

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

---

Институт природных ресурсов  
Направление подготовки 18.03.02 «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии»  
Кафедра ХТТ и ХК

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

Тема работы
<b>Исследование каталитической активности ультрадисперсных порошков железа в синтезе жидких углеводородов</b>

УДК 665.652.72:669.12-492.3

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2К31	Жданов Алексей Андреевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Попок Евгений Владимирович	к.т.н.		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент кафедры менеджмента	Рыжакина Татьяна Гавриловна	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ассистент кафедры ЭБЖ	Немцова Ольга Александровна	-		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ХТТ и ХК	Юрьев Егор Михайлович	к.т.н.		

## ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ (ООП 18.03.02)

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС ВПО, критериев и/или заинтересованных сторон
<i>Профессиональные компетенции</i>		
Р1	Применять базовые математические, естественнонаучные, социально-экономические и специальные знания в профессиональной деятельности	Требования ФГОС (ПК-1,2,3,14,16,17,18), Критерий 5 АИОР (п.1.1)
Р2	Применять знания в области энерго-и ресурсосберегающих процессов химической технологии, нефтехимии и биотехнологии для решения производственных задач	Требования ФГОС (ПК-4,5,9,15 ОК-7), Критерий 5 АИОР (пп.1.1,1.2)
Р3	Ставить и решать задачи производственного анализа, связанные с созданием и переработкой материалов с использованием моделирования объектов и процессов химической технологии, нефтехимии и биотехнологии.	Требования ФГОС (ПК-4,5,8,11 ОК-2,4), Критерий 5 АИОР (пп.1.2)
Р4	Проектировать и использовать энерго-и ресурсосберегающее оборудование химической технологии, нефтехимии и биотехнологии	Требования ФГОС (ПК-8,11,23,24), Критерий 5 АИОР (п.1.3)
Р5	Проводить теоретические и экспериментальные исследования в области энерго-и ресурсосберегающих процессов химической технологии, нефтехимии и биотехнологии	Требования ФГОС (ПК-1,4,5,19-22, ОК-7,10), Критерий 5 АИОР (п.1.4)
Р6	Осваивать и эксплуатировать современное высокотехнологичное оборудование, обеспечивать его высокую эффективность, соблюдать правила охраны здоровья и безопасности труда на производстве, выполнять требования по защите окружающей среды.	Требования ФГОС (ПК-6,7,10,12,13,14,17 ОК-3,4,8), Критерий 5 АИОР (п.1.5)
<i>Общекультурные компетенции</i>		
Р7	Демонстрировать знания социальных, этических и культурных аспектов профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-1,2,6-10), Критерий 5 АИОР (пп.2.4,2.5)
Р8	Самостоятельно учиться и непрерывно повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-6,7,8), Критерий 5 АИОР (2.6)
Р9	Владеть иностранным языком на уровне, позволяющем разрабатывать документацию, презентовать результаты профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-11), Критерий 5 АИОР (п.2.2)
Р10	Эффективно работать индивидуально и в коллективе, демонстрировать ответственность за результаты работы и готовность следовать корпоративной культуре организации.	Требования ФГОС (ОК-3,4,5,12), Критерий 5 АИОР (пп.1.6, 2.3)



Институт *природных ресурсов*

Направление подготовки (специальность) *18.03.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии, специализация Основные процессы химических производств и химическая кибернетика*

Кафедра *Химической технологии топлива и химической кибернетики*

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой

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

### ЗАДАНИЕ

#### на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

*Бакалаврской работы*

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

Студенту:

Группа	ФИО
<i>2К31</i>	<i>Жданов Алексей Андреевич</i>

Тема работы:

*Исследование каталитической активности ультрадисперсных порошков железа в синтезе жидких углеводородов*

Утверждена приказом директора (дата, номер)

от 31.01.2017 г. №420/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:

23 мая 2017 г.

### ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

#### Исходные данные к работе

*(наименование объекта исследования или проектирования;  
 производительность или нагрузка;  
 режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.);  
 вид сырья или материал изделия;  
 требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).*

Электровзрывные катализаторы на основе железа для синтеза углеводородного сырья из (CO + H<sub>2</sub>), полученные в атмосфере различных газов (CO, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>):

- исследование каталитической активности образцов катализатора в различных технологических условиях;
- Определение общей степени конверсии монооксида углерода.
- качественный и количественный анализ полученных жидких продуктов синтеза методом хроматографии;

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b> (аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</p>	<p>Аналитический обзор по использованию нетрадиционных катализаторов (электровзрывных, плазмохимических) в синтезе углеводородного сырья. Обзор реализованных в промышленности технологий синтеза углеводородов из СО и Н<sub>2</sub>.</p>
<p><b>Перечень графического материала</b> (с точным указанием обязательных чертежей)</p>	<p>Конструкции реакторных устройств, реализованных в промышленности</p>
<p><b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b> (с указанием разделов)</p>	
<p><b>Раздел</b></p>	<p><b>Консультант</b></p>
<p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>	<p>Рыжакина Татьяна Гавриловна, Кафедра менеджмента, доцент, к.э.н.</p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Немцова Ольга Александровна, Кафедра экологии и безопасности жизнедеятельности, ассистент</p>
<p> </p>	
<p><b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b></p>	
<p> </p>	
<p> </p>	

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

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент. каф. ХТТ и ХК	Попок Е.В.	к.т.н.		15.02.17 г.

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2К31	Жданов А.А.		15.02.17 г.

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

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
2К31	Жданову Алексею Андреевичу

<b>Институт</b>	<b>Природных ресурсов</b>	<b>Кафедра</b>	<b>ХТТ и ХК</b>
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии

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

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

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

1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	<i>Проведение предпроектного анализа. Определение целевого рынка и проведение его сегментирования. Выполнение SWOT-анализа проекта</i>
2. <i>Определение возможных альтернатив проведения научных исследований</i>	<i>Определение целей и ожиданий, требований проекта. Определение заинтересованных сторон и их ожиданий.</i>
3. <i>Планирование процесса управления НИИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	<i>Составление календарного плана проекта. Определение бюджета НИИ</i>
4. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	<i>Проведение оценки экономической эффективности исследования качества товарных бензинов.</i>

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

1. *Оценка конкурентоспособности технических решений*
2. *Матрица SWOT*
3. *График проведения и бюджет НИИ*
4. *Расчёт денежного потока*
5. *Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИИ*

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

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
доцент кафедры менеджмента	Рыжакина Татьяна Гавриловна	К.Э.Н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2К31	Жданов Алексей Андреевич		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
2К31	Жданову Алексею Андреевичу

<b>Институт</b>	<b>Природных ресурсов</b>	<b>Кафедра</b>	<b>Химической технологии топлива и химической кибернетики</b>
<b>Уровень образования</b>	Бакалавриат	<b>Направление/специальность</b>	Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии

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

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения

Объект исследования – железный электровзрывной катализатор синтеза Фишера-Тропша. Материал – железный порошок, приготовленный методом электрического взрыва из проволоки стальной марки Св–08А (ГОСТ 2246-70). Приборы – каталитическая установка «Катакон», ПК, хроматографические комплексы «Хроматэк-Кристалл 5000.1»; и «Хроматэк-Кристалл 5000.2» для анализа газообразных и жидких углеводородов. Методика – синтез-газ при повышенных температуре и давлении подаётся в лабораторный реактор; состав продуктов изучают методом капиллярной хроматографии. Рабочая зона – лабораторное помещение кафедры ХТТиХК ТПУ. Область применения – химическая промышленность, использующая GTL-технологии.

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

**1. Производственная безопасность**

1.1. Анализ вредных и опасных факторов, которые может создать объект исследования.

1.2. Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть в лаборатории при проведении исследований.

**1.1 Вредные и опасные факторы, которые может создать объект исследования:** в процессе таблетирования катализатора выделяется пыль; жидкий продукт содержит около 20 масс. % ароматических углеводородов. ГОСТ 12.1.007–76 ССБТ. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности.

**1.2 Вредные и опасные факторы, которые могут возникнуть в лаборатории:** электромагнитное излучение (источником является компьютер и лабораторная установка), шум и вибрация лабораторной установки, опасность возникновения взрыва или пожара при

	<p>работе на установке, поражение электрическим током, микроклимат, освещение.</p> <p>ГОСТ Р 12.1.019-2009 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты;</p> <p>22.07.2013 г. №123 – ФЗ. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности;</p> <p>СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений;</p> <p>СП 52.13330.2011 Естественное и искусственное освещение;</p> <p>ГОСТ 12.1.003–83 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности.</p>
<p><b>2. Экологическая безопасность:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы);</li> <li>– анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы);</li> <li>– анализ воздействия объекта на литосферу (отходы).</li> </ul>	<p>При синтезе углеводов методом Фишера-Тропша на лабораторной каталитической установке возможны вредные воздействия на воздушную среду (выброс газов – CO, H<sub>2</sub>, углеводородных газов). Во избежание чрезмерного загрязнения воздуха используется минимальный расход синтез-газа. Сбросы жидких и твёрдых отходов отсутствуют.</p>
<p><b>3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b></p> <p>3.1. Анализ возможных чрезвычайных ситуаций при работе в лаборатории</p> <p>3.2. Мероприятия по предотвращению возникновения чрезвычайных ситуаций</p>	<p><b>3.1 Вероятные чрезвычайные ситуации:</b> Разрыв трубопроводов на каталитической установке, возгорание продуктов синтеза, возникновение пожара на рабочем месте.</p> <p><b>3.2 Мероприятия по предотвращению возникновения чрезвычайных ситуаций:</b> Противопожарная защита. В случае возникновения ЧС предусмотрены первичные средства пожаротушения: огнетушители ОП-10 и ОУ-5 для тушения электрооборудования.</p>
<p><b>4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b></p>	<p>Правовые нормы трудового законодательства, регулирующие соблюдение безопасности при работе в производственных помещениях.</p> <p>Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 31.12.2014)</p>

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

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ассистент кафедры ЭБЖ	Немцова Ольга Александровна	-		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2К31	Жданов Алексей Андреевич		

## Реферат

Выпускная квалификационная работа содержит 76 с., 14 рис., 25 табл., 34 источника.

Ключевые слова: синтез Фишера-Тропша, GTL-процессы, железные катализаторы, технология электрического взрыва проводника.

Объектом исследования является железный катализатор синтеза Фишера-Тропша, полученный методом электрического взрыва проводника в среде окиси углерода.

Цель работы – исследование каталитической активности ультрадисперсных порошков железа, полученных методом электрического взрыва проводника в среде окиси углерода, в процессе синтеза жидких углеводородов по методу Фишера-Тропша.

Методология проведения исследования: полученные методом электрического взрыва ультрадисперсные порошки подвергали прессованию со связующим с использованием матрицы Пуансона; подготовленные к работе образцы катализатора испытывались на лабораторной каталитической установке; жидкие продукты синтеза анализировались на капиллярном газовом хроматографе.

В процессе исследования проводились серии опытов при давлении в 1,1 МПа, временах контакта 2 и 6,5 секунд и температурах 250, 260 и 270 °С целью выявления влияния данных условий проведения синтеза на активность катализатора, состав и свойства продуктов.

В результате исследования были получены данные об активности катализатора на основе ультрадисперсного порошка железа в различных условиях протекания процесса и составе продуктов синтеза.

Область применения – химическая промышленность, выпускающая продукцию по методу Фишера-Тропша или иное производство, использующее GTL-технологии.

## Оглавление

Введение.....	11
1. Литературный обзор.....	14
1.1. Теоретические основы синтеза Фишера-Тропша.....	14
1.2. Катализаторы.....	18
1.2.1. Основные компоненты катализаторов и их сравнение.....	18
1.2.2. Катализаторы на основе Со.....	19
1.2.3. Катализаторы на основе Fe.....	20
1.3. Реактора синтеза Фишера-Тропша.....	23
1.4. Промышленный опыт производства синтетических моторных топлив методом Фишера-Тропша.....	27
2. Экспериментальная часть.....	30
2.1. Приготовление катализатора.....	30
2.2. Аппаратурное оформление исследования.....	32
2.3. Методика исследования и обсуждение результатов.....	35
3. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	43
3.1. Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований.....	43
3.1.1. Потенциальные потребители результатов исследования.....	43
3.1.2. Анализ конкурентных технических решений.....	44
3.1.3. SWOT-анализ.....	45
3.2. Планирование научно-исследовательской работы.....	46
3.2.1. Структура работ в рамках научного исследования.....	46
3.2.2. Определение трудоемкости выполнения работ.....	47
3.2.3. Бюджет научно-технического исследования.....	50
3.3. Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективностей исследования.....	53
4. Социальная ответственность.....	56
4.1. Производственная безопасность.....	56
4.1.1. Анализ вредных факторов.....	56

4.1.1.1. Вредные вещества.....	56
4.1.1.2. Микроклимат.....	58
4.1.1.3. Повышенный уровень электромагнитных излучений.....	60
4.1.1.4. Недостаточная освещенность рабочей зоны.....	61
4.1.1.5. Повышенный уровень шума на рабочем месте.....	61
4.1.1.6. Повышенный уровень вибрации.....	62
4.1.2. Анализ опасных факторов.....	63
4.1.2.1. Электробезопасность.....	63
4.1.2.2. Пожаробезопасность.....	65
4.2. Экологическая безопасность.....	66
4.3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	67
4.3.1. Анализ возможных чрезвычайных ситуаций при работе в лаборатории..	67
4.3.2. Меры по предотвращению возникновения чрезвычайных ситуаций.....	68
4.4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.....	69
Заключение.....	70
Список публикаций студента.....	72
Список использованных источников.....	73

## Введение

В условиях ужесточения экологических требований к нефтехимической промышленности, а также с учетом внедрения ресурсоэффективных технологий в производство, появляется проблема утилизации попутного нефтяного газа на месторождениях. Данную проблему предлагается решать путем внедрения на местах нефтедобычи технологии gas-to-liquid (GTL), реализуемую процессом Фишера-Тропша. Данный подход позволит получать из попутного нефтяного газа, сжигаемого в данный момент, ценное сырье, обладающее преимуществом над продуктами, получаемыми традиционным способом. Данный жидкий продукт можно использовать в нуждах местного производства (топливо и масла), а также поставлять на рынок, с целью повышения капитализации предприятия [1].

В СФТ катализатор является самой важной и дорогостоящей составляющей производства. От его выбора зависят глубина переработки сырья, состав и количество получаемого продукта. Железные катализаторы обладают несколькими преимуществами над кобальтовыми. Одним из таких преимуществ является цена железного катализатора.

Большой вклад в свойства катализатора вносит способ его приготовления. Катализаторы, приготовленные методом электрического взрыва проводника (ЭВП), обладают развитой удельной поверхностью, определенным фазовым составом, многоуровневой организацией структуры и большим запасом свободной энергии [2].

Целью данной работы является исследование каталитической активности ультрадисперсных порошков железа (УДП-Fe), полученных методом ЭВП, в синтезе жидких углеводородов по методу СФТ. В соответствии с целью, сформулированы следующие задачи:

1. Получить УДП-Fe методом ЭВП, провести таблетирование порошка со связующим и отобрать фракцию 1 – 2 мм;

2. Провести серию опытов по методу СФТ с использованием подготовленного образца катализатора при давлении 1,1 МПа, временах контакта 2 и 6,5 секунд и температуре 250, 260 и 270 °С;

3. Провести хроматографический анализ полученных продуктов синтеза и оценить влияние изменения выше указанных условия на них.

## 1. Литературный обзор

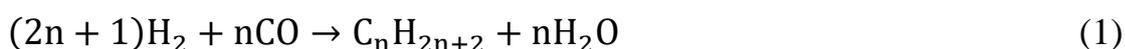
### 1.1. Теоретические основы синтеза Фишера-Тропша

СФТ представляет собой сложный гетерогенно-каталитический процесс получения из CO и H<sub>2</sub> (синтез-газ) смеси жидких углеводородов различного вида. Данный процесс характеризуется низкой селективностью и высокой экзотермичностью ( $\Delta H_{227^\circ\text{C}} = -165$  кДж/моль). [3]

Поведение процесса СФТ и ассортимент его главных продуктов определяются сочетанием типа катализатора, технологических условий и интеграцией установки синтеза с остальной частью завода. В общем виде основные продукты – насыщенные и ненасыщенные УВ алифатического ряда. Также образуются спирты, альдегиды и кетоны. Реакционноспособные соединения способны в ходе синтеза сами адсорбироваться на поверхности катализатора, являясь тем самым началом новой цепи, или взаимодействовать уже с образовавшимися первичными комплексами. Есть вероятность протекания крекинга и гидрокрекинга более высококипящих углеводородов. [4]

Для описания работы современных установок, выполненных в различных технологических вариантах, применяются следующие общие уравнения [5]:

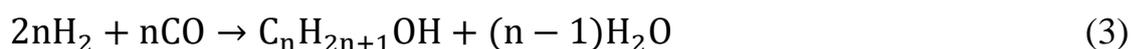
1. Получение парафинов:



2. Получение олефинов:



3. Получение спиртов:



Побочными реакциями СФТ являются [6]:

1. Гидрирование оксида углерода до метана:



2. Диспропорционирование CO (реакция Белла-Будуара):



### 3. Равновесие водяного газа:



Максимальный выход жидких УВ составляет 208,5 г/нм<sup>3</sup> синтез-газа [4].

Несмотря на то, что СФТ изучается на протяжении многих лет, в настоящее время не выдвинуто теории о механизме процесса, которая являлась бы общепризнано верной. Это связано в первую очередь с тем, что в процессе синтеза протекает множество последовательных и параллельных реакций. В общем виде СФТ можно разделить на четыре основных стадии [4, 6]:

- хемосорбция исходных газовых веществ на поверхности катализатора;
- взаимодействие между собой адсорбированных молекул CO и H<sub>2</sub> с образованием первичного комплекса («образование цепи»);
- присоединение поверхностного соединения («рост цепи»);
- десорбция, гидрирование или взаимодействие растущей цепочки с продуктами синтеза («обрыв цепи»).

В теоретическом описании СФТ [4, 6, 7] достаточно подробно рассмотрено образование алканов. Однако механизмы, приведенные в данных исследованиях, не дают достаточно точного описания процессов образования олефинов и разветвленных алканов, а также оксигенатных соединений. В связи с этим были представлены более сложные механизмы, представляющие собой комбинацию трех основных моделей протекания СФТ (диссоциативный механизм; полимеризационно-конденсационный механизм; механизм роста цепи путем включения CO) [6].

Стадия образование цепи может проходить по двум направлениям. В первом случае водород вступает в реакцию с обогащенным кислородом атомом углерода, во втором случае атом углерода не будет содержать кислород (рис. 1).

Т.к. в ходе эксперимента сложно установить стехиометрию поверхностного соединения, участвующего в образовании продуктов синтеза, то для рассмотрения механизма СФТ используют обозначения CН<sub>х</sub> и CН<sub>х</sub>О для радикалов [6].

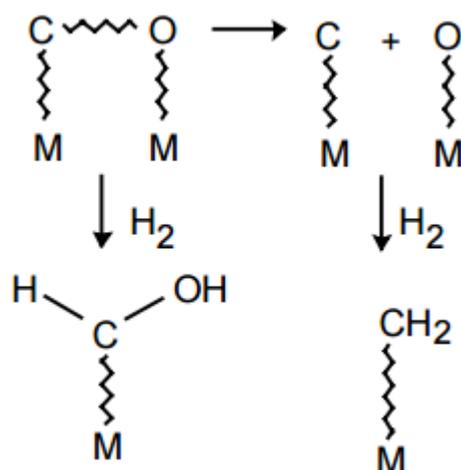


Рисунок 1 – Стадия образования цепи

Стоит также отметить, что водород может вступать в реакцию с адсорбированным оксидом углерода из газовой фазы или также из адсорбированного состояния.

Механизм для стадии роста цепи, предложенный А.Н. Башкировым [6] применительно к катализу на железных катализаторах (рис. 2-4), основан на предпосылке, что первичным комплексом является HCOH-фрагмент, при гидрировании которого образуются фрагменты CH<sub>2</sub>OH и CH<sub>2</sub> (рис. 1). Далее продукты C<sub>1</sub> реагируют между собой, давая вторичный кислородсодержащий комплекс C<sub>2</sub> (рис. 3), который затем присоединяется к первичным кислородсодержащим фрагментам с образованием C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub> и т.д., обеспечивая конденсационный рост цепи (рис. 4). При этом радикалы CH<sub>x</sub> и CH<sub>x</sub>O могут также взаимодействовать между собой и с растущими углеводородными цепями, что подтверждено экспериментально [6].

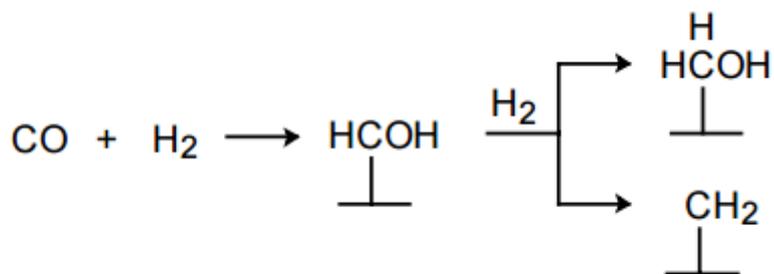


Рисунок 2 – Стадия образования УВ C<sub>1</sub> [6]

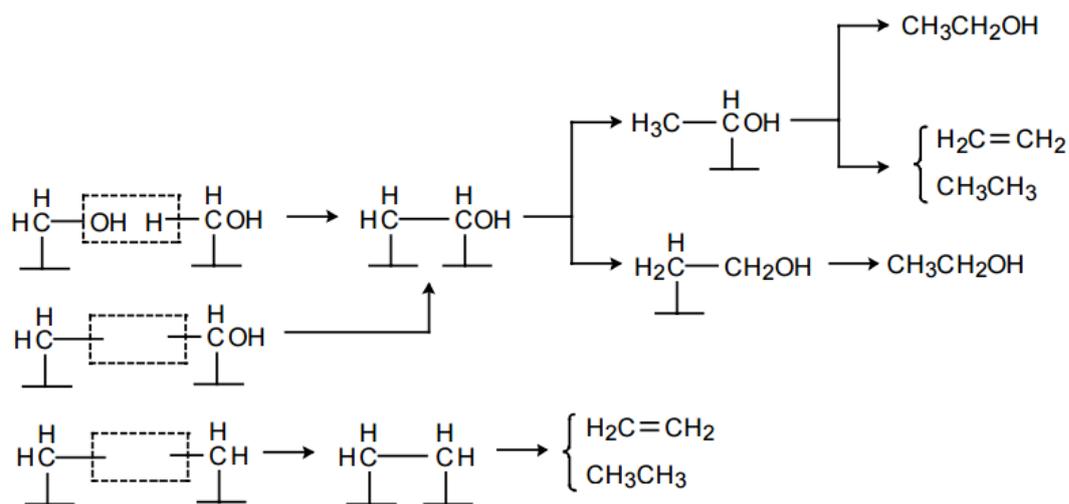


Рисунок 3 – Стадия образования УВ  $C_2$  [6]

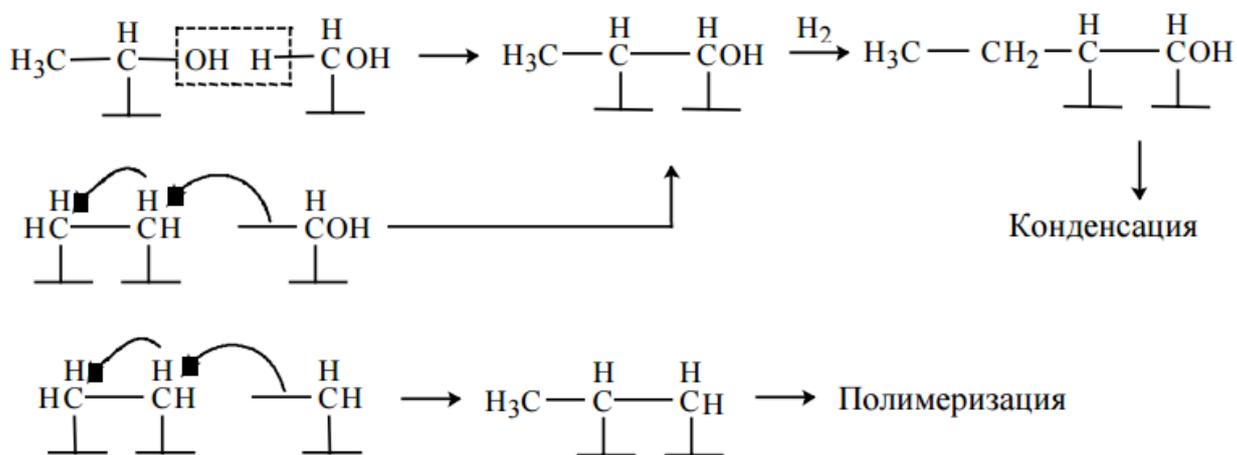


Рисунок 4 – Стадия образования УВ  $C_3$  и выше [6]

Авторы [8] утверждают, что есть различные пути роста цепи, и их соотношение определяется соотношением скоростей превращения первичной частицы НСОН.

В реакционной смеси в течение всего процесса образуется множество активных частиц, таких, как  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $O$ ,  $H$  и  $H_2$ . Взаимодействуя с радикалами, полученными из синтез-газа, эти частицы становятся причиной обрыва цепи [4]. Данная стадия единственная, которая не является спорной в описании механизма СФТ и не имеет существенных отличий для различных образцов катализаторов [6, 8].

## 1.2. Катализаторы

### 1.2.1. Основные компоненты катализаторов и их сравнение

Катализаторы процесса являются в настоящее время основными объектами исследования и модернизации. В ходе эксплуатации промышленного комплекса по получению синтетических УВ, 25% всех капиталовложений приходится на стадию синтеза [9], поэтому создание дешевого, но при этом высокопроизводительного и селективного образца катализатора с хорошей теплоотводящей способностью является приоритетной задачей [3, 9].

Катализаторы СФТ являются сложными гетерогенными системами, основным элементом которой является переходный металл VIII группы (Co; Ru; Ni; Fe), а также присутствуют носитель системы (оксид металла) и один или несколько промоторов [10]. Катализаторы на основе рутения показали наибольшую активность: образцы катализатора на основе данного металла не нуждаются в промоторах и позволяют получать жидкие углеводороды при низких температурах синтеза (порядка 200 °С) [11]. Но ввиду своей дороговизны о промышленном применении катализаторов, на основе Ru говорить не приходится. Следующим предполагаемым основным элементом для каталитической системы предлагается использовать Ni. Однако его высокая гидрирующая способность делает не целесообразным применение данного металла как основу для катализатора, т.к. основным продуктом в таком случае будет метан, промышленная ценность которого незначительна [10, 11]. Из всего выше сказанного следует, что с экономической и технологической точек зрения наиболее благоприятным является использование Co и Fe в качестве основы катализаторов СФТ.

На данный момент нет единого мнения по поводу того, какой из двух катализаторов (на основе железа или кобальта) в большей степени отвечает всем требованиям. Авторы работ [10 – 12] утверждают, что катализаторы на основе Co в сочетании с цеолитными добавками являются наиболее перспективными. Однако в работе [3] говорится о некоторых преимуществах

современных образцов железных катализаторов. Также в работе [4] приводятся данные, о большей технологической интеграции образцов на основе Fe. Железные катализаторы обладают одним явным преимуществом, над кобальтовыми – цена. Так в работе [13] приводятся данные о том, что стоимость материалов для Fe-катализатора меньше, чем стоимость материалов на Co-катализатор, в 70 раз на тонну материала.

### 1.2.2. Катализаторы на основе Co

Изначально в промышленности использовались только Co-катализаторы как при атмосферном, так и при среднем (порядка 0,5 МПа) давлениях. Первые образцы катализатора содержали помимо самого кобальта большое число носителя, и чуть меньше активаторов разного рода. К 1938 году был разработан катализатор состава 100 масс. ч. Co: 8 масс. ч. MgO: 5 масс. ч. ThO<sub>2</sub>: 200 масс. ч. кизельгура, который отвечал требованиям по производительности и механической прочности. В дальнейшем состав данного образца изменялся (система ThO<sub>2</sub> + MgO была заменена на MnO, уменьшена доля носителя). Модернизация позволила существенно увеличить выход УВ большей молярной массы. Данный образец оставался основным до появления в 50-ых годах конкурентоспособных Fe-катализаторов [4].

Появление пластинчатых реакторов, а также реактора «труба в трубе», инициировали разработку гранулированных катализаторов. Как показали опыты Горного бюро США, катализаторы в виде гранул показали более высокую активность в ходе СФТ, чем таблетирование аналогичного состава. Это было связано в первую очередь с уменьшением активной поверхности катализатора [7].

Промоторами, доказавшими на практике свою эффективность, являются Mn, UO<sub>2</sub>, U<sub>3</sub>O<sub>2</sub>, ThO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и MgO. В качестве основных носителей для катализаторов применялись кизельгур, каолин и окись алюминия [7, 15, 16]. Также авторами [9] приводятся данные об успешном применении 1% Ag в

качестве промотора. В целом сформирована тенденция к разработке многофункциональных катализаторов[17].

Современные исследования в основном направлены на изучение активности цеолитсодержащих катализаторов [3, 9, 12, 16, 18]. Так в работе [9] исследован катализатор, в состав носителя которого на 50% масс. состоял из теплопроводящих добавок на основе алюминия в виде чешуек (ПАП-2) и сфер (АСД-1), а остальное – бемит (20% масс.) и Н-форма цеолита Бета. Представленные результаты показывают, что при объёмной скорости  $1000 \text{ ч}^{-1}$  достигалась высокая степень конверсии СО (80 – 85%), но выход  $\text{CO}_2$  составлял в среднем 32% масс. Однако при скорости  $5000 \text{ ч}^{-1}$  наблюдается значительное снижение выхода  $\text{CO}_2$  (до 5 – 7% масс.), но и степень конверсии СО снижается до 62 - 75% масс.

Авторы другого исследования [12] в качестве промоторов использовали цеолит Н $\beta$ , модифицированный переходными металлами (Pd, Fe, Co, Ni). Данные добавки позволили добиться оптимальной степени восстановления Со при его активации в токе водорода. Наибольший выход жидких углеводородов получен на порошкообразном катализаторе, содержащем 4% масс. Ni. В таком же направлении работали авторы [10]. В своих опытах, помимо переходных металлов, в качестве добавки использовался редкоземельный элемент (0,5% масс.). В результате исследования было выявлено, что данный образец позволяет получать степень конверсии СО 92,5%, а выход жидких УВ составил 153,3 г. на  $\text{м}^3$  синтез-газа.

По утверждениям авторов [19], модифицирование катализаторов на основе  $\text{Al}_2\text{O}_3$  фосфором и цирконием является перспективным направлением. Но результаты приведенного ими исследования говорят об обратном (степень конверсии СО составляла не более 50%).

### **1.2.3. Катализаторы на основе Fe**

Существенное преимущество железных катализаторов над кобальтовыми заключается в возможности придания процессу большей

гибкости. Изменяя состав катализатора или метод его приготовления, состав синтез-газа или условия синтеза можно управлять реакцией, инициируя образование определенной группы продуктов. Помимо этого железо является более доступным материалом, чем кобальт.

При разработке Fe-катализаторов промотирование щелочью стало одним из самых важных этапов их развития. Фишером было установлено, что добавление 0,5 частей  $K_2O$  на 100 частей Fe в процессе приготовления катализатора приводит к значительному увеличению его активности [7]. Также проводились опыты с целью установления оптимального объёма щёлочи в составе катализатора. Было выявлено, что увеличение содержания  $K_2O$  до 1,5% приводит сначала к резкому увеличению активности, однако через непродолжительный отрезок времени активность также резко падает до значений, показываемых не промотированным катализатором. Подобный эффект объясняется слишком быстрой закоксовываемостью поверхностью катализатора, а также высоким содержанием карбида железа, появление которого разрушает строение катализатора. Добавление щелочи увеличивает выход парафинов и оксигенатов [7].

При дальнейшем изучении влияния щелочных металлов на ход синтеза, были изготовлены образцы Fe-катализаторов (4Fe:1Cu), промотированные карбонатами лития, натрия, рубидия, кальция и бария с массовым содержанием в 0,5%. Были достигнуты следующие результаты: максимальный выход жидких и твердых УВ получили на катализаторах с K- и Rb-промоторами (стоит отметить превалирующее образование твердых УВ над жидкими); Na-, Ba- и Ca-промоторы дали меньшую активность, чем предыдущие два образца, но и отличались менее резким падением активности; катализаторы с натрием показали больший выход жидких УВ, чем катализаторы с калием; образцы с литием были менее активны, чем без него.

Другим важным промотором Fe-катализаторов является медь. В таблице 1 приведены данные по влиянию различного содержания меди в катализаторе на его активность.

Таблица 1 – Влияние содержания меди на активность Fe-катализатора

[7]

Отношение Fe:Cu	Выход углеводородов, г/м <sup>3</sup>			Содержание CO <sub>2</sub> в отходящем газе, %
	CH <sub>4</sub>	C <sub>1</sub> –C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub> и выше	
9:1	8,5	42,0	19,9	20,1
4:1	13,0	58,2	38,1	33,2
2:1	15,0	60,8	34,7	31,2
1:1	14,9	55,6	17,2	32,3

При проведении СФТ на образцах с содержанием меди 1:4 и 1:2, получался наибольший выход жидких УВ. На катализаторах 4Fe:1Cu был самый большой выход бензиновой фракции. Наименее обогащенный медью катализатор показал самое интенсивное падение активности.

При высоких температурах синтеза (свыше 250 °С) большое содержание меди приводит к ее сплавлению с железом и значительному снижению активности катализатора. Рекомендуется использовать в составе катализаторов не более 10% масс. в пересчете на Fe [7].

В ходе изучения железных катализаторов были рассмотрены разные способы его приготовления. По результатам исследований оказалось, что самым перспективным является метод осаждения из водных растворов. Сравнительные испытания показали, что осажденные катализаторы имеют большие активность и селективность, чем спеченные и плавленные. Ещё одно преимущество осажденных катализаторов – способность, изменяя состав катализатора, влиять на распределение получаемых соединений с различным числом атомов углерода.

Для получения осажденного катализатора Fe и Cu растворяли в азотной кислоте при повышенной температуре, а затем, добавляя в нагретый до температуры кипения раствор соды, осуществляли осаждение. Сливание обоих растворов проводят в течение 2 – 4 минут до получения суспензии с рН=7 – 8. Суспензию фильтруют, твердый остаток промывают конденсатом и кристаллизуют из конденсата. В конце приготовления добавляют определенное количество жидкого калиевого стекла [4].

Осажденные катализаторы, несмотря на все свои преимущества, слабо проявляли себя в синтезе фракций для моторных топлив. Для решения этой проблемы были разработаны катализаторы, полученные методом спекания. Спеченные катализаторы отличались от осажденных составом и структурой. Помимо меди и калия они содержали оксид цинка, который позволял ограничивать длину цепи получаемых УВ и повысить содержание олефинов [4].

Процесс получения спеченных катализаторов проще, чем по методу осаждения, и включает в себя намного меньше стадий. Таким образом, описанный выше метод позволяет получить дополнительные возможности проведения СФТ с чуть меньшими экономическими тратами [4].

### **1.3. Реактора синтеза Фишера-Тропша**

Разработка реакторов для осуществления СФТ должна отвечать следующим требованиям [20]:

- 1) требуется создание реактора с большой единичной мощностью, т.к. потребление конечных продуктов процесса составляет миллионы тонн;
- 2) конструкционно реактор должен быть простым и надежным во время эксплуатации и учитывать особенности кинетики и гидродинамики процесса;
- 3) реактор должен обеспечивать высокую скорость превращения синтез-газа и минимальные потери катализатора;
- 4) необходим эффективный отвод тепла для обеспечения условий изотермичности, т.к. процесс является сильно экзотермичным.

Выбор типа реактора зависит от соотношения  $H_2:CO$ . Так при стехиометрическом соотношении  $H_2:CO=2:1$ , достигаемом при использовании синтез-газа на основе природного газа, прямой зависимости от типа реактора для протекания процесса нет. Если же сырьё получают из угля, то конструкция реактора будет иметь фундаментальное значение. Это объясняется тем, что для получения синтез-газа на основе угля существуют разные технологии, которые

на выходе дают разные соотношения  $H_2:CO$ . Современные газификаторы угля (конструкции компаний Техасо или Dow) дают соотношения  $H_2:CO=0,75:1$  [20].

На практике применение нашли только три типа реакторов (рис. 5) [3]:

- 1) Трубчатые реакторы с неподвижным слоем катализатора;
- 2) Реакторы с псевдоожиженным слоем катализатора;
- 3) Реакторы с суспендированным слоем катализатора (сларри-реактор).

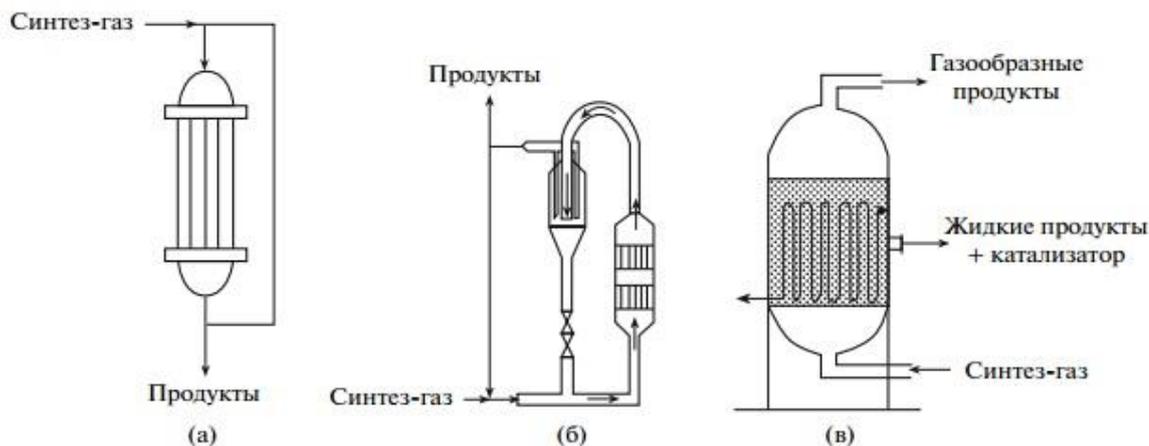


Рисунок 5 – Реакторы СФТ [3]: *а* – трубчатый аппарат со стационарным слоем катализатора, *б* – аппарат с псевдоожиженным слоем катализатора, *в* – аппарат с суспендированным слоем катализатора (сларри-реактор).

Первыми реакторами, на которых был испытан СФТ, были трубчатые реактора с неподвижным слоем катализатора (рис. 5 а). Изначально катализатор загружался в аппарат между параллельными пластинами, а охлаждающая вода подавалась в трубки. Затем Фишер и Пихлер усовершенствовали процесс: СФТ стал проводиться при средних давлениях (10 – 15 атм) в мультитрубных реакторах, где катализатор помещался в межтрубном пространстве. В дальнейшем компаниями Ruhrchemie и Lurgi был разработан аппарат конструкции ARGE (используется до сих пор), в которых катализатор находился внутри трубок, а теплоноситель подавался в межтрубное пространство. Также существовали разработки по охлаждению реакционного объёма за счёт распределительной подачи свежих порций синтез-газа в сегментированный реактор с неподвижным слоем [20].

В современных реакторах конструкции ARGE диаметр трубок составляет менее 50 мм, длина труб – до 12 м, загрузка катализатора в виде экструдатов диаметром 1 – 2 мм и длиной 5 – 6 мм находится на уровне 25 л в каждую трубку. Количество каталитических трубок в установке из 12 аппаратов составляет 180 тыс., а объём катализатора – около 4000 м<sup>3</sup>. По данным компании Shell современный реактор имеет высоту 12,95 м и диаметр 7,316 м, число каталитических трубок составляет 30 тыс. штук, а вес всего аппарата порядка 1200 т [3].

К явным преимуществам данного типа аппаратов относятся простота эксплуатации и масштабирования. Существуют и недостатки, такие как, например, перепад давления по длине реактора, большая металлоемкость и высокая стоимость.

Использование реакторов с псевдоожиженным слоем катализатора (рис. 5 б) позволяет достичь высокой скорости теплообмена и хорошего контроля температуры синтеза за счёт нахождения в подвижном состоянии в потоке синтез-газа частиц катализатора. Также возможна непрерывная регенерация катализатора за счёт вывода из реактора части катализатора и подпитки реактора его свежими порциями.

Данная конструкция впервые была разработана компанией Kellogg (США) в 1950-ых гг., а вскоре была использована компанией Sasol (ЮФР). В дальнейшем на заводах в ЮАР использовались разные модификации данного типа реакторов, в том числе и включающие в себя рециркуляцию псевдоожиженного слоя катализатора [21].

Несмотря на широкое применение, данный тип реактора признан как малоперспективный, поскольку характеризуется значительным истиранием катализатора и небольшим сроком его службы, а также сложностью и дороговизной изготовления самого аппарата.

Ещё в конце Второй мировой войны немецкими специалистами разрабатывался тип реактора, в котором осуществлялся барботаж подаваемого снизу вверх синтез-газа через суспензию мелкодисперсного катализатора.

Регулирование температуры осуществляется встроенными теплообменниками, в качестве жидкой среды использовались высококипящие продукты, нелетучие в условиях синтеза. Данный тип реактора – сларри-реактор (рис. 5 в) признан в настоящее время самым перспективным из всех рассматриваемых [20].

Сларри-реакторы используют для проведения низкотемпературного СФТ в присутствии преимущественно Со-катализаторов. Разработчики новых процессов производства синтетических моторных топлив (компании Sasol, ExxonMobil, Axens и др.) предлагают именно эту технологию. Она обладает рядом несомненных достоинств: высокая производительность по сравнению с реакторами со стационарным слоем катализатора (сравнимая с производительностью реакторов с псевдоожиженным слоем катализатора), удаление тяжелых продуктов с катализатора растворением в жидкой фазе. К недостаткам трехфазного процесса можно отнести проблемы, свойственные псевдоожиженному слою (сложность аппаратного оформления и масштабирования), а также большое время установления равновесия в системе [3].

Современные сларри-реакторы, используемые компанией Sasol в Катаре имеют диаметр 10 м и высоту 59 м, объём суспензии в колонне – более 2500 м<sup>3</sup>. Внешне реактор представляет собой вертикальную цилиндрическую барботажную колонну [3].

Широкое практическое применение нашли только два типа реакционных конструкций: мультитрубные реакторы (компания Shell) и сларри-реакторы (компания Sasol) [21].

Сравнение рассмотренных типов реакторов, их преимущества и недостатки представлены в таблице 2 [20].

Таблица 2 – Сравнение основных типов реакторов [20]

Реакторная система	Преимущества	Недостатки
Трубчатый реактор с неподвижным слоем катализатора	Простота эксплуатации и масштабирования	Сложность с загрузкой и заменой катализатора

Продолжение таблицы 2

	Отсутствие проблем с разделением твердой и жидкой фаз Отсутствие истирания катализатора	Большой перепад давления по длине реактора Проблемы с поддержанием изотермичности
	Возможность получения продуктов любого состава	Диффузионные ограничения на крупных зёрнах катализатора Проблемы с поддержанием изотермичности Высокая стоимость реакционного аппарата
Реактор с псевдоожиженным слоем катализатора	Простота загрузки и выгрузки катализатора Высокая теплопередача Условия, близкие к изотермичным	Эрозия катализатора Унос катализатора Узкое распределение продуктов
Сларри-реактор	Изотермичность Эффективный массообмен и теплоотвод Простота замены катализатора Небольшие диффузионные ограничения Относительно невысокая стоимость реактора	Необходимость разделения твердой и жидкой фаз Проблемы с осаждением и истиранием катализатора Проблемы масштабирования

#### 1.4. Промышленный опыт производства синтетических моторных топлив методом Фишера-Тропша

Передовыми компаниями в области производства СМТ являются Sasol, Shell и ExxonMobil. На данный момент, производимые ими продукты, занимают порядка 0,5% рынка по сравнению с традиционными нефтяными

топливами, что позволяет решать скорее проблемы местного уровня, чем глобального [20].

В настоящий момент на огромном газовом месторождении North Field в Ras-Laffan (Катар) реализованы два крупнейших проекта, основанных на СФТ: проект Pearl GTL (Shell) и проект ORYX GTL (Sasol) [20 – 22].

Проект Pearl GTL реализует консорциум компаний Qatar Petroleum Corp. и Shell. Данный проект должен стать крупнейшим по выпуску СМТ с мощностью 6,3 млн т/год (две очереди по 2,15 млн т/год) с использованием мультитрубных реакторов конструкции ARGE. Производство также включает две установки по производству сжиженного природного газа мощностью 3,15 и 5,4 млн т/год. Начальные капиталовложения составили 19 млрд долл. Пуск предприятия намечался на 2009 год, однако только в 2011 году была выпущена первая партия продукции. Конструкция применяемых реакторов описана в разделе 1.3.

Из-за гигантских размеров и большого числа параллельно работающих аппаратов СФТ, производство СМТ по данному проекту оказалось чрезвычайно капиталоемким: общие затраты на его строительство на 2014 год составляли порядка 20 млрд долл. и могут возрасти до 24 млрд. долл.

Основные проблемы проекта Pearl GTL заключаются в следующем [20]:

- большая длина трубок (12м), в которые загружают таблетки катализатора очень небольшого размера (диаметр 1– 2 мм), создает высокий перепад давления;
- низкая производительность катализатора (0,07 – 0,7 кг/кг в час) и высокий выход метана (10 – 15%), вызванные диффузионными ограничениями внутри таблеток;
- температурный пик в 12 – 20 градусов в центральной части каталитической трубки приводит к снижению селективности по УВ;
- плохо контролируемая работа реактора из-за образования воды и присутствие жидких УВ;
- низкая эффективность регенерации катализатора;

- сложность транспортировки и монтажа многотрубных реакторов с большими габаритными размерами.

Проект ORYX GTL, реализуемый компанией Sasol в партнерстве с компаниями Qatar Petroleum Corp. и Chevron-Texasco, основан на использовании сларри-реакторов с мощностью 1,7 млн т/год СМТ [21].

Синтез-газ для производства нарабатывается по технологии автотермического риформинга фирмы Haldor Topsøe. Сам синтез проводится с использованием разработанного в компании процесса суспендированной дистилляции в двух параллельно работающих сларри-реакторах с суспендированным кобальтовым катализатором, а гидрокрекинг и гидроизомеризацию продуктов СФТ осуществляют компанией Chevron. Технологическое описание реакторов приведено в разделе 1.3.

Официальное открытие производства состоялось в 2006 году, завод вводился в эксплуатацию в течение 2007 – 2008 годов, однако на запланированную мощность вышел только в 2012 году [22].

Согласно данным компании NRT, при эксплуатации сларри-реакторов возникли следующие проблемы:

- эрозия внутренних частей и стенок реакторов, трубопроводов, насосов и вентиляей;
- сложности с отделением катализатора от продуктов и его регенерацией;
- истирание катализатора;
- большая скорость внешнего рецикла суспензии;
- сложность масштабирования;
- высокая вероятность забивки трубопроводов и арматуры тонко измельченным катализатором.

В работе [21] есть информация о разработке и эксплуатации производства СМТ в Китае, США, Канаде, Узбекистане и Нигерии, однако более детальной информации по этим проектам нет.

## 2. Экспериментальная часть

### 2.1. Приготовление катализатора

Для проведения исследования использовались катализаторы из УДП-Fe, полученные методом ЭВП и предоставленные сотрудниками лаборатории №12 Института физики высоких технологий Томского политехнического университета.

Для приготовления УДП-Fe использовалась стальная проволока (ГОСТ 2246–70) марки Св–08А [23].

Таблица 3 – Химический состав проволоки (% масс.) [23]

Fe	C	Si	Mn	Cr	Ni	S	P	Al
98,13	0,80	0,03	0,60	0,12	0,25	0,03	0,03	0,01

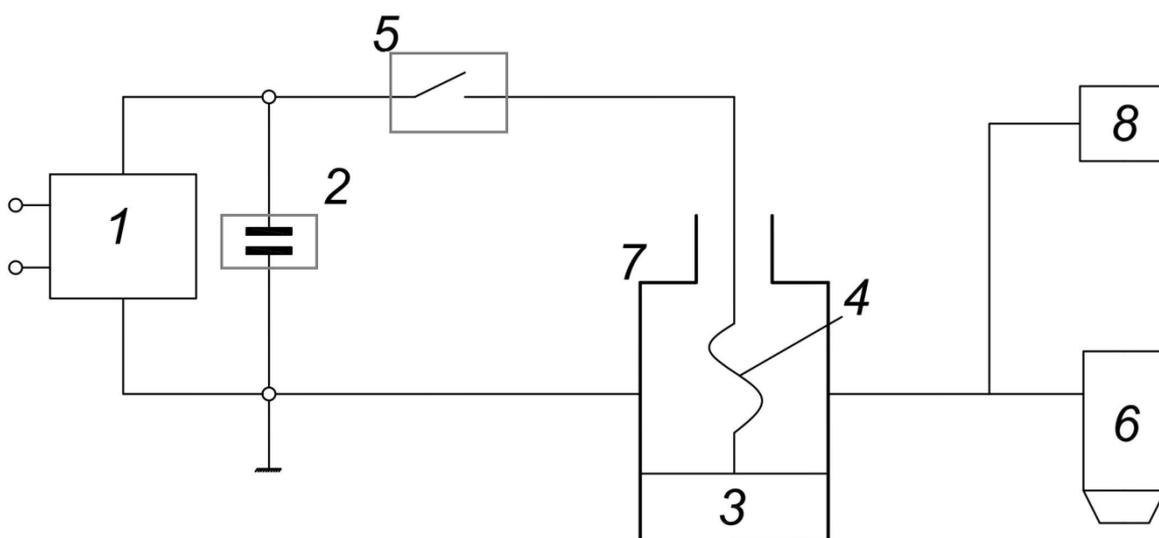


Рисунок 6 – Технологическая схема установки УДП-150

ЭВП происходил на установке УДП-150 (рис. 6), которая работает следующим образом: от высоковольтного источника питания – 1 заряжается ёмкостной накопитель энергии – 2; механизм подачи проволоки – 3 обеспечивает автоматическую установку взрываемого отрезка проволоки – 4 между двумя электродами; как только отрезок проволоки займет заданное положение, включается коммутатор – 5, происходит разряд накопителя на этот отрезок проволоки, и он взрывается; образовавшийся порошок собирается в накопителе – 6, пассивируется и поступает на дальнейшую переработку; объем

камеры – 7 вакуумируется, а затем системой газового снабжения – 8 заполняется газовой атмосферой, в которой происходил взрыв [24].

В зависимости от газовой атмосферы и условий проведения взрыва возможно получения порошков различного состава и свойств. В общем случае данный метод диспергирования металлов характеризуется следующими особенностями:

- время ЭВП составляет  $10^{-5} - 10^{-8}$  с;
- величина развиваемой мощности превышает  $10^{13}$  Вт/кг;
- температура в момент взрыва порядка  $10^4$  К, давление –  $10^9$  Па;
- скорость разлета продуктов составляет от 1 до 5 км/с.

Для получения УДП-Fe используется образец проволоки диаметром 0,35 мм и длиной в пределах 50 – 120 мм. Емкость батареи конденсатора составила 2,27 мкФ, индуктивность разрядного контура – 0,75 мкГн, а зарядное напряжение изменяется от 18 до 32 кВ. Масса порошка после каждого взрыва равнялась не менее 100 г [24].

Газовой атмосферой во время проведения ЭВП был СО. Данный выбор обусловлен тем, катализатор Fe(CO) не требует предварительного восстановления для осуществления СФТ, т.к. в ходе взрыва в атмосфере данного газа формируется определенный фазовый состав, необходимый для активации реакции синтеза углеводородов из смеси  $H_2$  и СО [23].

Таблица 4 – Свойства УДП-Fe[23]

Фазовый состав	Содержание фазы, % масс.	$S_{уд}, м^2/г$	$d_s, нм$
$\gamma$ -Fe	9,9	8,7	74
$\alpha$ -Fe	55,9		
FeO	29,4		
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	4,8		

Анализ изображений УДП-Fe (рис. 7), полученных с помощью сканирующего электронного микроскопа Quanta 200 3d, показал, что сферическая форма частиц не является для образца определяющей, т.к.

присутствуют множество поликристаллов различной сингинии и частицы с незавершенной кристаллической структурой.

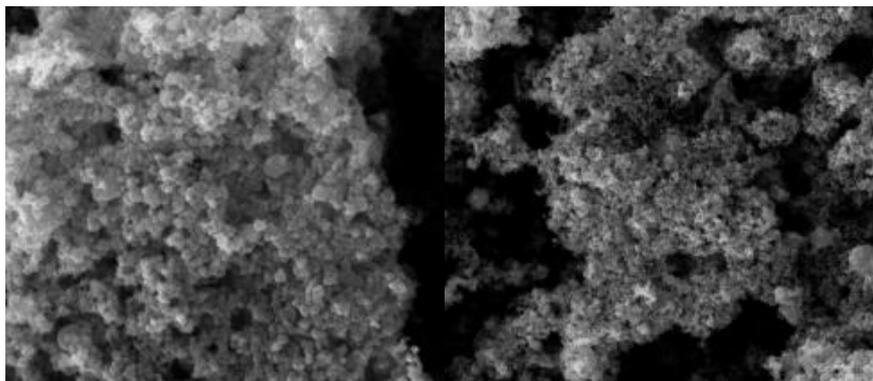


Рисунок 7 – Снимки поверхности УДФ-Fe

Для использования в реакторе пригодны гранулы катализатора с диаметром порядка 1 – 3 мм. В связи с этим необходимо таблетирование порошка, которое проходит в следующем порядке:

1. порошок обрабатывается 10 % поливиниловым спиртом и перемешивается;
2. полученная смесь прессуется в матрицах диаметром 13 мм под давлением 25 МПа с временем выдержки 30 секунд;
3. полученные брикеты высушиваются в течение суток при комнатной температуре и атмосферном давлении;
4. высушенные брикеты дробятся в фарфоровой ступе и просеиваются через сита 1 и 2 мм.

## **2.2. Аппаратурное оформление исследования**

Исследование каталитической активности УДФ-Fe проводилось на лабораторной установке «Катакон» (рис. 8).

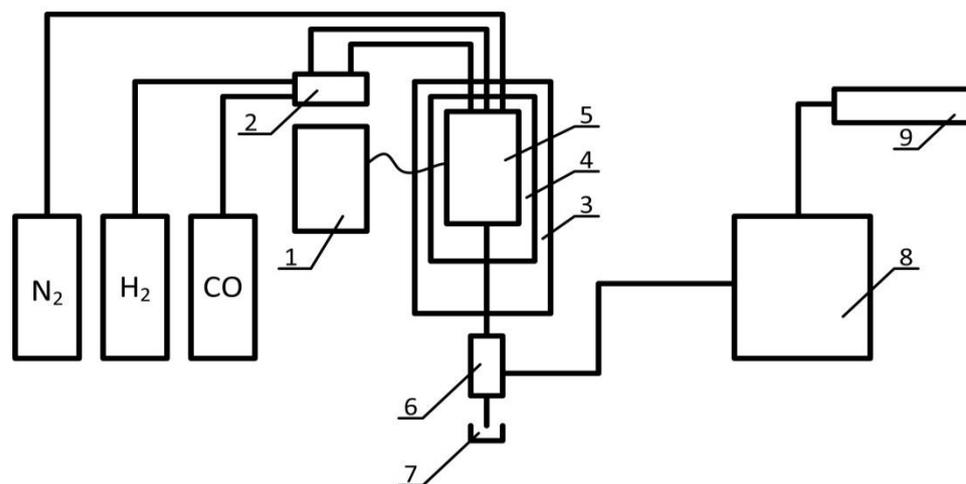


Рисунок 8 - Технологическая схема лабораторной каталитической установки: 1 - регулятор температур; 2 – блок дозирования газов; 3 – термошкаф; 4 – рубашка реактора; 5 – реактор; 6 – сепаратор; 7 – приёмник; 8 – хроматографический комплекс; 9 – вытяжка

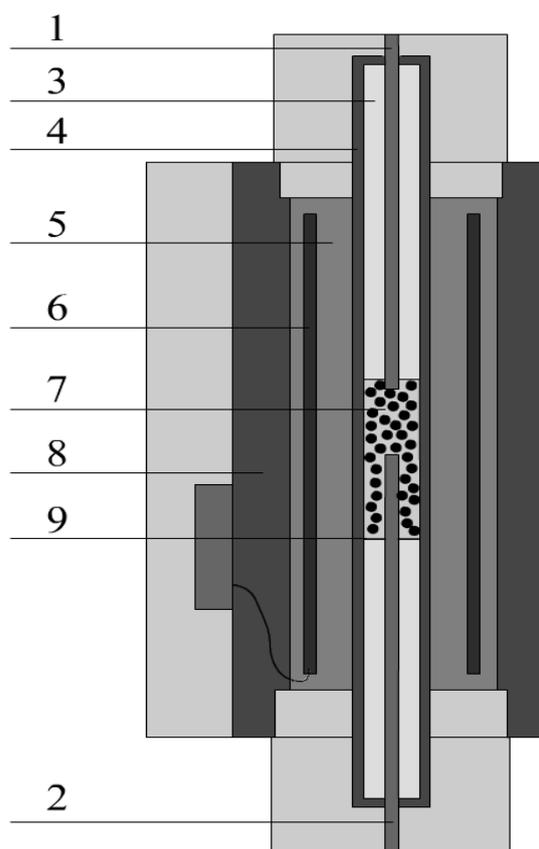


Рисунок 9 – Схема реактора: 1,2 – термопреобразователи сопротивления, 3 – испаритель, 4 – корпус, 5 – медный бандаж, 6 – печь, 7 – слой катализатора, 8 – теплоизоляция, 9 – решётка

Перед началом проведения исследования необходимо проверить установку на герметичность. Для этого нужно ввести в систему инертный газ – азот под повышенным давлением (1,5 – 2 МПа). Установка выдерживается в течение нескольких минут. В случае обнаружения утечек газа работа прекращается до их полного устранения. После опрессовки установки можно переходить к исследованию катализатора.

$\text{H}_2$  и  $\text{CO}$ , проходя через блок дозирования газов (электронный расходомер Bronkhorst), смешиваются в заданном соотношении и попадают в трубчатый реактор, расположенный в термошкафе. Термошкаф предназначен для поддержания высокой температуры, чтобы образовавшиеся в реакторе продукты в момент выхода из него не закупорили трубку, в случае их высокой вязкости при комнатной температуре. После выхода из реактора, образовавшаяся газо-продуктовая смесь попадает в трубчатый холодильник, охлаждается и направляется на разделение в сепаратор-холодильник. Газ из него уходит на хроматограф для анализа, а жидкий продукт отбирается в приемник для дальнейшего изучения. Температурные режимы внутри слоя катализатора, рубашки реактора и термошкафа контролируются микропроцессорным регулятором температуры «Siemens».

На лабораторной установке используется реактор (рис. 9) с неподвижным слоем катализатора типа идеального вытеснения. Его объем составляет  $12 \text{ см}^3$ . Для загрузки гранул катализатора внутрь реактора необходимо снять верхний фланец, открыв этим отверстие сверху реактора. С помощью двух термопар осуществляется контроль температурного режима. Верхняя часть испарителя используется как смеситель реагентов, нижняя его часть не допускает конденсацию жидкого продукта на выходе из реактора. Реакционное пространство, заключенное вместе с испарителем в корпус реактора, получает тепло от электрической печи через медный бандаж. Реактор находится в слое теплоизоляции. Решетка предназначена для удержания гранул катализатора внутри реакционного пространства.

Хроматографический анализ газовых смесей проводился на хроматографе «Хроматэк–Кристалл 5000.1». Анализ газовых проб производится с использованием следующих хроматографических колонок с температурой колонок 80 °С:

- насадочная колонка длиной 4 м с сорбентом NaX (60/80) – для обнаружения и расчета концентраций: водорода, кислорода, азота, метана и монооксида углерода (скорость газа-носителя (аргон) – 30 мл/мин);
- насадочная колонка длиной 1,5 м с сорбентом Carbosieve S-II (60/80) для обнаружения и расчета концентраций диоксида углерода (скорость газоносителя (гелий) – 30 мл/мин);
- капиллярная колонка длиной 25 м Agilent HP-AL-S для обнаружения и расчета концентраций углеводородов C<sub>1</sub>–C<sub>6</sub>.

Расчет концентраций компонентов газовой смеси проводили по методу абсолютной калибровки «Хроматэк Аналитик 2.5».

Хроматографический анализ жидких смесей проводился на хроматографе «Хроматэк-Кристалл 5000.2». Анализ жидких проб производится с использованием хроматографической колонки с температурой 200 °С. Использовалась капиллярная колонка длиной 100 м Agilent DB-1 с неполярным сорбентом диметилполисилоксаном для обнаружения и расчета концентраций углеводородов и оксигенатов.

Расчет концентраций компонентов жидкой смеси проводили по методу внутренней нормализации «Хроматэк Аналитик 2.5».

### **2.3. Методика исследования и обсуждение результатов**

Исследование состояло из 2 серий, в каждой из которых проводилось по три опыта. В каждой из серий постоянным оставались давление (1,1 МПа), соотношение H<sub>2</sub>:CO (2:1) и время опытов (6 часов).

Для каждой из двух серий опытов устанавливались свои объёмные расходы реагентов и, соответственно, времена контактов. В первом случае расходы H<sub>2</sub> и CO составили соответственно 200 и 100 нмл/мин, а время

контакта – 2 секунды. Во второй серии опытов объёмные расходы газов составляли соответственно 60 и 30 нмл/мин, время контакта – 6,5 секунд.

Для каждого опыта, в соответствии с его порядком внутри серии, устанавливалась собственная температура: 1 опыт – 250 °С, 2 – 260 °С и 3 – 270 °С. Выбранные условия для проведения исследования попадают под оптимальные параметры проведения процесса, рассмотренные выше, а также позволяют охватить широкий спектр условий протекания СФТ.

В реактор загружался, приготовленный по выше описанной методике, катализатор объёмом 8 см<sup>3</sup>. После загрузки катализатора, установка опрессовывалась инертным газом.

Для проведения синтеза на полученном катализаторе не требуется его предварительная активация. Катализатор прогревается внутри реактора в токе синтез-газа, и приблизительно через час после ввода смеси СО и Н<sub>2</sub> начинает образовываться жидкий продукт. Также в этот момент на газовой хроматограмме регистрируется понижение концентрации СО, что свидетельствует о протекании СФТ в данных условиях на выбранном катализаторе. После завершения синтеза полученный продукт хранился в морозильной камере для предотвращения его испарения и деградации. Объём и масса жидких продуктов синтеза отличаются незначительно (приблизительно на 0,1 мл и 0,3 г). В связи с малой продолжительностью опытов и отсутствием определенной зависимости в отклонениях невозможно утверждать о том, что данные различия в массе и объёме продуктов синтеза связаны с выбором параметров протекания процесса.

Результаты анализа внутреннего состава жидких и газообразных продуктов СФТ на катализаторах на основе УДП-Fe приведены в таблицах 5 – 10 и на рисунках 10 – 13.

Таблица 5 – Оксигенатный состав жидких продуктов, полученных при времени контакта 2 секунды

Компонент	Концентрация, % об.		
	При 250 °С	При 260 °С	При 270 °С
Этанол	5,371	4,140	3,226
Третбутанол	-	0,136	0,120
Третамиловый спирт	-	0,026	-
Пропанол-1	1,706	1,300	0,881
Метанол	5,018	3,885	3,026
Изопропанол	0,209	0,170	0,173
Изобутанол	-	0,046	0,041
Бутанол-1	0,526	1,473	0,223
Бутанол-2	0,050	-	0,027
Общая концентрация	12,88	11,176	7,717

Таблица 6 – Оксигенатный состав жидких продуктов, полученных при времени контакта 6,5 секунд

Компонент	Концентрация, % об.		
	При 250 °С	При 260 °С	При 270 °С
Этанол	-	-	-
Третбутанол	0,701	0,372	-
Третамиловый спирт	0,047	0,017	0,013
Пропанол-1	8,330	4,291	4,460
Метанол	25,820	13,898	11,829
Изопропанол	1,239	0,609	0,687
Изобутанол	0,277	0,143	0,176
Бутанол-1	0,276	0,276	0,198
Бутанол-2	2,239	2,239	1,158
Общая концентрация	38,929	21,845	18,521

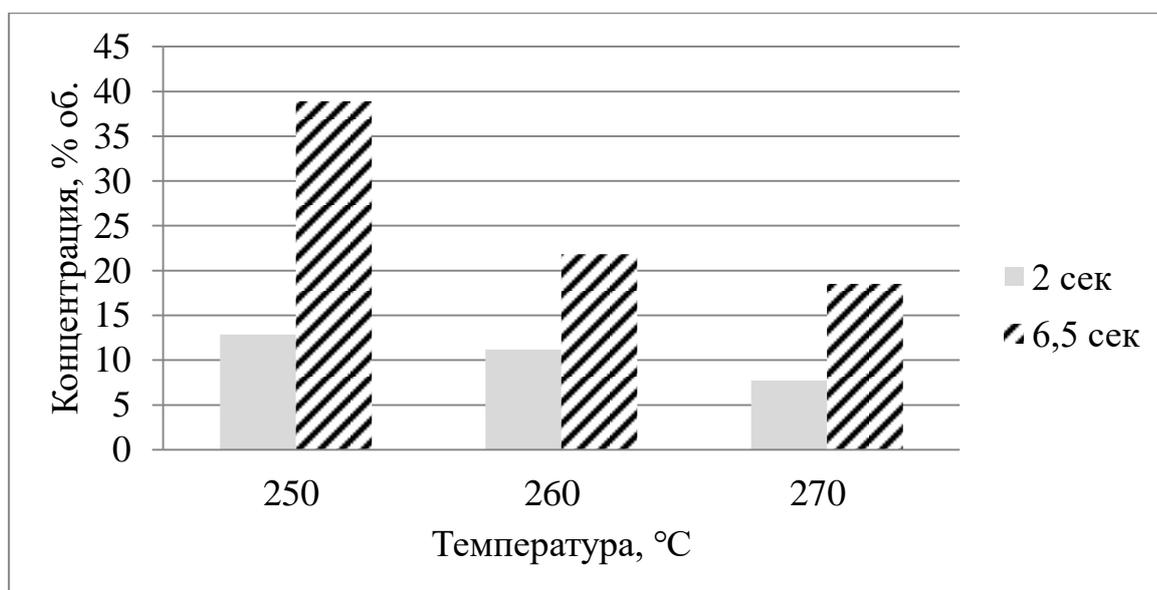


Рисунок 10 – Диаграмма изменения концентрации оксигенатов в жидком продукте СФТ в зависимости от температуры и времени контакта

Кислородосодержащие соединения являются ценным компонентом моторных топлив, т.к. обладают высоким октановым числом. В связи с чем их повышенная концентрация является одним из важнейших критериев качества конечного продукта синтеза.

Из представленных выше таблиц 5 и 6, а также диаграммы (рис. 10), наглядно видно, что увеличение времени контакта приводит к значительному увеличению содержания оксигенатов в жидком продукте СФТ. Это связано с поверхностным механизмом реакций. При большом времени контакта замедляются реакции гидрирования образующихся на поверхности катализатора оксигенатов. Тенденция к уменьшению концентрации данных веществ с увеличением температуры синтеза сохраняется в обеих сериях опытов. Это связано с поверхностным механизмом реакций. При большом времени контакта замедляются реакции гидрирования образующихся на поверхности катализатора оксигенатов.

Однако во всех опытах было получено неприемлемое количество метанола, отсутствие которого строго регламентировано в ГОСТ на моторные топлива. По остальным веществам продукт отвечает заявленным требованиям [25].

Таблица 7 – Концентрация веществ в газовом продукте при времени контакта 2 секунды

Компонент	Концентрация, % об.		
	При 250 °С	При 260 °С	При 270 °С
Окись углерода	30,081	28,044	24,966
Двуокись углерода	1,223	2,117	3,9
Метан	7,522	8,67	11,5

Таблица 8 – Концентрация веществ в газовом продукте при времени контакта 6,5 секунды

Компонент	Концентрация, % об.		
	При 250 °С	При 260 °С	При 270 °С
Окись углерода	26,216	26,443	24,353
Двуокись углерода	1,012	1,426	2,286
Метан	9,215	8,189	10,177

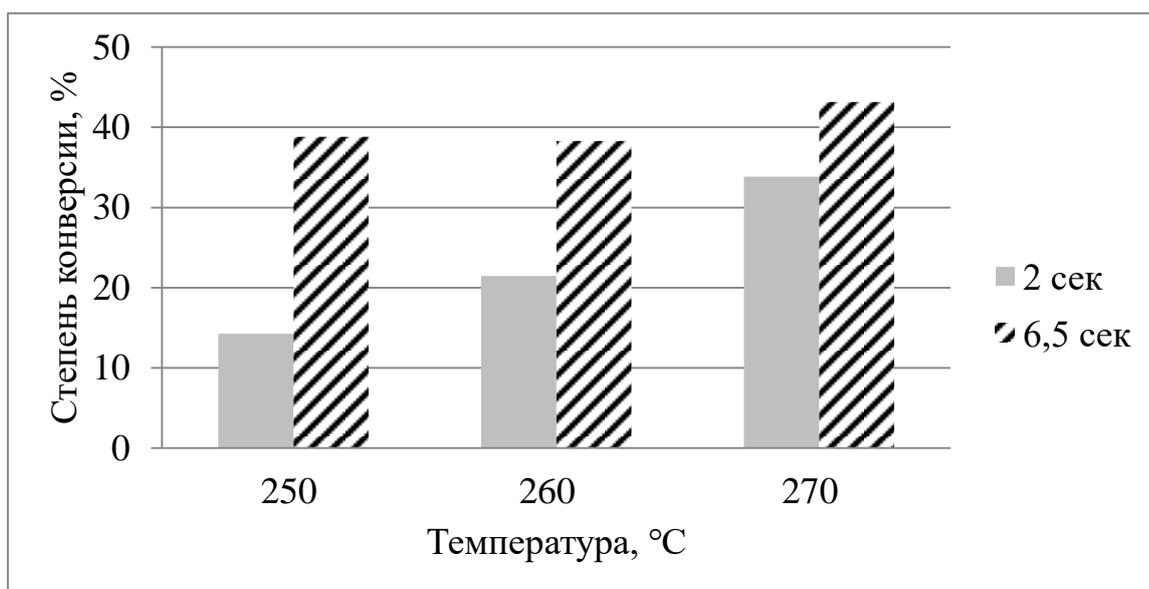


Рисунок 11 – Диаграмма изменения степени конверсии СО в газовом продукте СФТ в зависимости от температуры и времени контакта

В лабораторных условиях проведения СФТ не удается добиться достаточно высокой степени конверсии СО. Решением данной проблемы может стать организация рецикла газа.

Тенденция к увеличению степени конверсии окиси углерода с повышением температуры синтеза и времени контакта более наглядна при времени контакта в 2 секунды. Однако при максимально высокой температуре

синтеза в 270 °С она всё равно остается ниже, чем при температуре 250 °С и времени контакта в 6,5 секунд. Наблюдаемое увеличение степени конверсии связано с большим временем нахождения исходного вещества на поверхности катализатора.

Делать вывод о целесообразности использования какого-либо технологического режима как наиболее оптимального сложно, не зная объёмов жидкого продукта, полученного в ходе многодневного протекания синтеза.

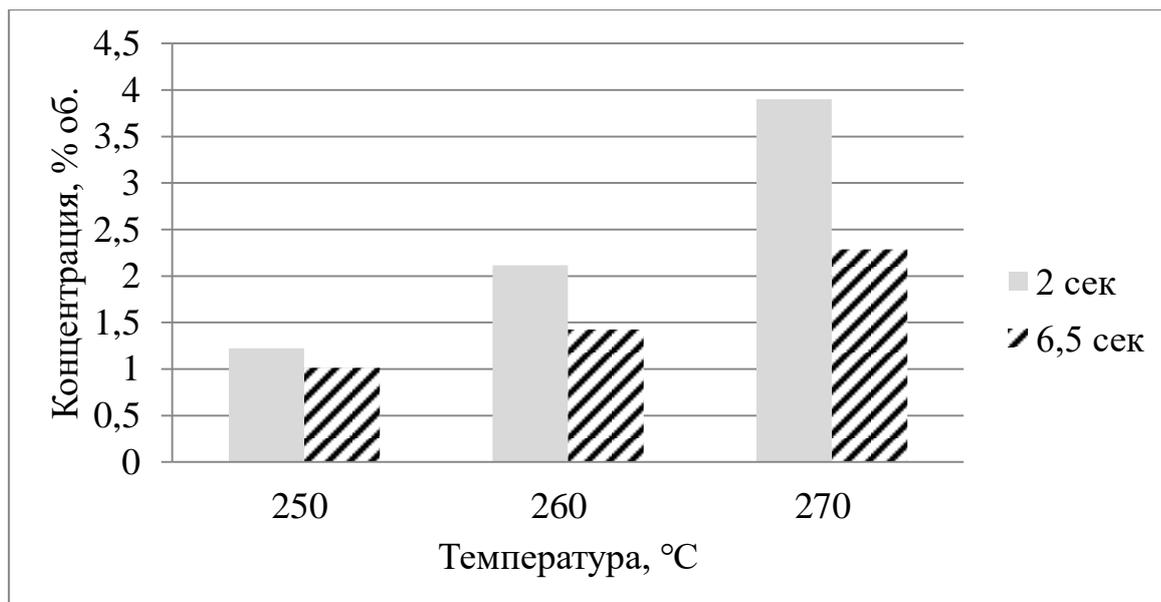


Рисунок 12 – Диаграмма изменения концентрации CO<sub>2</sub> в газовом продукте СФТ в зависимости от температуры и времени контакта

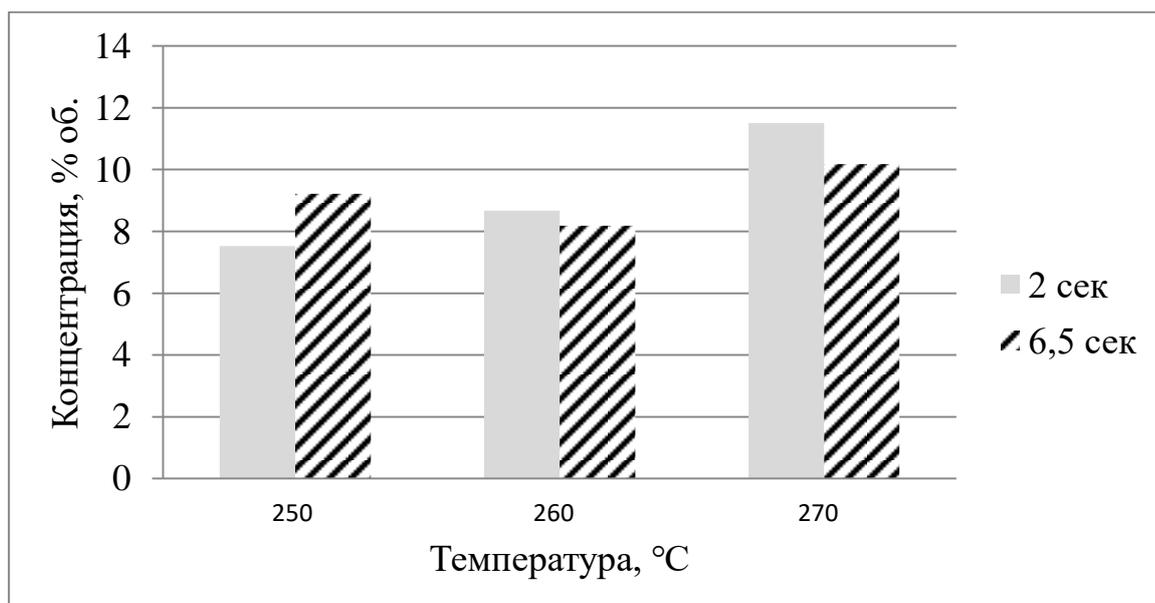


Рисунок 13 – Диаграмма изменения концентрации CH<sub>4</sub> в газовом продукте СФТ в зависимости от температуры и времени контакта

Важным фактором для определения оптимальных параметров проведения СФТ является образование побочных продуктов синтеза –  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$ . С точки зрения ресурсоэффективности использования сырья, более предпочтительными выглядят результаты, полученные при времени контакта в 6,5 секунд. Не смотря на общую для двух серий опытов динамику к росту концентрации побочных продуктов с ростом температуры, их концентрация при меньших расходах синтез-газа значительно ниже. Высокое значение концентрации метана при 250 °С и времени контакта в 6,5 секунд связано, скорее всего, с погрешностью в хроматографическом анализе, т.к. затем идёт резкое снижение концентрации с последующим ростом при увеличении температуры по динамике, схожей по своей интенсивности с динамикой для других газовых продуктов СФТ.

Значительные увеличения концентрации  $\text{CO}_2$  и степени превращения  $\text{CO}$  в опыте при 270 °С и времени контакта 2 секунды, вероятно, взаимосвязаны, т.к. на реакцию равновесия водяного газа, по которой образуется двуокись углерода,  $\text{CO}$  и  $\text{CO}_2$  расходуются по стехиометрии 1:1. Данный факт нецелесообразного использования синтез-газа в СФТ при данных условиях говорит о нерентабельности их применения на реальных установках.

Таблица 9 – Групповой состав жидкого продукта, полученного при температуре 270 °С и времени контакта 2 секунды

Группа	Парафины	Изопарафины	Ароматика	Нафтенны	Олефины	Оксигенаты	Итого
1	0,017	-	-	-	-	-	0,017
2	0,001	-	-	-	-	0,004	0,004
3	0,234	-	-	-	0,022	0,026	0,282
4	0,966	0,047	-	-	0,502	0,002	1,517
5	2,583	0,367	-	0,019	1,388	-	4,357
6	5,082	1,343	0,114	0,135	3,433	0,001	10,108
7	7,815	1,914	0,561	0,317	4,093	-	14,700
8	9,435	4,883	1,012	2,057	1,399	-	18,787
9	8,327	6,449	1,533	1,318	1,641	-	19,267
10	6,600	2,098	1,147	0,352	0,515	-	10,712

Продолжение таблицы 9

11	5,167	-	2,159	0,017	-	-	7,344
12	0,315	0,280	3,981	-	-	-	4,575
13	0,279	0,261	-	-	-	-	0,540
14	4,255	-	-	-	-	-	4,255
15	3,536	-	-	-	-	-	3,536
Итого	54,61	17,641	10,508	4,216	12,992	0,033	100

Таблица 10 – Фракционный состав жидкого продукта, полученного при температуре 270 °С и времени контакта 2 секунды

Отгон, %	0,5	20	40	60	80	99,5
Температура, °С	39,334	92,767	115,61	137,38	171,15	279,28

Основным продуктом являются парафины нормального строения. Приблизительно в равных количествах, но значительно меньших, чем парафины, образуются олефины, ароматика и изо-парафины. Отгон большей части жидкого продукта происходит при температуре 170 °С, а расчётное октановое число по хроматографическому методу составило порядка 60 пунктов. Данные результаты исследования говорят о невозможности применения конечного продукта напрямую в качестве моторного топлива. Однако применив фракционирование в ректификационной колонне, можно получить продукты для разных отраслей химической промышленности (легкие парафины) и высокооктановые добавки к моторным топливам или компоненты моторных масел. Тяжелый остаток фракционирования пригоден к использованию как дизельное топливо.

### **3. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

#### **3.1. Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований**

##### **3.1.1. Потенциальные потребители результатов исследования**

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

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

Сегментирование – это разделение покупателей на однородные группы, для каждой из которых может потребоваться определенный товар или услуга. Можно применять географический, демографический, поведенческий и иные критерии сегментирования рынка потребителей, возможно применение их комбинаций с использованием таких характеристик, как возраст, пол, национальность, образование, социальная принадлежность, профессия, уровень дохода.

Целесообразно выбрать два наиболее значимых критерия: размер компании и отрасль, по которым будет производиться сегментирование рынка.

Таблица 11 – Карта сегментирования рынка

		Отрасль предприятия	
		Газодобывающие	Нефтегазодобывающие
Размер компании	Крупные	Chevron	Роснефть
	Средние	–	Сургутнефтегаз
	Мелкие	Haldor Topsoe	Русснефть

Как видно из таблицы 11, наиболее перспективным сегментом в отраслях нефтегазодобычи и нефтегазопереработки для формирования спроса является сегмент крупных и средних нефтедобывающих компаний.

### 3.1.2. Анализ конкурентных технических решений

Анализ существующих на рынке конкурирующих разработок необходимо проводить систематически, поскольку рынки пребывают в постоянном движении. Такой анализ помогает вносить коррективы в научное исследование, чтобы успешнее противостоять соперникам. Важно адекватно оценить сильные и слабые стороны разработок конкурентов.

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности позволяет провести оценку эффективности научной разработки и определить направления для ее последующего улучшения.

Поскольку свойства катализаторов действующих промышленных производств по Фишеру-Тропшу не раскрываются, был проведен сравнительный анализ разработок научно-исследовательских институтов.

В России СФТ изучают в Томском государственном университете, Технологическом институте сверхтвёрдых и новых углеродных материалов (г. Троицк) и др. За рубежом исследования активно ведутся в США, Китае, ЮАР, странах Европейского Союза. Все исследования можно разделить на два основных типа: фундаментальные и прикладные. К недостаткам последних можно отнести малую практическую применимость и относительно долгое время исследований для продвижения разработки на рынок. В таблице 12 представлена оценочная карта сравнения конкурентных технических решений.

Таблица 12 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических разработок

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б <sub>ф</sub>	Б <sub>к1</sub>	Б <sub>к2</sub>	К <sub>ф</sub>	К <sub>к1</sub>	К <sub>к2</sub>
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,09	3	4	4	0,27	0,36	0,36
2. Энергоэкономичность	0,15	5	4	5	0,75	0,6	0,75

Продолжение таблицы 12

3. Надежность	0,13	4	5	3	0,52	0,65	0,39
4. Безопасность	0,14	5	5	4	0,7	0,7	0,56
<b>Экономические критерии оценки эффективности</b>							
1. Цена	0,13	5	4	4	0,65	0,52	0,52
2. Предполагаемый срок эксплуатации	0,13	5	4	3	0,65	0,52	0,39
3. Послепродажное обслуживание	0,05	5	5	5	0,25	0,25	0,25
4. Финансирование научной разработки	0,11	4	5	4	0,44	0,55	0,44
5. Срок выхода на рынок	0,07	3	3	4	0,21	0,21	0,28
Итого	1				4,44	4,36	3,94

Разрабатываемая GTL-технология является конкурентоспособной на рынке – её главным преимуществом является более дешёвый способ производства катализатора и его стабильность при эксплуатации.

### 3.1.3. SWOT-анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта. Итоговая матрица представлена в таблице 13.

Таблица 13 – Итоговая матрица SWOT

	<p><b>Сильные стороны:</b>                  С1. Энергоэффективность и экономичность технологии. С2. Экологичность технологии. С3. Низкая стоимость катализатора. С4. Высокая стабильность катализатора. С5. Близость разработки к завершённости.</p>	<p><b>Слабые стороны:</b>                  Сл1. Отсутствие пилотной установки. Сл2. Высокие капитальные затраты. Сл3. Высокие эксплуатационные затраты. Сл4. Чувствительность к чистоте и составу сырья. Сл5. Более низкая стоимость вторичных процессов нефтепереработки.</p>
--	--	--

Продолжение таблицы 13

<p><b>Возможности:</b>          В1. Использование инновационной структуры ТПУ.          В2. Использование отечественного сырья.          В3. Ужесточение экологических требований. В4.          Возможность модернизации технологии. В5.</p>	<p>1. Совершенствование энергоэффективности технологии.          2. Соответствие современным экологическим требованиям.          3. Разработка более дешёвой технологии.</p>	<p>1. Больше задействование ресурсов ТПУ.          2. Усиление требований экологии стимулирует развитие отрасли GTL          3. Постепенное вытеснение с рынка аналогичных нефтепродуктов.</p>
<p><b>Угрозы:</b>          У1. Отсутствие спроса на технологию.          У2. Высокий уровень конкуренции.          У3. Создание конкурирующего аналога в более быстрые сроки.          У4. Ограничения на экспорт.          У5. Снижение цены на нефть.</p>	<p>1. Продвижение на рынок экологичных технологий.          2. Увеличение финансирования с целью углубления исследований.          3. Более полное взаимодействие со всеми участниками рынка.</p>	<p>1. Проведение исследований смежных процессов с целью снижения капитальных затрат.          2. Использование отечественного сырья и комплектующих.</p>

На основе SWOT-анализа были показаны проблемы и возможности данной технологии. Для данного проекта, как и для любой GTL-технологии, характерен баланс сильных сторон и возможностей (экологичность, обширная база дешёвого сырья и т.д.) а так же слабых сторон и угроз (высокие капитальные затраты, низкий спрос и др.), то есть разрабатываемая технология находится в достаточно стабильных условиях. Для получения дополнительных конкурентных преимуществ необходимо дальнейшее совершенствование технологии до тех пор, пока рыночная цена получаемых продуктов не будет конкурировать с ценами на продукты, полученные из нефти.

### 3.2. Планирование научно-исследовательской работы

#### 3.2.1. Структура работ в рамках научного исследования

Для выполнения научных исследований формируется рабочая группа, в

состав которой могут входить научные сотрудники и преподаватели, инженеры, техники и лаборанты, численность групп может варьироваться. По каждому виду запланированных работ устанавливается соответствующая должность исполнителей.

В данном разделе необходимо составить перечень этапов и работ в рамках проведения научного исследования, провести распределение исполнителей по видам работ.

Таблица 14 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Выбор направления исследований	Руководитель темы
Выбор направления исследований	2	Составление и утверждение технического задания	Руководитель
	3	Календарное планирование работ по теме	Руководитель
	4	Подбор и изучение материалов по теме	Бакалавр
Теоретические исследования	5	Проведение теоретических расчетов и обоснований	Руководитель, бакалавр
	6	Проведение компьютерных расчетов	Руководитель, бакалавр
Обобщение и оценка результатов	7	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель, бакалавр
Проведение ОКР			
Испытание образца	8	Лабораторные испытания	Бакалавр, лаборант
Оформление отчета по НИР	9	Оформление отчета	Бакалавр

### 3.2.2. Определение трудоемкости выполнения работ

Временные показатели проведения научного исследования представлены в таблице 15.

Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости используется следующая формула:

$$t_{ож\ i} = \frac{3t_{min\ i} + 2t_{max\ i}}{5}. \quad (7)$$

Продолжительность каждой работы в рабочих днях:

$$T_{р\ i} = \frac{t_{ож\ i}}{ч\ i}. \quad (8)$$

Продолжительность каждой работы в календарных днях:

$$T_{к\ i} = T_{р\ i} * k_{кал}. \quad (9)$$

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{кал} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}}. \quad (10)$$

Таблица 15 – Временные показатели проведения научного исследования

№	Наименование работ	Трудоемкость работ									Исполнители		
		t <sub>min</sub> , чел-дни			t <sub>max</sub> , чел-дни			t <sub>ож</sub> , чел-дни					
		Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3
1	Разработка технического задания	1	2	1	5	6	5	2,6	3,6	2,6	Р	Р	Р
2	Выбор направления исследований	2	3	2	6	6	6	3,6	4,2	3,6	Р	Р	Р
3	Составление и утверждение технического задания	2	2	2	6	7	6	3,6	4	3,6	Р	Р	Р
4	Календарное планирование работ по теме	1	1	1	2	2	2	1,4	1,4	1,4	Р	Р	Р
5	Подбор и изучение	15	15	15	20	20	20	17	17	17	Б	Б	Б
6	Проведение теоретических расчетов и обоснований	20	20	20	30	30	30	24	24	24	Б Р	Б Р	Б Р
		10	10	10	20	20	20	14	14	14			
7	Проведение компьютерных расчетов	5	5	5	7	7	7	5,8	5,8	5,8	Б Р	Б Р	Б Р
		2	3	2	5	5	5	3,2	3,8	3,2			

Продолжение таблицы 16

8	Оценка эффективности полученных	0,7 1,6	0,7 1,6	0,7 1,6	1,03 2,4	1,03 2,4	1,03 2,4	Р Б	Р Б	Р Б
9	Лабораторные испытания	2,3 2,3	2,3 2,3	2,3 2,3	3,4 3,4	3,4 3,4	3,4 3,4	Б Л	Б Л	Б Л
10	Оформление отчета	4,6	4,6	4,6	7	7	7	Б	Б	Б

Таблица 17 – Календарный план-график проведения НИОКР по теме

№ раб-от	Вид работ	Исполнители	T <sub>кв</sub> кал. дн.	Продолжительность выполнения													
				февр		март			апрель			май			июнь		
				2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	
1	Разработка технического задания	Руководитель	4														
2	Выбор направления исследований	Руководитель	5														
3	Составление и утверждение технического задания	Руководитель	5														
4	Календарное планирование работ по теме	Руководитель	2														
5	Подбор и изучение материалов по теме	Бакалавр	25	.....													
6	Проведение теоретических расчетов и обоснований	Руководитель, бакалавр	11 18														
7	Проведение компьютерных расчетов	Руководитель, бакалавр	3 5														
8	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель, бакалавр	2 4														



$C_3$  – цена одного кВт·ч, руб.

Линейная амортизация определяется по следующей формуле:

$$A = \frac{C}{T_{обг}}, \quad (13)$$

где  $C$  – стоимость оборудования;

$T_{обг}$  – норма использования оборудования, лет.

Для расчета основной заработной платы используем месячный оклад руководителя и лаборанта.

Таблица 20 – Расчет основной заработной платы

Исполнители	Оклад, руб	Районный коэффициент	Месячная зарплата, руб./мес.	Общие затраты по заработной плате, руб. (5 месяцев)
Руководитель	16048	1,3	20862	104310
Лаборант	13058	1,3	16975	84875

Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления). В данной статье расходов 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 отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$З_{внеб} = k_{внеб}(З_{осн} + З_{доп}), \quad (14)$$

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

Таблица 21 – Социальные отчисления

Исполнитель	Основная заработная плата, руб.		
	Исп.1	Исп.2	Исп.3
Руководитель проекта	20862	22435	19860
Лаборант	16975	14354	17020
Социальные отчисления ( $k_{внеб} = 0,3$ )			
Руководитель проекта	6258,6	6730,5	5958,0

Продолжение таблицы 21

Лаборант	5092,5	4306,2	5106,0
Всего	11351,1	11036,7	11064,0

Величина накладных расходов, попавших в предыдущие статьи расходов (печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые расходы и др.), определяется по следующей формуле:

$$Z_{\text{накл}} = (\text{сумма статей } 1 \div 7) * k_{\text{нр}}, \quad (15)$$

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

Величину коэффициента накладных расходов можно взять в размере 16%.

Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта. Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы 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.

Таблица 22 – Расчет бюджета затрат научно-технического исследования

Наименование статьи	Сумма, руб.		
	Исп.1	Исп.2	Исп.3
1. Материальные затраты НТИ	42100	51050	43200
2. Затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	4014000	4014000	4014000
3. Затраты на электроэнергию	582,4	582,4	582,4
4. Затраты по основной заработной плате исполнителей	37837	36789	36880
5. Социальные отчисления	11351,1	11036,7	11064
6. Накладные расходы	656939,3	658153,3	656916,2
7. Бюджет затрат НТИ	4762810	4771611	4762643



Рисунок 14 – Круговая диаграмма материальных затрат НТР

Как видно из диаграммы, наиболее затратная часть – это затраты на специальное оборудование. Большой объем затрат для данной работы обуславливается высокой ценой на каталитическую установку.

### 3.3. Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективностей исследования

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

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более) вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносится финансовые значения по всем вариантам исполнения.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп } i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}}, \quad (16)$$

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

$\Phi_{\text{рi}}$  – стоимость  $i$ -го варианта исполнения;

$\Phi_{\text{max}}$  – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта.

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

$$I_{\text{рi}} = \sum a_i * b_i, \quad (17)$$

где  $I_{\text{рi}}$  – интегральный показатель ресурсоэффективности для  $i$ -го варианта исполнения разработки;

$a_i$  – весовой коэффициент  $i$ -го варианта исполнения разработки;

$b_i^a, b_i$  – балльная оценка  $i$ -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

$n$  – число параметров сравнения.

Таблица 23 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Объект исследования Критерии	Весовой коэффициент параметра	Исп.1	Исп.2	Исп.3
1. Способствует росту производительности труда	0,1	5	5	3
2. Удобство в эксплуатации	0,15	4	4	3
3. Энергосбережение	0,15	4	4	4
4. Надежность	0,20	5	3	4
5. Воспроизводимость	0,25	4	4	4
6. Материалоемкость	0,15	5	5	5
ИТОГО	1	4,45	4,05	3,9

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки ( $I_{\text{испi}}$ ) определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{\text{исп.1}} = \frac{I_{\text{р-исп.1}}}{I_{\text{финр.1}}}, I_{\text{исп.2}} = \frac{I_{\text{р-исп.2}}}{I_{\text{финр.2}}} \text{ и т. д.} \quad (18)$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных. Сравнительная эффективность проекта ( $\mathcal{E}_{\text{ср}}$ ):

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{исп.1}}}{I_{\text{исп.2}}}. \quad (19)$$

Таблица 24 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Исп.1	Исп.2	Исп.3
1	Интегральный финансовый показатель разработки	1	0,98	0,96
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,45	4,05	3,9
3	Интегральный показатель эффективности	4,45	4,13	4,06
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1	0,93	0,91

В ходе выполнения данного раздела были определены финансовый показатель разработки, показатель ресурсоэффективности, интегральный показатель эффективности и, на основании сравнительной эффективности вариантов исполнения, оптимальным был выбран вариант исполнения 1.

## **4. Социальная ответственность**

Выполнение выпускной квалификационной работы осуществлялось на лабораторной каталитической установке «Катакон». На данной установке проводились исследования каталитической активности железного катализатора Фишера-Тропша в процессе синтеза жидких углеводородов.

Объект исследования – железный катализатор, полученный методом электрического взрыва. Сырьё – синтез-газ ( $H_2:CO=2:1$ ). Цель работы – исследование активности катализатора в процессе получения жидких углеводородов из монооксида углерода и водорода.

Лабораторная установка, хроматографический комплекс и персональный компьютер расположены в лабораторном помещении кафедры ХТТиХК ТПУ. Рабочая зона оборудована системами отопления, водоснабжения, вентиляции воздуха, комбинированным освещением; соответствует требованиям [26,27].

### **4.1. Производственная безопасность**

#### **4.1.1. Анализ вредных факторов**

##### **4.1.1.1. Вредные вещества**

Процесс на каталитической установке протекает при высоких температурах (до 400 °С) и следствием этого является то, что получаемые продукты находятся в жидком и газообразном состоянии. Это делает их более активными. Большинство ядовитых веществ попадает в организм человека через органы дыхания. Это опасно из-за большой всасывающей способности слизистой оболочки носа и дыхательной поверхности легких. Получаемые жидкие углеводороды содержат около 20 масс. % ароматических углеводородов (бензол, толуол и т.д.). Они относятся к ядовитым (токсичным) веществам. Помимо этого в состав выделяющихся газов входят непрореагировавшие водород и монооксид углерода.

Бензол по своему биологическому действию относится по характеру действия к канцерогенам. При непродолжительном вдыхании паров бензола не возникает немедленного отравления, если организм человека подвергается

длительному воздействию бензола в малых количествах, последствия также могут быть очень серьезными. В этом случае хроническое отравление бензолом может стать причиной лейкемии (рака крови) и анемии (недостатка гемоглобина в крови).

Толуол вызывает аналогичные изменения со стороны крови, но несколько слабее, чем бензол.

В воздухе кроме токсичных веществ содержится так называемая производственная пыль. Выделение пыли происходит при таблетировании и дроблении катализатора. Длительный контакт с производственной пылью в данном случае приводит к хроническому заболеванию легких – силикозу.

Поэтому важно знать, какая предельно допустимая концентрация этих веществ должна быть в воздухе, чтобы они не оказывали сильного влияния на организм человека. По определению, ПДК вещества в воздухе рабочей зоны – концентрация, которая при ежедневной работе без средств защиты в течении 8 часов или другой продолжительности, но не более 40 часов в неделю, в течении всего рабочего стажа не могут вызвать заболеваний или отклонений в состоянии здоровья.

Таблица 25 – Предельно допустимые концентрации токсичных веществ в воздухе рабочей зоны (ГН 2.2.5.1313-03) [28]

Наименование	ПДК рабочей зоны, мг/м <sup>3</sup>	Класс опасности	Примечание
Монооксид углерода	20	2	Образует карбоксигемоглобин, надолго уменьшая поступление кислорода
Бензол	5	2	Канцероген, обладает наркотическим действием
Толуол	50	3	Более слабый канцероген, чем бензол; пары при вдыхании также оказывают наркотическое действие

#### Продолжение таблицы 25

Бензин	100	3	При вдыхании вызывает наркотическое опьянение; содержит токсичные и канцерогенные вещества
--------	-----	---	--

Средствами защиты от попадания на кожу вредных химических веществ служат резиновые перчатки, лабораторные халаты, шапочки, обувь. Для защиты дыхательных путей от действия вредных химических веществ служат специальные ватно-марлевые повязки, респираторы, противогазы. Для защиты слизистой оболочки глаз можно использовать специальные очки. Средством защиты от поражения вредными химическими веществами служит также точное соблюдение техники безопасности и инструкций к используемым веществам.

#### 4.1.1.2. Микроклимат

Микроклимат производственных помещений – это климат внутренней среды этих помещений, который определяется действующими на организм человека сочетаниями температуры, влажности и скорости движения воздуха, а также температуры окружающих поверхностей.

Метеорологические условия рабочей среды (микроклимат) оказывают влияние на процесс теплообмена и характер работы. Микроклимат характеризуется температурой воздуха, его влажностью и скоростью движения, а также интенсивностью теплового излучения. Длительное воздействие на человека неблагоприятных метеорологических условий резко ухудшает его самочувствие, снижает производительность труда и приводит к заболеваниям. Высокая температура воздуха способствует быстрой утомляемости работающего, может привести к перегреву организма, тепловому удару или профзаболеванию. Низкая температура воздуха может вызвать местное или общее охлаждение организма, стать причиной простудного заболевания либо обморожения [29].

Влажность воздуха оказывает значительное влияние на терморегуляцию

организма человека. Высокая влажность при высокой температуре воздуха способствует перегреванию организма, при низкой же температуре она усиливает теплоотдачу с поверхности кожи, что ведет к переохлаждению организма. Низкая влажность вызывает пересыхание слизистых оболочек дыхательных органов работающего.

Оптимальные параметры микроклимата на рабочих местах соответствуют требованиям Санитарных правил и нормативов «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений» применительно к выполнению работ различных категорий в холодный и теплый период года.

В лаборатории предусмотрены следующие нормы производственной санитарии

1) Температура в помещении:

- в холодный период (+15) – (+24) °С;
- в тёплый период (+16) – (+27) °С.

2) Влажность воздуха в помещениях:

- в холодный период – не более 75 %;
- в тёплый период – не более 55 – 75 %.

3) Скорость движения воздуха:

- в холодный период – 0,1 – 0,4 м/с;
- в теплый период – 0,1 – 0,5 м/с.

В помещении, где находится компьютер, средняя температура воздуха 22 °С, относительная влажность воздуха 55 %, скорость движения воздуха – 0,1 м/с. Ориентируясь на оптимальные и допустимые показатели микроклимата на рабочих местах (СанПиН 2.2.2.542-96), можно сделать вывод о том, что метеоусловия являются оптимальными, то есть обеспечивают сохранение нормального функционального и теплового состояния организма без напряжения реакции терморегуляции и создают предпосылки для высокого уровня работоспособности.

### 4.1.1.3. Повышенный уровень электромагнитных излучений

Спектр электромагнитного излучения (источником является компьютер) природного и техногенного происхождения, оказывающий влияние на человека как в условиях быта, так и в производственных условиях, имеет диапазон волн от тысяч километров (переменный ток) до триллионной доли миллиметра (космические энергетические лучи). Есть два источника электромагнитного излучения: монитор и системный блок.

Длительное воздействие электромагнитного поля на организм человека может вызвать нарушение функционального состояния нервной и сердечнососудистой систем. Это выражается в повышенной утомляемости, снижении качества выполнения рабочих операций, изменение кровяного давления и пульса.

Допустимые уровни напряженности и требования к проведению контроля на рабочих местах нормы допустимых уровней напряженности электрических полей зависят от времени пребывания человека в контролируемой зоне. Время допустимого пребывания в рабочей зоне составляет  $T = 50/E - 2$  часов. Работа в условиях облучения электрическим полем с напряженностью 20–25 кВ/м продолжается не более 10 минут. При напряженности не выше 5 кВ/м присутствие людей в рабочей зоне разрешается в течение 8 часов [29].

Особые требования к помещениям, в которых эксплуатируются компьютеры:

- не допускается расположение рабочих мест в подвальных помещениях;
- площадь на одно рабочее место должна быть не меньше  $6 \text{ м}^2$ , а объем – не менее  $20 \text{ м}^3$ ;
- для повышения влажности воздуха в помещениях с компьютерами необходимы увлажнители воздуха, ежедневно заправляемые дистиллированной или прокипяченной питьевой водой. В начале и через каждый час работы помещения необходимо проветрить.

#### **4.1.1.4. Недостаточная освещенность рабочей зоны**

Наиболее важной областью оптического спектра электромагнитных излучений является видимый свет (излучение с длиной волны от 0,38 – 0,4 до 0,75 – 0,78 мкм). Он обеспечивает зрительное восприятие, дающее около 90 % информации об окружающей среде, влияет на тонус центральной и периферической нервной системы, на обмен веществ в организме, его иммунные и аллергические реакции, на работоспособность и самочувствие человека. Недостаточное освещение рабочего места затрудняет длительную работу, вызывает повышенное утомление и способствует развитию близорукости. Слишком низкие уровни освещенности вызывают апатию и сонливость, а в некоторых случаях способствуют развитию чувства тревоги. Длительное пребывание в условиях недостаточного освещения сопровождаются снижением интенсивности обмена веществ в организме и ослаблением его активности. К таким же последствиям приводит длительное пребывание в световой среде с ограниченным спектральным составом света и монотонным режимом освещения.

Работа, связанная с документами, требует хорошего освещения. Излишне яркий свет снижает зрительные функции, приводит к перевозбуждению нервной системы, уменьшает работоспособность, нарушает механизм сумеречного зрения. Воздействие чрезмерной яркости может вызывать фотоожоги глаз и кожи, кератиты, катаракты и другие нарушения.

Нормируемыми параметрами для систем искусственного освещения являются: величина минимальной освещенности  $L_{\text{доп}}$ , допустимая яркость в поле зрения  $L_{\text{доп}}$ , а также показатель ослепленности  $P$  и коэффициент пульсации  $K_{\text{п}}$  (СНиП 23–05–95) [29].

#### **4.1.1.5. Повышенный уровень шума на рабочем месте**

Шум лабораторной установки – это беспорядочное сочетание звуков различной частоты и интенсивности, возникающих при механических колебаниях в упругой среде (твердой, жидкой или газообразной). Длительное

воздействие шума снижает остроту слуха и зрения, повышает кровяное давление, утомляет центральную нервную систему, в результате чего ослабляется внимание, увеличивается количество ошибок в действиях рабочего, снижается производительность труда. Воздействие шума приводит к появлению профессиональных заболеваний и может явиться причиной несчастного случая.

Органы слуха человека воспринимают звуковые колебания с частотой 16 – 20000 Гц. Колебания с частотой ниже 20 Гц (инфразвук) и выше 20000 Гц (ультразвук) не вызывают слуховых ощущений, но оказывают биологическое воздействие на организм. Гигиенические нормативы шума определены ГОСТ 12/1/003-83\* «ССБТ. Шум. Общие требования безопасности» и СН 2.2.4/2.1.8.562-96 «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых и общественных зданий».

Для снижения шума в помещениях проводятся следующие основные мероприятия:

- 1) уменьшение уровня шума в источнике его возникновения;
- 2) звукопоглощение и звукоизоляция;
- 3) установка глушителей шума;
- 4) рациональное размещение оборудования.

#### **4.1.1.6. Повышенный уровень вибрации**

Вибрация лабораторной установки – процесс распространения механических колебаний в твердом теле. Вибрация по способу передачи телу человека подразделяется на общую (воздействие на все тело человека) и локальную (воздействие на отдельные части тела). При воздействии общей вибрации наблюдаются нарушения сердечной деятельности, расстройство нервной системы, спазмы сосудов, изменения в вестибулярном аппарате. Локальная вибрация, возникающая при работе с ручным механизированным инструментом (в данном случае это мышь), вызывает спазмы периферических сосудов, различные нервно-мышечные и кожно-суставные нарушения.

Частотный диапазон расстройств зрительных восприятий лежит между 60 и 90 Гц, что соответствует резонансу глазных яблок.

Для снижения вибрации используют следующие методы:

- виброизоляция; вибродемпфирование,
- под которым понимают превращение энергии механических колебаний в тепловую.

Важным для снижения опасного воздействия вибрации на организм человека является правильная организация труда и отдыха, постоянное медицинское наблюдение, лечебно-профилактические мероприятия.

## **4.1.2. Анализ опасных факторов**

### **4.1.2.1. Электробезопасность**

Электробезопасность установки должна обеспечиваться в любых возможных нормальных и аварийных эксплуатационных ситуациях.

Источниками электрической опасности являются:

- оголенные части проводов или отсутствие изоляции;
- отсутствие заземления;
- замыкания;
- статическое напряжение.

Электробезопасность обслуживающего персонала и посторонних лиц должна обеспечиваться выполнением следующих мероприятий:

- 1) соблюдение соответствующих расстояний до токоведущих частей или путем закрытия;
- 2) ограждения токоведущих частей;
- 3) применение блокировки аппаратов и ограждающих устройств для предотвращения ошибочных операций и доступа к токоведущим частям;
- 4) применение предупреждающей сигнализации, надписей и плакатов;
- 5) применение устройств для снижения напряженности электрических и магнитных полей до допустимых значений;
- 6) использование средств защиты и приспособлений, в том числе для

защиты от воздействия электрического и магнитного полей в электроустановках, в которых их напряженность превышает допустимые нормы.

Для контроля предельно допустимых значений напряжений прикосновения и токов измеряют напряжения и токи в местах, где может произойти замыкание электрической цепи через тело человека. Класс точности измерительных приборов не ниже 2,5.

Все помещения лаборатории должны соответствовать требованиям электробезопасности при работе с электроустановками по ГОСТ 12.1.019-79.

Все электрооборудование с напряжением свыше 36 В, а также оборудование и механизмы, которые могут оказаться под напряжением, должны быть надежно заземлены.

Для отключения электросетей на вводах должны быть рубильники или другие доступные устройства. Отключение всей сети, за исключением дежурного освещения, производится общим рубильником.

В целях предотвращения электротравматизма запрещается:

- 1) работать на неисправных электрических приборах и установках;
- 2) перегружать электросеть;
- 3) переносить и оставлять без надзора включенные электроприборы;
- 4) работать вблизи открытых частей электроустановок, прикасаться к ним;
- 5) загромождать подходы к электрическим устройствам.

Обо всех обнаруженных дефектах в изоляции проводов, неисправности рубильников, штепсельных вилок, розеток, а также заземления и ограждений следует немедленно сообщить электрику.

В случае перерыва в подаче электроэнергии электроприборы должны быть немедленно выключены.

Категорически запрещается прикасаться к корпусу поврежденного прибора или токоведущим частям с нарушенной изоляцией и одновременно к заземленному оборудованию (другой прибор с исправным заземлением,

водопроводные трубы, отопительные батареи), либо прикасаться к поврежденному прибору, стоя на влажном полу.

При поражении электрическим током необходимо как можно быстрее освободить пострадавшего от действия электрического тока, отключив электроприбор, которого касается пострадавший. Отключение производится с помощью отключателя или рубильника.

При невозможности быстрого отключения электроприбора необходимо освободить пострадавшего от токоведущих частей деревянным или другим, не проводящим ток предметом источник поражения.

Во всех случаях поражения электрическим током необходимо вызвать врача [30].

#### **4.1.2.2. Пожаробезопасность**

Все помещения лаборатории должны соответствовать требованиям пожарной безопасности по ГОСТ 12.1.004-91 и иметь средства пожаротушения по ГОСТ 12.4.009-83.

Лаборатория должна быть оснащена пожарными кранами (не менее одного на этаж) с пожарными рукавами. В каждом рабочем помещении должны быть в наличии огнетушители и песок, а в помещениях с огнеопасными и легковоспламеняющимися веществами – дополнительные средства пожаротушения.

В помещении лаборатории на видном месте должен быть вывешен план эвакуации сотрудников в случае возникновения пожара.

Распоряжением по лаборатории из числа сотрудников назначается группа (3 – 5 человек), которая организует все противопожарные мероприятия, получив инструктаж местной пожарной команды.

Все сотрудники лаборатории должны быть обучены правилам обращения с огне- и взрывоопасными веществами, газовыми приборами, а также должны уметь обращаться с противогазом, огнетушителем и другими средствами пожаротушения, имеющимися в лаборатории.

В помещениях лаборатории и в непосредственной близости от них (в коридорах, под лестницами) запрещается хранить горючие материалы и устанавливать предметы, загромождающие проходы и доступ к средствам пожаротушения.

Курить разрешается только в отведенном и оборудованном для этой цели месте.

Без разрешения начальника лаборатории и лица, ответственного за противопожарные мероприятия, запрещается установка лабораторных и нагревательных приборов, пуск их в эксплуатацию, переделка электропроводки.

Запрещается эксплуатация неисправных лабораторных и нагревательных приборов.

После окончания работы необходимо отключить электроэнергию, закрыть газовые баллоны и воду во всех помещениях.

Каждый сотрудник лаборатории, заметивший пожар, задымление или другие признаки пожара обязан:

- 1) немедленно вызвать пожарную часть по телефону;
- 2) принять меры по ограничению распространения огня и ликвидации пожара;
- 3) поставить в известность начальника лаборатории, который в свою очередь должен известить сотрудников, принять меры к их эвакуации и ликвидации пожара.

Для ликвидации небольших очагов пожара на территории объекта имеются первичные средства тушения пожара – огнетушители, ящики с песком, асбестовые одеяла (кошмы) [31].

#### **4.2. Экологическая безопасность**

Вредное воздействие установки распространяется главным образом на атмосферу. Для борьбы с загрязнением воздуха на каталитической установке следует использовать как можно меньшие значения расхода синтез-газа, так как

выброс газообразных продуктов осуществляется напрямую в атмосферу.

Воздействие на гидросферу и литосферу отсутствует, так как слив вредных веществ и выброс твердых остатков отсутствует.

### **4.3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

#### **4.3.1. Анализ возможных чрезвычайных ситуаций при работе в лаборатории**

Химический взрыв – взрыв, возникающий за счет протекания химической реакции веществ или разложения вещества. Характеризуется значительной разрушительной мощностью и поражающей способностью. Может приводить к пожару в лаборатории. К химическому взрыву может привести накопление горючих газов (в первую очередь, водорода и монооксида углерода) до взрывоопасных концентраций.

При работе с взрывчатыми веществами необходимо соблюдать меры безопасности. В данном случае необходимо не допускать разгерметизации установки, чтобы горючие газы не смешивались с воздухом. Для этого требуется периодически опрессовывать установку инертным газом и не допускать разбора или разъединения узлов во время работы.

Физический взрыв – взрыв, возникающий за счет быстрого разрушения емкостей или из-за быстрого выделения тепла в какой-либо точке. Обычно (но не всегда) имеет меньшую мощность и разрушительные последствия, чем химический взрыв. К физическому взрыву может привести неконтролируемое повышение давления в герметичной системе (например, при закупоривании отводных трубок высоковязкими веществами или катализаторным шламом). Также к физическому взрыву может привести механическое повреждение баллона со сжатым газом.

Пожар – неконтролируемое возгорание в лаборатории. Может привести к полному уничтожению всей лаборатории. К пожару может привести воспламенение синтез-газа вследствие разгерметизации установки.

Термический ожог – воздействие на кожу сильно нагретых материалов.

К термическому ожогу может привести неосторожная работа с нагревательными приборами.

Отравление – попадание в организм токсичного вещества. К отравлению может привести попадание в воздух монооксида углерода или разлив жидких продуктов синтеза, содержащих ароматические углеводороды.

#### **4.3.2. Меры по предотвращению возникновения чрезвычайных ситуаций**

В целях обеспечения надежности и безопасности работы, предусматривается ряд мероприятий, обеспечивающих безопасное ведение технологического процесса:

- 1) герметичность арматуры оборудования и трубопроводов;
- 2) автоматизированный контроль исследуемого процесса;
- 3) оснащение установки сигнализацией, реагирующей на резкое повышение или понижение давления и температуры;
- 4) продувка системы инертным газом пуском или ремонтом;
- 5) наличие подъездов для пожарной техники;
- 6) оснащение лабораторного помещения вытяжкой.

Вода – наиболее доступное средство для тушения пожаров в лаборатории. Для тушения небольших очагов пламени можно взять воду из ближайшего водопроводного крана. При необходимости подачи большого количества воды в зону очага горения пользуются внутренним пожарным водопроводом (пожарный кран). Вода применяется для тушения твердых горючих материалов – дерева, бумаги, резины, тканей, одежды, а также хорошо растворяющихся в воде горючих жидкостей – ацетона, низших спиртов, органических кислот. Эффективность тушения пожара водой повышается при подаче ее в зону горения в виде распыленных струй. Водой нельзя тушить электрооборудование и электропроводку, находящиеся под напряжением, вещества, способные вступить с водой в химическую реакцию.

Асбестовое полотно применяют для тушения веществ и материалов,

горение которых не может происходить без доступа воздуха, но только в тех случаях, когда площадь горения не велика.

Сухой песок рекомендуется применять при загорании небольших количеств ГЖ, ЛВЖ и твердых веществ, в том числе тех, которые нельзя тушить водой. В соответствии с нормами противопожарной безопасности, наличие песка обязательно в каждом лабораторном помещении. Песок хранят в ящиках, снабженных совком.

Для тушения твердых и жидких веществ, не вступающих во взаимодействие с водой, и в первую очередь – для тушения нефтепродуктов в лаборатории можно использовать воздушно-пенные огнетушители ОВП-10.

Порошковые огнетушители (ОП-5, ОП-10) являются одними из самых эффективных средств пожаротушения. Они не повреждают оборудование, нетоксичны и неэлектропроводные и предназначены для тушения твердых веществ, жидких веществ (в том числе ГЖ и ЛВЖ), газообразных веществ, электропроводов и электрооборудования, находящихся под напряжением до 1000 вольт.

#### **4.4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**

При выполнении научно-исследовательской работы необходимо следовать требованиям ТК РФ. Согласно источнику [32], необходимо проводить обязательные предварительные (при поступлении на работу) и периодические медицинские осмотры (обследования) работников, занятых на тяжелых работах и на работах с вредными и (или) опасными условиями труда.

Необходимо руководствоваться источником [33], если работа предполагает использование некоторых мер предосторожности и средства индивидуальной защиты.

Во избежание несчастных случаев следует проводить обучение и проверять знания работников [34].

## Заключение

В ходе выполнения данного исследования были рассмотрены теоретические аспекты СФТ: детально разобран механизм протекания синтеза, рассмотрены различные режимные варианты его реализации и сопутствующие им выходы продуктов. Подробно изучен вопрос выбора катализатора для осуществления синтеза, влияние его промоторов и носителей на ход протекания процесса, а также рассмотрены условия протекания процесса, в которых данные катализаторы проявляют наибольшую активность. В работе представлены основные типы реакторов, используемые для реализации СФТ, показана их интеграция в современные производства.

В результате экспериментального исследования УДП-Fe, полученных методом ЭВП, как катализаторов СФТ, были получены зависимости влияния различных условий протекания синтеза на конечный жидкий продукт. Из опытных данных можно сделать следующие выводы:

- катализаторы на основе УДП-Fe проявляют каталитическую активность в процессе СФТ (в температурных условиях 250 – 270 °С, временах контакта 2 и 6,5 секунд и давлении 1,1 МПа за 6 часов синтеза удавалось получать в среднем 1,6 мл жидкости);
- увеличение температуры протекания синтеза с 250 °С до 270 °С приводит к повышению степени конверсии сырья при временах контакта 2 секунды с 14,27 % до 33,84 % и 6,5 секунд с 38,83 % до 43,18 %, однако её значение остается недостаточно высоким;
- увеличение времени контакта синтез-газа в реакционном объёме с 2 до 6,5 секунд дает положительные результаты при прочих равных условиях: степень конверсии и содержание оксигенатов возрастают соответственно с 33,84 % до 43,18 % при температуре 270 °С и с 12,88 % об. до 38,929 % об. при температуре 250 °С, выход побочных продуктов уменьшается при температуре 270 °С с 3,9 % об до 2,286 % об. для CO<sub>2</sub> и с 11,5 % об. до 10,177 % об. для CH<sub>4</sub>;

– конечный жидкий продукт не применим напрямую в качестве моторного топлива, т.к. расчётное октановое число по хроматографическому методу составило порядка 60 пунктов.

В результате исследования установлена пригодность УДП-Fe в качестве катализатора для получения жидких УВ по методу СФТ. Для повышения степени конверсии СО предлагается организация рецикла газового продукта. Для реализации продукта необходимо его разделение на фракции.

### Список публикаций студента

1. Жданов А.А. Изучение каталитической активности ультрадисперсных порошков железа при синтезе жидких углеводородов // Проблемы геологии и освоения недр: труды XX Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 120-летию со дня основания Томского политехнического университета. – 2016. – Т. 2, – С. 490-491.

2. Жданов А.А. Изучение каталитической активности ультрадисперсных порошков железа в синтезе Фишера-Тропша // Актуальные вопросы химической технологии и защиты окружающей среды: сборник материалов VI Всероссийской конференции с международным участием. – 2016. – С. 113-114.

## Список использованных источников

1. Каримова А.Р. Основные особенности и перспективы развития технологий синтеза Фишера–Тропша / А.Р. Каримова // Вестник молодого ученого УГНТУ. – 2015. – №3. – С. 15 – 21.
2. Popok E.V., Levashova A.I., Chekantsev N.V., Kirgina M.V., Rafegerst K.V. Ultradispersed Hydrocarbon Synthesis Catalyst from CO and H<sub>2</sub> Based on Electroexplosion of Iron Powder // Procedia Chemistry. – 2014. – Vol. 10. – P. 20 – 24.
3. Крылова А.Ю. Катализаторы синтеза Фишера-Тропша – ядро стратегии получения синтетических жидких углеводородов / А.Ю. Крылова // Кинетика и катализ. – 2014. – №6. – С. 790 – 795.
4. Химические вещества из угля: пер. с нем. / под ред. Ю. Фальбе. — Москва: Химия, – 1980. – 614 с.
5. Миргоязов И.И. Современные методы получения синтез-газа и процесс Фишера Тропша / И.И. Миргоязов, А.И. Абдуллин // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – №9. – С. 258 – 261.
6. Лapidус А.Л., Крылова А.Ю. Росс. хим. ж. (Ж. Росс. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева). – 2000. – Т. 44. – №1. – С. 43 – 56.
7. Сторч Г. Синтез углеводородов из окиси углерода и водорода: пер. с англ. / Г. Сторч, Н. Голамбик, Р. Андерсон. // Москва: Изд-во иностранной литературы. – 1954. – 516 с.
8. Vahid S., Mirzaei A.A. An investigation of the kinetics and mechanism of Fischer-Tropsch synthesis on Fe-Co-Ni supported catalyst // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. – 2014. – № 20. – P. 2166 – 2173.
9. Синева Л.В., Мордкович В.З., Ермолаев В.С., Ермолаев И.С., Митберг Э.Б., Соломоник И.Г. Разработка высокопроизводительного промышленного катализатора синтеза Фишера-Тропша // Катализ в промышленности. – 2012. – №6. – С. 13 – 22.
10. Логинов В.А., Мирошниченко Д.А., Жагфаров Ф.Г., Лapidус А.Л. Особенности использования кобальтовых катализаторов синтеза

Фишера-Тропша в начальный период работы // Технологии нефти и газа. – 2012. – №5. – С. 19 – 23.

11. Нурмаканов Е.Е., Елигбаева Г.Ж., Иткулова Ш.С. Производство жидких синтетических углеводородов из синтез-газа на Со-содержащем полиметаллическом катализаторе // Известия Национальной академии наук Республики Казахстан. – 2016. – Т. 2. – №416. – С. 36 – 41.

12. Кривенцева Е.В., Грязнов К.О., Хатькова Е.Ю., Синева Л.В., Мордкович В.З. Влияние типа цеолита как компонента композитного кобальтового катализатора на состав продуктов синтеза Фишера – Тропша // Тонкие химические технологии. – 2013. – Т. 8. – №6. – С. 9 – 16.

13. Zyryanova M.M., Snytnikov P.V., Amosov Yu.I., Belyaev V.D., Kireenkov V.V., Kuzin N.A., Vernikovskaya M.V., Kirillov V.A., Sobyenin V.A. Upgrading of associated petroleum gas into methane-rich gas for power plant feeding applications Technological and economic benefits // Fuel. – 2013. – № 108. – P. 282 – 291.

14. Zhou W.-G., Liu J.-Y., Wu X., Chen J.-F., Zhang Y. An effective Co/MnOx catalyst for forming light olefins via Fischer-Tropsch synthesis // Catalysis Communications. – 2015. – № 60. – P. 76 – 81.

15. Yeong Jun Lee, Min Hye Jung, Jong-Bae Lee, Kwang-Eun Jeong, HyunSeog Roh, Young-Woong Suh, Jong Wook Bae. Single-step synthesis of dimethyl ether from syngas on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-modified CuO-ZnO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ferrierite catalysts: Effects of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> content // Catalysis Today. – 2014. – Vol. 228. – P. 175 – 182.

16. Алхимов С.А., Григорьев Д.А., Михайлов М.Н. Гибридные металл-цеолитные катализаторы синтеза Фишера-Тропша для получения фракции углеводородов C<sub>5</sub> – C<sub>18</sub> // Катализ в промышленности. – 2013. – №4. – С. 31 – 41.

17. Qiangu Yan, Fei Yu, Jian Liu, Jason Street, Jinsen Gao, Zhiyong Cai, Jilei Zhang. Catalytic conversion wood syngas to synthetic aviation turbine fuels

over a multifunctional catalyst // *Bioresource Technology*. – 2013. – № 127. – P. 281 – 290.

18. Yanpeng Pei, Yunjie Ding, Hejun Zhu, Hong Du. One-step production of C1–C18 alcohols via Fischer-Tropsch reaction over activated carbon-supported cobalt catalysts: Promotional effect of modification by SiO<sub>2</sub> // *Chinese Journal of Catalysis*. – 2015. – Vol. 36. – P. 355 – 361.

19. Кунгурова О.А., Дорофеева Н.В., Сидорова О.И., Водянкина О.В. Влияние добавок Zr и P на формирование активной поверхности Co/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> катализаторов процесса Фишера-Тропша // *Вестник Томского государственного университета*. – 2012. – №364. – С. 234 – 237.

20. Макарян И.А., Савченко В.И. Конструкции реакторов синтеза Фишера-Тропша в крупнотоннажных производствах синтетических жидких топлив // *Мир нефтепродуктов*. – 2014, – № 3. – С. 28 – 37.

21. Охатрина В.С. Международный опыт производства синтетических жидких топлив по технологии GTL и перспективы его развития // *Проблемы современной экономики*. – 2012. – №1. – С. 114 – 116.

22. Глебова О.Л., Зубарева В.Д. Экономическая эффективность промышленного производства синтетических углеводородов // *Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом*. – 2013. – №5. – С. 45 – 50.

23. Левашова А.И., Дубинина В.И., Юрьев Е.М. Электровзрывные порошки на основе железа как катализаторы синтеза углеводородов из CO и H<sub>2</sub> // *Фундаментальные исследования*. – 2013. – №8-3. – С. 645 – 649.

24. Яворовский Н.А. Получение ультрадисперсных порошков методом электрического взрыва // *Журнал Известия Вузов «Физика»*. – 1994. – № 4, Издание Томского госуниверситета. – С. 114 – 136.

25. ГОСТ Р 51105-97. Топлива для двигателей внутреннего сгорания. Неэтилированный бензин.

26. Федеральный закон Российской Федерации от 28 декабря 2013 г. N 426-ФЗ «О специальной оценке условий труда» [Электронный ресурс]. –

Режим доступа [www.URL: http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_156555](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_156555).

27. Гигиенические требования к персональным электронновычислительным машинам и организации работы: санитарноэпидемиологические правила и нормативы СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03: утверждены Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 13 июня 2003 г. № 118 г. Москва [Электронный ресурс]. – Режим доступа [www.URL: http://www.rosteplo.ru/Npb\\_files/npb\\_shablon.php?id=707](http://www.rosteplo.ru/Npb_files/npb_shablon.php?id=707).

28. Кушелев В.П., Орлов Г.Г., Сорокин Ю.Г. Охрана труда в нефтеперерабатывающей промышленности. // М: Недра, – 1983. – 472с.

29. Кукин П.П., Лапин В.Л., Пономарев Н.Л., Сердюк Н.И. Безопасность жизнедеятельности. Безопасность технологических процессов и производств (Охрана труда): Учеб. Пособие для вузов. // – 5-е изд., стер. М.: Высш. Шк., – 2009. – 335 с.

30. ГОСТ 12.1.038–82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов.

31. Федеральный закон от 22 июля 2008 г. N123-ФЗ Технический регламент о требованиях пожарной безопасности [Электронный ресурс]. – Режим доступа [www.URL: http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_148963/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_148963/).

32. Приказ Министерства здравоохранения и социального развития Российской Федерации от 12 апреля 2011 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа [www.URL: http://www.rg.ru/2011/10/28/medosmotr-dok.html](http://www.rg.ru/2011/10/28/medosmotr-dok.html).

33. Технический регламент от 24 декабря 2009 г. О безопасности средств индивидуальной защиты [Электронный ресурс]. Режим доступа [www.URL: http://www.rg.ru/2010/03/30/tehreg-site-dok.html](http://www.rg.ru/2010/03/30/tehreg-site-dok.html).

34. ГОСТ 12.0.004-90. Организация обучения безопасности труда. 01.07.1991.– М.: Стандартиформ, – 2010. – 16 с.