно нагревается сначала в теплообменнике НХ-02 до 770 °С путем теплообмена с выходным потоком от анода, а затем в теплообменнике НХ-03 до рабочей температуры 800 °С за счет теплообмена с дымовыми газами горелки В-1. В реакторе R-1 пар и диоксид углерода преобразуются в синтез-газ, который выходит с катода. Образовавшаяся в реакторе R-1 смесь пара и синтез-газа последовательно охлаждается в теплообменнике НХ-05, где она отдает свое тепло на испарение воды, а затем в турбине SRC-1, где тепловая энергия смеси пара и синтез-газа преобразуется в электрическую. После турбины SRC-1 смесь пара и синтез-газа попадает в конденсатор Т-1, где разделяется на воду и товарный синтез-газ. После конденсатора Т-1 товарный синтез-газ поступает на установку компримирования С-2, где сжимается до давления 4,0 МПа, а затем направляется на подогрев в теплообменник НХ-06. После теплообменника НХ-06 товарный синтез-газ поступает в реакторный блок процесса Фишера-Тропша. Дымовые газы горелки В-1, пройдя последовательно теплообменники НХ-04, НХ-03, НХ-01, НХ-06, НХ-07, поступают на турбину SRC-2, где их остаточная тепловая энергия преобразуется в электрическую. После турбины SRC-2 дымовые газы, охлажденные до температуры 100 °С и сбрасываются в атмосферу.

Источником CO₂ для исследуемого процесса получения синтез-газа является установка газификации угля. Производимый синтез-газ используется в качестве сырья для процесса Фишера-Тропша. В ходе данного процесса образуются побочные продукты – легкие топочные газы (ЛТГ), которые используются в качестве топлива на установке производства синтез-газа.

2.2 Моделирование установки получения синтез-газа

Определение параметров технологических потоков в компрессорной станции и состава дымовых газов производится с использованием ПО UniSim

Design. Для этого разработана имитационная математическая модель исследуемой установки на основе данных, представленных в [21].

Для описания термодинамических свойств потоков был использован пакет свойств «Peng-Robinson» [37] (уравнение 2.1).

$$P = \frac{RT}{V_m - b} = \frac{a\alpha}{V_m^2 + 2bV_m - b^2} \quad (2.1)$$

где P – давление, Па;

R – универсальная газовая постоянная, Дж/(К·моль);

T – температура, К;

V_m – молярный объем, м³/моль;

a, b, α – коэффициенты.

Выбор данного пакета свойств основан на том, что уравнение Пенга-Робинсона в полной мере описывает парожидкостное равновесие смесей углеводородов, газов и воды в широком диапазоне.

Следует отметить, что электрохимический реактор исследуемой установки рассматривался как «черный ящик». Данное допущение связано с ограниченными возможностями моделирования электролизеров и свойств электролитов в ПО UniSim.

Ввиду отсутствия данных по составу потока ЛТГ в [21], для его моделирования использованы экспериментальные данные [38], представленные в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Состав ЛТГ [38]

Фракция	Состав, % мас.
C1	39,8
C2 - C4	17,6
C5 - C7	38,49
C8	3,9
C9 - C12	0,21

Для моделирования теплообменного оборудования использован метод «Exchanger design (end point)», это связано с тем, что в [21] отсутствуют

данные о конфигурации теплообменников. Значение перепада давления в аппаратах основывается на исходных данных исследуемой установки [21].

2.3 Методология определения минимальной разности температур с учетом изменения целевой температуры потоков

Определение ΔT_{\min} основывается на минимизации ТАС теплообменной сети [25]. Минимальные ТАС достигаются путем компромисса между операционными и капитальными затратами теплообменной сети и определяются по формуле 2.2 [25].

$$TAC = CAPEX + OPEX \quad (2.2)$$

где CAPEX – капитальные затраты на теплообменную сеть, \$/год;

OPEX – операционные затраты теплообменной сети, \$/год.

Поскольку целевая температура технологических потоков равна 800 °С, то окончательный подогрев холодных потоков предполагается в технологических печах. Поэтому капитальные затраты складываются из затрат на теплообменное оборудование и печь (формула 2.3).

$$CAPEX = \frac{i \cdot (1 + i)^n}{(1 + i)^n - 1} \cdot \left(N_{\min} \cdot \left(a + b \cdot \frac{A^{*c}}{N_{\min}} \right) + (a' + b' \cdot Q_H^{c'}) \right) \quad (2.3)$$

где i – годовая кредитная ставка;

n – срок кредитования, год;

a – стоимость установки теплообменного аппарата, \$;

b – стоимость 1 м² теплообменной поверхности, \$/м²;

c – коэффициент нелинейности стоимости теплообменной поверхности;

A^* – модифицированная теплообменная поверхность рекуперативных теплообменных аппаратов, м²;

N_{\min} – минимальное количество рекуперативных теплообменных аппаратов, шт;

a' – стоимость установки печи, \$;

b' – стоимость передачи 1 кВт тепла в печи, \$/кВт;

c' – коэффициент нелинейности стоимости передачи тепла в печи;

Q_H – мощность горячих утилит, кВт.

Модифицированная теплообменная поверхность рекуперативных теплообменных аппаратов определяется при помощи ПО HILECT [39].

Операционные затраты включают в себя затраты на горячие и холодные утилиты и определяются по следующей формуле:

$$OPEX = P_H \cdot Q_H + P_C \cdot Q_C \quad (2.4)$$

где P_H – стоимость горячих утилит, \$/кВт·год;

P_C – стоимость холодных утилит, \$/кВт·год;

Q_H – мощность горячих утилит, кВт;

Q_C – мощность холодных утилит, кВт.

Исследуемая установка содержит потоки, целевые температуры которых являются гибкими спецификациями, поэтому определение ТАС производится с учетом изменения целевой температуры данных потоков. Общий алгоритм определения минимальных ТАС имеет следующий вид (рисунок 2.2):

- сначала определяются минимальные ТАС на каждом этапе изменения целевой температуры горячего потока;
- среди полученного массива данных выбирается минимальное значение ТАС, соответствующие ему ΔT_{\min} и целевая температура горячего потока;
- далее с учетом новой целевой температуры горячего потока аналогичным образом определяются минимальные ТАС на каждом этапе изменения целевой температуры одного из холодных потоков;
- среди полученного массива данных выбираются потоки, при изменении целевых температур которых были достигнуты меньшие значения ТАС, чем при изменении целевой температуры только горячего потока;
- далее определяются минимальные ТАС на каждом этапе совместного изменения целевых температур холодных потоков, выявленных ранее;

- среди полученного массива данных выбирается минимальное значение TAC, соответствующие ему ΔT_{\min} и целевые температуры холодных потоков.

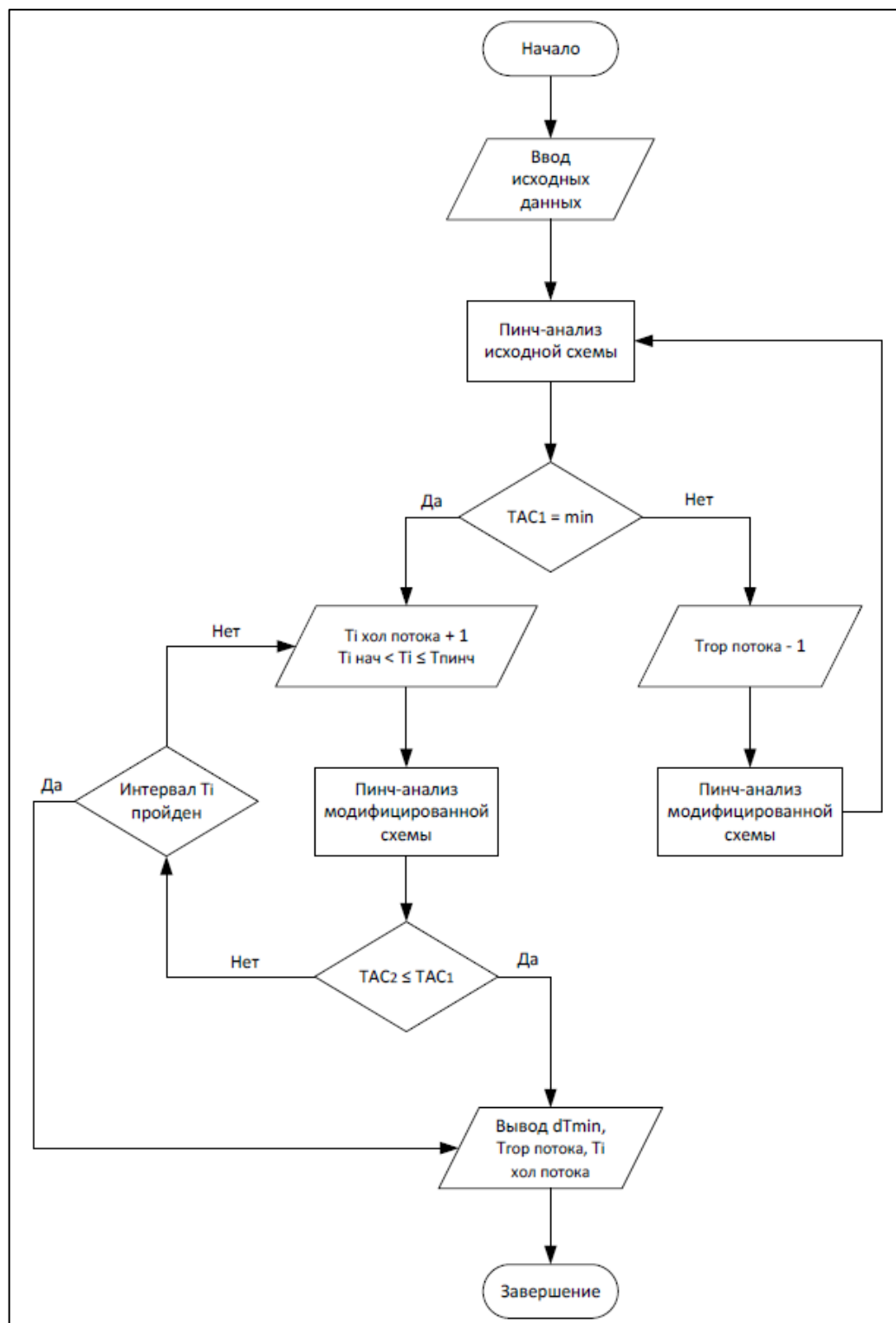
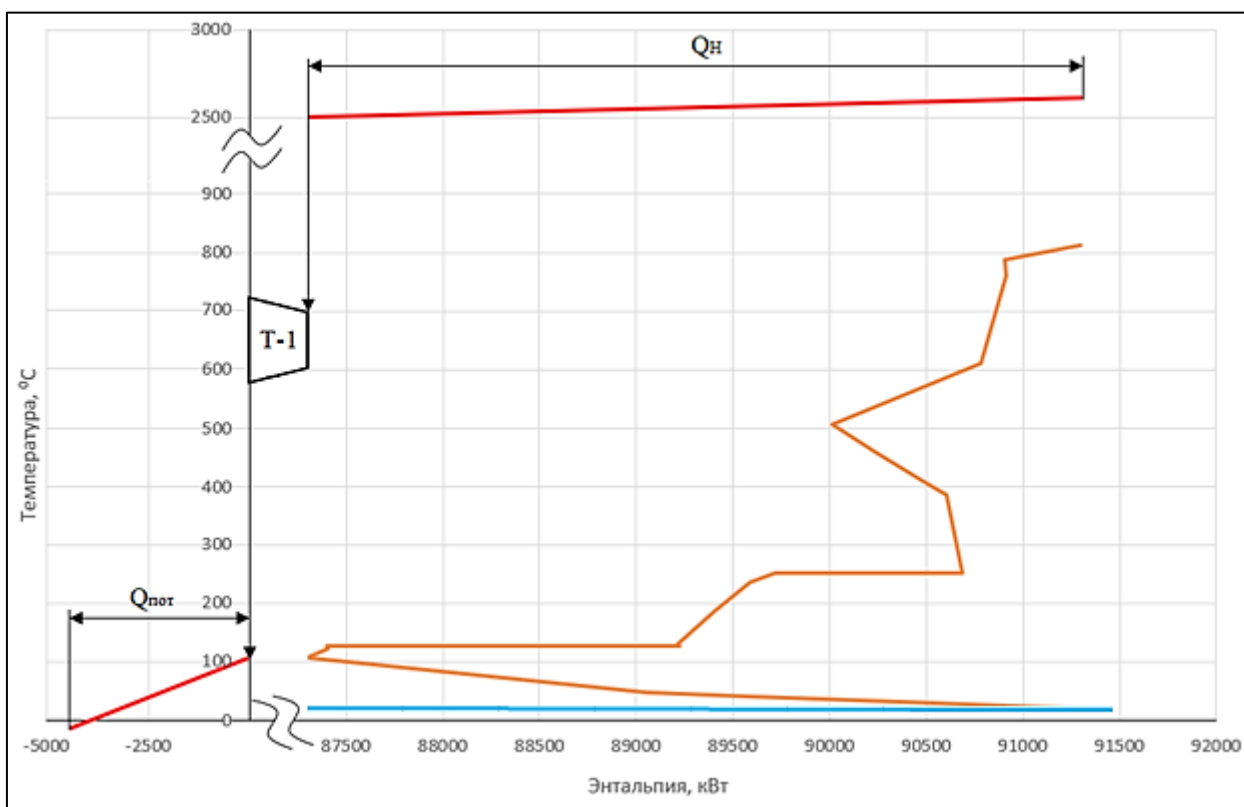


Рисунок 2.2 – Блок-схема методологии определения минимальных общегодовых затрат

При использовании в качестве горячих утилит ЛТГ возможна когенерация тепла и электричества. Это связано с тем, что расход ЛТГ является фиксированной величиной, которая зависит от производительности процесса Фишера-Тропша. Предполагается, что при сжигании ЛТГ в печи, образующиеся дымовые газы, сначала нагревают холодные потоки до целевых температур, а затем направляются на газовую турбину для выработки электроэнергии (рисунок 2.3).



Т-1 – газовая турбина, Q_n – мощность горячих утилит, $Q_{пот}$ – потери тепла с дымовыми газами

Рисунок 2.3 – Генерация электроэнергии с использованием отходящих дымовых газов печи

Поэтому ТАС определяются с учетом генерации электроэнергии и капитальных затрат на газовую турбину (формула 2.5).

$$TAC = CAPEX + OPEX + Cost_T + Cost_W \quad (2.5)$$

где CAPEX – капитальные затраты на теплообменную сеть, \$/год;

ОРЕХ – операционные затраты теплообменной сети, \$/год;

$Cost_T$ – капитальные затраты на газовую турбину, \$/год;

$Cost_W$ – стоимость импортируемой электроэнергии, \$/год.

Так как при изменении целевой температуры продувочного воздуха в исследуемом интервале количество генерируемой электроэнергии изменяется в пределах 21,6 - 21,9 МВт, а изменение капитальных затрат газовой турбины составляет менее 1% от стоимости генерируемой электроэнергии [40], то для упрощения расчета примем фиксированную стоимость газовой турбины $Cost_T = 3250000$ \$.

Примем, что полученная от турбины электроэнергия будет замещать часть импортируемой электроэнергии с электростанции. Таким образом, стоимость импортируемой электроэнергии определяется по формуле 2.6.

$$Cost_W = (W_{\text{треб}} - W_T) \cdot P_E \quad (2.6)$$

где $W_{\text{треб}}$ – количество электроэнергии необходимое для работы установки, кВт;

W_T – количество электроэнергии производимое при помощи газовой турбины, кВт;

P_E – стоимость электроэнергии, \$/кВт год.

Количество генерируемой при помощи газовой турбины электроэнергии определяется по формуле 2.7.

$$W_T = CP_d \cdot (T_{\text{вых}} - T_k) \cdot \eta \quad (2.7)$$

где CP_d – потоковая теплоемкость дымовых газов, кВт/°С;

$T_{\text{вых}}$ – температура дымовых газов на выходе из печи, °С;

T_k – температура дымовых газов на выходе из газовой турбины, °С;

η – КПД газовой турбины.

Образующиеся при сжигании ЛТГ дымовые газы не содержат в своем составе кислотные оксиды серы и азота, поэтому температура дымовых газов на выходе из турбины не лимитируется кислотной точкой росы. Температуру

дымовых газов на выходе из турбины и ее КПД принимаем в соответствии с [21] равными $T_k = 100 \text{ }^\circ\text{C}$, $\eta = 0,25$.

2.4 Методология определения параметров горения топлива

Одним из этапов исследования интеграции процесса Фишера-Тропша и высокотемпературного электролиза является определение количества выбросов вредных веществ в атмосферу в зависимости от типа используемого топлива. В данном разделе приведена методика количественной оценки выбросов, а также определения теоретической температуры горения. Также в данном разделе приведена методика оценки стоимости ЛТГ по отношению к газовому эквиваленту.

2.4.1 Определение стоимости ЛТГ

Определение стоимости ЛТГ необходимо для проведения пинч-анализа. Одним из наиболее распространенных способов определения стоимости углеводородов это сравнение их теплотворной способности с аналогичным параметром эквивалента. В качестве эквивалента обычно используют природный газ или нефть. Определение стоимости ЛТГ производится относительно газового эквивалента (природного газа) по следующей формуле:

$$P_{\text{ЛТГ1}} = P_{\text{ПГ}} \frac{Q_{\text{ЛТГ}}}{Q_{\text{ПГ}}} \quad (2.8)$$

где $P_{\text{ПГ}}$ – стоимость природного газа, руб/кг;

$Q_{\text{ЛТГ}}$ – теплотворная способность ЛТГ, МДж/кг;

$Q_{\text{ПГ}}$ – теплотворная способность природного газа, МДж/кг.

Для определения стоимость 1 кВт года ЛТГ используем формулу 2.9:

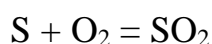
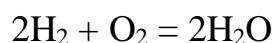
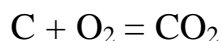
$$P_{\text{ЛТГ}} = 31536 \cdot \frac{P_{\text{ЛТГ1}}}{dQ_{\text{ЛТГ}} \cdot K} \quad (2.9)$$

где K – курс доллара, руб/\$.

2.4.2 Определение параметров горения

Оценка выбросов вредных веществ в атмосферу по данной методике производится для типов топлива, входящих в «сценарий II», это связано с тем, что оценка уменьшения выбросов вредных веществ в «сценарии I» производится на основе снижения выбросов на электростанции при снижении импорта электричества для исследуемой установке получения синтез-газа.

Количественная оценка выбросов вредных веществ в атмосферу производится на основе термодинамических вычислений и не учитывает неполноту сгорания топлива. Для определения количества выбросов необходимо знать не только расход топлива, но и расход воздуха, необходимый для его сжигания. Элементный состав топлива для расчета приведен в таблице 2.1.



Определение стехиометрического количества кислорода, необходимого для сжигания 1 кг топлива производится на основе реакций, представленных выше, по следующей формуле [41]:

$$G_{O_2} = 0,0267 \cdot C + 0,08 \cdot H + 0,01 \cdot (S - O) \quad (2.10)$$

где C – массовая доля углерода в составе топлива, %;

H – массовая доля водорода в составе топлива, %;

S – массовая доля серы в составе топлива, %;

O – массовая доля кислорода в составе топлива, %;

Далее определяется действительное количество кислорода, необходимое для сжигания 1 кг топлива [41]:

$$G_d = \alpha \cdot G_{O_2} \quad (2.11)$$

где α – коэффициент избытка воздуха, который принимается в соответствии с рекомендациями [25] равным 1,5; 1,2 и 1,1 для твердого, жидкого и газообразного топлива соответственно;

G_{O_2} – стехиометрическое количество кислорода, необходимое для сжигания 1 кг топлива, кг/кг.

После определения действительного количества кислорода определяется количество продуктов сгорания, образующихся при сжигании 1 кг топлива [41]:

$$m_{CO_2} = 0,0367 \cdot C \quad (2.12)$$

$$m_{SO_2} = 0,01 \cdot S \quad (2.13)$$

$$m_{H_2O} = 0,08 \cdot H \quad (2.14)$$

$$m_{O_2} = G_{O_2} \cdot (\alpha - 1) \quad (2.15)$$

$$m_{N_2} = \frac{\omega_{N_2}}{\omega_{O_2}} \cdot G_{O_2} + 0,01 \cdot N \quad (2.16)$$

где ω_{N_2} – массовая доля азота в составе воздуха, подающегося в печь для горения топлива;

ω_{O_2} – массовая доля кислорода в составе воздуха, подающегося в печь для горения топлива.

Далее на основе теплоемкостей продуктов сгорания, полученных из разработанной модели, определяется теоретическая температура горения топлива [42]:

$$T_{\text{теор}} = \frac{Q}{\sum_i^n C_{p_i} \cdot m_i} \quad (2.17)$$

где Q – теплотворная способность топлива, кДж/кг;

C_{p_i} – теплоемкость i -го продукта сгорания, кДж/кг·°С;

m_i – количество i -го продукта сгорания при сжигании 1 кг топлива, кг/кг.

После определения теоретической температуры горения топлива по БСК определяется общая тепловая нагрузка печи, как показано на рисунке 2.4.

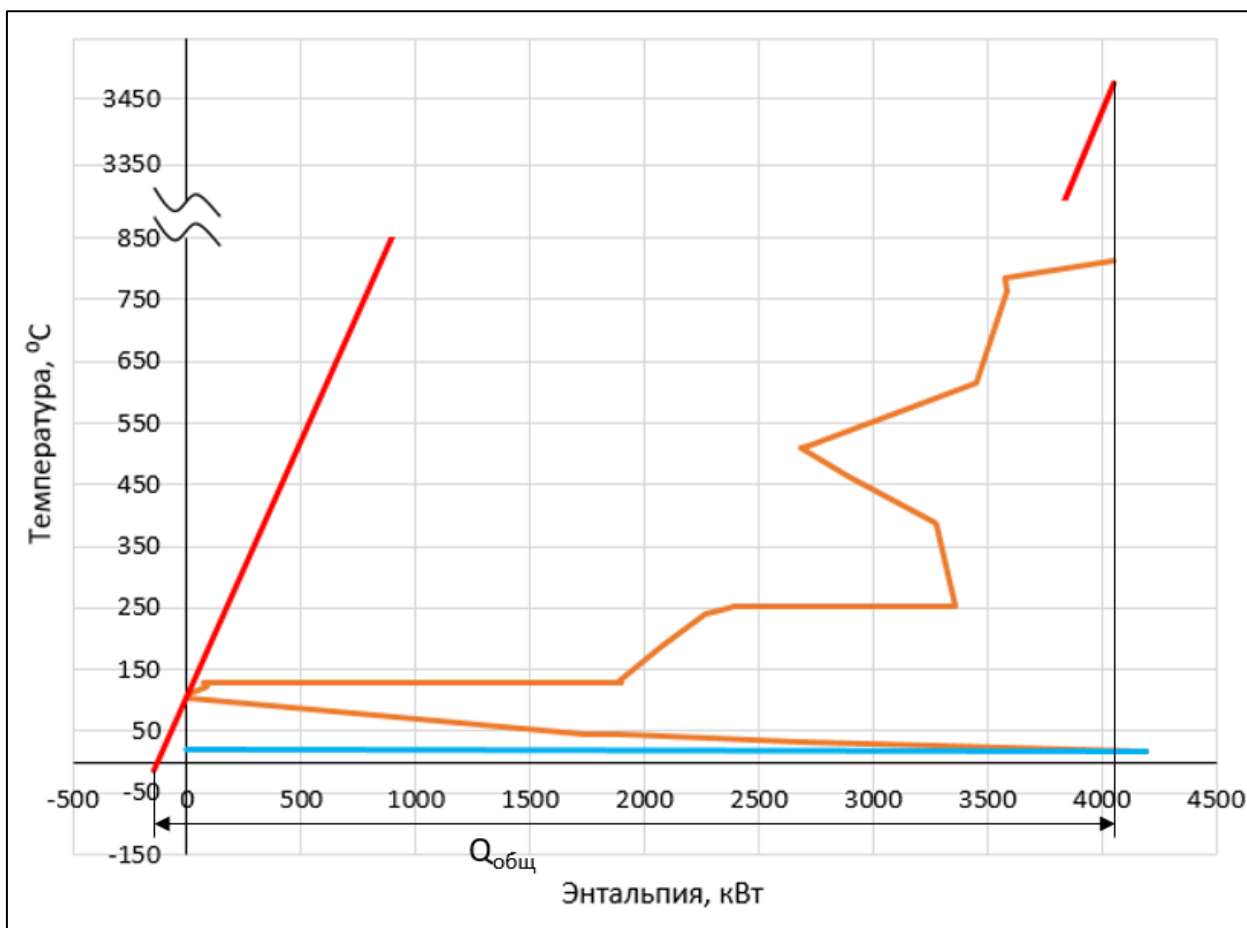


Рисунок 2.4 – Определение общей тепловой нагрузки печи

Затем определяется расход топлива, необходимый для нагрева холодных потоков до целевых температур:

$$G_T = \frac{Q_{\text{общ}}}{Q} \quad (2.18)$$

где $Q_{\text{общ}}$ – общая тепловая нагрузка на печь, кВт;

Q – теплотворная способность топлива, кДж/кг.

На основе полученного расхода топлива определяются выбросы CO_2 и SO_2 в атмосферу:

$$M_i = 31536 \cdot m_i \cdot G_T \quad (2.19)$$

где m_i – количество CO_2/SO_2 образующееся при горении 1 кг топлива, кг/кг.

Потоковая теплоемкость определялась из имитационной модели процесса, созданной в ПО UniSim Design, и данных о расходе и составе дымовых газов.

3 Результаты и их обсуждение

3.1 Результаты предварительного анализа исследуемого процесса

Анализируя исследуемую установку, было выявлено, что при увеличении ее производительности увеличивается экономическая целесообразность разделения ЛТГ на индивидуальные фракции/компоненты. Поэтому при исследовании теплообменной сети будут рассматриваться 2 сценария:

I. В качестве горячих утилит используется ЛТГ, полученный в процессе Фишера-Тропша.

II. В качестве горячих утилит используются ископаемые виды топлива (природные газ, уголь, мазут и сжиженные углеводородные газы (СУГ)), элементный состав которых представлен в таблице 3.1.

Таблица 3.2 – Элементный состав топлива, входящих во II сценарий

Название топлива	Состав топлива, % мас.					
	C	H	S	O	N	Примеси
Природный газ [1]	70,5	22	-	-	7,5	-
Бурый уголь [41]	76	4,5	4,7	3,5	1,8	9,5
Топочный мазут 40 [42]	87,4	11,2	0,5	0,45	0,45	-
СУГ (ПБТ) [43]	82,28	17,71	0,01	-	-	-

В таблице 3.2 представлена стоимость и теплотворная способность топлива, входящего в «сценарий I» и «сценарий II».

Таблица 3.2 – Экономические и физико-химические характеристики топлива

Название топлива	Стоимость, \$/кВт год	Q, МДж/кг
ЛТГ	54	47,3
Природный газ [44]	54	50,1
Бурый уголь [45]	56	29,3
Топочный мазут 40 [46]	114	41,3
СУГ (ПБТ) [47]	417	46,8

Следует отметить, что в «сценарии I» ЛТГ от процесса Фишера-Тропша в полном объеме направляется для утилизации на установку получения синтез-газа. Поэтому при сжигании ЛТГ возникает избыточное количество тепловой энергии, которую возможно использовать для генерации электроэнергии.

В «сценарии II» когенерация электроэнергии и тепла экономически нецелесообразна. Это связано с тем, что построение нового завода осуществляется вблизи источника электроэнергии. Данный источник потребляет наиболее дешевый из доступных тип топлива, который будет потребляться на исследуемой установке. Ввиду того, что электростанция генерирует существенно большее количество электроэнергии, чем может быть получено при утилизации избыточного тепла на установке, то ее электроэнергия является более дешевой это связано с эффектом масштаба. Данный эффект заключается в том, что увеличение производства продукции приводит к уменьшению ее себестоимости [48]. Также следует отметить, что исследуемая установка не является обособленной, т.к. для ее работы необходим источник CO₂. Поэтому исследуемую установку предполагается интегрировать в уже существующее предприятие, располагающее собственными электрогенерирующими мощностями. Исходя из вышесказанного можно сделать вывод, что минимизация операционных затрат в «сценарии II» осуществляется путем уменьшения расхода топлива.

Используя основные принципы интеграции процессов, была проанализирована исходная технологическая схема установки получения синтез-газа. В результате пинч-анализа были выявлены 1 горячий и 3 холодных потока, изменение целевой температуры которых может привести к повышению энергоэффективности установки (рисунок 3.1). Параметры данных потоков приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Технологические параметры потоков

№ потока	Название потока	Тип потока	$t_n, ^\circ\text{C}$	$t_k, ^\circ\text{C}$
1	Продувочный воздух	гор	800	400
14	Водород	хол	40	-
15	Топливо (LFG)	хол	58	-
16	Атмосферный воздух	хол	75	-

При исследовании «сценария II» технологические параметры потока № 15 будут соответствовать рассматриваемому типу топлива. В случае, когда в качестве топлива выбран уголь, данный поток будет отсутствовать. Расход потока № 16 будет переопределен для каждого типа топлива с использованием большой составной кривой (БСК).

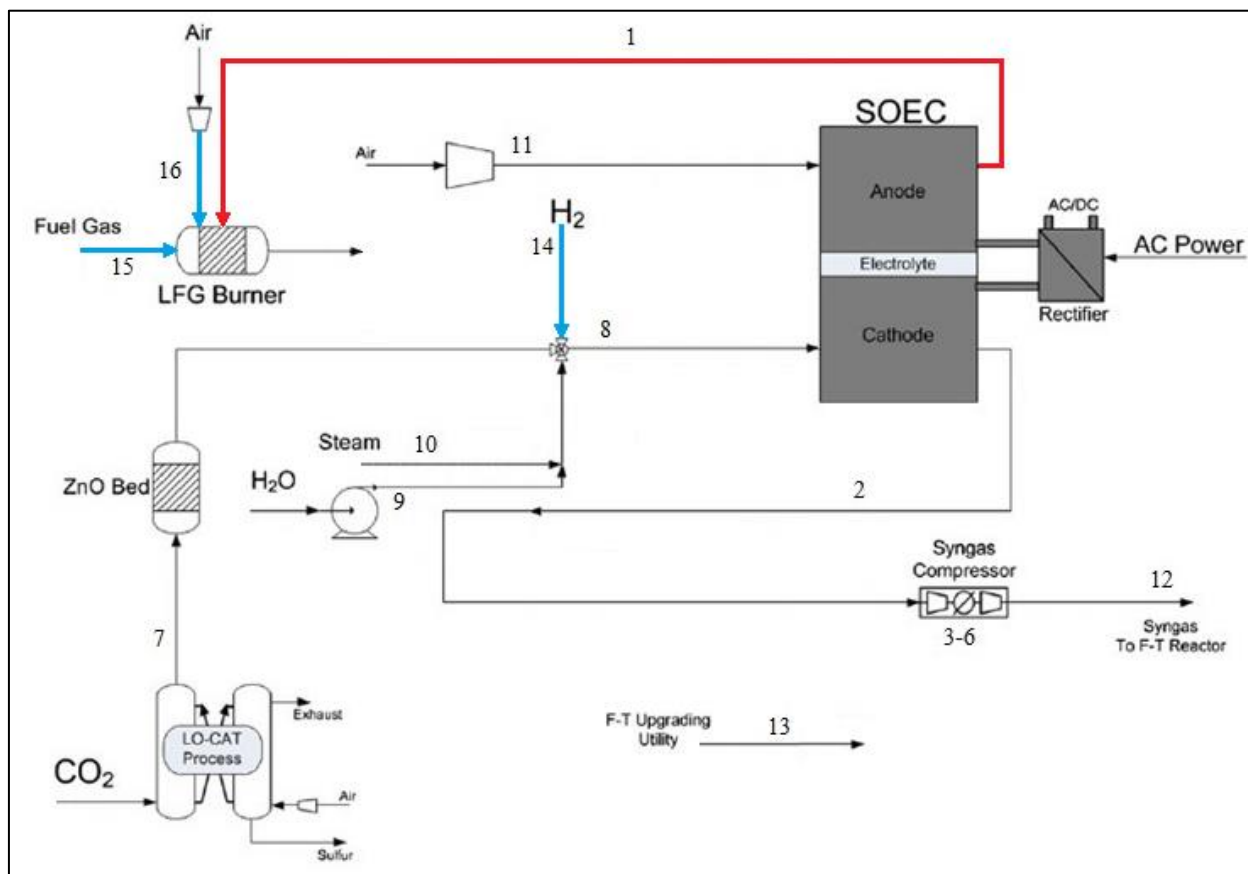


Рисунок 3.1 – Технологическая схема без теплообменной сети

3.2 Результаты моделирования установки получения синтез-газа

В ПО UniSim Design была разработана имитационная математическая модель исследуемой установки (рисунок 3.2). В приложении А (таблица А.1) представлены параметры основных материальных потоков разработанной модели.

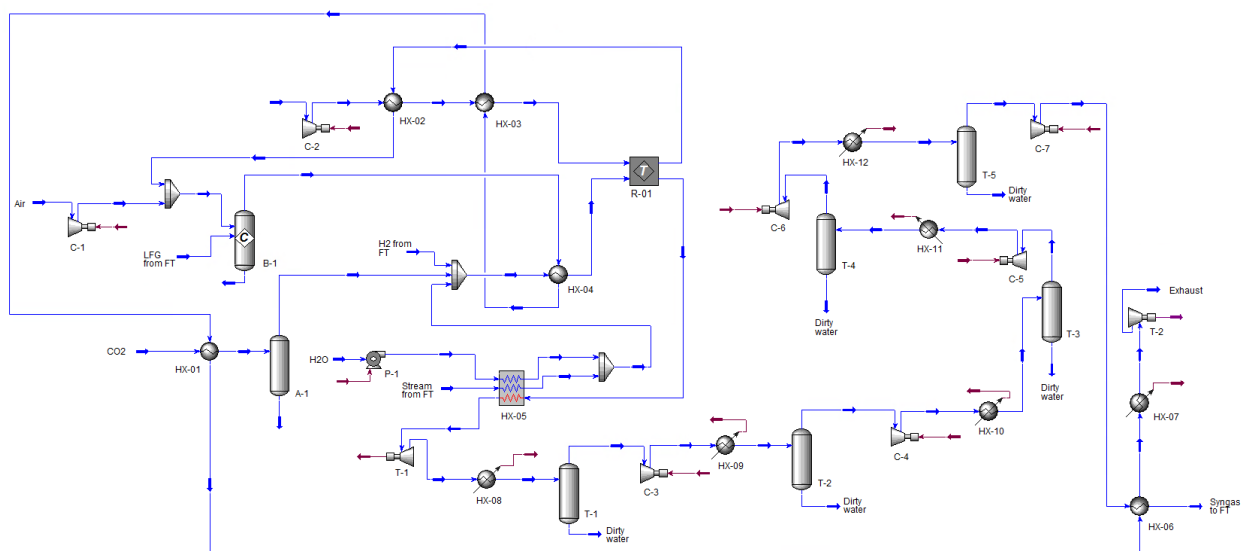


Рисунок 3.2 – Модель исходной установки получения синтез-газа

Ввиду того, что электрохимический реактор (R-01) смоделирован как «черный ящик», изменение состава продуктового потока реактора основывается на данных, представленных в [21] (рисунок 3.3).

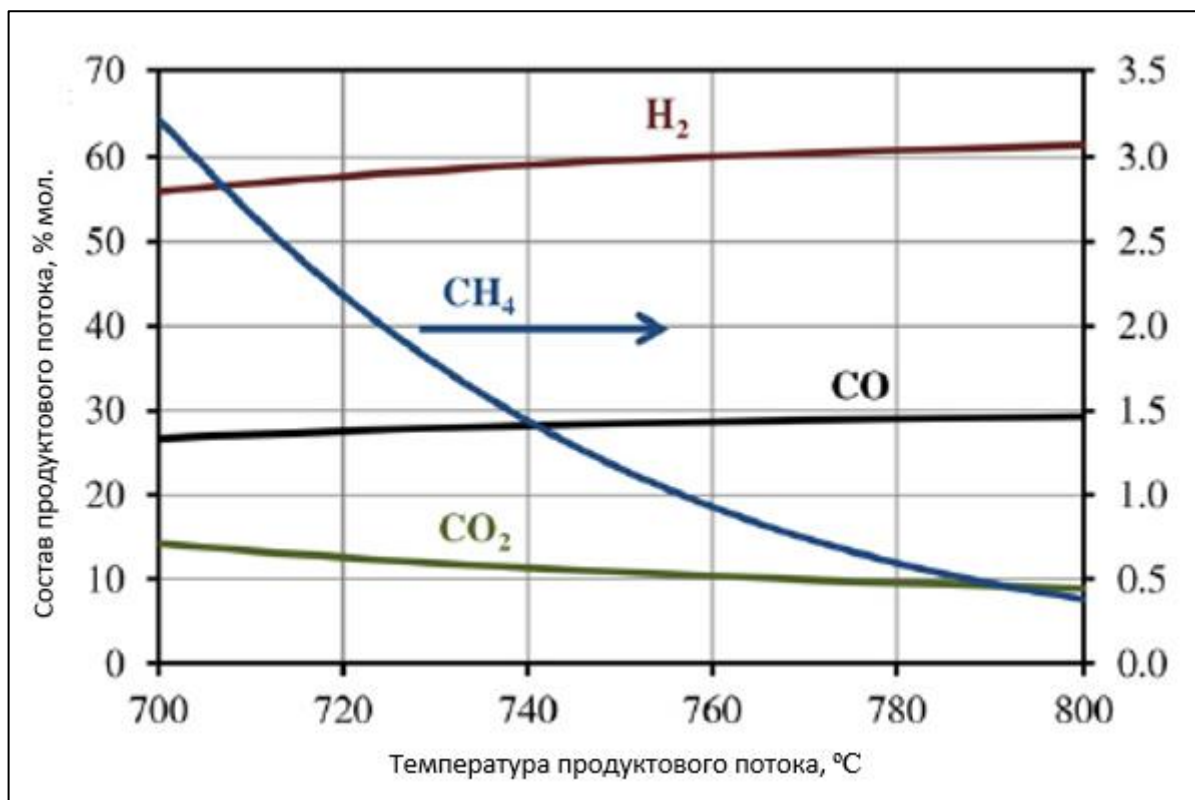


Рисунок 3.3 – Зависимость состава продуктового потока от температуры [21]

Расход потока № 16 (Air) был скорректирован с учетом полного сгорания компонентов потока ЛТГ. При моделировании компрессорной станции на основе [21] были выявлены несоответствия между исходными данными:

- количество ступеней компримирования не согласуется со степенью сжатия на каждой из них;
- при компримировании потока №2 с 0,12 МПа до 4 МПа затрачивается большее количество энергии, чем представлено в исследовании.

Ввиду этого моделирование компрессорной станции осуществлялось на основе рекомендаций [49], технологические параметры потока на каждой ступени сжатия приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Технологические параметры компримируемого потока

Степень сжатия	Потоковая теплоемкость, кВт/°С	Начальная температура, °С	Конечная температура, °С	Начальное давление, МПа	Конечное давление, МПа
1	8,829	30	119,5	0,12	0,236
2	7,747	30	119,5	0,236	0,474
3	7,21	30	119,5	0,474	0,961
4	6,975	30	119,5	0,961	1,951
5	6,915	30	119,5	1,951	3,99

На основе данных о технологических потоках, представленных в [21], и данных полученных из разработанной имитационной модели, составлена потоковая таблица установки получения синтез-газа (таблица Б.1 приложения Б).

3.3 Результаты исследования теплообменной сети «сценарий I»

В ходе проведения пинч-анализа исследуемой установки была получена зависимость ТАС от температуры горячего потока (рисунок 3.3). При определении ТАС учитывалось не только изменение целевой температуры горячего потока, но и когенерация тепла и электричества.

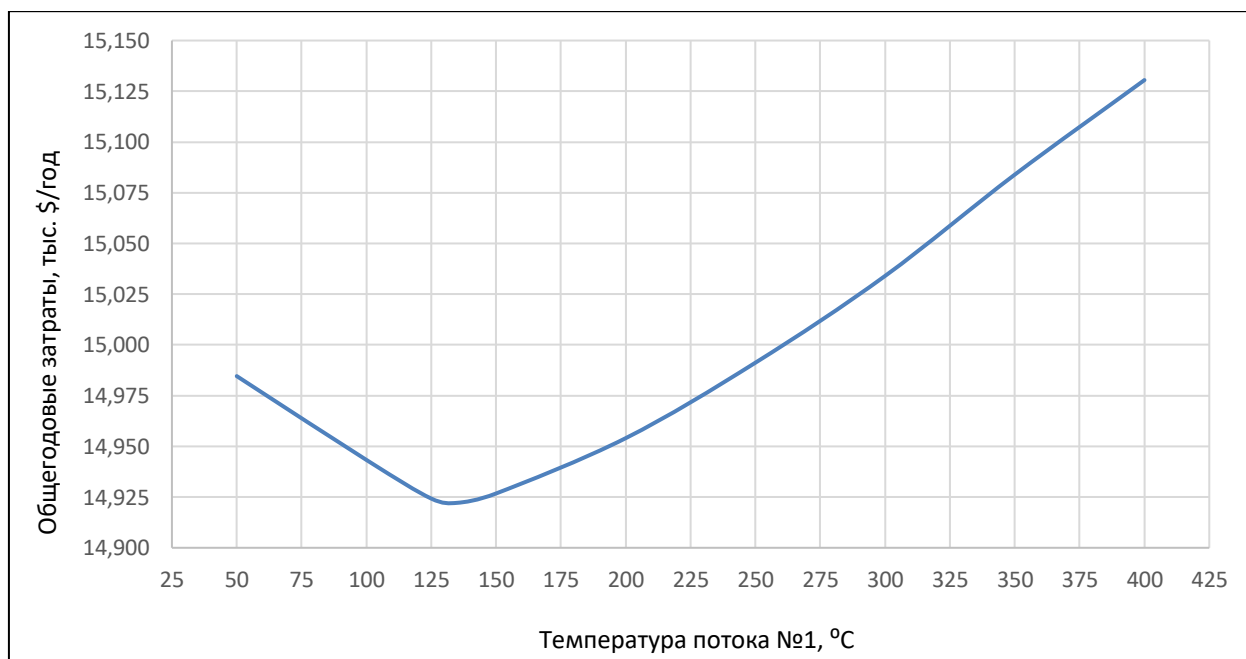


Рисунок 3.3 – Зависимость ТАС от целевой температуры потока №1

Как видно из рисунка 3.3 при уменьшении целевой температуры потока №1 ТАС сначала уменьшаются, достигают экстремума и затем увеличиваются. Это связано с тем, что до точки экстремума выгода от совместного снижения затрат на горячие утилиты, капитальных затрат на печь и затрат на импорт электроэнергии, вызванных увеличением количества рекуперированной энергии, превышает капитальные затраты на теплообменную сеть. При уменьшении целевой температуры потока №1 от 135 °С до температуры пинча горячих потоков (119,5 °С) капитальные затраты на теплообменную сеть превышают выгоду, получаемую от снижения вышеперечисленных затрат. Уменьшение температуры потока №1 ниже 119,5 °С приводит к дополнительному расходу холодных утилит и дополнительным капитальным затратам на теплообменную сеть, что отражается в увеличении значения ТАС.

Зависимость ТАС от изменения целевых температур холодных потоков, с учетом измененной целевой температуры потока №1, представлена на рисунке 3.4.

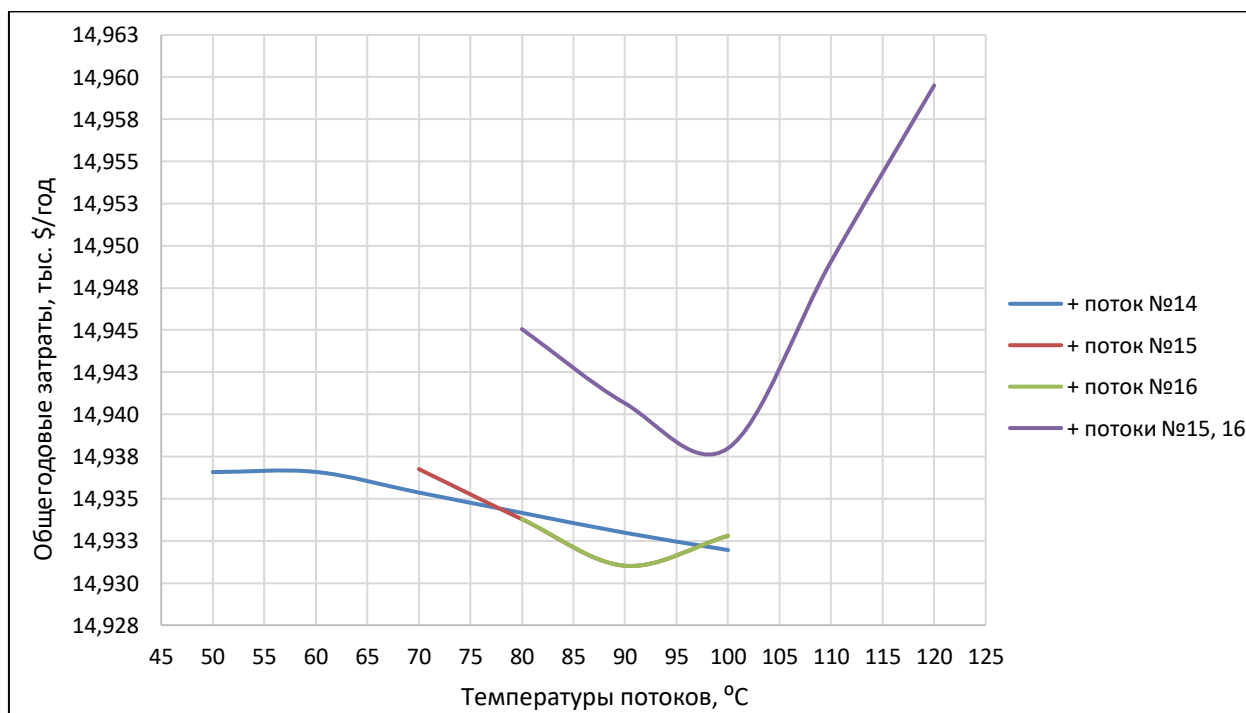


Рисунок 3.4 – Зависимость ТАС от целевой температуры холодных потоков

Анализируя рисунок 3.4, можно сделать вывод, что изменение целевых температур холодных потоков экономически нецелесообразно. Это связано с тем, что при повышении количества рекуперлируемой энергии в области ниже пинча капитальные затраты на дополнительные рекуперативные теплообменники превышают выгоду от снижения затрат на холодные утилиты.

Совместный анализ зависимостей, представленных на рисунках 3.3 и 3.4, показывает, что наименьшие ТАС (14 922 159 \$/год) достигаются только при изменении целевой температуры потока №1. Таким образом, оптимальная целевая температура потока №1 составляет 135 °С, а ΔT_{\min} , соответствующая минимальному значению ТАС, равна 23 °С.

На рисунке 3.5 представлена БСК для минимального значения ТАС.

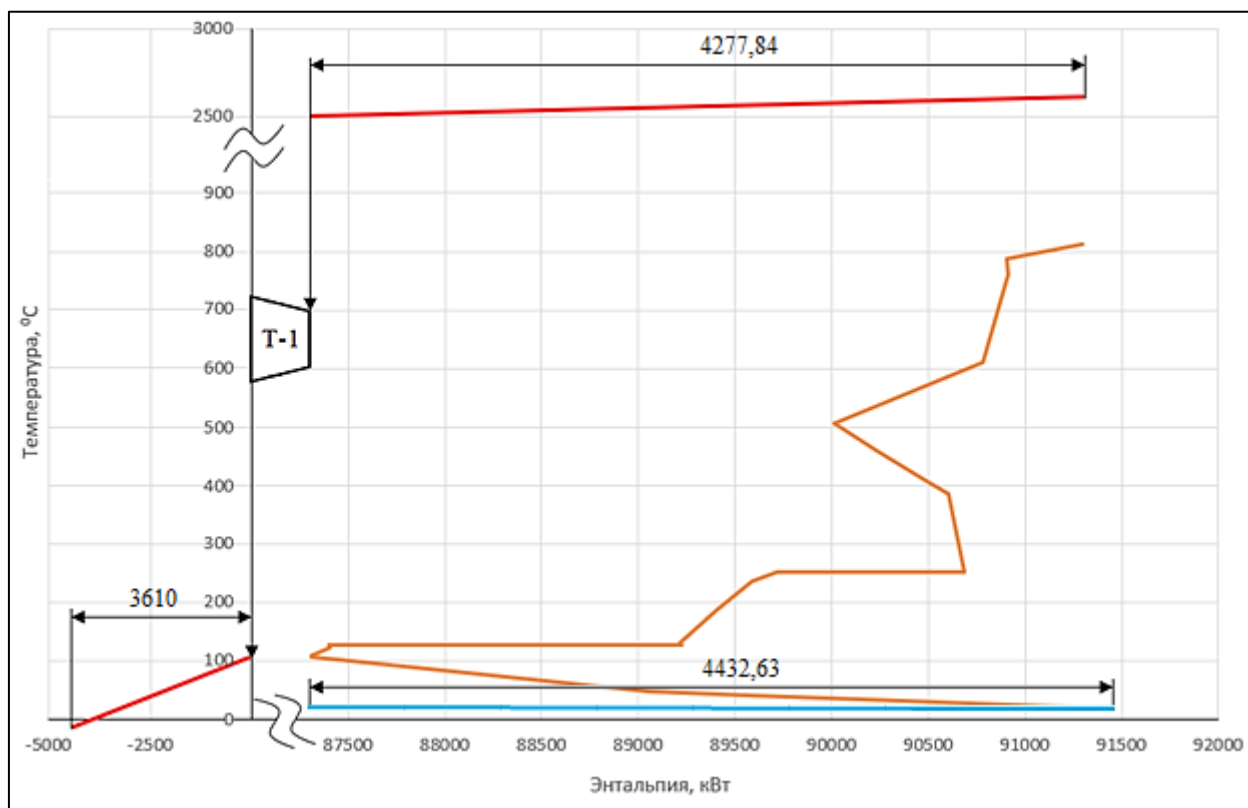


Рисунок 3.5 – Большая составная кривая

Анализируя БСК видно, что для доохлаждения горячих потоков до целевых температур используется охлаждающая вода с начальной

температурой равной 20 °С. Данная температура обусловлена температурой воды, которую удастся достичь в летний период на градирнях [50]. Конечная температура охлаждающей воды была принята равной 25 °С. Это связано с тем, что дальнейшее уменьшение ΔT_{\min} между горячими потоками и охлаждающей водой приведет к существенному росту теплообменной поверхности, которая, как уже описывалось ранее, существенно дороже, чем охлаждающая вода. Из БСК также видно, что дымовые газы после догрева холодных потоков до целевых направляются на газовую турбину, где охлаждаются до 100 °С в результате чего, генерируется около 21,8 МВт электроэнергии. Когенерация тепла и электроэнергии при утилизации ЛТГ позволяет на 38 % снизить импорт электроэнергии и уменьшить выбросы CO₂ на электростанции на 21032 т/год.

На основе полученных данных и принципах пинч-анализа была разработана теплообменная сеть (рисунок 3.6).

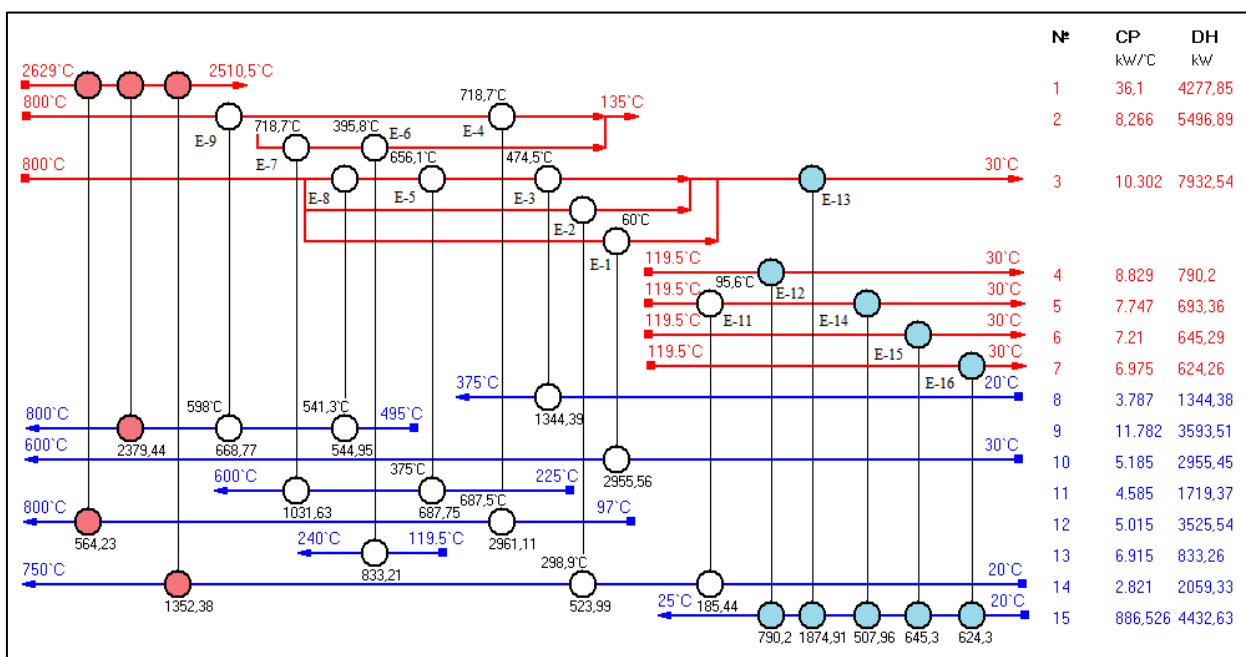


Рисунок 3.6 – Теплообменная сеть исследуемой установки

Основные показатели разработанной теплообменной сети приведены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Основные показатели теплообменной сети

Кол-во т/о, шт	Теплообменная поверхность, м ²	Кол-во рекуперативных т/о, шт	Рекуперативная поверхность, м ²	OPEX, \$/год	CAPEX, \$/год	TAC, \$/год
15	3076	10	2193	254940	1992608	2247548

На основе теплообменной сети, представленной на рисунке 3.6, была разработана новая принципиальная технологическая схема процесса высокотемпературного электролиза (рисунок 3.7).

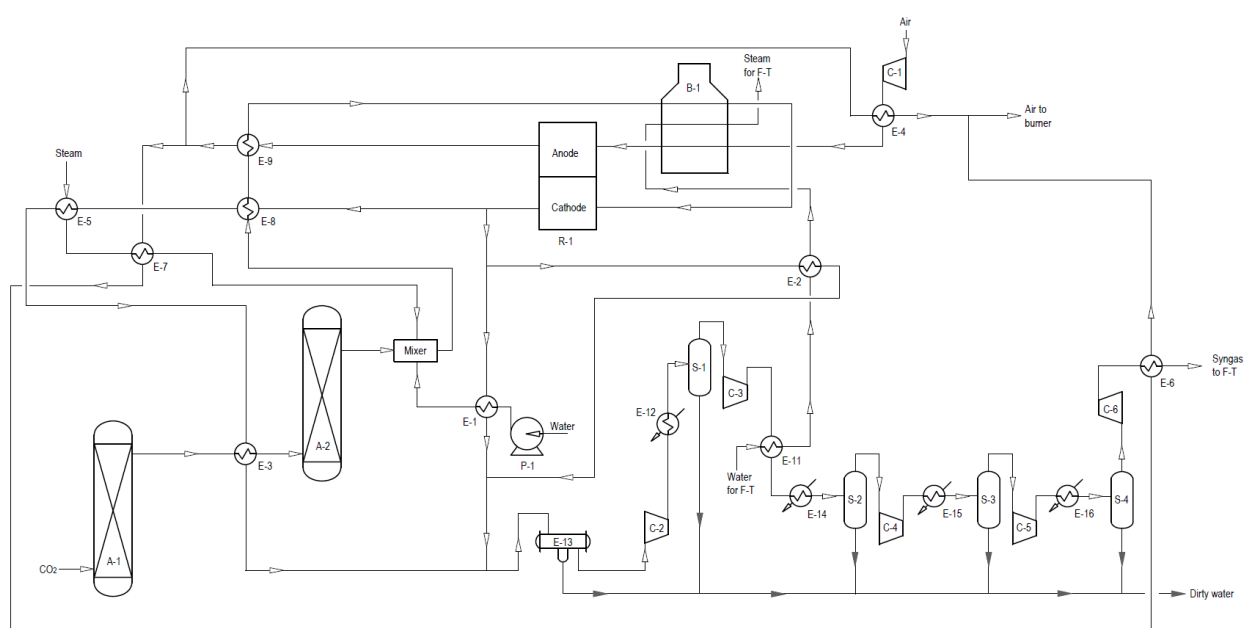


Рисунок 3.7 – Принципиальная технологическая схема установки получения синтез-газа с учетом разработанной теплообменной сети

3.4 Результаты исследования теплообменной сети «сценарий II»

В ходе проведения пинч-анализа исследуемой установки была получена зависимость TAC от изменения целевой температуры горячего потока (рисунок 3.8) для выбранных типов топлива.

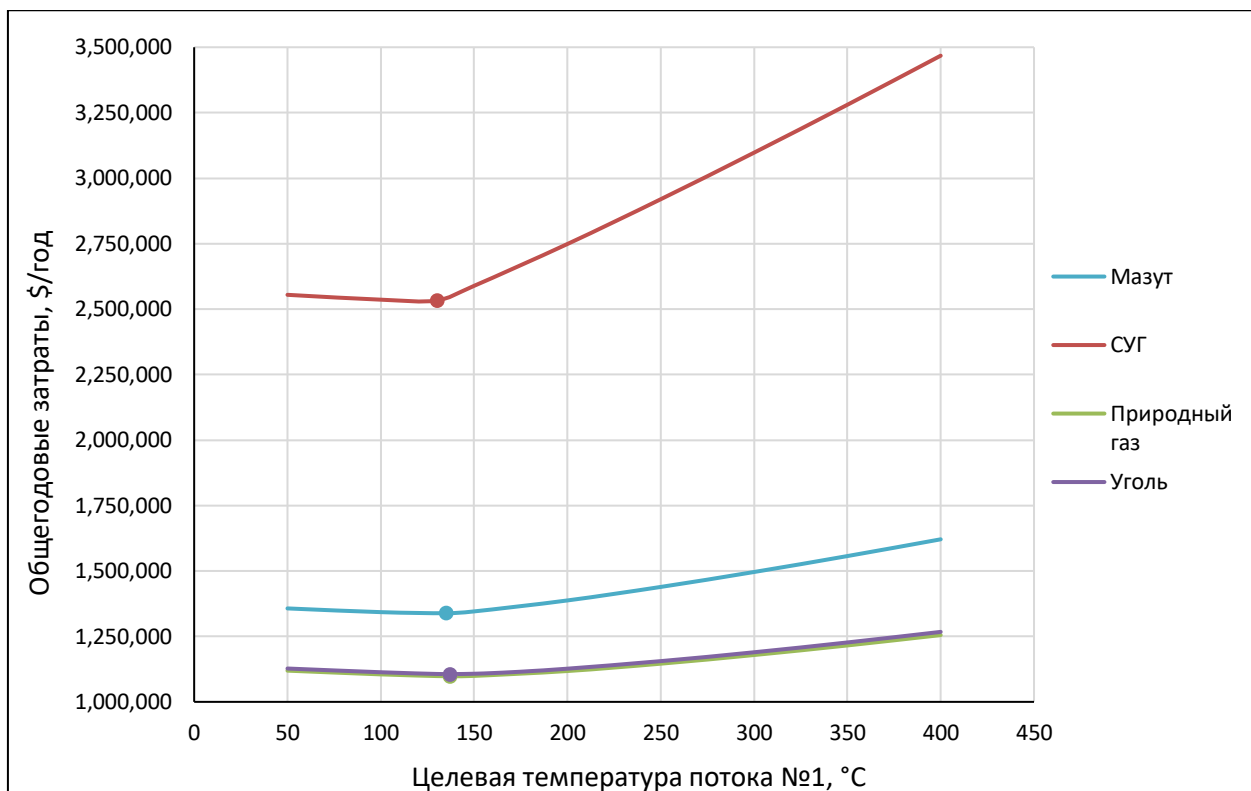


Рисунок 3.8 – Зависимость ТАС от целевой температуры потока №1

Анализируя рисунок 3.8 видно, что при снижении целевой температуры потока №1 ТАС сначала уменьшаются, достигают экстремума и затем увеличиваются для всех типов топлива. Это связано с тем, что до точки экстремума выгода от совместного снижения затрат на горячие утилиты и капитальных затрат на печь, вызванных увеличением количества рекуперированной энергии, превышает капитальные затраты на теплообменную сеть. После точки экстремума капитальные затраты на теплообменную сеть превышают выгоду, получаемую от снижения вышеперечисленных затрат, что приводит к увеличению ТАС. Также следует отметить, что для каждого типа топлива точка экстремума характеризуется различной целевой температурой потока №1. В таблице 3.6 показана зависимость температуры горячего потока и ΔT_{\min} от стоимости топлива.

Таблица 3.6 – Оптимальные значения температуры потока №1 и ΔT_{\min}

Вид топлива	Стоимость, \$/кВт год	Температура потока №1, °C	ΔT_{\min} , °C
Природный газ	54	137	28
Каменный уголь	56	137	27
Топливный мазут 40	114	135	25
ПБТ (СУГ)	417	130	23

Целевая температура потока №1 тем ниже, чем выше стоимость топлива, данная тенденция также прослеживается для ΔT_{\min} . Понижение данных параметров увеличивает количество рекуперлируемой энергии, что компенсирует высокую стоимость топлива. Также следует отметить, что целевая температура потока №1 одинакова для теплообменных сетей, использующих в качестве топлива природный газ и уголь, однако их ΔT_{\min} отличаются. Это связано с тем, что стоимость данных типов топлива примерно равна.

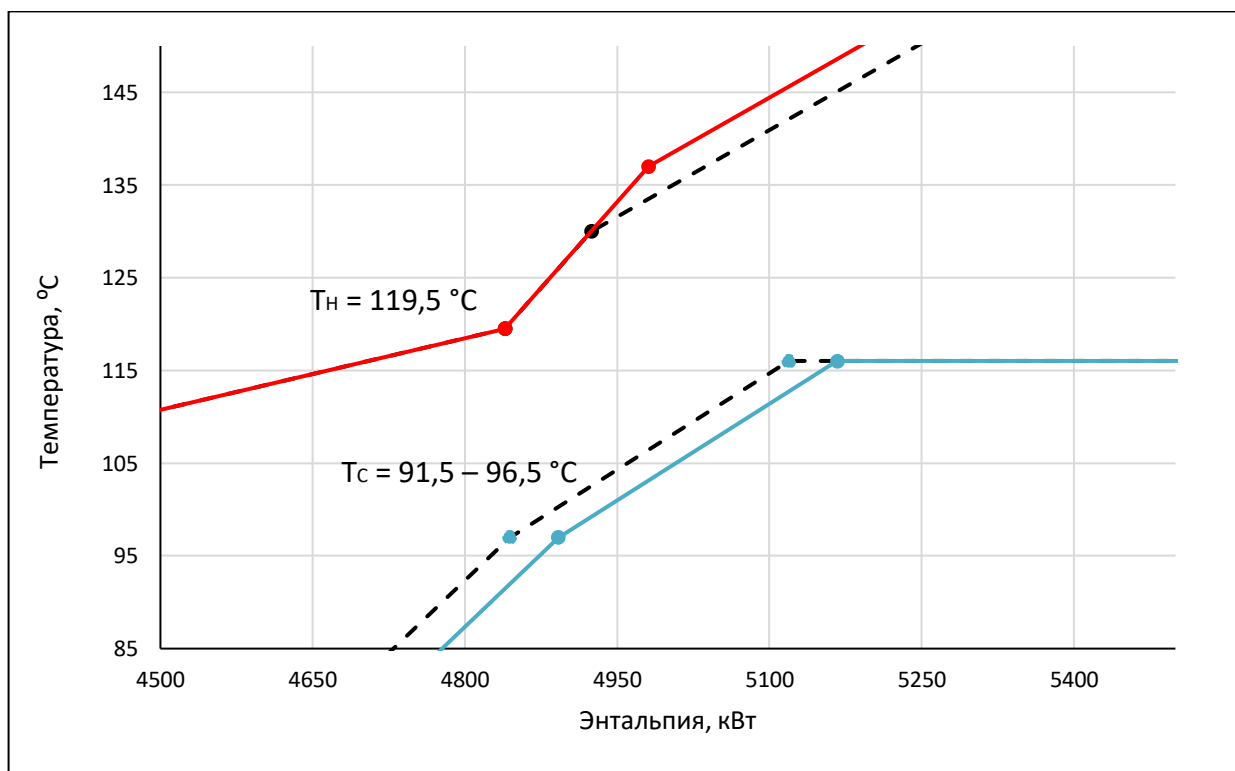


Рисунок 3.9 – Составная кривая исследуемого процесса при различных типах топлива

Влияние изменения целевых температур холодных потоков на ТАС для выбранных типов топлив имеет аналогичные результаты, рассмотренным в разделе 3.3, т.к. стоимость холодных утилит в «сценарии I» и «сценарии II» одинакова, а локализация области точки пинча изменяется несущественно (не более 5 °С по холодному потоку). На рисунке 3.9 приведена область локализации точки пинча. Сплошными линиями указаны составные кривые (СК) для теплообменной сети, использующей природный газ (наиболее дешевый тип топлива), пунктирной линией, использующей СУГ (наиболее дорогой тип топлива). Целевые значения горячих и холодных утилит для различных типов топлива изменяются в диапазонах 3950 - 4050 кВт и 4143 - 4190 кВт соответственно. В качестве холодной утилиты была выбрана охлаждающая вода аналогично разделу 3.3.

В ходе разработки теплообменной сети было выявлено, что исследуемая установка, использующая в качестве топлива природный газ, уголь и мазут, обладает теплообменной сетью с одинаковой топологией теплообменников (рисунок 3.10).

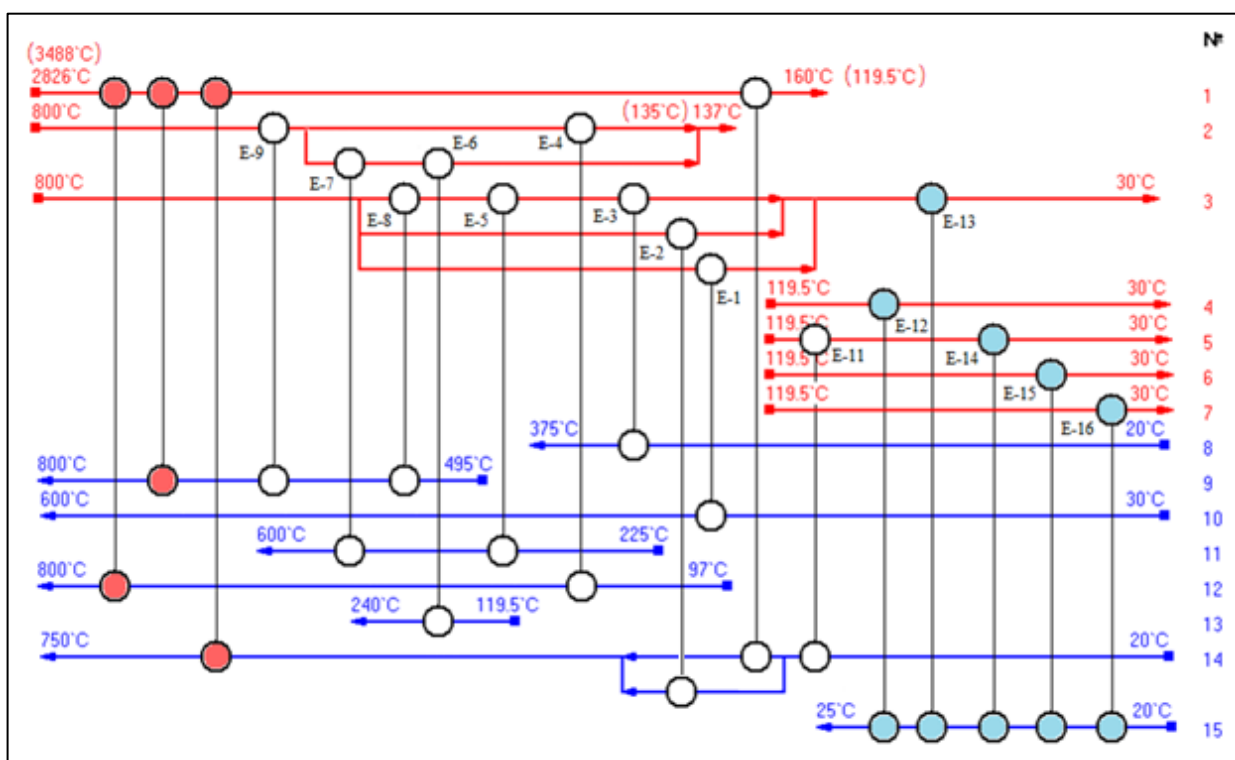


Рисунок 3.10 – Теплообменная сеть исследуемой установки, использующей в качестве топлива природный газ, уголь или мазут

При этом на теплообменниках E-1,5-7,15,16 нагрузка не изменяется, а на остальных ее изменение незначительно. Это позволяет подобрать теплообменные аппараты, с поверхностью, удовлетворяющей всему интервалу нагрузок во всех разработанных вариантах теплообменной сети. Установка получения синтез-газа, использующая в качестве топлива СУГ обладает схожей топологией с ранее описанными теплообменными сетями, однако имеет на 1 теплообменный аппарат больше (рисунок 3.11).

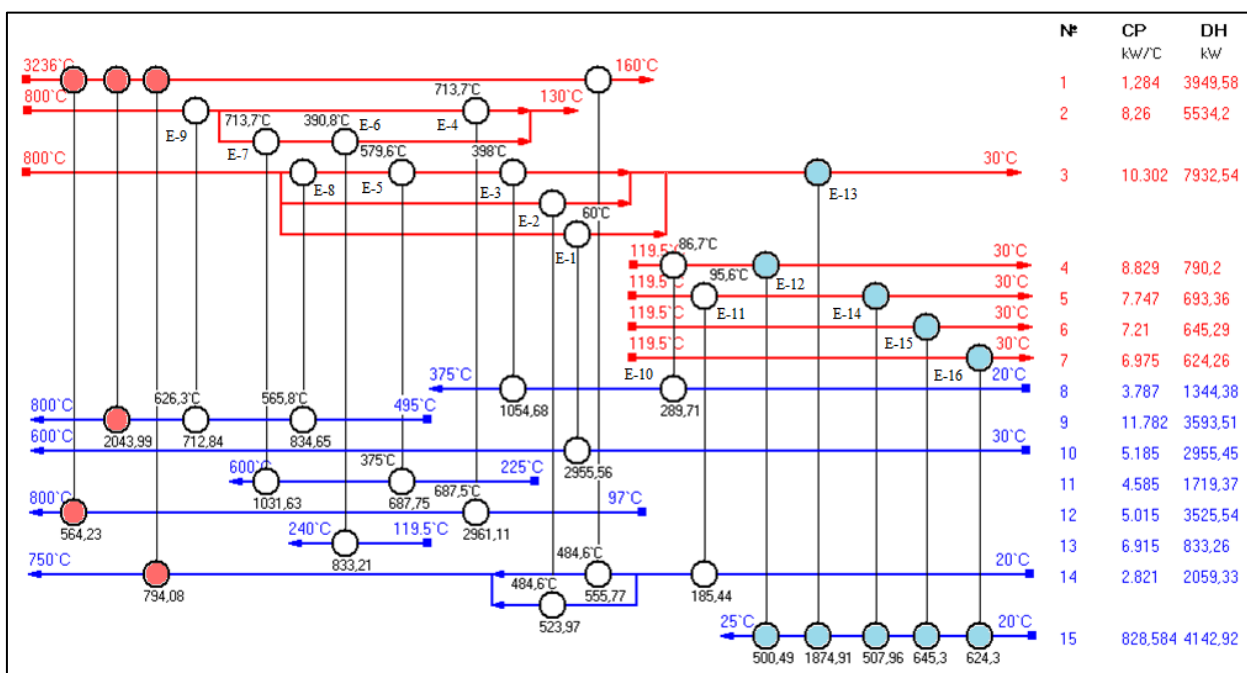


Рисунок 3.11 – Теплообменная сеть исследуемой установки, использующей в качестве топлива СУГ

В таблице 3.7 приведены основные показатели разработанных теплообменных сетей. Как видно из данной таблицы общая нагрузка на печь для каждого типа топлива различается и не совпадает с тенденцией, выявленной из СК. Это связано с различной теоретической температурой горения топлива, а также с температурой дымовых газов на выходе из печи.

Таблица 3.7 – Основные показатели теплообменной сети для различных типов топлива

Вид топлива	$Q_{\text{общ}}$, кВт	Стоимость топлива, \$/кВт год	ОРЕХ, \$/год	CAPEX, \$/год	ТАС, \$/год	M_{CO_2} , т/год	M_{SO_2} , т/год
Природный газ	4474,92	54	265738	1122296	1388034	7288	-
Каменный уголь	4574,87	56	280254	1123205	1403458	13734	231
Топливный мазут 40	4505,36	114	537502	1043192	1580693	11035	17
СУГ (ПБТ)	4154,89	417	1732589	1268126	3000715	8454	0,28

Анализируя количество выбросов в атмосферу, а также ТАС разработанных теплообменных сетей, можно сделать вывод, что наиболее выгодным является использование природного газа в качестве топлива для процесса получения синтез-газа высокотемпературным электролизом. Также можно сделать вывод, что использование в качестве топлива СУГ экономически нецелесообразно, т.к. ТАС такой теплообменной сети в 2 раза превышает аналогичный показатель для теплообменных сетей с другим типом топлива.

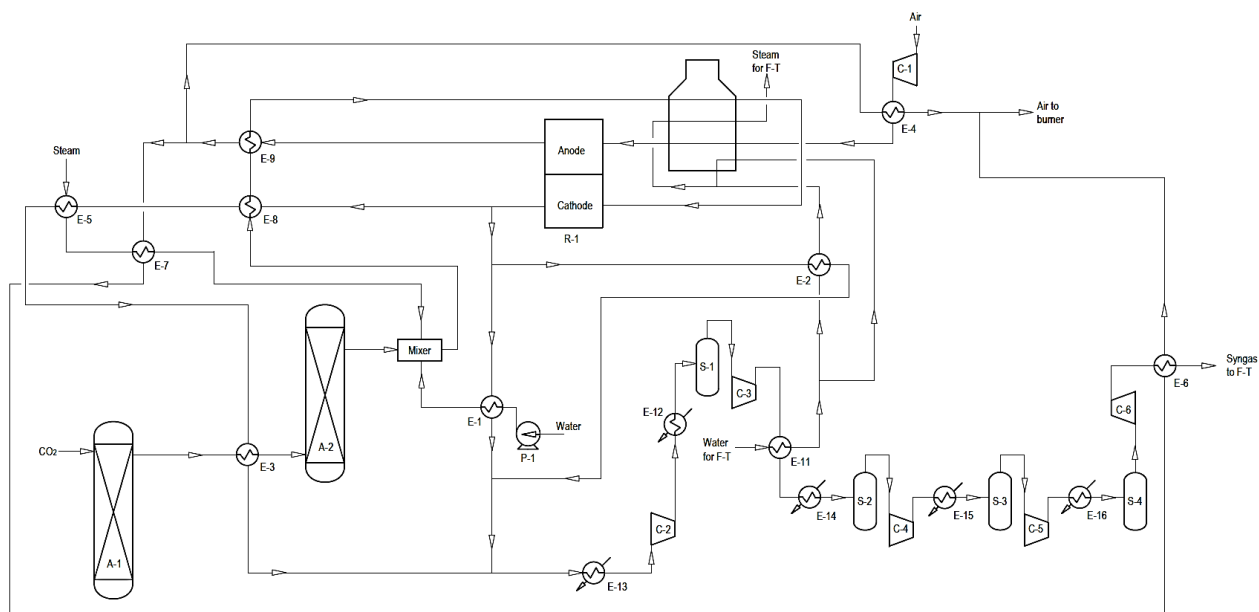


Рисунок 3.12 – Принципиальная технологическая схема установки получения синтез-газа с учетом разработанной теплообменной сети

Отдельное внимание стоит уделить количеству выбросов CO_2 , т.к. именно данный оксид является сырьем для исследуемой установки. Наибольшее количество выбросов CO_2 достигается при использовании в качестве топлива каменного угля, а ТАС теплообменной сети всего на 2% превышают аналогичный показатель для природного газа. Таким образом, можно сделать вывод, что при рециркуляции CO_2 из отходящих дымовых газов наиболее экономически эффективным является использование в качестве топлива каменного угля. Однако для полноценного использования такого сырья необходима его очистка от азота и непрореагировавшего кислорода.

Разработанная технологическая схема позволяет использовать в качестве топлива как природный газ, так и каменный уголь с одинаковой эффективностью. Это позволит быстро переключаться между выбранными типами топлива в случае нехватки одного из них или в случае перебоев с поставкой сырья. На рисунке 3.12 представлена новая принципиальная технологическая схема установки получения синтез-газа, использующая в качестве топлива природный газ или уголь.



Рисунок 3.13 – Предполагаемые районы эксплуатации исследуемой установки

Анализируя карту энергетических ресурсов России [51] можно сделать вывод, что наиболее благоприятными районами для введения в эксплуатацию установки получения синтез-газа совместным высокотемпературным электролизом CO_2 и H_2O являются: север Уральского ФО, юго-восток Приволжского ФО, Южный ФО, а также центральная часть Сибирского ФО и юго-запад, юго-восток Дальневосточного ФО (рисунок 3.13). Данная установка позволит производить наиболее дешевый синтез-газ, который в дальнейшем может быть использован в качестве сырья для производства метанола или аммиака. Производство СЖУ нецелесообразно, т.к. данные районы обладают собственными месторождениями нефти.

4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Основной целью данного раздела является оценка перспективности развития и планирование финансовой и коммерческой ценности конечного продукта, представленного в рамках научно-исследовательской работы (НИР). Коммерческая ценность продукта определяется более низким энергопотреблением в сравнении с конкурентными разработками, а также скоростью ответа разработчиком на следующие вопросы: будет ли продукт востребован на рынке, какова будет его цена, каков бюджет НИР и какое время будет необходимо для продвижения разработанного продукта на рынок.

Целью НИР является исследование влияния структуры теплообменной сети на потребление энергии в газопереработке.

4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения исследования с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

4.1.1 Анализ конкурентных технических решений

Сравним эффективность разработанной теплообменной сети (индекс « $НЕН_2$ »), использующей в качестве топлива LFG, с исходной теплообменной сетью (индекс « $НЕН_1$ ») установки высокотемпературного совместного электролиза для оценки сильных и слабых сторон. Сравнение теплообменных сетей будет производиться при помощи оценочной карты. В таблице 4.1 приведено сравнение $НЕН_1$ и $НЕН_2$ с позиции технических и экономических критериев оценки эффективности.

Расчет конкурентоспособности определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot \text{Б}_i \quad (4.1)$$

где B_i – вес показателя (в долях единиц);

Б_i – балл показателя.

Таблица 4.1 – Оценочная карта сравнения технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		Конкурентоспособность	
		НЕН ₁	НЕН ₂	НЕН ₁	НЕН ₂
Технические критерии оценки ресурсоэффективности					
1. Актуальность исследования	0,1	4	5	0,4	0,5
2. Эффективность работы	0,2	3	5	0,6	1
3. Количество единиц оборудования	0,15	5	4	0,75	0,6
4. Безопасность	0,15	4	5	0,6	0,75
5. Удобство эксплуатации	0,1	5	5	0,5	0,5
Экономические критерии оценки эффективности					
1. Стоимость оборудования	0,12	5	4	0,6	0,48
2. Предполагаемый срок эксплуатации	0,1	5	5	0,5	0,5
3. Финансирование научной разработки конкурентных товаров и разработок	0,08	4	5	0,32	0,4
Итого	1	35	38	4,27	3,73

Анализируя таблицу 4.1, можно сделать вывод, что разработанная теплообменная сеть является наиболее эффективной и актуальной, а также является конкурентоспособной

4.1.2 SWOT-анализ

Для комплексной оценки НИР необходимо составить SWOT-анализ, результатом которого является описание сильных и слабых сторон исследования, выявление возможностей и угроз для реализации исследования, которые проявились или могут появиться в его внешней среде.

В таблице 4.2 приведена матрица SWOT-анализа.

Таблица 4.2 – Матрица SWOT-анализа

	Сильные стороны проекта: С1. Повышение энергоэффективности. С2. Снижение выбросов вредных веществ. С3. Снижение экспорта электроэнергии. С4. Утилизация CO ₂ .	Слабые стороны проекта: Сл1. Высокая металлоемкость. Сл2. Высокие тепловые потери. Сл3. Использование сталей различных марок.
Возможности: В1. Повышение рентабельности процесса Фишера-Тропша. В2. Организация производства без выбросов CO ₂ . В3. Выход продукции установки на новый рынок.	1. Использование побочных продуктов процесса Фишера-Тропша в качестве источника энергии на установке. 2. Возможность когенерации тепла и электричества. 3. Использование CO ₂ дымовых газов в качестве сырья приведет к практически полному отсутствию вредных выбросов в атмосферу.	1. Использование теплообменников с развитой поверхностью позволяет снизить металлоемкость теплообменной сети. 2. Использование качественной теплоизоляции и ее своевременное обслуживание позволит снизить тепловые потери. 3. Применение современных электродов или разъемных соединений позволит создать герметичное соединение.
Угрозы: У1. Невозможность импорта оборудования из-за санкционной политики. У2. Неправильная экстракция исходных данных. У3. Снижение стоимости традиционного производства синтез-газа.	1. Расчет с учетом отечественного оборудования позволит предотвратить экономические потери. 2. Использование термодинамических методов разработки теплообменной сети позволит своевременно выявить ошибку в экстракции данных.	1. Использование квалифицированного персонала для экстракции исходных данных. 2. Использование теплообменного оборудования с развитой поверхностью. 3. Продвижение новой технологии с целью появления спроса.

Проанализировав матрицу SWOT-анализа, можно сделать вывод, что для выхода на лидирующие позиции на рынке необходимо провести ряд следующих преобразований:

- использование отечественных теплообменных аппаратов с развитой теплообменной поверхностью;
- использование качественной теплоизоляции и расположение теплообменников на закрытых площадках;
- использование современных методов сварки.

4.1.3 Оценка готовности проекта к коммерциализации

Для оценки степени готовности НИР к коммерциализации заполним специальную форму, содержащую показатели о степени проработанности проекта с позиции коммерциализации и компетенций разработчика научного проекта (таблица 4.3).

Таблица 4.3 – Оценка степени готовности проекта к коммерциализации

№ п/п	Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
1	Определен имеющийся научно-технический задел	4	4
2	Определены перспективные направления коммерциализации научно-технического задела	5	5
3	Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке	5	5
4	Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок	5	4
5	Определены авторы и осуществлена охрана их прав	4	4
6	Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	3	3
7	Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	3	3
8	Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	3	3
9	Определены пути продвижения научной разработки на рынок	3	3
10	Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	5	5

Продолжение таблицы 4.3

11	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	4	3
12	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	4	5
13	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	4	4
14	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	4	4
15	Проработан механизм реализации научного проекта	5	5
	ИТОГО БАЛЛОВ	61	60

Оценка готовности научного проекта к коммерциализации (или уровень имеющихся знаний у разработчика) определяется по формуле:

$$B_{\text{сум}} = \sum B_i \quad (4.2)$$

где $B_{\text{сум}}$ – суммарное количество баллов по каждому направлению;

B_i – балл по i -му показателю.

Значение $B_{\text{сум}}$ по обоим направлениям попало в интервал от 75 до 60, следовательно, данная разработка считается перспективной. Уровень имеющихся знаний у разработчика достаточен для успешной коммерциализации.

Наиболее эффективным методом коммерциализации для данной НИР является инжиниринг. Имеется ряд предприятий по производству аммиака, метанола и т.д., которые заинтересованы в использовании дешевых способов производства синтез-газа.

Исследования проводятся на основе данных, взятых непосредственно с предприятия. Владелец предприятия и работники, выполняющие исследования, заранее договариваются о предоставлении последними услуг по повышению эффективности процесса, а производитель в свою очередь предоставляет данные для НИИ.

4.1.4 Инициация проекта

Информация по заинтересованным сторонам проекта представлена в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
НИ ТПУ	Сотрудничество, развитие партнёрских отношений для достижения общих экономических и стратегических целей
ООО «Томскнефтехим»	Разработка энергоэффективных установок получения синтез-газа совместным высокотемпературным электролизом

В таблице 4.5 представлена иерархия целей проекта и критерии достижения целей.

Таблица 4.5 – Цели и результат проекта

Цели проекта:	Исследование влияния структуры теплообменной сети на потребление энергии в газопереработке
Ожидаемые результаты проекта:	Разработка рекомендаций по эффективному использованию установок высокотемпературного электролиза CO ₂ и H ₂ O в зависимости от используемого источника энергии
Критерии приемки результата проекта:	Экономические и технические показатели проекта, установленные заказчиком
Требования к результату проекта:	Требование:
	Проведение анализа установки совместного высокотемпературного электролиза CO ₂ и H ₂ O
	Определение энергоэффективной конфигурации теплообменной сети
	Разработка универсальной топологии теплообменной сети

4.2 Планирование научно-исследовательских работ

4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Для выполнения научного исследования сформирована рабочая группа, в чей состав входят: магистрант, в качестве инженера проекта; научный руководитель магистерской диссертации (НР). Составлен перечень этапов и работ в рамках проведения научно-исследовательской работы и проведено распределение исполнителей по видам работ (Таблица 4.6).

Таблица 4.6 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания, утверждение плана-графика	Научный руководитель
	2	Календарное планирование выполнения НИР	Инженер, научный руководитель
Выбор способа решения поставленной задачи	3	Обзор научной литературы	Инженер
	4	Выбор методов исследования	Инженер
Теоретические и экспериментальные исследования	5	Планирование эксперимента	Инженер, научный руководитель
	6	Экстракция данных	Инженер
	7	Проведение исследования	Инженер
Обобщение и оценка результатов	8	Обработка полученных данных	Инженер
	9	Оценка правильности полученных результатов	Инженер, Научный руководитель
Оформление отчета по НИР	10	Составление пояснительной записки	Инженер

4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ

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

Для определения, ожидаемого (среднего) значения трудоемкости $t_{ож\ i}$ используется формула:

$$t_{ож\ i} = \frac{3t_{min\ i} + 2t_{max\ i}}{5} \quad (4.3)$$

где $t_{ож\ i}$ – 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_p , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями:

$$T_{pi} = \frac{t_{ож\ i}}{Ч_i} \quad (4.4)$$

где T_p – продолжительность выполнения одной работы, раб.дн.;

$t_{ож\ i}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел. – дн.;

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

Для перевода длительности каждого этапа из рабочих в календарные дни, необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{кал} \quad (4.5)$$

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

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

$k_{кал}$ – календарный коэффициент.

Коэффициент календарности равен:

$$k_{кал} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}} = \frac{365}{365 - 104 - 14} = 1,48 \quad (4.6)$$

Результаты расчетов занесены в таблицу 4.7.

Таблица 4.7 – Временные показатели проведения научного исследования

№ работы	Трудоёмкость работ						Длительность работ в рабочих днях (T_{pi})	Длительность работ в календарных днях (T_{ki})
	t_{min} , чел-дни		t_{max} , чел-дни		$t_{ож}$, чел-дни			
	Инженер	НР	Инженер	НР	Инженер	НР		
1	2	-	4	-	2,8	-	2,8	4
2	1	3	3	4	1,8	3,4	3,4	4
3	-	6	-	10	-	7,6	7,6	11
4	-	3	-	5	-	3,8	3,8	6
5	2	6	4	8	2,8	6,8	6,8	10
6	-	5	-	7	-	5,8	5,8	9
7	-	15	-	20	-	17	17	25
8	-	10	-	15	-	12	12	18
9	2	3	4	5	2,8	3,8	3,8	5
10		8		10	-	8,8	8,8	13
Итого:	7	59	15	84	10,2	69	71,8	105

На основании таблицы 4.7 составляем календарный план-график, который наглядно показывает продолжительность работы исполнителей. План-график (диаграмма Ганта) представлен в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – План-график выполнения НИР

№ работы	Исп	T_{ki} , кал. дн.	Продолжительность работ											
			февр			март			апр			май		
			1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	НР	4	█											
2	НР Инженер	4		█										
3	Инженер	11		█										
4	Инженер	6			█									
5	НР Инженер	7				█								
6	Инженер	9				█								
7	Инженер	25					█							
8	Инженер	18						█						
9	НР Инженер	5								█				
10	Инженер	13										█		

4.3 Бюджет научно-исследовательской работы

При планировании бюджета НИР должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов планируемых расходов, необходимых для его выполнения. В процессе формирования бюджета, планируемые затраты группируются по статьям:

- материальные затраты на НИР;
- затраты на специальное оборудование для научных исследований
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- накладные расходы.

4.3.1 Расчет материальных затрат НИИ

Материальные затраты включают стоимость всех используемых в ходе работы материалов.

В таблице 4.9 отражены материальные затраты, необходимые для выполнения НИР.

Таблица 4.9 – Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, руб.
Бумага	листов	120	2	240
Чернила для принтера	мл	110	1,5	165
Тетрадь	шт.	1	100	100
Ручка	шт.	1	75	75
Карандаш	шт.	1	35	35
Итого				615

4.3.2 Расчет затрат на специальное оборудование и программное обеспечение для НИР

Определение затрат на выполнение НИР сводится к определению амортизационных отчислений, т.к. оборудование и программное обеспечение (ПО) было приобретено до начала выполнения магистерской диссертации. Ввиду этого при расчете затрат на оборудование и ПО учитываем только рабочие дни по данной теме.

Расчет амортизации проводится следующим образом:

Норма амортизации рассчитывается по формуле:

$$N_A = \frac{1}{n} \quad (4.7)$$

где n – срок полезного использования в количестве лет.

Амортизация оборудования рассчитывается по формуле:

$$A = \frac{N_A \cdot I}{12} m \quad (4.8)$$

где I – итоговая сумма, тыс. руб.;

m – время использования, мес.

Затраты на специальное оборудование и ПО приведены в таблице 4.10

Таблица 4.10 – Затраты на специальное оборудование и ПО

№ п/п	Наименование оборудования и ПО	Кол-во ед.	Срок полезного использования, лет	Время использования, мес.	N_A , %	Цена, руб.	Амортизация
1	Компьютер	2	5	3	20	150000	7500
2	Microsoft Office	1	1	3,5	100	30000	8750
3	MathCad	1	1	0,5	100	45720	1905
4	UniSim Design	1	1	1	100	100000	8333
Итого:						26488 руб.	

4.3.3 Основная заработная плата исполнителей темы

Статья заработной платы исполнителей темы включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НИР, (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:

$$Z_{\text{ап}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}} \quad (4.9)$$

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

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

Основная заработная одного сотрудника рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_{\text{р}} \quad (4.10)$$

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

$T_{\text{р}}$ – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим персоналом, раб. дн.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}} \quad (4.11)$$

где $Z_{\text{м}}$ – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

при отпуске в 24 раб.дня $M = 11,2$ месяца, 5-дневная неделя;

при отпуске в 48 раб.дней $M = 10,4$ месяца, 6-дневная неделя;

$F_{\text{д}}$ – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб.дн.

В таблице 4.11 приведен баланс рабочего времени сотрудников, задействованных в выполнении магистерской диссертации.

Таблица 4.11 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней		
- выходные	52	104
- праздничные дни	14	14
Потери рабочего времени		
- отпуск	48	24
- невыходы по болезни	5	10
Действительный годовой фонд рабочего времени	246	213

Месячный должностной оклад работника определяет по формуле:

$$З_{\text{м}} = З_{\text{тс}} \cdot k_{\text{р}} \quad (4.12)$$

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

$k_{\text{р}}$ – районный коэффициент, равный 1,3 для Томска.

Расчет основной заработной платы приведен в таблице 4.12.

Таблица 4.12 – Расчет основной заработной платы

Исполнители	$Z_{\text{б}}$, руб.	$k_{\text{р}}$	$Z_{\text{м}}$, руб.	$Z_{\text{дн}}$, руб.	$T_{\text{р}}$, раб. дн.	$Z_{\text{осн}}$, руб.
НР	36300	1,3	47190	2010,41	10	20104,1
Инженер	28000	1,3	36400	1493,33	69	103039,8
Итого						123143,9

4.3.4 Дополнительная заработная плата исполнительной темы

Расчет дополнительной заработной платы проводится по следующей формуле:

$$Z_{\text{доп}} = Z_{\text{осн}} \cdot k_{\text{доп}} \quad (4.13)$$

где $k_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной заработной платы принимаем 0,12 из диапазона 0,12 – 0,15.

- $Z_{\text{доп}}$ руководителя: 2412,5 руб.;
- $Z_{\text{доп}}$ инженера: 12364,8 руб.

В итоге заработная плата работников рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{зп}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}} \quad (4.14)$$

- для руководителя: 22516,6 руб.;
- для инженера: 115404,6 руб.

В статье расходов отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления) отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Величина этих отчислений определяется по следующей формуле:

$$Z_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}) \quad (4.15)$$

где $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр. Общая ставка взносов составляет в 2021 году – 30 % (ст. 425, 426 НК РФ).

Отчисления во внебюджетные фонды представлены в таблице 4.13.

Таблица 4.13 – Отчисления во внебюджетные фонды

Участник	Основная заработная плата, руб.	Дополнительная заработная плата, руб.
Руководитель проекта	20104,1	2415,5
Инженер	103039,8	12364,8
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды, %	30	
Итого, руб.	руководитель: 6755; инженер: 34621,4	
В сумме	41376,4	

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование графических материалов, оплата услуг связи, электроэнергии, транспортные расходы и т.д. Их величина определяется по следующей формуле:

$$Z_{\text{накл}} = (\text{сумма статей } 1 \div 5) \cdot k_{\text{нр}} \quad (4.16)$$

где $k_{\text{нр}}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы.

Величину коэффициента накладных расходов $k_{нр}$ примем в размере 16%.

Рассчитанная величина затрат НИР является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции.

Определение бюджета затрат на НИР приведен в таблице 4.14.

Таблица 4.14 – Затраты на научно-исследовательский проект

Наименование статьи	Сумма, руб.	Примечание
1. Материальные затраты НИР	615	Таблица 4.9
2. Затраты на специальное оборудование и ПО	26488	Таблица 4.10
3. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	123143,9	Таблица 4.12
4. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	14780,3	Раздел 4.3.4
5. Отчисления во внебюджетные фонды	41376,4	Таблица 4.10
8. Накладные расходы	33024,6	16 % от суммы ст. 1-5
9. Бюджетные затраты НТИ	239428,2	Сумма ст. 1- 8

4.4 Определение ресурсосберегающей, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности проекта

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности проекта. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

В качестве исполнения 1 примем исходную теплообменную сеть, в качестве исполнения 2 примем разработанную теплообменную сеть.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}} \quad (4.17)$$

где $I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i}$ – интегральный финансовый показатель разработки;

Φ_{pi} – стоимость каждого варианта исполнения;

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения проекта.

$$I_{\text{фин.1}} = \frac{381263,5}{381263,5} = 1$$

$$I_{\text{фин.1}} = \frac{239428,2}{381263,5} = 0,63$$

Сравнительная оценка вариантов исполнения теплообменной сети представлена в таблице 4.15.

Таблица 4.15 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии \ Объект исследования	Весовой коэффициент параметра	Исп. 1	Исп. 2
1. Способствует росту производительности труда	0,1	4	4
2. Энергосбережение	0,3	3	5
3. Снижение вредных выбросов в атмосферу	0,3	3	5
4. Утилизация CO ₂	0,15	5	5
5. Снижение импорта электроэнергии	0,15	4	5
ИТОГО	1	3,55	4,9

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i \quad (4.18)$$

где I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности для i -го варианта исполнения разработки;

a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки;

b_i – бальная оценка i -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

n – число параметров сравнения.

$$I_{p-исп1} = 0,1 \cdot 4 + 0,3 \cdot 3 + 0,3 \cdot 3 + 0,35 \cdot 5 + 0,15 \cdot 4 = 3,55$$

$$I_{p-исп2} = 0,1 \cdot 4 + 0,3 \cdot 5 + 0,3 \cdot 5 + 0,35 \cdot 5 + 0,15 \cdot 5 = 4,9$$

Определим интегральный показатель эффективности вариантов исполнения по следующей формуле:

$$I_{исп.i} = \frac{I_{p-испi}}{I_{фин.i}} \quad (4.19)$$

$$I_{исп.1} = \frac{3,55}{1} = 3,55$$

$$I_{исп.2} = \frac{4,9}{0,63} = 7,78$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных:

$$\mathcal{E}_{ср} = \frac{I_{исп1}}{I_{исп2}} \quad (4.20)$$

Таблица 4.16 - Сравнительная эффективность разработки

№	Показатели	Исп. 1	Исп. 2
1	Интегральный финансовый показатель разработки	1	0,63
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	3,55	4,9
3	Интегральный показатель эффективности	3,55	7,78
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	0,46	1

Вывод:

В данном разделе был произведен анализ сильных и слабых сторон выполненного исследования, были выявлены возможности и опасности для его реализации, а также была оценена конкурентоспособность разработанной теплообменной сети в сравнении с уже существующей. При сравнении разработанной теплообменной сети с исходной было выявлено, что первая является более энерго- и экономически эффективной. В результате выполненного анализа, можно сделать вывод, что результаты НИР будут востребованы в промышленности.

5 Социальная ответственность

В данной дипломной работе исследуется влияние структуры теплообменной сети на энергопотребление в процессе производства синтез газа совместным высокотемпературным электролизом CO_2 и H_2O . Обеспечение безопасности условий работы достигается путем поддержания оборудования и технических средств в исправном состоянии, своевременным ремонтом, герметизацией аппаратов, поддержанием режима, утвержденного в технологическом регламенте для установки.

Область применения данного исследования – нефтехимическая промышленность.

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 аппаратов, как входящих в состав теплообменной сети, так и входящих в состав установки по производству синтез-газа в целом.

5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Законодательство РФ об охране труда основывается на Конституции РФ и состоит из федеральных законов и иных нормативных правовых актов субъектов РФ. Среди них можно выделить федеральный закон «Об обязательном социальном страховании от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний». Для реализации этих законов приняты Постановления Правительства РФ «О государственном надзоре и контроле за соблюдением законодательства РФ о труде и охране

труда», «О службе охраны труда», «О Федеральной инспекции труда» и др. [52].

К работе с аппаратами, входящими в состав теплообменной сети, допускаются лица не моложе 18 лет, имеющие соответствующую квалификацию, прошедшие медицинское освидетельствование и годные по состоянию здоровья, а также прошедшие вводный инструктаж и инструктаж на рабочем месте, обучение и проверку знаний по охране труда и промышленной безопасности, практически освоившие безопасные методы и приемы правильного обращения с механизмами, приспособлениями и инструментом.

Работник обязан соблюдать действующие в организации правила внутреннего трудового распорядка, график работы, режим труда и отдыха. Каждый работник имеет право на: компенсации, установленные в соответствии с Трудовым кодексом РФ, коллективным договором, локальным нормативным актом, трудовым договором, если он занят на тяжелых работах, работах с вредными и (или) опасными условиями труда; обеспечение средствами индивидуальной и коллективной защиты в соответствии с требованиями охраны труда за счет средств работодателя.

Для обеспечения безопасных и комфортных условий пребывания персонала на рабочем месте необходимо выполнить ряд следующих условий:

- рабочее место должно содержать исправное оборудование и необходимый инструментарий, для выполнения прямых функций персонала;
- рабочее место должно быть оборудовано средствами ликвидации ЧС (огнетушители, песок, кошма и т.д.);
- трубопроводы должны быть оборудованы мостиками, для возможности их быстрого и безопасного преодоления, на аппаратах должны быть установлены смотровые площадки, огражденные со всех стороны стальными перилами высотой не ниже 1500 мм;
- перемещение персонала по территории предприятия должно осуществляться либо на личном транспорте (велосипед), либо на внутреннем транспорте предприятия (автобусы).

5.2 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. Необходимо выявить вредные и опасные производственные факторы, которые могут возникать при изготовлении и эксплуатации исследуемой теплообменной сети. Выбор факторов производится с использованием [53]. Выявленные факторы перечислены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Опасные и вредные факторы при изготовлении и эксплуатации исследуемой теплообменной сети

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ		Нормативные документы
	Изготовление	Эксплуатация	
1. Повышенный уровень общей вибрации	+	+	ГОСТ 26568-85 Вибрация. Метод и средства защиты. Классификация [54]
2. Повышенный уровень шума	+	+	ГОСТ 12.1.003-2014 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Шум. Общие требования безопасности [55]
3. Недостаточная освещенность рабочей зоны	+	+	СНиП 23-05-095 Естественное и искусственное освещение: нормативно-технический материал [56]
4. Высокая температура поверхности оборудования	+	+	ГОСТ 12.4.011-89 (ССБТ). Средства защиты работающих. Общие требования и классификация [57]; ГОСТ 14202-69. Трубопроводы промышленных предприятий. Опознавательная окраска, предупреждающие знаки и маркировочные щитки [58]

Проведем анализ выявленных вредных факторов при изготовлении и эксплуатации исследуемой теплообменной сети.

Производственное оборудование должно обеспечивать безопасность рабочих при монтаже (демонтаже), вводе в эксплуатацию и эксплуатации как при автономном использовании, так и в составе технологических комплексов при соблюдении требований (условий, правил), предусмотренных эксплуатационной документацией.

1. Повышенный уровень общей вибрации.

Появление данного вредного фактора вызвано тем, что через теплообменные аппараты, входящие в состав теплообменной сети, проходят потоки различного состава со скоростью не менее 0,5 м/с. При этом поток, проходящий через теплообменник, многократно меняет своё направление, вследствие чего и возникает вибрация. При воздействии вибрации может возникать усталость, а как следствие и низкий уровень производительности труда оператора. Режим труда должен устанавливаться при показателе превышения вибрационной нагрузки на оператора не менее 1 дБ (в 1,12 раза), но не более 12 дБ (в 4 раза) [54]. При показателе превышения более 12 дБ (в 4 раза) запрещается проводить работы и применять машины, генерирующие такую вибрацию [54].

Основным способом обеспечения вибробезопасности должно быть создание и применение вибробезопасных машин и аппаратов. Создание таких машин и аппаратов должно обеспечиваться применением методов, снижающих вибрацию в источнике возбуждения, которые приведены в [55]. Для теплообменников характерно снижение уровня вибрации при помощи добавлению в их конструкцию отбойных устройств, изменения расстояния между перегородками, а также изменения конструкций самих перегородок.

2. Повышенный уровень шума.

Шум непосредственно связан с вибрацией, кроме того, основной шум создают насосы, которые перекачивают горячие и холодные технологические и утилитные потоки. Шум и вибрация не только ухудшают самочувствие человека и снижают производительность труда в среднем на 10 - 15%, но и очень часто приводят к профессиональным заболеваниям.

Физиопатологические последствия могут проявляться в форме нарушения слуха и других симптомах.

В большинстве случаев технически трудно снизить шум до очень малых уровней, поэтому при нормировании исходят не из оптимальных, а из терпимых условий, т.е. таких условий, когда вредное действие шума на человека не проявляется или проявляется незначительно. Нормирование допустимых уровней звукового давления производится в соответствии с [4]. По данному документу уровень звука в производственных помещениях не должен превышать 85 дБА.

В качестве средств индивидуальной защиты от шума машин и аппаратов, входящих в состав исследуемой теплообменной сети, используются [59]:

- противошумные наушники, закрывающие ушную раковину снаружи;
- противошумные шлемы и каски.

3. Недостаточная освещенность рабочей зоны.

Рациональное освещение производственных помещений, в данной работе под производственным помещением следует понимать цех, с установленным в нем оборудованием, в светлое время суток осуществляется за счет естественного освещения через оконные проемы в наружных стенах. В темное время суток применяется общее местное и комбинированное искусственное освещение. Предусмотрено также аварийное и дежурное освещение. Рациональное освещение рабочих мест обеспечивает безопасные и здоровые условия труда. Освещение, соответствующее санитарным нормам, является главнейшим условием гигиены труда и культуры производства. При хорошем освещении устраняется напряжение зрения, ускоряется темп работы. При недостаточном освещении глаза сильно напрягаются, темп работы снижается, снижается производительность труда. Недостаточное освещение рабочих мест отрицательно влияет на хрусталик глаза, что может привести к близорукости.

Освещенность на производственном объекте (цех) нормируется [56] и относится к IVa разряду. Наименьший размер объекта различения равен интервалу 0,5 - 1,0 мм, величина нормируемой освещенности равна $E = 300$ лк общего освещения. Размеры помещения: длина $A = 20$ м; ширина $B = 15$ м; высота $H = 6$ м. Высота рабочей поверхности составляет $h_{рп} = 1,5$ м. Коэффициент отражения стен $\rho_c = 30$ %, потолка $\rho_n = 30$ % [60]. Т.к. помещение относится к помещениям со средним выделением пыли, то коэффициент запаса примем равным $k = 1,8$ [60], коэффициент неравномерности для люминесцентных ламп примем равным $Z = 1,1$ [60].

Определим систему общего освещения, в качестве источника искусственного освещения примем светильники люминесцентные с защитной решёткой типа ОДР с $\lambda = 1,3$ [60].

Определим площадь помещения:

$$S = A \cdot B = 20 \cdot 15 = 300 \text{ м}^2 \quad (5.1)$$

Примем, что светильники вплотную крепятся к потолку, тогда высота от потолка до рабочей поверхности составит:

$$h = H - h_{рп} = 6 - 1,5 = 4,5 \text{ м} \quad (5.2)$$

Расчетная длина между двумя рядами светильников определяется по [60].

Примем люминесцентные лампы типа ЛБ, мощностью 40 Вт, со световым потоком 2800 лм [60]. Определим расстояние между светильниками:

$$L = \lambda \cdot h = 1,3 \cdot 4,5 = 5,85 \text{ м} \quad (5.3)$$

Определим число рядов светильников:

$$n = \frac{B}{L} = \frac{15}{5,85} = 2,56 \quad (5.4)$$

Примем число рядов по рекомендации [60] равным $n = 2$. Тогда индекс помещения равен:

$$i = \frac{S}{(A + B) \cdot n} = \frac{300}{(20 + 15) \cdot 2} = 4,29 \quad (5.5)$$

Т.к. светильник содержит две лампы, то его световой поток составляет $\Phi = 5600$ лм. Коэффициент использования потока [60] примем равным $\eta = 0,59$. По [60] определим необходимое число ламп для освещения:

$$N = \frac{E \cdot S \cdot Z \cdot k}{\Phi \cdot \eta} = \frac{300 \cdot 300 \cdot 1,1 \cdot 1,8}{5600 \cdot 0,59} \approx 56 \quad (5.6)$$

Проведем проверку результатов расчета:

$$\Phi_p = \frac{E \cdot S \cdot Z \cdot k}{N \cdot \eta} = \frac{300 \cdot 300 \cdot 1,1 \cdot 1,8}{56 \cdot 0,59} = 5393 \text{ лм} \quad (5.7)$$

$$-10\% \leq \frac{\Phi_c - \Phi_p}{\Phi_c} \cdot 100\% \leq +20\% \quad (5.8)$$

$$-10\% \leq -3,7 \leq +20\%$$

В ходе расчета, представленного выше, было выявлено, что освещение в цехе соответствует нормам и содержит 28 светильников типа ОДР, расположенных в два ряда. При длине светильника 1,23 м, их общая длина составляет 17,22 м. Расстояние между светильниками в ряду составляет 18,5 см. На рисунке 5.1 представлена схема расположения светильников.

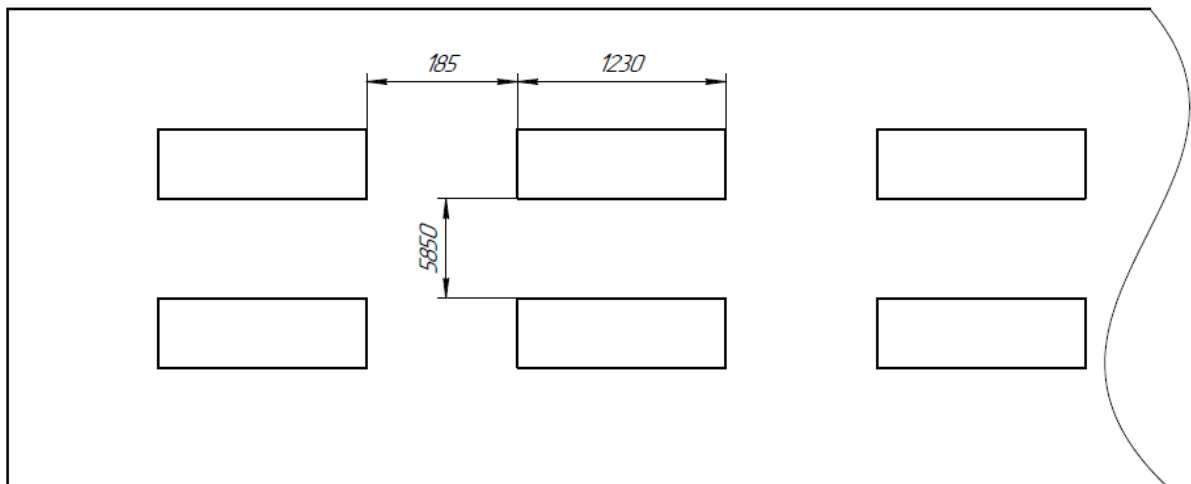


Рисунок 5.1 – Схема расположения светильников

4. Высокая температура поверхности оборудования.

На теплообменники, входящие в состав исследуемой теплообменной сети, необходимо установить защитный экран для предотвращения

разбрызгивания жидкости в случае выхода из строя прокладок. Защитный экран может быть изготовлен из листа оцинкованной или нержавеющей стали толщиной от 0,5 до 0,8 м.

При необходимости нахождения людей вблизи горячих частей оборудования должны быть приняты меры по их защите от ожогов и действия высокой температуры (ограждение действующего оборудования, вентиляция, спецодежда и т.п.) [61].

Все горячие части оборудования, трубопроводы, баки и другие элементы, прикосновение к которым может вызвать ожоги, должны иметь тепловую изоляцию. Температура на поверхности изоляции при температуре окружающего воздуха 25 °С должна быть не выше 45 °С [61]. Окраска, условные обозначения, размеры букв и расположение надписей должны соответствовать правилам устройства и безопасной эксплуатации трубопроводов пара и горячей воды [58].

Трубопроводы агрессивных, легковоспламеняющихся, горючих, взрывоопасных или вредных веществ должны быть герметичными. 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 [62].

5.3 Экологическая безопасность

Мероприятия, направленные на сокращение и уменьшение воздействия на окружающую среду, условно подразделяются на профилактические и технологические [63]. Общие профилактические мероприятия, направленные на сокращение и уменьшение воздействия на окружающую среду [63]:

- устройство и озеленение площадки;

- поддержание в полной технической исправности и герметичности резервуаров и емкостей, технологического оборудования и трубопроводов;

- планово-предупредительные ремонты технологического оборудования, выполняемые по утвержденным планам-графикам специализированными бригадами предприятия;

- контроль сварных стыков физическими методами;

- гидравлическое испытание трубопроводов, резервуаров и оборудования на прочность и герметичность;

- контролируемый и планируемый слив воды после гидроиспытаний;

- высокие требования к качеству металла труб;

- необходимый запас надежности по толщине стенки труб и аппаратов;

Общие технологические мероприятия, направленные на сокращение и уменьшение воздействия на окружающую среду [63]:

- покрытие оборудования и трубопроводов антикоррозионной изоляцией;

- защита оборудования от атмосферной коррозии;

- система постоянного контроля регламентированных значений технологических параметров.

1. Основные мероприятия по охране атмосферного воздуха.

Основными источниками загрязнения атмосферного воздуха могут быть выбросы вредных веществ, а именно синтез-газа, метана и непрореагировавшего диоксида углерода, через неплотности аппаратов, арматуры и фланцевых соединений. Воздействие водорода, входящего в состав синтез-газа, выражается в создании с атмосферным воздухом гремучей смеси, что может привести к взрыву. Монооксид углерода, который также является компонентом синтез-газа, при вдыхании человеком снижает

концентрацию кислорода в крови, что в свою очередь может привести к потере сознания и смерти. Для предотвращения утечек данных газов предусмотрены следующие мероприятия:

- применение герметичных аппаратов и трубопроводов под давлением;
- герметичность трубопроводов за счет максимального соединения элементов трубопроводов сваркой;
- применение технологического оборудования и запорно-регулирующей арматуры в соответствии с рабочими параметрами процесса и коррозионной активностью среды;
- предусмотрена система предохранительных клапанов для защиты аппаратов и трубопроводов от превышения давления;
- сбор утечек от насосов технологического оборудования предусмотрен в емкости закрытой дренажной системы опасных стоков;
- непрерывный контроль загазованности в местах максимально возможных выделений углеводородов;
- периодический контроль максимально разовой ПДК не реже 1 раза в квартал (для веществ III, IV классов опасности), не реже 1 раза в месяц (для веществ II класса опасности);
- периодический контроль за среднесменными ПДК не реже 1 раза в месяц.

2. Основные мероприятия по защите поверхностных вод.

В качестве холодных утилит исследуемой теплообменной сети предполагается использовать охлаждающую воду. Ввиду неисправностей теплообменного оборудования или компрессоров есть вероятность загрязнения воды продуктами синтеза синтез-газа или техническими жидкостями. Поэтому для защиты поверхностных вод от охлаждающей воды предусмотрены следующие мероприятия:

- открытая дренажная система поверхностных стоков;

- открытая дренажная система опасных стоков;
- закрытая дренажная система.

Для предупреждения истощения подземных вод предусмотрены следующие мероприятия:

- учёт использования подземных вод на проектируемом объекте;
- строгое соблюдение лимитов на воду;
- проведение гидрогеологического контроля за предотвращением истощения эксплуатационных запасов подземных вод.

3. Основные мероприятия по охране почв от возможного загрязнения за счет утечки охлаждающей воды из-под фланцевых соединений теплообменных аппаратов или трубопровода.

Для защиты почв предусмотрены следующие мероприятия:

- выполнение строительных работ исключительно в пределах монтажной площадки;
- организация площадок для сбора и хранения отходов производства и потребления;
- сдача отходов производства и потребления осуществляется в специализированную организацию;
- планировка и устройство твердого покрытия на технологических площадках;
- устройство ограждающих стен вокруг технологических резервуаров.

5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Перечень возможных чрезвычайных ситуаций на установке производства синтез-газа:

- пожарная и взрывная опасность;
- землетрясения;

- лесные пожары;
- ураганы.

Наиболее возможной чрезвычайной ситуацией на производстве, вблизи с исследуемой теплообменной сетью, является пожарная и взрывная опасность. Данная ЧС наиболее вероятна т.к. возможно возникновение утечки синтез-газа в атмосферу с образованием гремучей смеси между кислородом воздуха и водородом, входящим в состав синтез-газа.

Производственные помещения, в которых ведутся работы с синтез-газом, должны быть обеспечены приточно-вытяжной вентиляцией, а оборудование - местными отсосами. В помещениях для хранения и применения природного-газа запрещается обращение с открытым огнем, а также использование инструментов, дающих при ударе искру. Электрооборудование и искусственное освещение должно быть выполнено во взрывобезопасном исполнении.

Меры по ликвидации чрезвычайных ситуаций и последствий.

Действия работников при возникновении аварий и аварийных ситуаций определяются по [64]. Для обеспечения безаварийной работы установки и достижения минимального уровня взрыво- пожароопасности процесса предусмотрены следующие мероприятия:

- все стадии технологического процесса непрерывны и склонны к устойчивому протеканию;
- при соблюдении правил эксплуатации процесс не обладает возможностью взрыва внутри технологической аппаратуры;
- на установке отсутствуют открытые поверхности аппаратов и трубопроводов с температурой выше температуры самовоспламенения обрабатываемых веществ;
- контроль и управление процессом осуществляется автоматически и дистанционно из операторной с использованием электронной системы приборов;

- предусмотрены система аварийного освобождения аппаратов от продуктов в аварийную емкость и аварийный сброс на факел;
- на наружной установке, где расположено оборудование, в котором обращаются взрывопожароопасные вещества, предусмотрены датчики загазованности, сигналы от которых поступают в операторную.

Способы и средства пожаротушения.

В соответствии с требованием норм по пожаротушению на установке должны быть предусмотрены первичные и стационарные средства пожаротушения, а также пожарная сигнализация [65]. На установке должны быть предусмотрены следующие средства пожаротушения:

- первичные средства пожаротушения (огнетушители – пенные ОХП-10, корюшковые ОПУ-10, ОПС-10г, углекислотные ОУ-5, ОУ-8; кошмы, ящики с песком, лопаты и т.д.);
- стационарная система пенотушения открытой насосной;
- водяная оросительная система шаровых хранилищ синтез-газа;
- пожарные краны в помещении компрессорной [10].

Вывод:

На опасном производственном объекте, где применяются, транспортируются, производятся легковоспламеняющиеся, горючие жидкости и газы, во избежание аварий, инцидентов и несчастных случаев, необходимо соблюдать установленные законодательством и производственными инструкциями требования безопасности, а эксплуатацию технических устройств производить согласно инструкциям заводов изготовителей. Работодатель должен обеспечить персонал объекта необходимыми средствами защиты от опасных и вредных производственных факторов, а также организовать отдых работников после рабочей смены.

Заключение

Интеграция процесса Фишера-Тропша и совместного высокотемпературного электролиза CO_2 и H_2O позволяет существенно снизить себестоимость синтетических жидких углеводородов. Разработанная технологическая схема для исследуемого процесса позволяет использовать побочные продукты процесса Фишера-Тропша в качестве топлива для когенерации тепла и электроэнергии. Это в свою очередь приводит к уменьшению импорта электроэнергии на 38 %, что также снижает нагрузку на окружающую среду за счет снижения выбросов CO_2 в атмосферу на 21032 т/год.

В случае невозможности использования побочных продуктов процесса Фишера-Тропша как источника энергии, разработанная технологическая схема позволяет использовать в качестве топлива природный газ или уголь. При смене топлива энергоэффективность установки снижается менее, чем на 5 %. Синтез-газ, производимый на установке высокотемпературного электролиза, использующей природный газ или уголь, может быть использован не только для крупнотоннажного процесса Фишера-Тропша, но и для производства метанола или аммиака. Также данную установку можно интегрировать с установкой гидрокрекинга. Такая интеграция позволит снизить себестоимость водородсодержащего газа, что приведет к снижению стоимости продуктов гидрокрекинга, а также уменьшить выбросы CO_2 в окружающую среду.

Результаты данного исследования способствуют разработке установки высокотемпературного электролиза с минимальным углеродным следом и низкой себестоимостью синтез-газа. Также данные результаты позволят выбрать регион, наиболее подходящий для строительства исследуемой установки.

Список публикаций студента

1. S. Boldyryev, T. Gil, M. Kuznetsov. Is it Possible to Reduce the Energy Consumption by 50 % at Existing Refinery Units: the Case Study of Hydrocracking Unit. Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems. Cologne, 01 - 05.09.2020. P. 185.

Список использованных источников

1. Квалифицированная первичная переработка нефтяных и природных углеводородных газов / М. А. Берлин, В. Г. Гореченков, В. П. Капралов. - Краснодар: Советская Кубань, 2012. - 515 с.
2. Синтетические жидкие углеводороды. Технология и экономика производства / Л. С. Глебов, О. Л. Глебова. - Москва: Недра, 2014. - 296 с.
3. Статистический ежегодник мировой энергетики 2020. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://clck.ru/QwgRM> (дата обращения: 19.02.2021).
4. Child, M., Kemfert, C., Bogdanov, D., & Breyer, C. (2019). Flexible electricity generation, grid exchange and storage for the transition to a 100% renewable energy system in Europe. *Renewable Energy*.
5. Awodumi, O. B., & Adewuyi, A. O. (2020). The role of non-renewable energy consumption in economic growth and carbon emission: Evidence from oil producing economies in Africa. *Energy Strategy Reviews*, 27, 100434.
6. Perspectives on the global renewable energy transition. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://clck.ru/TMDvt> (дата обращения: 19.02.2021).
7. Global Energy Review 2020. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2020> (дата обращения: 23.02.2021).
8. Gupta, P. K., Kumar, V., & Maity, S. (2020). Renewable fuels from different carbonaceous feedstocks: A sustainable route through Fischer-Tropsch synthesis. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*.
9. Hodala, J. L., Moon, D. J., Reddy, K. R., Reddy, C. V., Kumar, T. N., Ahamed, M. I., & Raghu, A. V. (2020). Catalyst design for maximizing C5+ yields during Fischer-Tropsch synthesis. *International Journal of Hydrogen Energy*.

10. Ghorbani, B., Ebrahimi, A., Rooholamini, S., & Ziabasharhagh, M. (2020). Integrated Fischer-Tropsch synthesis process with hydrogen liquefaction cycle. *Journal of Cleaner Production*, 124592.
11. Stoots CM, O'Brien JE, Hartvigsen JJ. Syngas production via hightemperature coelectrolysis of steam and carbon dioxide. *J Fuel Cell Sci Technol* 2009;6.
12. Slovakian refiner operating new hybrid hydrogen-production process. 1994.
13. Liu, Z., Jia, G., Zhao, C., & Xing, Y. (2020). Efficient Fischer-Tropsch to light olefins over iron-based catalyst with low methane selectivity and high olefin/paraffin ratio. *Fuel*, 119572.
14. Л. Б. Бурханова, О. Б. Прозорова, Н. А. Лихачева, Э. К. Аминова. Повышение эффективности работы блока гидроформирования производства бутиловых спиртов. *Башкирский химический журнал*. 2019, Том 26, № 3.
15. Lee Pereira, R. J., Argyris, P. A., & Spallina, V. (2020). A comparative study on clean ammonia production using chemical looping based technology. *Applied Energy*, 280, 115874.
16. Виноградов А.С., Воробьев В.С., Даут В.А. и др. Современное состояние производства метанола // Клуб научно-технической информации при журнале «Химия и бизнес». М., 2001. - 149 с.
17. Нефтегазовые технологии на русском языке. [Электронный ресурс]: науч. журн. М.: «Топливо и энергетика», 2006, №9, 127 с.
18. Автотермический риформинг (ATR) – Производство синтез-газа. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://clck.ru/NzqFD> (дата обращения: 31.03.2021).
19. Нефтегазовые технологии на русском языке. [Электронный ресурс]: науч. журн. М.: «Топливо и энергетика», 2006, №8, 131 с.
20. Заменители природного газа. Производство и свойства: Пер. с англ. / У. Л. Лом, А. Ф. Уильямс. - М.: Недра, 1979. - 247 с.

21. Becker W.L. et al. Production of Fischer–Tropsch liquid fuels from high temperature solid oxide co-electrolysis units // *Energy*. 2012. Vol. 47, № 1. P. 99–115.
22. O’Brien J.E. et al. Parametric study of large-scale production of syngas via high-temperature co-electrolysis // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2009. Vol. 34, № 9. P. 4216–4226.
23. Ye, L., & Xie, K. (2020). High-temperature electrocatalysis and key materials in solid oxide electrolysis cells. *Journal of Energy Chemistry*.
24. Dogu, D., Gunduz, S., Meyer, K. E., Deka, D. J., Co, A. C., & Ozkan, U. S. (2019). CO₂ and H₂O Electrolysis Using Solid Oxide Electrolyzer Cell (SOEC) with La and Cl- doped Strontium Titanate Cathode. *Catalysis Letters*.
25. Смит Р., Клемеш Й., ТОВАЖНЯНСКИЙ Л.Л., Капустенко П.А., Ульев Л.М. Основы интеграции тепловых процессов. Харьков. НТУ “ХПИ”. – Библиотека журнала ИТЭ. – Харьков: НТУ “ХПИ”. 2000. - 458 с.
26. Piacentino A. Thermal analysis and new insights to support decision making in retrofit and relaxation of heat exchanger networks // *Applied Thermal Engineering*. 2011. Vol. 31, № 16. P. 3479–3499.
27. Čuček, L., Boldyryev, S., Klemeš, J.J., Kravanja, Z., Krajačić, G., Varbanov, P.S., Duić, N. Approaches for retrofitting heat exchanger networks within processes and Total Sites. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 211, pp. 884–894, 2019.
28. Lai Y.Q., Wan Alwi S.R., Manan Z.A. Graphical customisation of process and utility changes for heat exchanger network retrofit using individual stream temperature versus enthalpy plot // *Energy*. 2020. Vol. 203. P. 117766.
29. Kravanja, Z. (2010). Challenges in sustainable integrated process synthesis and the capabilities of an MINLP process synthesizer MipSyn. *Computers & Chemical Engineering*, 34(11), 1831–1848.
30. Nemet, A., Isafiade, A. J., Klemeš, J. J., & Kravanja, Z. (2018). Two-step MILP/MINLP approach for the synthesis of large-scale HENs. *Chemical Engineering Science*.

31. Aguitoni M.C., Pavão L.V., Antonio da Silva Sá Ravagnani M. Heat exchanger network synthesis combining Simulated Annealing and Differential Evolution // *Energy*. 2019. Vol. 181. P. 654–664.
32. Zamora J.M. et al. Optimization and utilities relocation approach for the improvement of heat exchanger network designs // *Chemical Engineering Research and Design*. 2020. Vol. 156. P. 209–225.
33. Hafizan A.M. et al. Design of optimal heat exchanger network with fluctuation probability using break-even analysis // *Energy*. 2020. Vol. 212. P. 118583.
34. Kayange H.A. et al. Non-structural model for heat exchanger network synthesis allowing for stream splitting // *Energy*. 2020. Vol. 201. P. 117461.
35. Akpomiemie, M. O., & Smith, R. (2016). Retrofit of heat exchanger networks with heat transfer enhancement based on an area ratio approach. *Applied Energy*, 165, 22–35.
36. UniSim – Software for Process Design and Simulation. <https://clck.ru/UhhEx> (дата обращения: 15.03.2021).
37. D.-Y. Peng, D.B.A. Robinson New Two-Constant Equation of State *Ind Eng Chem Fundamen*, 15 (1) (1976), pp. 59-64.
38. Каримова А.Р. Получение компонентов моторных топлив синтезом Фишера-Тропша на модифицированных пиллар-глинах [Текст]: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. тех. наук (05.17.07) / Каримова Альбина Римовна; Уфимский государственный нефтяной технический университет. - Уфа, 2018. - 23 с.
39. S. Boldryev, M. Ban, L. Ulyev, HILECT: an online software for energy saving prediction, CO2 mitigation and retrofit planning, in: *Proceedings of the 12th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 2017, SDEWES2017.0501.
40. Garrett D.E. *Chemical engineering economics*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1989.

41. Архипов В.А., Синогина Е.С. Горение и взрывы. Опасность и Анализ последствий: Учебное пособие. ТГПУ: Изд-во Томского Государственного Педагогического Университета. 2007. –124 с.
42. Адамов В.А. Сжигание мазута в топках котлов. – Л.: Недра, 1989. – 304 с.
43. ГОСТ Р 52087-2018 Газы углеводородные сжиженные топливные. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2018.
44. Стоимость природного газа. ПАО "Газпром". [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://www.sargc.ru/stoimost-prirodnogo-gaza.html> (дата обращения: 02.04.2021).
45. Стоимость угля. ООО" ПРОМИНВЕСТ-УГОЛЬ". [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://prominvest19.ru/price> (дата обращения: 02.04.2021).
46. Мазут топочный (котельный). [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://clck.ru/UhgdL> (дата обращения: 02.04.2021).
47. Цены на газ (СУГ). [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://clck.ru/GaUmH> (дата обращения: 02.04.2021).
48. Экономическая теория: микро- и макроэкономика: учеб. пособие / Под ред. проф. А.М. Гатаулина.- М.: «Финансы и статистика», 2007.
49. Абдурашитов С.А. Насосы и компрессоры / Абдурашитов С.А., Тупиченков А.А., Вершинин И.М., Тененгольц С.М. - М.: Недра, 1974. - 296 с.
50. Лаптев А.Г., Ведьгаева И.А. Устройство и расчет промышленных градирен: Монография. Казань: КГЭУ, 2004. – 180 с.
51. Карта топливно-энергетических ресурсов России. Геологический портал GeoKniga. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://www.geokniga.org/maps/5445> (дата обращения: 25.04.2021).
52. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 27.12.2018).

53. ГОСТ 12.0.003-2015 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. М.: Стандартиформ, 2019.

54. ГОСТ 26568-85. Вибрация. Методы и средства защиты. Классификация (с Изменением N 1). М.: Издательство стандартов, 1987.

55. ГОСТ 12.1.003-2014 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Шум. Общие требования безопасности (Переиздание). М.: Стандартиформ, 2019.

56. Строительные нормы и правила: СНиП 23-05-95. Естественное и искусственное освещение: нормативно-технический материал. - Москва: [б.и.], 1996.

57. ГОСТ 12.4.011-89 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Средства защиты работающих. Общие требования и классификация. М.: ИПК Издательство стандартов, 2001.

58. ГОСТ 14202-69. Трубопроводы промышленных предприятий. Опознавательная окраска, предупреждающие знаки и маркировочные щитки. М.: ИПК Издательство стандартов, 2004.

59. ГОСТ 12.1.029-80 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Средства и методы защиты от шума. Классификация. М.: ИПК Издательство стандартов, 2001.

60. Безопасность жизнедеятельности. Расчёт искусственного освещения. Методические указания к выполнению индивидуальных заданий для студентов дневного и заочного обучения всех направлений и специальностей ТПУ. – Томск: Изд. ТПУ, 2008. – 20 с.

61. Кожухотрубные теплообменники. Инструкция по эксплуатации и техническому обслуживанию. [Электронный ресурс]: Режим доступа: <https://clck.ru/Mрбар> (дата обращения: 03.03.2021).

62. 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.

63. Белов, Сергей Викторович. Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды (техносферная безопасность): учебник для академического бакалавриата / С. В. Белов. - 5-е изд., перераб. и доп.. - Москва: Юрайт ИД Юрайт, 2015. - 703 с.

64. СНиП 21-01-97*. Пожарная безопасность зданий и сооружений (с Изменениями N 1, 2). - М.: ГУП ЦПП, 2002. – 38 с.

65. Федеральный закон от 22.07.2013 г. №123 – ФЗ, Технический регламент о требованиях пожарной безопасности.

Приложение А

(справочное)

Таблица А.1 – Исходные данные для построения модели

Название потока	Сырьевой поток	Легкий топочный газ	Дымовые газы	Продуктовый поток после реактора	Продуктовый поток после компримирования
Компоненты:	% мас.	% мас.	% мас.	% мас.	% мас.
CO ₂	100	-	25,41	24,7	30,37
CO	-	-	-	48,8	59,92
H ₂	-	-	-	7,2	8,83
H ₂ O	-	-	15,73	18,8	0,43
O ₂	-	-	0,57	-	-
N ₂	-	-	58,39	-	-
CH ₄	-	39,81	-	0,5	0,55
C ₂ H ₆	-	3,82	-	-	-
C ₃ H ₈	-	6,64	-	-	-
C ₄ H ₁₀	-	7,28	-	-	-
C ₅ H ₁₂	-	19,19	-	-	-
C ₆ H ₁₄	-	16,02	-	-	-
C ₇ H ₁₆	-	3,31	-	-	-
C ₈ H ₁₈	-	3,93	-	-	-
Расход, кг/с	3,85	1,57	18,05	3,75	3,06
Давление, МПа	0,19	0,16		0,15	4,00
Начальная температура, °С	20	58	2671	800	30
Конечная температура, °С	375	-	100	30	119,5

Приложение Б

(справочное)

Таблица Б.1 – Поточная таблица установки высокотемпературного электролиза

№ Потока	№ Подпотока	Название на начальной схеме	Тип потока	Расход, кг/с	tн, °С	tк, °С	Ср, кВт/(кг °С)	СР, кВт/°С	dH, кВт	h, кВт/м2*С	А	В	С
1		Воздух после реактора	гор	7,71	800	400	1,100	8,481	3392,40	0,1	30800	4407	0,81
2	2.1	Продуктовый поток после реактора	гор	3,75	800	265	2,327	8,726	4668,54	0,1	30800	3749	0,81
	2.2				265	60	2,158	8,093	1658,96	0,1	30800	1644	0,81
	2.3				60	30	14,264	53,491	1604,72	1	30800	1339	0,81
3		I ст. компримирования	гор	3,19	119,5	30	2,189	8,829	790,20	1	30800	1339	0,81
4		II ст. компримирования	гор	3,12	119,5	30	2,188	7,747	693,40	0,8	30800	1339	0,81
5		III ст. компримирования	гор	3,08	119,5	30	2,192	7,210	645,30	0,7	30800	1339	0,81
6		IV ст. компримирования	гор	3,06	119,5	30	2,209	6,975	624,30	0,6	30800	1339	0,81
7	7.1	Сырьевой поток	хол	3,85	20	175	0,925	3,561	551,99	0,1	30800	1644	0,81
	7.2				175	375	1,029	3,962	792,33	0,2	30800	1644	0,81
8		Сырьевой поток в реактор	хол	6,89	495	800	1,710	11,782	3593,48	0,5	30800	4407	0,81
9	9.1	Вода после насоса	хол	0,82	30	116	4,376	3,588	308,60	2	30800	1644	0,81
	9.2				116	116	-	-	1828,31	2,00	30800	1644	0,81
	9.3				116	400	2,003	1,642	466,46	0,2	30800	1644	0,81
	9.4				400	600	2,149	1,762	352,44	0,5	30800	3749	0,81

Продолжение таблицы Б.1

10	10.1	Пар с процесса Фишера-Тропша	хол	2,19	225	450	2,045	4,479	1007,67	0,2	30800	1644	0,81
	10.2				450	600	2,166	4,744	711,53	0,5	30800	3749	0,81
11	11.1	Продувойчный воздух	хол	4,57	97	500	1,070	4,890	1970,63	0,2	30800	1644	0,81
	11.2				500	800	1,134	5,182	1554,71	0,5	30800	4407	0,81
12		Синтез-газа после компримирования	хол	3,08	119,5	240	2,245	6,915	833,21	0,5	30800	1644	0,81
13	13.1	Производство пара	хол	0,551	20	240	4,4	2,424	533,08	2	30800	1644	0,81
	13.2				240	240	-	-	968,70	2	30800	1644	0,81
	13.3				240	750	1,984	1,093	557,22	0,5	30800	3749	0,81

Приложение В

(справочное)

Раздел 1 Литературный обзор

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
9ДМ91	Кузнецов Максим Тарасович		

Консультант школы отделения ИШХБМТ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Научный сотрудник	Болдырев Станислав	К.Т.Н		

Консультант – лингвист отделения ШПИБ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Кобзева Надежда Александровна	К.П.Н.		

1 Literature review

It is difficult to imagine a modern society without cars, gadgets or an ordinary light bulb that allows you to illuminate streets or houses at night. All these things, which make our life easier and safer, use a huge amount of energy. For some of them, energy is spent only at the moment of creating the object itself. Other things continue to use energy throughout the entire life cycle. So, modern society used about 14 billion tons of oil equivalent in 2019 [3] and this indicator continues to grow. Therefore, the problem of energy consumption is one of the most important problems of nowadays.

Energy sources are classified as renewable and non-renewable. Renewable sources include wind, sun, geothermal sources and much more [4]. Non-renewable sources are hydrocarbons [5]. Generation of energy using renewable energy sources is unprofitable, and technologies are only developing. Therefore, more than 70% of electricity is produced using non-renewable energy sources [6]. However, the proportion of energy derived from renewable energy sources is constantly increasing.

Non-renewable energy sources, for example hydrocarbons, are used not only for energy production. Floor coverings and cases for phones, elements of high-precision instruments and components of a spacecraft are obtained from different compounds that make up oil, gas and coal. However, it can lead to a shortage of hydrocarbons. Therefore, scientists have begun to increasingly turn their attention to the production of synthetic oil by using the Fischer-Tropsch process in recent years [8]. To increase the efficiency and profitability of this process, it is necessary to improve the technology, namely, to modify the catalysts [9], to modernize the installation [10] and to reduce the cost of raw materials, to reduce its dependence on oil and gas [11].

The raw material for the Fischer-Tropsch process is syngas, which is produced in huge amount. However, most of syngas is used for production of methanol [12], SLH [13], butyl and other alcohols [14] and ammonia [15]. It is due

to the high profitability of these processes. Improving the energy efficiency of syngas units is important. It is due to the huge consumption of syngas and the possibility of its use for synthetic oil production. The existing units of syngas production do not meet modern energy requirements, because were built in the last century. Therefore, the key aim of this work is reducing energy consumption by upgrading the unit and using non-hydrocarbon feedstock for syngas production.

1.1 Basic units of syngas production

This section provides an overview of the main units of syngas production and their process flow diagrams. Also, the new method of syngas production by high-temperature co-electrolysis of CO_2 and H_2O are shown in this section.

1.1.1 Natural gas steam reforming

Methane steam reforming or single-stage reforming is the oldest method of producing syngas. This method is less energy efficient than other methods of producing syngas. The single-stage reforming includes the conversion of natural gas in a tube oven at high temperature and low pressure [16]. One of the main disadvantages of single-stage reforming is the large size of the radiant chamber in the reforming oven. It leads to the formation of a large volume of flue gases. The resulting excess heat leads to overproduction of steam. It reduces the energy efficiency of steam reforming. Next, we will consider 2 of the most modern technologies of production syngas by single-stage reforming.

1.1.1.1 Natural gas classical steam reforming

The unit of natural gas steam reforming is not energy efficient, but it can use not only natural gas as feedstock, but also gas condensate and propane-butane

mixtures. The versatility of the raw material is unit's dignity, but today it is the norm than feature of the syngas production technology.

The generalized process flow diagram of a single-stage reforming of natural gas is shown in Figure 1.1. This process flow diagram includes a unit of preliminary treatment of raw materials, a unit of preliminary conversion, a unit of steam conversion of hydrocarbons, a unit of removing CO₂ and a unit of low-temperature cleaning.

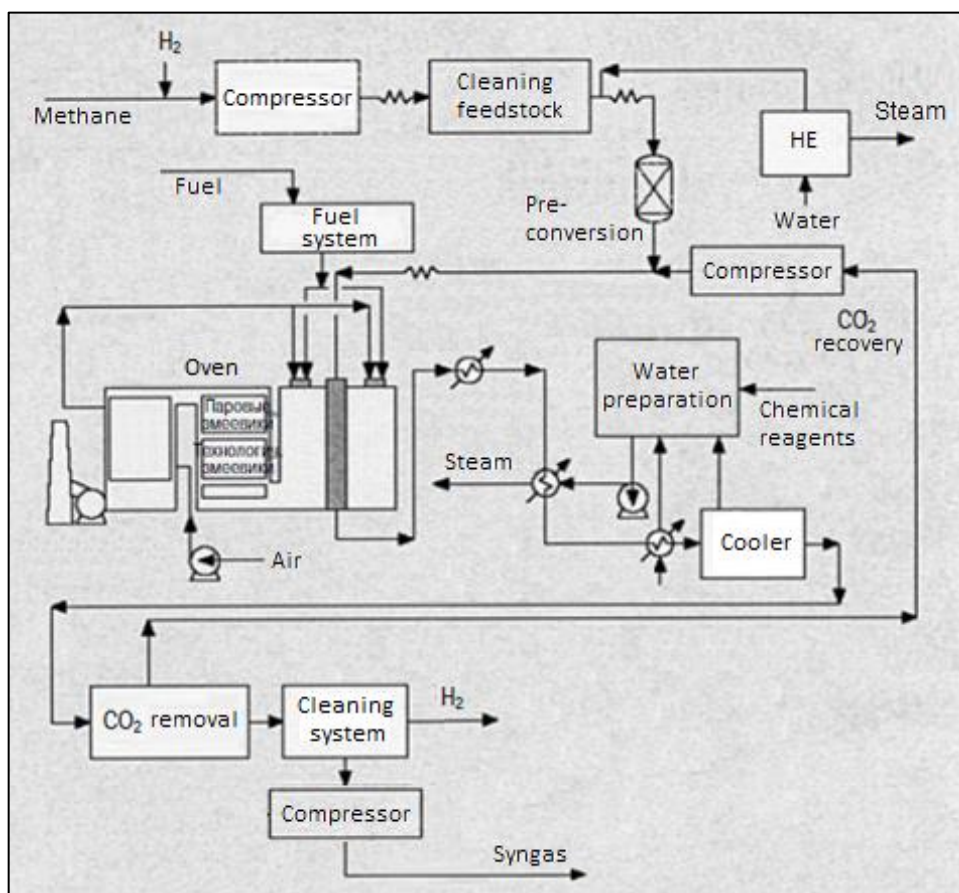


Figure 1.1 – The generalized process flow diagram of a single-stage reforming [17]

Hydrocarbon feedstock enters the purification unit, where it is purified from mechanical impurities and catalytic poisons. The cleaned feedstock is mixed with recycle CO₂ from the CO₂ removal unit and process steam. The resulting gas mixture is heated and enters the tubular reformer, where it is converted into syngas. At the request of customers, single-stage reforming unit can be equipped with a pre-conversion reactor, which is installed directly in front of the tubular reformer.

The excessing heat of reactions try to use for generating steam. After the tubular reformer cooled syngas is sent to the unit for removing CO₂ and subsequent purification for commercial syngas predetermined quality.

1.1.1.2 Advanced natural gas steam reforming

Основным отличием усовершенствованной паровой конверсии природного газа, от простой паровой конверсии является использование печи с боковым расположением горелок, использование нового катализатора фирмы Topsue [17]. Энергоэффективная утилизация тепла предотвращает избыточную выработку технологического пара.

The main difference between advanced natural gas steam reforming and classical steam reforming is using the oven with side burners, a new Topsue catalyst [17]. Energy efficient heat recovery prevents excess process steam generation.

The process flow diagram of advanced natural gas steam reforming is shown in Figure 1.2.

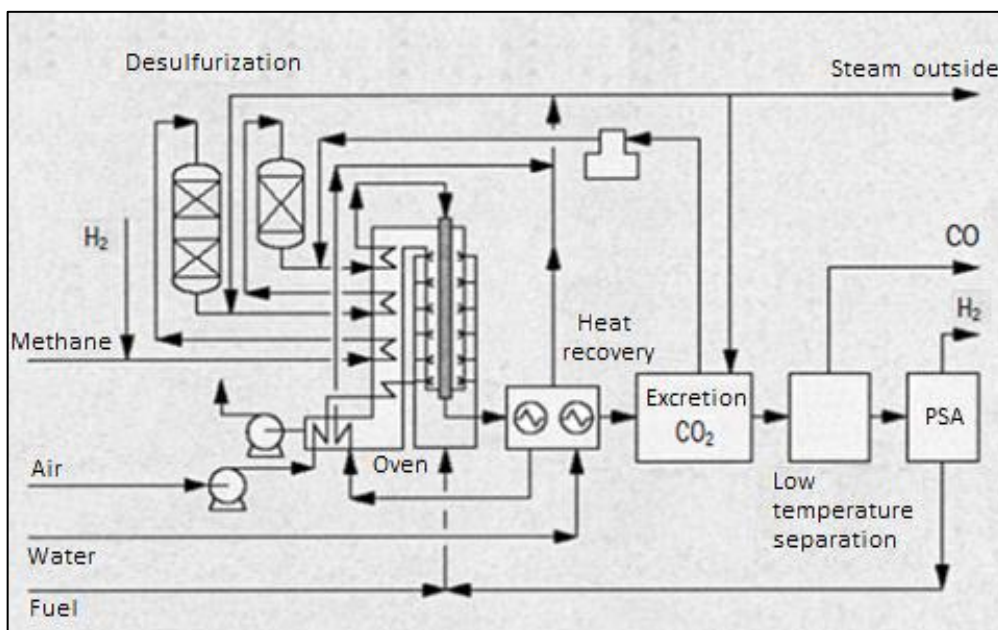


Figure 1.2 – The process flow diagram of advanced natural gas steam reforming

A pre-reformer is used when heavy hydrocarbons are used as feedstock. Using of CO₂ generated during the production of syngas significantly reduces the economic costs of its import. Purification of syngas from other reaction products is carried out using membrane separation, low-temperature separation or using pressure swing adsorption. The choice of methods depends on the final quality of the commercial product.

1.1.2 Natural gas autothermal reforming

Autothermal reforming is the process of producing syngas by partial oxidation of hydrocarbon feedstock with oxygen and steam with followed by catalytic reforming [18]. The main raw material of autothermal reforming units is natural gas and gas condensate. Next, we will consider 2 process flow diagrams of production syngas by autothermal conversion of natural gas and highlight their main features.

1.1.2.1 Autothermal Reforming (Uhde)

The unit is intended for producing of syngas required for producing of ammonia, methanol, SLH by the Fischer-Tropsch process and oxosynthesis products [19]. The raw material can be natural gas and methane itself, propane-butane mixture, gas condensate or even their gas mixtures. The versatility of raw material is one of the main advantages of this unit. The process flow diagram of an autothermal reforming by Uhde is shown in Figure 1.3.

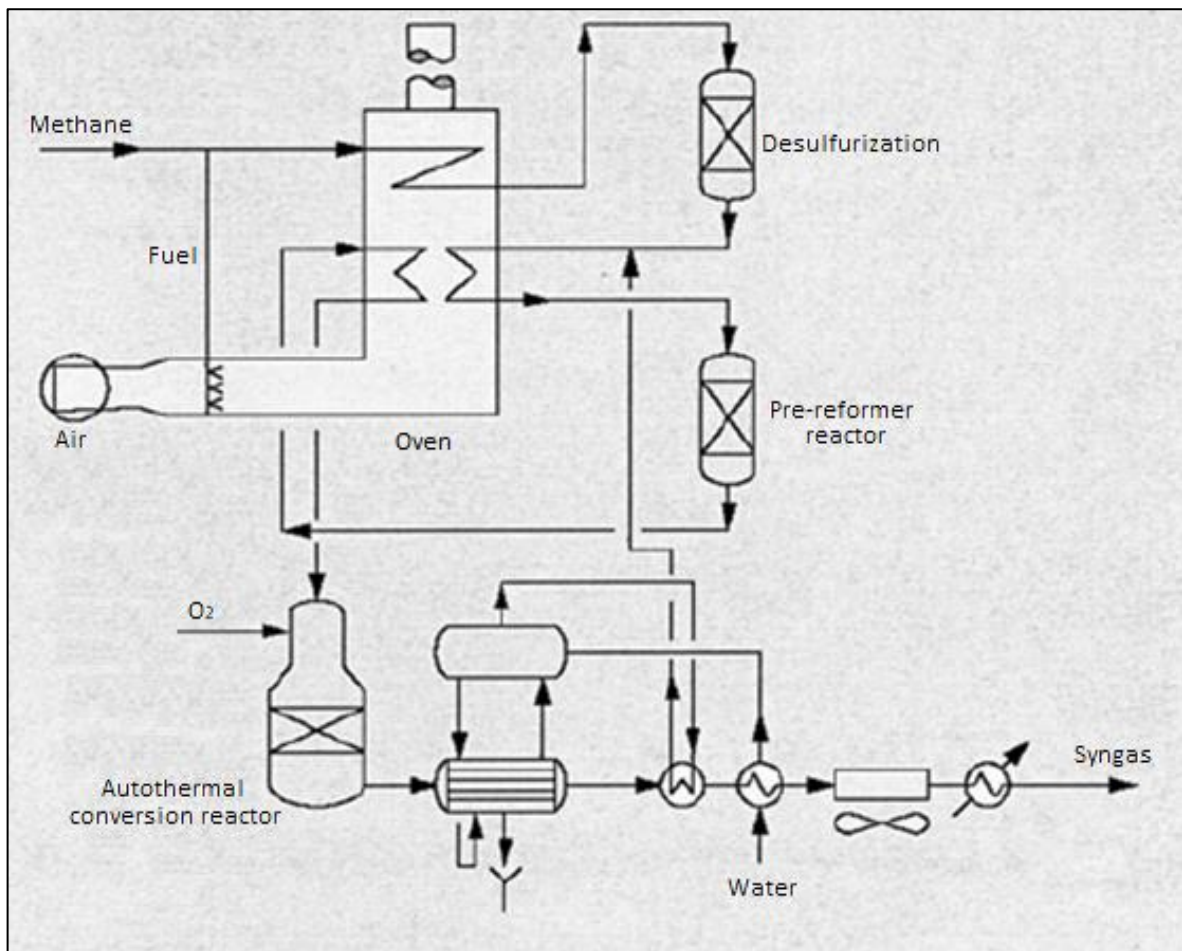


Figure 1.3 – The process flow diagram of an autothermal reforming by Uhde [19]

Autothermal reforming technology (Uhde) is an alternative to conventional steam reforming of natural gas. Analyzing figure 1.3, it is seen that the feedstock (natural gas) is preheated in the oven, and then sent to desulfurization in the adsorber. Then it is reheated and sent to the adiabatic autothermal conversion reactor (AACR). The feature of the AACR is water-cooled oxygen nozzles, which are located under the reactor head [12]. The nozzles provide complete mixing of the components in the combustion zone without the use of any internal metal things. Reducing of the metal consumption of the AACR leads to an additional reduction in capital costs. The resulting syngas heated to 1000-1100 °C is used for generating high pressure steam. After cooling, the resulting syngas is sent for cleaning from CO₂ and steam. Also, there are flow diagrams where the filtered CO₂ is returned to

the reactor to increase the rate of conversion of natural gas or other feedstocks [12].

1.1.2.2 Autothermal Reforming (Lurgi)

The process flow diagram of autothermal reforming (Lurgi) is shown in Figure 1.4.

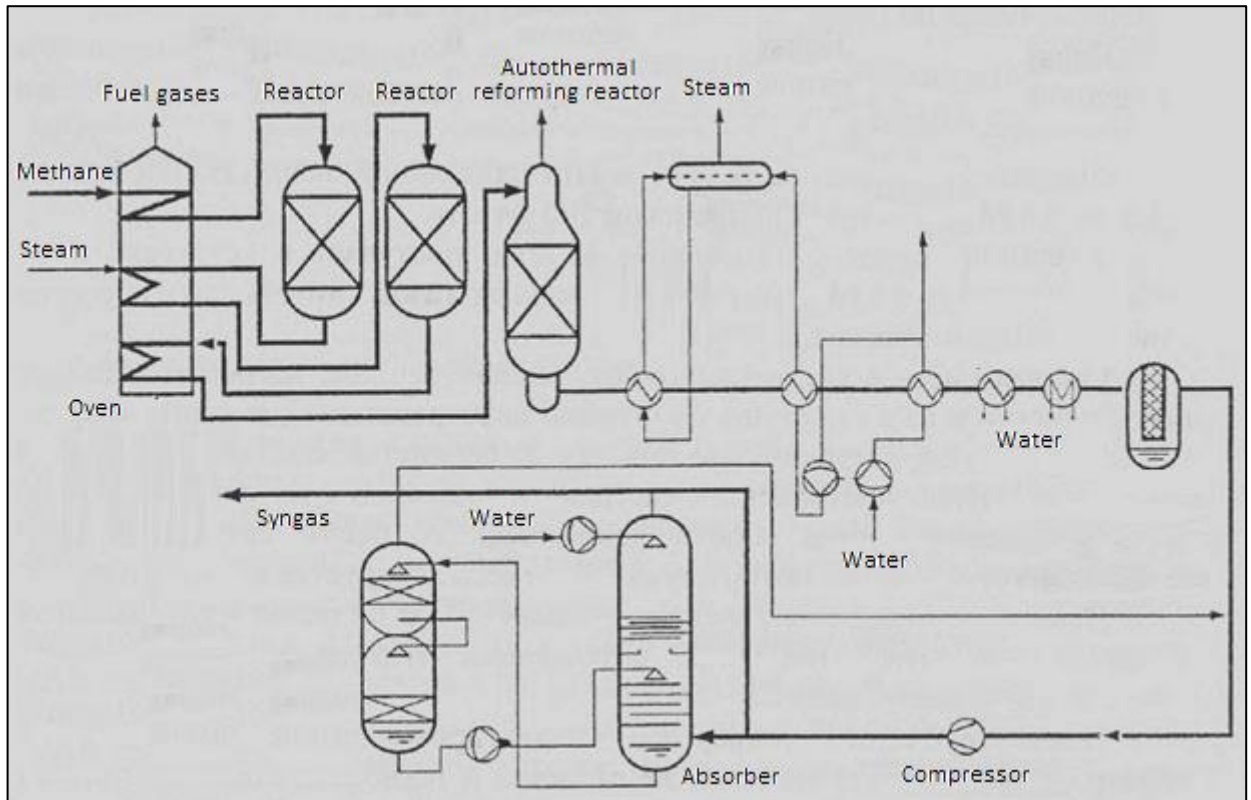


Figure 1.4 – The process flow diagram of autothermal reforming (Lurgi) [20]

The feedstock passes through the heater, where it is heated by recuperative heat exchange. Then the heated feedstock sequentially enters each reactor of the autothermal reforming reactor block. After the reactor, the resulting syngas passes through recuperative heat exchangers, where it gives off its heat to the boiler water and enters the gas condenser. In this condenser, the temperature of the synthesis gas is reduced to condense part of the gases that are formed during the conversion of natural gas. After the gas condenser, the syngas is sent to the absorber, where it is finally cleaned of impurities.

Lurgi's autothermal reforming unit practically look likes Uhde's unit, however, it also has a number of differences. One of the differences is a more developed heat exchange network, as well as an improved process for cleaning syngas from CO₂ and water vapor.

1.1.4 High-temperature co-electrolysis

Nowadays, the method of producing syngas by high-temperature co-electrolysis CO₂ and H₂O is the most economical and energy efficient. These units can be located adjacent to the previously described units or separate from them in places where excess CO₂ is had.

The high-temperature co-electrolysis is supposed to be used to produce syngas, which will then be use to production of methanol, SLH, butyl alcohols and ammonia. The feedstock must be heated up to 800 °C before being fed into the reactor, so there are process flow diagrams that use on various sources of thermal energy. One of the heat sources is a nuclear power plant (NPP), such the unit is characterized by low operating costs. Another source of heat is hydrocarbon fuel.

1.1.4.1 High-temperature co-electrolysis using the heat of the nuclear power plant

One of the cheapest and easiest ways to heat feedstock to a high-temperature is using hot utilities from a NPP. However, this method can be called strange, because there is a need for a joint location of the unit for the production of syngas and a NPP, which significantly increases the danger of such production. Using cheap hot utilities from NPP will significantly reduce the price of the resulting syngas and products of its conversion.

The process flow diagram of high-temperature co-electrolysis CO₂ and H₂O using the heat of a NPP is shown in Figure 1.6.

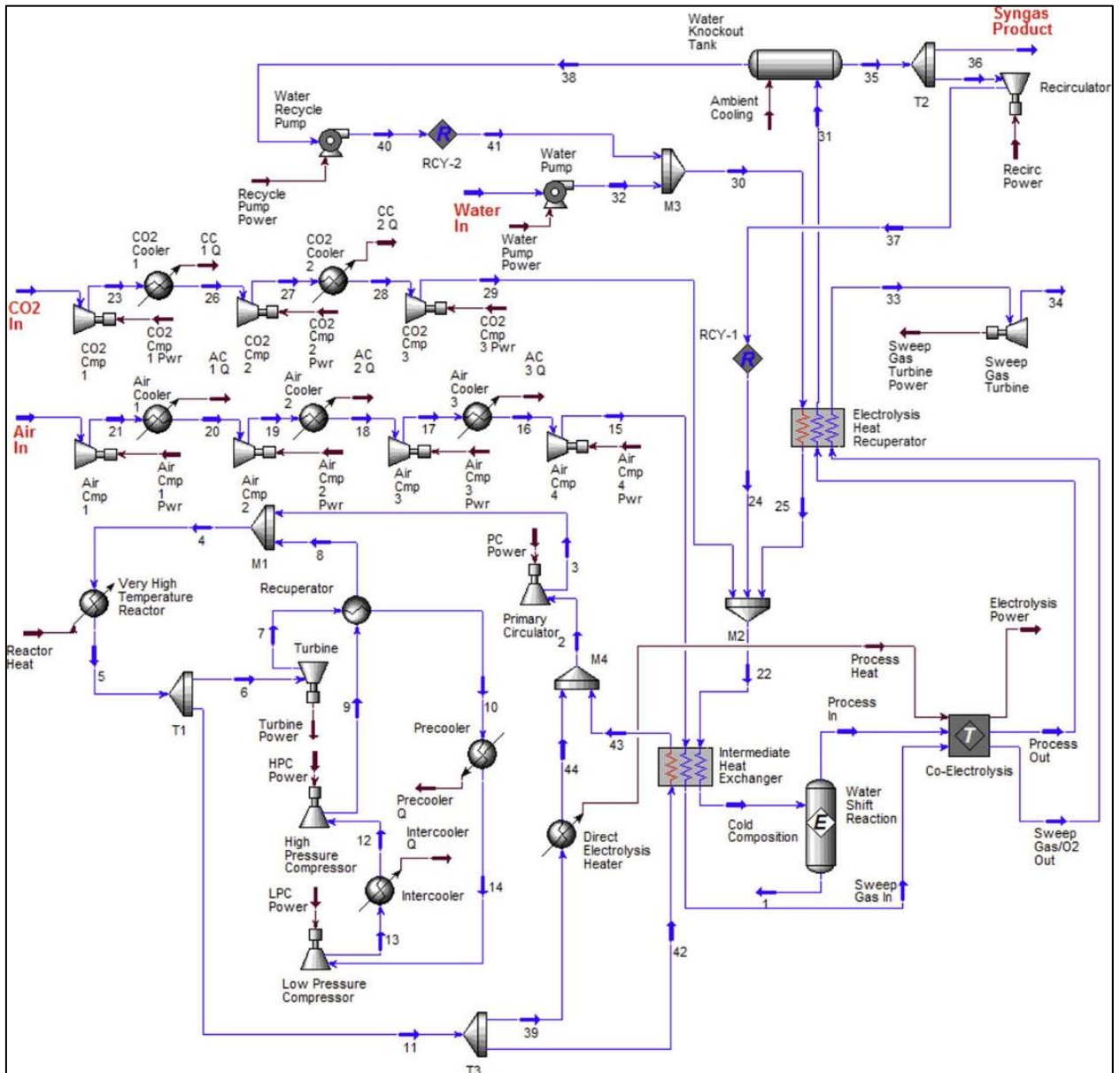


Figure 1.6 – The process flow diagram of high-temperature co-electrolysis CO₂ and H₂O using the heat of a NPP [22]

The water stream is compressed to a working pressure of 3.5 MPa using a pump. It is then mixed with the recirculating water stream from the catchment tank in mixer M3. After M3, the water stream is directed to the electrolysis recuperator, where it is evaporated and heated due to the heat of the electrolysis process and the heat of the purge air stream removed. Then the formed steam is mixed in the mixer M2 with CO₂ and with the recycle syngas from the separator T2. After mixer M2,

the gas mixture enters an intermediate heat exchanger (IHX), where heating of the steam-gas mixture to the working temperature of the reactor takes place. Then the feedstock goes to the electrolyzer. The resulting syngas passes through the electrolysis recuperator being cooled by heating and evaporation of water.

1.1.4.2 High-temperature co-electrolysis using the heat of a hydrocarbon fuel

The process flow diagram of the production of syngas by high-temperature co-electrolysis unit using heat from hydrocarbon fuel is similar to the previous flow diagram, but instead of a NPP, an oven and/or a burner is used. Using of hydrocarbon fuel as a heat source is safer and also makes it possible to produce syngas from CO₂ and H₂O at gas processing plants (GPPs) or oil processing plants (OPPs).

The most interesting method for the production of syngas is the method considered in this subsection, since its implementation is possible at almost any GPP and OPP. It is also necessary to take into account the fact that CO₂ used as a feedstock can be obtained by gasification of coal. This makes high-temperature co-electrolysis plants very flexible. They can be introduced not only at GPPs and OPPs, but also located near power plants, which will additionally reduce CO₂ emissions into the atmosphere.

It should also be noted the great interest of the scientific community in this method of producing syngas. For example, some scientists are struggling with lowering the temperature in an electrochemical reactor. They are helped in this by replacing graphite electrodes with metal electrodes of various compositions [23]. Other scientists modify the composition of the electrodes to increase the rate of electrochemical reactions [24].