

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

Школа Инженерная школа природных ресурсов  
 Направление подготовки 18.04.01 Химическая технология  
 Отделение школы (НОЦ) Отделение химической инженерии

### МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
<b>Тестирование катализаторов риформинга с применением математической модели процесса</b>

УДК 665.644.097.3:518.876

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2ДМ92	Федоров Иван Евгеньевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Чернякова Е.С	К.Т.Н.		

### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Рыжакина Т.Г	К.Э.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Пашков Е.Н	К.Т.Н.		

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Ивашкина Е.Н	Д.Т.Н.		

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

Школа Инженерная школа природных ресурсов  
 Направление подготовки 18.04.01 Химическая технология  
 Отделение школы (НОЦ) Отделение химической инженерии

УТВЕРЖДАЮ:  
 Руководитель ООП  
 \_\_\_\_\_  
 (Подпись)    (Дата)    (ФИО)

**ЗАДАНИЕ  
на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Магистерской диссертации
--------------------------

Студенту:

Группа	ФИО
2ДМ92	Федорову Ивану Евгеньевичу

Тема работы:

<b>Тестирование катализаторов риформинга с применением математической модели процесса</b>	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	

Срок сдачи студентом выполненной работы:	10.06.2021
--	------------

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<p><b>Исходные данные к работе</b></p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Объектом исследования являются промышленные платино-рениевые катализаторы риформинга различных марок.</p>
---	--

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

*(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).*

1. Теоретические основы процесса каталитического риформинга
  - 1.1. Химические превращения, происходящие в процессе каталитического риформинга;
  - 1.2. Термодинамика процесса;
  - 1.3. Катализаторы процесса;
    - 1.3.1 Полиметаллические катализаторы;
  - 1.4 Регенерация катализатора;
  - 1.5 Влияние основных технологических параметров на процесс каталитического риформинга;
  - 1.6 Конфигурация реакторов процесса риформинга;
    - 1.6.1 Сферический реактор;
    - 1.6.2 Мембранный реактор с псевдоожиженным слоем катализатора;
    - 1.6.3 Цилиндрический реактор;
  - 1.7 Классификация технологий каталитического риформинга;
    - 1.7.1 Полурегенеративный (SRCRP) каталитический риформинг;
    - 1.7.2 Циклический (CRCRP) каталитический риформинг;
    - 1.7.3 Непрерывный регенеративный (CCRRP) процесс риформинга;
  - 1.8 Модели процесса каталитического риформинга;
    - 1.8.1 Краткий обзор существующих математических моделей каталитического риформинга;
2. Объект и методы исследования
3. Расчеты и аналитика
  - 3.1 Мониторинг и прогнозирование работы катализаторов риформинга;
    - 3.1.1 Исследование влияния состава переработанного сырья;
    - 3.1.2 Прогнозирование длительности межрегенерационного периода работы катализатора RG-582;
  - 3.2 Исследование влияния пористой структуры катализаторов различных марок на эффективность процесса риформинга бензинов;
    - 3.2.1 Тестирование и подбор катализаторов при оптимизации работы установки ЛЧ-35-11/1000
    - 3.2.2 Формирование рекомендаций для эффективного ведения промышленного процесса в оптимальной области;
4. Выполнение раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»
5. Выполнение раздела «Социальная ответственность».

<b>Перечень графического материала</b> <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	Презентация Раздаточный материал
---	-------------------------------------

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

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Рыжакина Т.Г, к.э.н., доцент
Социальная ответственность	Пашков Е.Н, к.т.н., доцент

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

1. Теоретические основы процесса каталитического риформинга
  - 1.1. Химические превращения, происходящие в процессе каталитического риформинга;
  - 1.2. Термодинамика процесса;
  - 1.3. Катализаторы процесса;
  - 1.4 Регенерация катализатора;
  - 1.5 Влияние основных технологических параметров на процесс каталитического риформинга;
  - 1.6 Конфигурация реакторов процесса риформинга;
    - 1.6.1 Сферический реактор;
    - 1.6.2 Мембранный реактор с псевдоожииженным слоем катализатора;
    - 1.6.3 Цилиндрический реактор;
  - 1.7 Классификация технологий каталитического риформинга;

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	25.09.2020
---	------------

**Задание выдал руководитель**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Чернякова Е.С	к.т.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2ДМ92	Федоров Иван Евгеньевич		

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

Инженерная школа природных ресурсов  
 Направление подготовки (специальность) 18.04.01 Химическая технология  
 Уровень образования Магистр  
 Отделение химической инженерии  
 Период выполнения (осенний / весенний семестр 2020 /2021 учебного года)

Форма представления работы:

Магистерская диссертация

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН  
выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы:

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
20.12.2020	Обзор литературы	20
13.01.2021	Объект и методы исследования	20
10.02.2021	Расчеты и аналитика	20
15.03.2021	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	20
22.03.2021	Социальная ответственность	20

**СОСТАВИЛ:**

**Руководитель ВКР**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Чернякова Е.С	К.Т.Н.		

**СОГЛАСОВАНО:**

**Руководитель ООП**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Ивашкина Е.Н	Д.Т.Н.		

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

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
2ДМ92	Федоров Иван Евгеньевич

<b>Школа</b>	<b>ИШПР</b>	<b>Отделение</b>	<b>Отделение химической инженерии</b>
<b>Уровень образования</b>	Магистратура	<b>Направление/специальность</b>	Химическая технология

<b>Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:</b>	
Работа на направлении на исследование различных типов катализаторов процесса риформинга бензинов методом математического моделирования и прогнозирование качества процесса при их применении	Работа с научной литературой, представленной в российских и иностранных научных публикациях, аналитических материалах
<b>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</b>	
1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив разработки проекта с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Проведение предпроектного анализа. Определение целевого рынка и проведение его сегментирования. Выполнение SWOT-анализа проекта
2. Планирование и формирование бюджета разработки	Определение целей и ожиданий, требований проекта. Определение бюджета научного исследования
3. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности разработки	Проведение оценки экономической эффективности, ресурсоэффективности и сравнительной эффективности различных вариантов исполнения
<b>Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):</b>	
<p align="center">1. Оценка конкурентоспособности технических решений 2. Матрица SWOT 3. График проведения и бюджет проекта 4. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности разработки</p>	

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

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент	Рыжакина Татьяна Гавриловна	Кандидат экономических наук		31.01.2021

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
2ДМ92	Федоров Иван Евгеньевич		31.01.2021

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
2ДМ92	Федоров Иван Евгеньевич

Школа	Отделение (НОЦ)	Уровень образования	Направление/специальность
		Магистратура	18.04.01 «Химическая технология»

Тема ВКР:

Тестирование катализаторов риформинга с применением математической модели процесса	
<b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>	
<p>1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения</p>	<p>Объектом исследования являются промышленные платино-рениевые катализаторы риформинга различных марок.</p> <p>Область применения: нефтеперерабатывающие предприятия, на которых реализован процесс каталитического риформинга.</p>
<b>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</b>	
<p><b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>- организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul>	<p>Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N197-ФЗ (ред.от 27.12.2018)</p> <p>ГОСТ 12.2.032-78 Рабочее место при выполнении работ сидя</p> <p>ГОСТ 12.2.033-78 Рабочее место при выполнении работ стоя</p> <p>ГОСТ 12.2.049-80 ССБТ. Оборудование производственное. Общие эргономические требования.</p> <p>ГОСТ 12.1.005-88 Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.</p> <p>Федеральный закон от 28.12.2013 N 426 О специальной оценке условий труда с изменениями 2019.</p> <p>ГОСТ 12.1.019 – 2017 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Оборудование</p>

	производственное. Общие требования безопасности.
<b>2. Производственная безопасность:</b> 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	Акустические колебания в производственной среде (повышенный уровень шума); Микроклиматические параметры воздушной среды (температура, относительная влажность воздуха, запыленность воздуха); Световая среда (отсутствие или недостаток естественного/искусственного освещения); Опасные или вредные производственные факторы связанные с электрическим током, вызываемым разницей электрических потенциалов, под действие которого попадает работающий; Токсические вещества
<b>3. Экологическая безопасность:</b>	Атмосфера: выбросы углеводородного газа, предельных и непредельных углеводородов, серосодержащих, азотосодержащих и кислородосодержащие соединения. Гидросфера: сбросы воды от санитарно-бытовых и ремонтных работ. Литосфера: загрязнение почвы сырьем и продуктами каталитического риформинга.
<b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b>	Возможные ЧС: взрывы, пожары, разлив нефтепродуктов. Наиболее типичная ЧС: возникновение пожаров и взрывов.
<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Пашков Е.Н	к.т.н		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2ДМ92	Федоров Иван Евгеньевич		



**Запланированные результаты обучения**  
**по образовательной программе «Химическая технология топлива и газа»**  
**(направление подготовки 18.04.01 «Химическая технология»)**

<b>Код компетенции СУОС</b>	<b>Наименование компетенции СУОС (самостоятельно устанавливаемого образовательного стандарта)</b>
<b>Общекультурные (универсальные) компетенции</b>	
УК(У)-1	Способность осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действия
УК(У)-2	Способность управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла
УК(У)-3	Способность организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной цели
УК(У)-4	Способность применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном(ых) языке(ах), для академического и профессионального взаимодействия
УК(У)-5	Способность анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия
УК(У)-6	Способность определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки
<b>Общепрофессиональные компетенции</b>	
ОПК(У)-1	Готовность к коммуникации в устной и письменной формах на русском и иностранном языках для решения задач профессиональной деятельности
ОПК(У)-2	Готовность руководить коллективом в сфере своей профессиональной деятельности, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия
ОПК(У)-3	Способность к профессиональной эксплуатации современного оборудования и приборов в соответствии с направлением и профилем подготовки
ОПК(У)-4	Готовность к использованию методов математического моделирования материалов и технологических процессов, к теоретическому анализу и экспериментальной проверке теоретических гипотез
ОПК(У)-5	Готовность к защите объектов интеллектуальной собственности и коммерциализации прав на объекты интеллектуальной собственности
<b>Профессиональные компетенции</b>	
ПК(У)-1	Способность организовывать самостоятельную и коллективную научно-исследовательскую работу, разрабатывать планы и программы проведения научных исследований и технических разработок, разрабатывать задания для исполнителей
ПК(У)-2	Готовность к поиску, обработке, анализу и систематизации научно-технической информации по теме исследования, выбору методик и средств решения задачи
ПК(У)-3	Способность использовать современные приборы и методики, организовывать проведение экспериментов и испытаний, проводить их обработку и анализировать их результаты
<b>Дополнительные профессиональные компетенции (профессиональные компетенции, установленные университетом)</b>	
ДПК(У)-1	Готовность к решению профессиональных производственных задач – контролю технологического процесса, разработке параметров проведения технологического процесса, разработке технологических расходных коэффициентов сырья и материалов, энергоресурсов, к выбору основного и вспомогательного оборудования
ДПК(У)-2	Способность использовать математические модели и пакеты прикладных программ для описания и прогнозирования различных явлений
ДПК(У)-3	Способность проводить технологические и технические расчеты по проектам, технико-экономический анализ проекта
ДПК(У)-4	Способность разрабатывать учебно-методической документации для реализации образовательных программ

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 151 с., 25 рис., 40 табл., 70 источников, 5 приложений.

Ключевые слова: КАТАЛИТИЧЕСКИЙ РИФОРМИНГ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, КАТАЛИЗАТОРЫ, РЕГЕНЕРАЦИЯ, РЕАКТОРЫ

Объектами исследования являются промышленные платино-рениевые катализаторы риформинга различных марок.

Целью работы является исследование различных промышленных катализаторов риформинга для оптимизации процесса и повышения его эффективности с использованием метода математического моделирования.

В процессе исследования проводились:

1) Мониторинг установки риформинга ЛЧ-35-11/1000 с целью определения технологических параметров работы катализатора, срока его службы, а также прогнозирования дальнейшей работы.

2) Прогнозирование замены катализатора с учетом его пористой структуры и различного типа сырья (лёгкого или более тяжелого) с целью выбора оптимального, выход и октановое число продуктов, полученных с использованием которого будет максимальным при минимальных затратах на регенерацию.

3) Формирование рекомендаций для эффективного ведения промышленного процесса в оптимальной области.

Научная новизна работы заключается в определении зависимости между пористой структурой катализатора и его эффективностью для переработки различного типа сырья (лёгкого или более тяжелого)

Степень внедрения: рекомендации по оптимальному использованию катализаторов в процессе риформинга не переданы на промышленное производство.

Область применения: объекты нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности.

Экономическая эффективность/значимость работы заключается в сохранении ресурса катализатора и повышении ресурсоэффективности процесса.

В будущем планируется провести углубленное изучение дезактивации катализатора с целью увеличения его срока службы.

### **Определения**

В данной работе применены следующие термины с соответствующими определениями:

**каталитический риформинг:** это процесс переработки нефтепродуктов, в основном бензиновых и лигроиновых фракций нефти, с целью получения высокооктановых бензинов из низкооктановых.

**моделирование химико-технологической системы:** это количественный анализ процессов нефтехимии и нефтепереработки с помощью создания математических моделей.

**водородсодержащий газ (ВСГ):** газ с высоким содержанием водорода (от 50%), образуется в процессе каталитического риформинга.

Оглавление	
РЕФЕРАТ .....	10
Введение.....	13
1 Теоретические основы процесса каталитического риформинга .....	14
1.1  Химические превращения, происходящие в процессе каталитического риформинга.....	18
1.2  Термодинамика процесса .....	23
1.3  Катализаторы процесса .....	25
1.3.1 Полиметаллические катализаторы .....	27
1.4  Регенерация катализатора .....	29
1.5  Влияние основных технологических параметров на процесс каталитического риформинга .....	30
1.6  Конфигурация реакторов процесса риформинга.....	33
1.6.1 Сферический реактор.....	33
1.6.2 Мембранный реактор с псевдоожиженным слоем катализатора.....	38
1.6.3 Цилиндрический реактор .....	40
1.7  Классификация технологий каталитического риформинга.....	43
1.7.1 Полурегенеративный (SRCRP) каталитический риформинг .....	43
1.7.2 Циклический (CRCRP) каталитический риформинг .....	45
1.7.3 Непрерывный регенеративный (CCRRP) процесс риформинга .....	46
1.8  Модели процесса каталитического риформинга .....	49
1.8.1 Краткий обзор существующих математических моделей каталитического риформинга .....	50
2 Объект и методы исследования .....	54
4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	55
5. Социальная ответственность .....	87
Заключение .....	105
Список использованных источников .....	108

## **Введение**

Процесс каталитического риформинга бензиновых фракций принято считать одним из наиболее значимых процессов для современной нефтеперерабатывающей и нефтехимической индустрии, назначением которой является производство бензина и водорода на протяжении уже более 50 лет. С каждым годом процесс риформинга становится всё важнее и актуальнее. Аналогично с этим увеличивается спрос потребителей на высокооктановые компоненты моторных топлив и источники сырья для нефтехимии. Повышение эффективности производства моторных топлив высокого качества с высоким октановым числом можно считать перспективным направлением в нефтехимической отрасли и переработке. Одним из вариантов внедрения новых технологий в переработку является создание и использование математических моделей для различных процессов. Математическое моделирование дает возможность подобрать оптимальные технологические решения и параметры, а также выбрать наиболее подходящий данному процессу катализатор исходя из эффективности и экономической составляющей. Таким образом, актуальным представляется исследование процесса каталитического риформинга нефтяного сырья и его катализаторов.

**Целью работы** является исследование различных промышленных катализаторов риформинга для оптимизации процесса и повышения его эффективности с использованием метода математического моделирования.

**Объектом исследования** являются промышленные платино-рениевые катализаторы риформинга различных марок.

**Предметом исследования** являются расчеты текущей и оптимальной активности катализатора процесса каталитического риформинга, а также исследование различных марок и прогноз их активности.

**Научная новизна** работы заключается в определении зависимости между пористой структурой катализатора и его эффективностью для переработки различного типа сырья (лёгкого или более тяжелого)

**Практическая значимость результатов работы** состоит в том, что учет структурных характеристик катализаторов при переработке различного типа сырья (более тяжелого или легкого) позволит оптимизировать промышленный процесс и повысить его эффективность.

## **1 Теоретические основы процесса каталитического риформинга**

Основное назначение каталитического риформинга состоит в увеличении стойкости детонации бензинов, вместе с этим происходит и образование отдельных ароматических углеводородов, таких как бензол, ксилол и толуол, которые в свою очередь являются сырьём для нефтехимической промышленности. Риформингом принято считать процесс переработки бензиновых и лигроиновых фракций с низким октановым числом с целью получения таких продуктов как: высокооктановые компоненты бензина, ВСГ (водородсодержащий газ обычно используется в процессах гидрогенизации переработки нефтяного сырья на нефтеперерабатывающих предприятиях).

Важные цели процесса риформинга:

- увеличение октанового числа бензина с целью получения бензина более высокого качества и повышенным октановым числом;
- получение ароматических углеводородов;
- получение водородсодержащего газа с целью дальнейшего его использования в других процессах на нефтеперерабатывающих заводах.

В таблице 1 представлены октановые числа различных углеводородов и некоторых видов топлива.

Таблица 1 – Значения октанового числа углеводородов и различных бензиновых фракций [1]

Наименование	ОЧМ	ОЧИ	Наименование	ОЧМ	ОЧИ
н-Гексан	25,0	24,8	Изогептан (2,4-Диметилпентан)	82,0	83,1
Изогексан (2-Метилпентан)	73,0	73,4	н-Октан	22,0	10,0
н-Гептан	0	0	Изооктан (2,2,4-Триметилпентан)	100,0	100,0
н-Нонан	-20,0	-20,0	н-Декан	-30,0	-30,0
Циклопентан	84,0	100,0	Метилциклопентан	81,0	91,3
Циклогексан	77,2	83,0	Бензол	108,0	113,0
Толуол	102,5	115,7	Ксилолы	111	115
Ароматические углеводороды C <sub>9</sub>	101,0	110,0	Ароматические углеводороды C <sub>10</sub>	98,0	109,0
Ароматические углеводороды C <sub>11</sub>	94,0	105,0	Прямогонные бензины	40-55	42-57
Бензины каталитического риформинга	77-94	84-100	Бензины каткрекинга	74-88	79-93
Бензины термкрекинга	64-69	60-74			

Прямогонные бензиновые фракции (н.к – 200 °С) имеют октановые числа в диапазоне от 50 до 55. Низкий показатель объясняется достаточно высоким содержанием в бензинах нафтеновых и парафиновых углеводородов. Риформат, полученный на промышленных установках с применением современных эффективных катализаторов, иногда достигает значений 98-100. В таблице 2 представлены составы нефти до и после процесса риформинга.

Таблица 2 – Изменения в составе нефти в процессе каталитического риформинга [1]

Компонентный состав	Сырьё, % об.	Продукт, % об.
Парафины	50	35
Нафтены	40	10
Ароматические углеводороды	10	55
ОЧИ	50-55	95-100

В процессе каталитического риформинга сырьём могут выступать различные виды топлива, такие как: прямогонные бензины, бензины вторичных процессов переработки, например, процесса термического крекинга или коксования.

Чаще всего сырьём принято считать бензиновые фракции с началом кипения в пределах 60-65 °С, наиболее легкие фракции использовать нецелесообразно, потому что в них не присутствуют группы углеводородов C<sub>6</sub> и выше, помимо этого они могут вызвать излишнее газообразование [1-2]. Обычно в процессе риформинга используются бензиновые фракции с пределами выкипания 85-180 °С [3]. Повышение конца кипения нежелательно, это может способствовать большему образованию кокса. Однако, повышение начала кипения приводит к увеличению выхода бензина из-за большего содержания тяжелых нафтеновых и парафиновых углеводородов, так как они легче подвержены ароматизации. Фракции с температурой начала кипения 105-140 °С могут использоваться в случае, когда более лёгкие фракции (с температурой кипения 62-105 °С, 105-140 °С) направляются на получение индивидуальных ароматических углеводородов [1].

Углеводородный состав исходного бензина очень важен. Бензиновые фракции делят на две категории богатые и бедные. Это зависит от содержания в них ароматических и нафтеновых углеводородов. Процесс обладает большей селективностью, если в исходном сырьё преобладали ароматические и



нафтеновые углеводороды. Выход катализата в таком случае увеличивается, а выход продукта побочных реакций процесса гидрокрекинга углеводородного уменьшается [4]. На рисунке 1 показано как влияет состав сырья на относительную глубину превращения его компонентов при приблизительно одинаковых условиях процесса каталитического риформинга.



Рисунок 1 – Типичная глубина превращения компонентов бедных и богатых бензиновых фракций [4]:

1 – парафины; 2 – нафтены; 3 – ароматические углеводороды

Благодаря такому процессу как каталитический риформинг появляется возможность получать ценное сырье для нефтехимической промышленности, а именно индивидуальные ароматические углеводороды, такие как этилбензол, толуол, бензол, изомеры ксилола. И в данной ситуации сырьем риформинга будут выступать наиболее узкие фракции: для получения бензола – фракции бензинов с температурой кипения 62 – 85 °С, толуола – фракции 85 - 105 °С, ксилолов – фракции 105 – 140 °С [5]. Чтобы предотвратить дезактивацию катализатора в исходном сырье существует ограничение по содержанию серы (не более 0,00005 – 0,0010 % в зависимости от типа катализатора), по азоту (не более 0,0001 %).

## 1.1 Химические превращения, происходящие в процессе каталитического риформинга

Химические реакции каталитического риформинга в основном направлены на получение высокооктановых компонентов товарного бензина из прямогонного низкооктанового. Основными реакциями риформинга принято считать реакции дегидрирования, крекинга, изомеризации и дегидроциклизации. Катализаторы риформинга обладают активными центрами двух видов – кислотными и металлическими. На поверхности этих катализаторов и протекают данные химические реакции. Качество сырья, различные технологические параметры, типы катализаторов и т.д. – всё это влияет на скорость химической реакции. Также реакции разделяют на параллельные и последовательные. Основная схема химических реакций представлена на рисунке 2.



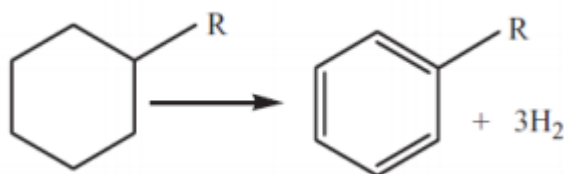
Рисунок 2 – Обобщённая схема реакций каталитического риформинга [4]:

А – кислотные центры, М – металлические центры.

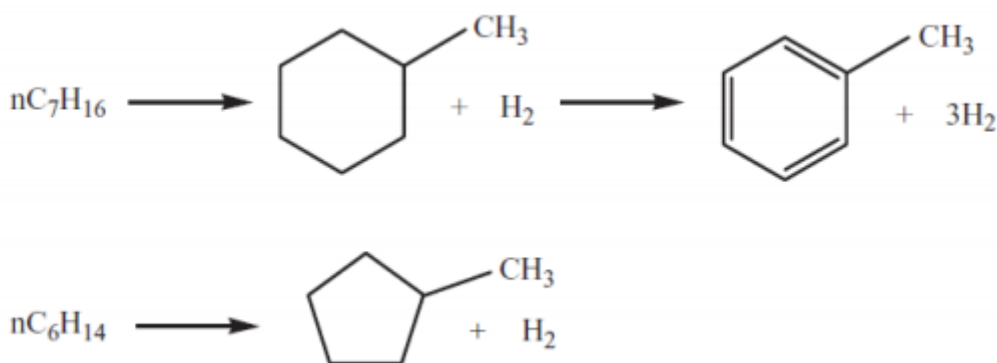
1. *Дегидрирование шестичленных нафтенов до ароматических соединений.*

Одной из наиболее важных реакций риформинга принято считать реакцию дегидрирования нафтенов в ароматические соединения. В свою очередь, циклопентаны подвержены изомеризации, это сопровождается образованием циклогексанов, которые после дегидрируются до ароматических соединений [5].

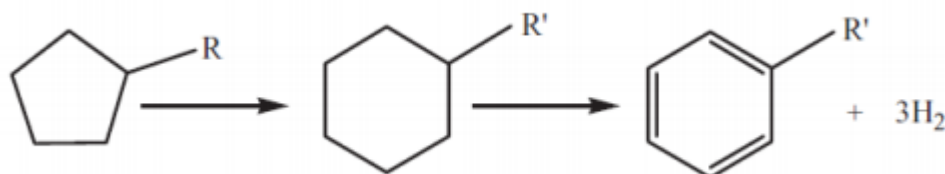
Реакции дегидрирования циклогексана и его гомологов, приводящие к образованию ароматических углеводородов, протекают на металлическом центре катализатора риформинга



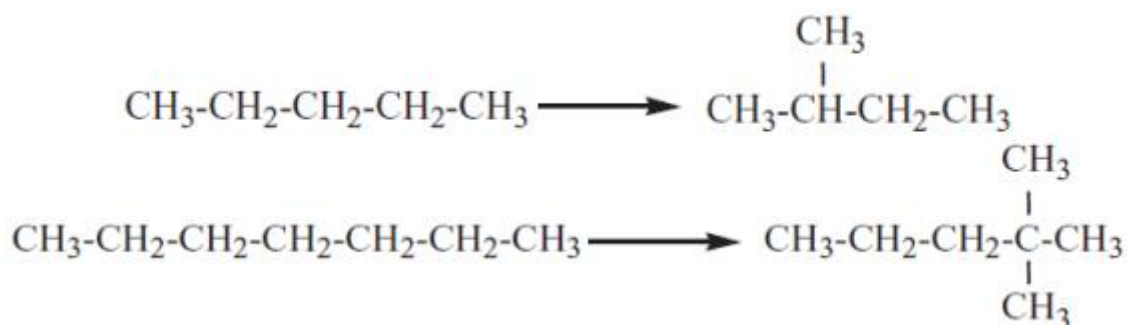
2. *Дегидроциклизация парафинов.* Парафины претерпевают дегидроциклизацию с образованием циклопарафинов. Химическая реакция дегидроциклизации состоит из этапа дегидрирования и ароматизации. Реакции дегидроциклизации парафинов протекают как на металлическом, так и на кислотном центре.



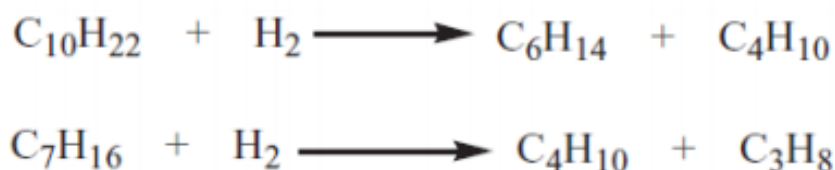
3. *Дегидроизомеризация алкилциклопентанов.* На металлическом центре катализатора происходит только дегидрирование метилциклопентана до соответствующих циклоолефинов. Превращение же метилциклопентена в бензол достигается в результате совместного действия металлического и кислотного центров.



4. *Изомеризация парафинов.* Изомеризация парафинов сопровождается образованием молекул разветвленного строения, другими словами изопарафинов. Химические реакции изомеризации можно охарактеризовать быстрой скоростью протекания и невысоким тепловым эффектом [6]. Реакции изомеризации протекают на металлическом центре катализатора



5. *Гидрокрекинг парафинов.* Происходит гидрокрекинг парафинов и образуются более мелкие молекулы. Только в этой реакции каталитического риформинга происходит потребление водорода. Реакция экзотермическая.



Гидрокрекинг парафинов на катализаторах риформинга протекает по бифункциональному механизму. Реакции протекают как на металлическом, так и на кислотном центре.

Протекание таких реакций как: дегидрирование, дегидроциклизация, дегидроизомеризация характеризуется отрицательным тепловым эффектом, также они эндотермичны. Реакции изомеризации имеют низкий тепловой эффект, приближённый к нулю (таблица 3). В реакциях гидрокрекинга происходит выделение тепла, это в небольшой степени компенсирует затраты тепла на реакции ароматизации.

Если рассматривать совокупность отрицательных тепловых эффектов реакций каталитического риформинга, то получим показатель равный 250-520

кДж на 1 кг сырья. Именно поэтому нужно подогревать не только исходное сырьё, но и продукты его частичного превращения.

В таблице 3 приведены скорости основных реакций каталитического риформинга для углеводородов  $C_6$ - $C_7$  относительно скорости реакции дегидроциклизации н-гексана [1].

Таблица 3 – Относительные скорости и тепловые эффекты реакций риформинга [1]

Наименование реакции	Углеводород		Н, кДж/моль
	$C_6$	$C_7$	
Дегидрирование углеводородов нафтеновой группы	100	120	+221
Дегидроциклизация парафинов нормального строения	1	4	+260
Дегидроциклизация нафтенов	5	3	-43,9
Изомеризация парафинов нормального строения	10	13	-4,6
Изомеризация нафтенов	10	13	-15,6
Гидрокрекинг парафинов	3	4	-56,4

Скорости химических реакций парафиновых углеводородов  $C_6$  и  $C_7$  различны.

Скорость гидрокрекинга н-гексана больше скорости его дегидроциклизации в три раза, это объясняет преобразование в ароматические соединения небольшой части гексана. В это же время, если рассматривать отношение скорости дегидроциклизации н-гептана к скорости н-гексана, получим значение равное четырём, это даёт нам представление о том, что гептан проще подвергается реакциям реформации, чем гексан.

Аналогично с этим, различия в скоростях протекания реакций присутствуют и между нафтенами: алкилциклопентанами и алкилциклогексанами. Алкилциклопентаны, как правило, реагируют медленно, при этом реакция способна идти двумя путями [4]. Желательной можно считать реакцию изомеризации до алкилциклогексана с последующим дегидрированием до ароматических соединений. Нежелательной реакцией является дециклизация алкилциклогексанов с образованием парафинов. Это обусловлено ее уменьшением содержания ароматических соединений в конечном продукте и отрицательном ее влиянии на октановое число риформата [4-5]. Если говорить про алкилциклогексаны, то реакции дегидрирования до ароматических углеводородов для них протекают достаточно быстро и практически полностью.

В реакциях ароматизации наименьшей активностью и избирательностью обладают парафины, поэтому сырье, в котором преобладает данная группа углеводородов является наиболее трудно перерабатываемым. Алкилциклопентаны характеризуются большей активностью и избирательностью по сравнению с парафинами, однако могут давать значительный выход неароматических соединений в процессе риформинга. Наиболее оптимальным сырьем для данного процесса являются алкилциклогексаны, быстро преобразующиеся и дающие высокий выход ароматических углеводородов. Реакции гидрокрекинга протекающие в процессе каталитического риформинга считаются побочными. Нежелательной является их высокая интенсивность, так как это способно приводить к снижению селективности процесса и уменьшению срока службы катализатора. Однако, при производстве автомобильных бензинов частичный гидрокрекинг высокомолекулярных парафиновых углеводородов полезен, так как это даёт возможность увеличить октановое число риформата, а также повысить упругость паров и уменьшить температуру выкипания бензина.

## 1.2 Термодинамика процесса

Дегидрирование нафтенов является наиболее быстрой реакцией. Этот факт позволяет достигать термодинамического равновесия. В свою очередь другие реакции могут быть подконтрольны кинетике. Повышение температуры в ходе реакции оказывает положительное влияние на скорость химической реакции, а также на термодинамическую осуществимость дегидрирования нафтенов. Снижение давления также способствует этому. Основной и наиболее важной реакцией процесса каталитического риформинга считается именно реакция дегидрирования нафтенов. Если говорить о других реакциях, то в них подобное влияние этих параметров на термодинамическое равновесие наблюдается гораздо слабее.

В таблице 4 представлен суммарный термодинамический эффект основных реакций каталитического риформинга.

Таблица 4 – Общее термодинамическое сравнение основных реакций каталитического риформинга [7]

Тип химической реакции	Скорость реакции	Теплота реакции	Термодинамическое равновесие
Дегидрирование нафтенных	Очень быстрая	Сильно эндотермическая	Достигается
Изомеризация нафтенных	Быстрая	Слабо экзотермическая	Достигается
Изомеризация парафиновых	Быстрая	Слабо экзотермическая	Достигается
Дегидроциклизация парафиновых	Медленная	Сильно эндотермическая	Не достигается
Дегидрогенизация парафиновых	Очень быстрая	Эндотермическая	Не достигается

Для других химических реакций термодинамический эффект описан ниже [7,8-13]:

- Дегидрирование парафинов и нафтенов идёт быстро, а равновесные концентрации устанавливаются в начальных частях слоя катализатора.
- Олефины довольно легко гидрируются, и в равновесии могут существовать лишь небольшие концентрации.
- Изомеризация парафинов – это достаточно быстрая реакция, помимо этого является термодинамически контролируемой. Благодаря этому, фактические концентрации очень близки к равновесию.
- Реакция дегидроциклизации парафинов протекает заметно медленнее и контролируется с помощью кинетики.
- Параллельно с ростом давления увеличивается и скорость реакции гидрокрекинга. Это объясняет снижение выхода риформата.
- Если говорить о коксовании, то оно происходит очень медленно, однако, быстро увеличивается при низком давлении водорода и высокой температуре.

Оптимальный режим технологического процесса каталитического риформинга сопровождается высокой температурой и невысоким давлением. Зачастую это приводит к быстрой дезактивации катализатора и осаждению на нём кокса. Уменьшение парциального давления водорода приводит к увеличению скорости ароматизации. Скорость процесса гидрокрекинга при этом падает.



### 1.3 Катализаторы процесса

Типичными катализаторами, которые используются в каталитическом риформинге, являются монометаллические, биметаллические или триметаллические, такие как платиновые ( $\text{Pt}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ), платино-иридиевые ( $\text{PtIr}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ) или платино-иридиево-оловянные ( $\text{Pt-Ir-Sn}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ) соответственно. Производительность катализатора с точки зрения его стабильности, селективности и активности может быть улучшена путем модификации его свойств. Наилучшим подходом для достижения высоких выходов и высокого качества риформинга является повышение селективности желаемых реакций за счет баланса между кислотными и металлическими свойствами. За форму катализаторов чаще всего принимают: цилиндрическую и сферическую. Плотность этих катализаторов находится в интервале от 0,5 до 0,8 г/см<sup>3</sup>. Использование сферических катализаторов, а не экструдата, позволяет избежать пылеобразования и разрушения.

Основные эксплуатационные характеристики катализаторов риформинга следующие [4]:

- Активность – обеспечение необходимой глубины превращения исходного сырья при заданных параметрах; показателем активности в данном случае служит октановое число продукта или содержание в нем ароматических соединений;
- Селективность – обеспечение максимальных выходов катализата и водорода;
- Стабильность – способность сохранять изначальную селективность и активность во времени.

В настоящее время существует шесть международных поставщиков катализаторов риформинга, производящих более 80 различных типов

катализаторов, подходящих для различных условий применения и для различных видов сырья [7,15].

В таблице 5 приведены основные типы катализаторов, которые используются на производстве.

Таблица 5 – Основные типы катализаторов риформинга, используемые на производстве [9]

Марка катализатора	Содержание, % (масс.)		Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>	Диаметр (мм) и вид гранул
	Pt	Других металлов		
АП-64	0,60-0,64	-	580-680	2,6-3,0
КР-104А	0,36	Cd 0,25+Re 0,20	640	2,8 экструдат
КР-200	0,26	Re 0,42;Cl	660	1,8 (2,8) экструдат
ШПР-2А	0,38	Sn 0,25	700	1,5-1,8 шарик
ШПР-2Б	0,60	Sn 0,40	700	1,5-1,8 шарик
РБ-22У	0,22	Re 0,44;Cl	720	1,9 экструдат
РБ-44У	0,26	Re 0,40	780	1,6 экструдат
ПР-50	0,36	Re 0,30	670	2,8 экструдат
ПР-71	0,23	Re 0,35; Zr 0,30; Cl	680	2,8 экструдат
REF-23М	0,30	Re 0,30; Ti 0,08-0,10; Zr 4,0-5,0; Cl 1,35	650	1,3 экструдат
REF-24	0,50	Re 0,01-0,02; Ti 0,08-0,10; F 0,32	650	1,9-2,6 экструдат
RG-482	0,30	Re 0,30;Cl	590	-
RG-582	0,30	Re 0,44;Cl	670	-
R-56	0,25	Re 0,40; Cl	840	-
R-98	0,25	Re 0,25	720	-
RU-125	0,25	Re 0,40	660	1,2-1,6 экструдат
RU-130	0,30	Re 0,30	660	1,2-1,6 экструдат

Поставщики катализаторов риформинга продолжают разрабатывать новые рецептуры катализаторов, предназначенные для решения широкого круга задач.

Многие из этих проблем связаны с экологическими нормами, которые нефтеперерабатывающие заводы соблюдали и будут обязаны соблюдать в течение ближайших нескольких лет

### **1.3.1 Полиметаллические катализаторы**

Бифункциональные триметаллические катализаторы относятся к последним поколениям катализаторов риформинга нефти, используемых для повышения октанового числа riformата. В последнее десятилетие эти катализаторы постепенно вытеснили прежние промышленные биметаллические катализаторы из-за их более высокой стабильности, адаптируемости к различным видам сырья и устойчивости к ядам [23-25]. В настоящее время на промышленных установках каталитического риформинга используются современные триметаллические катализаторы запатентованного состава. Известно, что эти катализаторы имеют состав следующего типа Pt-Re-M/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Во многих докладах исследовались характеристики триметаллических систем, таких как Pt-Re-Sn и Pt-Re-Ge/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [16]. Например, небольшие количества Ge в триметаллических катализаторах Pt-Re-Ge/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> несколько улучшают их свойства по сравнению с характеристиками стандартных биметаллических катализаторов Pt-Re/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Эти улучшения связаны с качеством продукта риформинга и работой реактора [16-20]. Триметаллический катализатор Pt-Re-Ge/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с содержанием Ge 0,1 % обладает высокой активностью в реакциях риформирования н-гептана, а также характеризуется хорошей селективностью к образованию изопарафинов [16]. Соответственно, riformат содержит меньше ароматических углеводородов и больше разветвленных изопарафинов. Таким образом, продукт риформинга лучше соответствует существующим ограничениям по рецептурам автомобильных бензинов. Пониженные скорости коксования и крекинга улучшают как выход катализата,

так и стабильность катализатора, который может работать в течение более длительного времени между регенерациями. Содержание Ge от 0,1 до 0,6 % улучшает стабильность и селективность катализатора по отношению к изопарафинам, но приводит к слишком высокому снижению конверсии по сравнению с исходным биметаллическим катализатором Pt-Re [16]. В тоже время, добавление Sn снижает общую кислотность, особенно блокируя некоторые сильные кислотные участки, ответственные за крекинг и коксование, в то время как более мягкие участки, подходящие для изомеризации и циклизации, остаются. Лучший катализатор – это катализатор с 0,1 % Sn. Sn-Pt-Re/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> обладает самой высокой каталитической активностью в отношении дегидрирования циклогексана, он устойчив к отравлению серой и имеет одно из самых высоких значений восстановления активности (гидрированием отложений серы, образующихся при отравлении). Данный катализатор является наиболее удобным катализатором для *n*-C<sub>5</sub> изомеризации и для дегидроциклизации *n*-C<sub>8</sub> с точки зрения активности, селективности и стабильности [18]. Также добавление Sn снижает отношение *бензол*/*i*-C<sub>7</sub>, давая продукты с меньшим воздействием на окружающую среду.

## 1.4 Регенерация катализатора

В ходе течения процесса риформинга осаждение кокса на катализаторе приводит к уменьшению его активности. Коксование происходит за счёт протекания вторичных реакций углеводородов, по большей степени олефинов. Восстановление активности катализатора происходит с помощью регенерации катализатора. Регенерацию проводят выжигом кокса под большими температурами.

Сжигание кокса обычно происходит в диапазоне температур 400–500 °С, и при начальной концентрации кислорода 1–2 % мол. [26] Содержание кислорода и температура часто повышаются во время сжигания, чтобы гарантировать, что весь кокс сгорел к концу сжигания. Обычно катализатор можно регенерировать три или четыре раза.

Стадия выжига кокса должна тщательно контролироваться. Реакция сжигания кокса до диоксида углерода и воды является экзотермической, поэтому концентрация кислорода должна поддерживаться на низком уровне, чтобы предотвратить сильное повышение температуры [27]. Чрезмерная температура может вызвать спекание платины или, в более крайних случаях, может вызвать изменение структуры оксида алюминия. Вода, образующаяся при сжигании, также способствует спеканию платины. Поэтому необходим постепенный выжиг. Поскольку платина может агломерироваться даже при относительно умеренных экзотермических условиях, ее необходимо подвергать повторному диспергированию после сжигания углерода. После выжига кокса катализатор подвергают оксихлорированию. Данный процесс добавляет хлор к катализатору для повышения его кислотности. Последним этапом процесса регенерации является восстановление металлов на катализаторе и сульфидирование при необходимости [28]. К катализаторам предъявляются определённые требования в зависимости от способа ведения процесса. Катализаторы, используемые в полурегенеративных установках, должны иметь длительный эксплуатационный период. В среднем, установка каталитического риформинга требует остановки

для регенерации каждые 6-12 месяцев [6]. В установках непрерывной регенерации катализатор протекает через реакторы и непрерывно регенерируется в отдельном аппарате. Чтобы компенсировать дезактивацию катализатора, температуру реактора постоянно повышают до тех пор, пока не будет достигнута максимально допустимая величина, или не будет слишком снижены селективность и октановое число продуктов [29].

### **1.5 Влияние основных технологических параметров на процесс каталитического риформинга**

Основными переменными процесса, которые влияют на производительность установки процесса риформинга, являются давление и температура в реакторе, объемная скорость, молярное отношение  $H_2$ /углеводороды и тип катализатора. Взаимосвязь между переменными и производительностью процесса обычно применима как к полурегенеративным режимам работы, так и к режимам непрерывной регенерации [1,7-8].

#### *а) Температура*

Температура является наиболее важной переменной в каталитическом риформинге, поскольку качество продукта и выходы сильно зависят от неё.

Основными параметрами для выражения средней температуры реактора риформинга принято считать среднюю температуру слоя и среднюю температуру на входе. Средняя температура слоя представляет собой интегрированную температуру вдоль слоя катализатора. Средняя температура на входе в реактор рассчитывается с температурой на входе по каждому реактору.

Полурегенеративные установки работают при более высокой температуре реактора (от 450 до 525 °C), чем установки непрерывной регенерации (от 525 до 540 °C) [17]. По мере работы установки происходит дезактивация катализатора, поэтому температуру на входе в реакторы повышают на 0,5 – 2 °C в месяц без ущерба качеству продукта.

Скорости всех реакций превращения углеводородов увеличиваются при повышении температуры, в том числе скорости реакций гидрокрекинга, которые являются нежелательными при каталитическом риформинге, так как способствуют закоксовыванию катализатора. Повышение скоростей реакций ароматизации нафтен и парафинов приводит к увеличению концентраций ароматических углеводородов в катализате, вследствие этого увеличивается октановое число продукта [3]. В ходе процесса необходимо уделять особое внимание реакциям ароматизации и гидрокрекинга, так как от их протекания зависит высокого или низкого качества будет получаемый продукт. Также они влияют на количество производимого риформата. Именно поэтому необходимо постоянно контролировать температуру в реакторе.

*б) Давление*

Оптимальное давление в реакторах со стационарным слоем катализатора при проведении процесса риформинга 1.5-3.3 МПа, для реакторов с непрерывной регенерацией катализатора 0,6-1,0 МПа.

Снижение давления в реакторе приводит к увеличению селективности процесса, как следствие увеличивается выход водорода и риформата, уменьшается выход легких углеводородов  $C_1-C_4$  [1,3]. Также снижается требуемая температура реактора для достижения постоянного качества продукта.

Однако, при понижении давления сокращается межрегенерационный период катализатора, увеличивается скорость коксования и дезактивации катализатора.

При повышении давления снижается содержание непредельных углеводородов в жидких продуктах, возрастает газообразование и, следовательно, снижается выход катализата.

*в) Объемная скорость подачи сырья*

Загрузка установки сырьем характеризуется объемной скоростью подачи сырья. Объемную скорость и температуру реактора обычно используют для

определения октанового числа продукта. Чем больше объемная скорость подачи сырья, тем выше температура, необходимая для получения продукта заданного качества. Без дополнительного корректирования параметров, влияющих на качество катализатора, увеличение объемной скорости приведет к уменьшению выхода ароматических углеводородов и, соответственно, снижению октанового числа [15].

Мощность установки каталитического риформинга может быть увеличена либо путем повышения температуры реактора, либо путем снижения объемной скорости. Однако, при объемной скорости ниже  $0,75 \text{ час}^{-1}$  велика вероятность неравномерного распределения смеси по слою катализатора, что может привести к усиленному коксообразованию. Изменение объемной скорости во время работы установки происходит только путем уменьшения скорости потока сырья, так как объем катализатора является постоянным.

*г) Молярное отношение  $H_2$ /углеводороды*

Этот показатель практически не оказывает влияния на протекание реакций превращения углеводородов в процессе каталитического риформинга. Однако данное соотношение сильно влияет на стабильность работы катализатора [4].

Значения от 4 до 6 моль/моль типичны для установок риформинга. Увеличение отношения  $H_2$ /углеводороды вызывает повышение парциального давления водорода, при этом происходит снижение коксообразования на катализаторе, что увеличивает срок его службы [4].

Понижение отношения водород/углеводороды приводит к увеличению коксообразования на катализаторе и, соответственно, скорости его дезактивации. При дальнейшем снижении резко падает активность катализатора.



## **1.6 Конфигурация реакторов процесса риформинга**

Реактор играет очень важную роль в процессе риформинга. Именно от его работы будет зависеть экономическая составляющая процесса, а также качество получаемого на выходе продукта. Реакторы каталитического риформинга чаще всего относятся к аппаратам проточного типа, то есть непрерывного действия. Были предложены различные конфигурации реакторов с различными характеристиками. Эти конфигурации можно классифицировать в соответствии с формой реактора и структурой входного потока исходного сырья следующим образом [1, 30-34]:

- Сферический реактор с радиальным вводом;
- Сферический реактор с аксиальным вводом;
- Мембранный реактор с псевдооживленным слоем катализатора;
- Цилиндрический реактор с радиальным вводом;
- Цилиндрический реактор с аксиальным вводом.

### **1.6.1 Сферический реактор**

Обеспечивая постоянно растущий спрос на энергию и сырье в результате роста мировой экономики, пересмотр традиционных конфигураций реакторов может значительно сократить капитальные и эксплуатационные расходы при одновременном удовлетворении растущего спроса на рынке. Геометрия сферического реактора является привлекательной альтернативой конструкции традиционных трубчатых реакторов из-за более низкого перепада давления (который обусловлен распределением подачи по большей площади поверхности в сферических реакторах по сравнению с площадью поперечного сечения в обычных трубчатых реакторах) а также меньших инвестиций в строительные материалы (уменьшение толщины стен до половины) [35].

Также, для сферических реакторов возможно использование более мелких каталитических гранул с более высокой эффективностью.

В данном типе реактора используется неподвижный уплотненный слой катализатора. По сравнению с псевдоожиженным слоем реакторы с уплотненным слоем предпочтительнее в химической промышленности из-за их более легкой конструкции и простоты эксплуатации [35].

Сферические реакторы имеют более высокую площадь поперечного сечения по сравнению с обычными трубчатыми реакторами и, таким образом, имеют более низкий перепад давления. Это дает преимущество в работе с более высокой молярной скоростью подачи сырья и возможностью использования катализаторов меньшего размера, что устраняет диффузионные ограничения в катализаторе и улучшает конечную конверсию.

На сегодняшний день известны два типа сферических реакторов [35]:

- 1) сферические реакторы с радиальным потоком;
- 2) сферические реакторы с осевым потоком.

В реакторах со сферическим уплотненным слоем с радиальным потоком реагенты могут течь в радиальном направлении к внешней или внутренней сферам, как показано на рисунке 3.

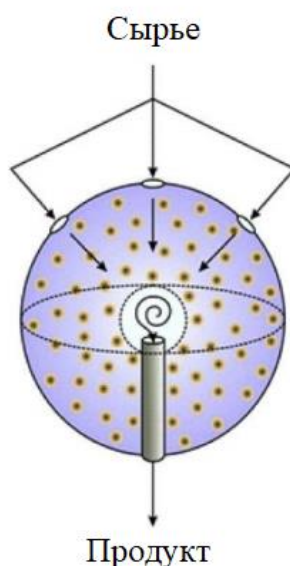


Рисунок 3 – Схема сферического реактора с радиальным потоком [35]

Эта конфигурация состоит из двух concentрических сфер. Катализатор загружается в пространство между этими сферами. Подаваемый газ поступает в реактор и течет снаружи через слой катализатора во внутреннюю сферу.

Исследователи изучали влияние направления потока (внутри или наружу) на производительность реактора в изотермических условиях. Они пришли к выводу, что для реакций, связанных с увеличением объема и реакций, связанных с уменьшением объема, предпочтительными режимами потока являются наружу и внутрь, соответственно. Другие ученые, которые исследовали реакторы с обратным движением потока, обнаружили более низкую температуру в центре радиального сферического реактора с уплотненным слоем (RF-SPBR) по сравнению с трубчатым. Периодическое и быстрое изменение направления подачи потока между внутренним и внешним путями предсказывало более низкую температуру в центре сферического радиального реактора, которая могла бы значительно повысить конверсию экзотермических обратимых реакций. Они также подчеркнули превосходство SPBR в управлении зоной горячей температуры в центре реактора (за счет увеличения скорости потока подачи) по сравнению с трубчатыми реакторами. Также, в сферических реакторах для достижения желаемой конверсии необходим меньший объем реакционной среды, нежели в трубчатых.

Радиальный поток подачи в сферических реакторах представляет ряд проблем, таких как получение равномерного распределения подачи и использование мембран. Эти недостатки устраняются в реакторах с осевым потоком и сферическим уплотненным слоем (AF-SPBR). Здесь слой катализатора расположен между двумя перфорированными экранами, как показано на рисунке 4.

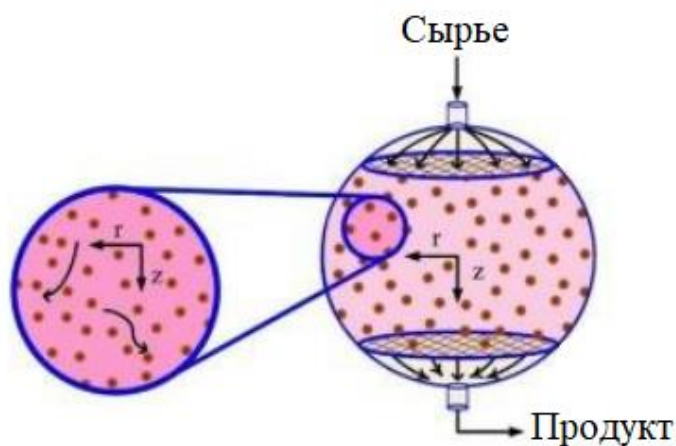


Рисунок 4 – Схема сферического реактора с осевым потоком [35]

Исходное сырье поступает в верхнюю часть реактора и течет в осевом направлении к нижней части реактора. Осевое направление потока сверху вниз гарантирует более равномерное распределение потока в AF-SPBR по сравнению с реакторами с радиальным потоком. Перфорированные экраны на входе и выходе реактора необходимы, как опоры для слоя катализатора.

В сферических реакторах с осевым потоком возникает возможность изменения конфигурации мембраны, для смещения равновесия реакции в необходимую сторону, а также повышения конверсии на основании принципа Ле-Шателье. В таких процессах, как риформинг (который включает в себя реакции гидрирования и дегидрирования) использование  $H_2$  –полупроницаемой мембраны позволяет успешно оптимизировать соотношение водорода к углеводородам ( $H_2/HC$ ) [35]. Это является важным фактором для увеличения срока службы катализатора с дополнительным преимуществом получения чистого газообразного водорода. Ожидается, что удаление продукта улучшит термодинамическую эффективность процесса и сократит затраты на последующие установки очистки. На рисунке 5 представлена схема предложенного мембранного сферического реактора с осевым вводом сырья.

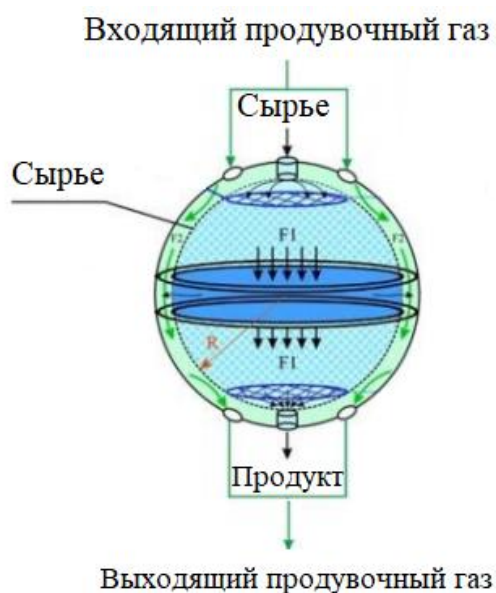


Рисунок 5 – Схематическая конструкция мембранного сферического реактора с осевым потоком [35]

Несмотря на сложность изготовления мембраны сферической формы, это может существенно снизить стоимость изготовления мембраны для реактора в целом, поскольку общая необходимая площадь поверхности будет составлять примерно 80% от соответствующей трубчатой мембраны для обычных реакторов.

### 1.6.2 Мембранный реактор с псевдооживленным слоем катализатора

Предложен новый мембранный реактор с псевдооживленным слоем (fluidized-bed membrane reactor – FBMR) для процесса риформинга. В этой конфигурации использовался реактор с псевдооживленным слоем с проницаемой для водорода стенкой, сделанной из Pd-Ag (23 % масс. Ag) [36].

На рисунке 6 представлена схема процесса с использованием мембранных реакторов с псевдооживленным слоем для каталитического риформинга.

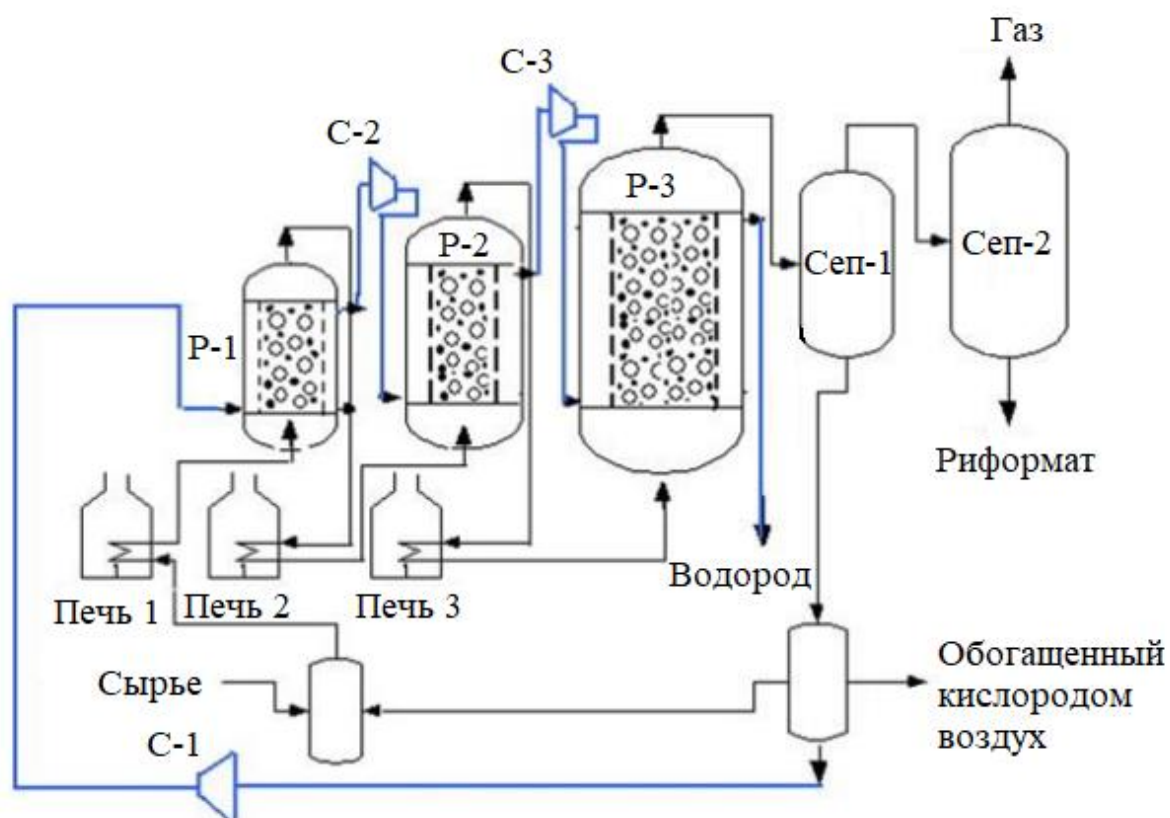


Рисунок 6 – Схема предлагаемого мембранного реактора с псевдооживленным слоем для каталитического риформинга [36]

Мембранный реактор состоит из двух концентрических труб. Внутренняя труба является каталитической реакционной средой, а внешняя труба оболочкой (рисунок 7). Внутренняя труба представляет собой полупроницаемую мембрану Pd-Ag, а внешняя – непроницаемую оболочку. Толщина полупроницаемой мембраны равна 10 мкм. Для поддержки мембраны Pd-Ag используется нержавеющая сталь. Длина мембран составляет 6.29, 7.13, 7.89 м для 1, 2 и 3

реактора соответственно [36]. Также площади мембран составляют 30.02, 37.39 и 49.05 м<sup>2</sup> для 1, 2 и 3 реактора соответственно.

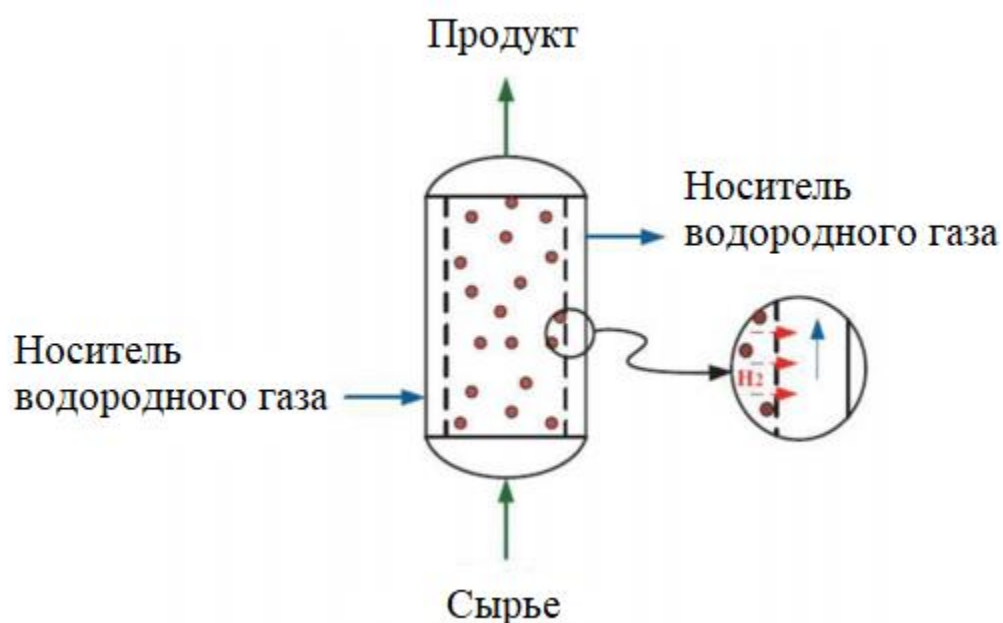


Рисунок 7 – Принципиальная схема мембранного реактора с псевдооживленным слоем [36]

Реагенты протекают через внутреннюю реакционную среду, в то время как водород подается во внешнее свободное пространство реактора. Водород проникает через мембрану в реакционную среду благодаря движущей силе парциального давления водорода. Проникновение водорода через мембрану приводит к сдвигу реакции в сторону продуктов в соответствии с термодинамическим равновесием, это также позволяет увеличить производство ароматических веществ вдоль всего реактора.

Такая конфигурация реактора с псевдооживленным слоем с мембранной системой устраняет некоторые недостатки, такие как падение давления, внутренние ограничения массообмена и радиальный градиент концентрации и температуры, а повышение качества продукта может быть достигнуто путем контролируемого удаления водорода через мембраны [36].

Отсутствие радиальных и осевых градиентов температуры обосновывается превосходными характеристиками теплопередачи в режиме псевдооживления.

Снятие внутренних ограничений массообмена происходит за счет лучшего взаимодействия двух фаз в псевдооживленном состоянии. Также устранение диффузионных осложнений возможно при использовании зерен катализатора оптимального размера. Некоторыми из возможных недостатков мембранных реакторов с псевдооживленным слоем являются такие проблемы, как трудности в конструкции реактора, закрепление мембраны на стенке, эрозия внутренних частей реактора и истирание катализатора [36].

### **1.6.3 Цилиндрический реактор**

На рисунке 8 представлена конструкция цилиндрического реактора риформинга. Ввод сырья аксиальный. Такие реакторы могут быть как с нисходящими, так и с восходящими потоками, это зависит от разных факторов, в том числе и гидродинамических условий движения сырья.

Данная конструкция реактора состоит из таких деталей как: корпус, днище, штуцеров для ввода и вывода сырья, а также конечного продукта реакции, распределителя, опорной решетки, слоя катализатора, состоящего из фарфоровых шариков, многозонных термопар, наружных термопар, футеровочного слоя, опорного кольца, люков для загрузки и выгрузки катализаторов и очистки. [1,37]

Штуцер 5 и распределитель 6 служат для подачи исходного сырья в реактор. Назначением распределителя является равномерное распределение газосырьевой смеси. Следующим этапом является прохождение потока через слой фарфоровых шариков. Это делается также для наиболее равномерного распределения по сечению аппарата и уменьшения уноса катализатора. После прохождения через слой катализатора продукты реакции выводятся из аппарата с помощью нижнего штуцера.



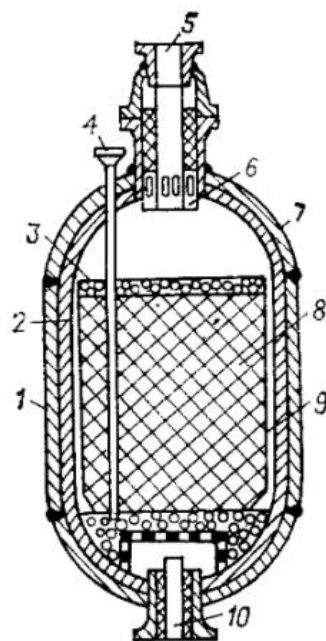


Рисунок 8 – Реактор риформинга с аксиальным вводом сырья [1]:  
 1 – корпус; 2 – футеровка; 3 – фарфоровые шары; 4 – штуцер для термопары; 5 – штуцер для ввода газосырьевой смеси; 6 – распределитель; 7 – днище; 8 – катализатор; 9 – перфорированный стакан с сеткой; 10 – штуцер для вывода газопродуктовой смеси»

Основным преимуществом данного реактора является то, что в течение двухгодичного безрегенерационного периода эксплуатации обеспечивается требуемое качество продукта при минимальном перепаде давления и с минимальными энергетическими затратами.

Основные недостатки аксиальных реакторов следующие: неравномерная работа катализатора по стою; значительный перепад давления на слое катализатора при эксплуатации; уменьшение соотношения водород/сырье по высоте слоя катализатора; неравномерность температур в слое [1,33].

Реактор каталитического риформинга с радиальным движением потока, применяемый на отечественных установках, приведен на рисунке 9. Основное их отличие от реакторов с радиальным вводом сырья заключается в том, в газосырьевая смесь проходит через слой катализатора в радиальном направлении, то есть от периферии к центру. Такая конфигурация позволяет

уменьшить потери давления в потоке в несколько раз. Также такое конструктивное решение позволяет значительно снизить гидравлическое сопротивление, уменьшить вероятность засорения катализатора продуктами коррозии [38-39].

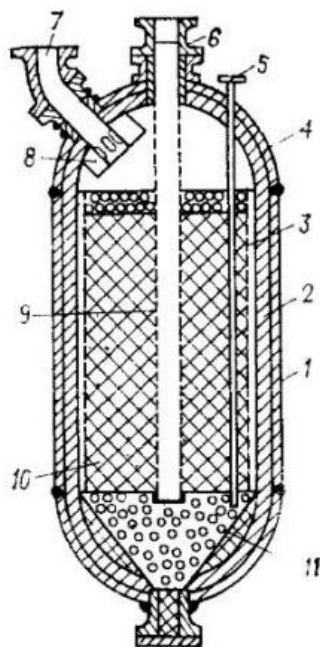


Рисунок 9 – Реактор риформинга с радиальным вводом газосырьевой смеси [1]: 1 – корпус; 2 – футеровка; 3 – перфорированный стакан с сеткой; 4 – днище; 5 – штуцер для термопары; 6 – штуцер для вывода газо-продуктовой смеси; 7 – штуцер для ввода газо-сырьевой смеси; 8 – распределитель; 9 – перфорированная труба с сеткой; 10 – катализатор; 11 – фарфоровые шары

Внутреннее устройство отличается от реакторов с аксиальным вводом тем, что катализатор размещается во внутреннем перфорированном стакане, а между футеровкой и стаканом существует кольцевой зазор.

Газосырьевая смесь по кольцевому зазору проходит через слой катализатора и выводится через центральную перфорированную трубу.

В остальном цилиндрические реакторы с аксиальным и радиальным вводом сырья ничем не отличаются.

## 1.7 Классификация технологий каталитического риформинга

Процесс каталитического риформинга обычно классифицируют в соответствии с частотой и режимом регенерации катализатора на [40-41]:

- Полурегенеративный (SRCRP – semi-regenerative catalytic reformer process);
- Циклический (CRCRP – cyclic regenerative catalytic reformer process);
- Непрерывный регенеративный (CCRPP – continuous catalytic regeneration reformer process).

Основное различие между тремя типами процессов заключается в необходимости остановки реакторного блока риформинга для регенерации катализатора.

Наиболее распространенный тип ведения процесса – полурегенеративный, больше половины установок по всему миру работают по данной технологии. На втором месте по распространённости использования идет непрерывная регенерация, третье место за циклической регенерацией катализатора. В настоящее время большинство установок каталитического риформинга спроектированы с непрерывной регенерацией, а бывшие полурегенеративные установки переоборудованы для непрерывной регенерации.

### 1.7.1 Полурегенеративный (SRCRP) каталитический риформинг

Полурегенеративный (SRCRP) является самым старым процессом риформинга, схема представлена рисунке 10. Октановое число при данном способе ведения процесса может достигать 85-100 пунктов. В полурегенеративном процессе обычно используется Pt-Re катализатор, поскольку он обеспечивает высокую устойчивость к высокому содержанию кокса на катализаторе, а также позволяет снизить рабочее давление. Реакторный блок обычно включает три или четыре последовательно расположенных реактора с неподвижным слоем катализатора. Такая система работает без

остановки от шести месяцев до одного года, затем требуется регенерация катализатора.

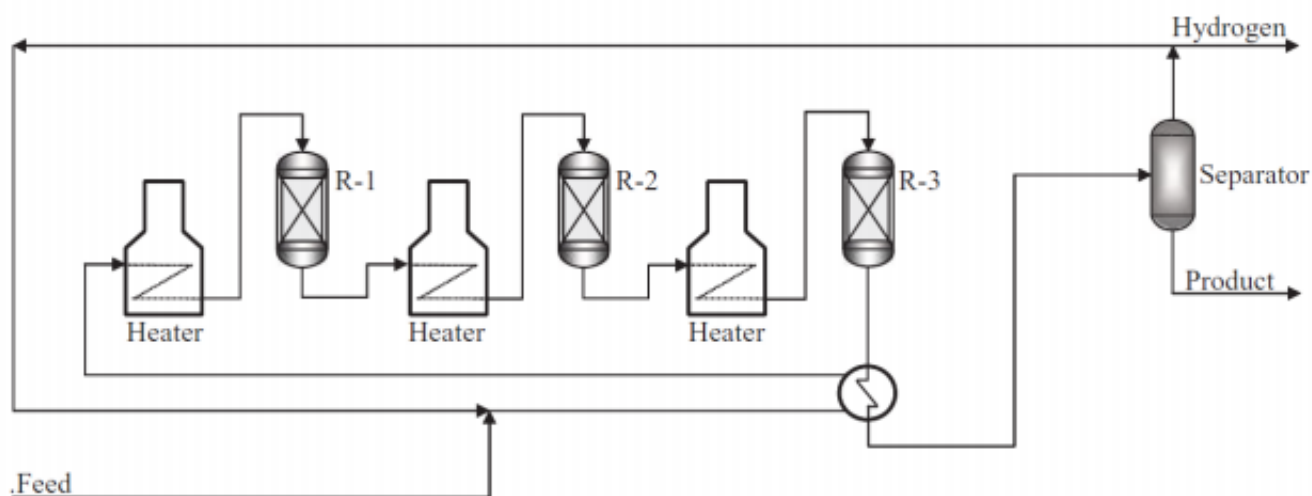


Рисунок 10 – Принципиальная технологическая схема SRCRP [8]

Осаждение кокса приводит к уменьшению активности, это в свою очередь снижает выход ароматических соединений, также снижается чистота газообразного водорода. Полурегенеративные установки работают при высоких давлениях в диапазоне от 1,5 до 2 Мпа. Высокое давление необходимо для уменьшения скорости дезактивации катализатора. Для компенсации снижения активности катализатора и поддержания конверсии на постоянном уровне температуру реактора непрерывно увеличивают до максимальных пределов. Регенерация катализатора происходит в момент отключения и остановки установки. Остановка происходит по достижению максимальной температуры в реакторе процесса риформинга. Конец каталитического цикла происходит в тот момент, когда установка риформинга уже не способна обеспечивать высокое октановое число и заданный выход продукта. Количество регенераций катализатора составляет от пяти до десяти раз, затем его удаляют или подвергают замене.

### 1.7.2 Циклический (CRCRP) каталитический риформинг

Данный тип процесса риформинга является наименее распространенным с точки зрения его использования для производства бензина с высоким октановым числом. Схема приведена на рисунке 11.

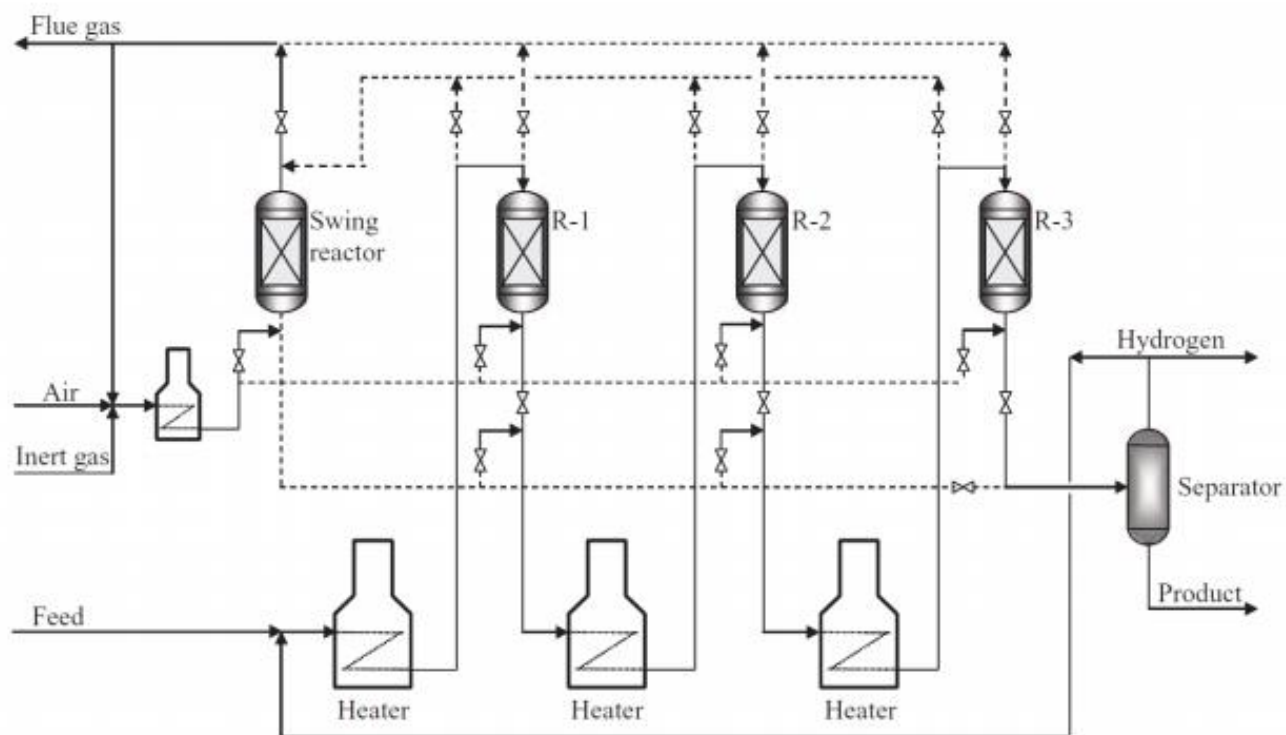


Рисунок 11 – Принципиальная технологическая схема CRCRP [8]

Помимо основных трех реакторов с неподвижным слоем катализатора, в технологической схеме процесса риформинга с циклической регенерацией имеется дополнительный реактор, который используется, когда катализатор с любого из обычных реакторов нуждается в регенерации. Реактор с регенерированным катализатором затем становится запасным. Таким образом, данный процесс характеризуется непрерывной работой.

Циклический процесс регенерации позволяет установке риформинга работать при более жестких условиях: пониженном давлении (около 1,5 МПа), подаче сырья с широким диапазоном температур кипения и низкой кратности циркуляции ВСГ [32]. Скорости отложения кокса при таких условиях настолько высоки, что катализатор в отдельных реакторах требует регенерации уже через

одну неделю. Поэтому, средний интервал между двумя регенерациями для каждого реактора составляет от нескольких недель до нескольких месяцев.

Однако данные условия увеличивают выход риформата и водорода.

Также, данная конфигурация технологической схемы позволяет получать риформат с высоким октановым числом – от 100 до 104 пунктов.

Преимуществом такого процесса является то, что общая активность катализатора, степень превращения и чистота водорода изменяются со временем значительно меньше, чем в полурегенеративном процессе [32].

Основным недостатком каталитического риформинга этого типа является сложный процесс переключения реакторов, требующий высоких мер предосторожности. Кроме того, чтобы сделать возможным переключение между реакторами, они должны быть одинакового размера.

### **1.7.3 Непрерывный регенеративный (CCRRP) процесс риформинга**

Процесс риформинга с непрерывной регенерацией катализатора самый современный процесс, используемый для производства бензина с высоким октановым числом и ароматических соединений. С момента своего появления в начале 1970-х годов он получил широкое признание в нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности по всему миру.

Процесс CCRR характеризуется высокой каталитической активностью, пониженными требованиями к катализатору, равномерным риформингом с более высоким содержанием ароматических соединений в составе катализата и высокой чистотой водорода [32,41].

Данная конфигурация технологической схемы риформинга включает четыре последовательно соединенных реактора или, чаще всего, конструкцию реактора с подвижным слоем, в которой реакторы уложены друг на друга. Реакторная система имеет общий слой катализатора, который движется по трубам небольшого диаметра под действием силы тяжести сверху вниз. Отработанный закоксованный катализатор выводится из последнего четвертого

реактора и направляется в верхнюю часть регенератора для выжига кокса. Транспортировка катализатора между реакторами и регенератором осуществляется методом газлифта. Схема процесса показана на рисунке 12.

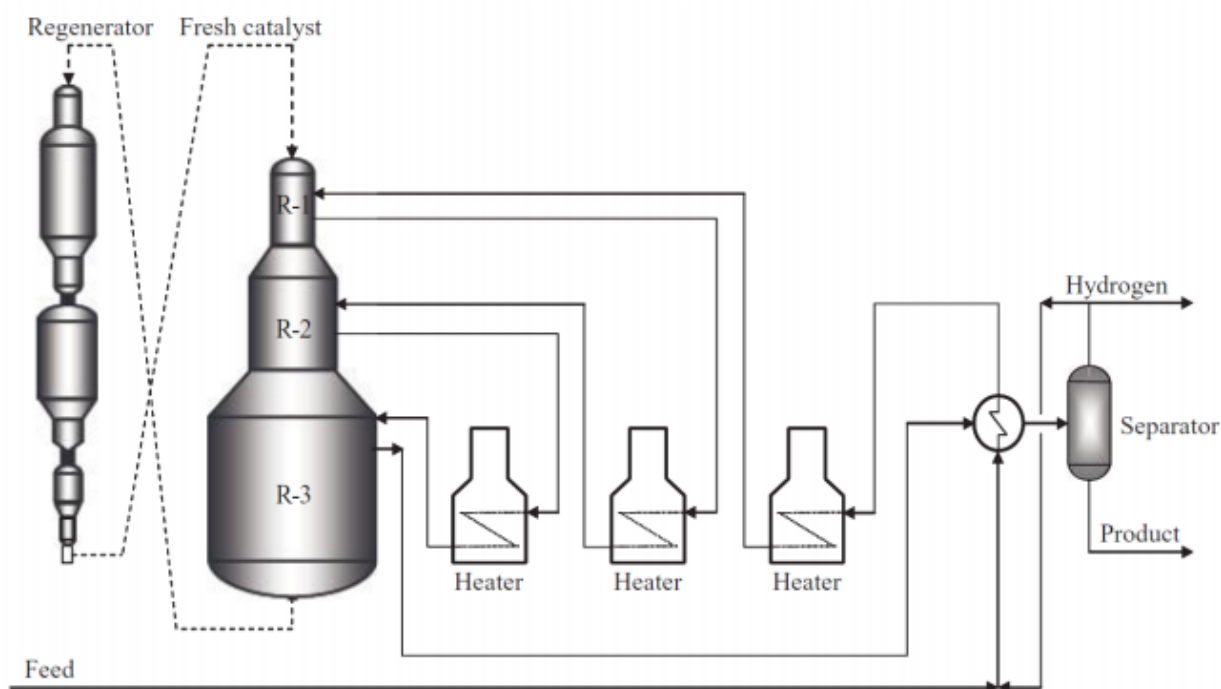


Рисунок 12 – Принципиальная технологическая схема CCRRP [8]

Во время нормальной работы небольшие количества катализатора удаляются непрерывно. Свежие или регенерированные порции катализатора поступают в верхнюю часть первого реактора для поддержания постоянного объема катализатора.

Преимущества такого ведения процесса включают устранение простоев при регенерации катализатора и стабильное производство водорода постоянной чистоты (93 % по сравнению с 80 % в полугенеративном процессе). Рабочее давление находится в диапазоне 0,35–1,7 МПа, а октановое число при проектных исследованиях находится в диапазоне 95–108 пунктов [41].

В CCRRP в качестве основного катализатора используется Pt-Sn/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Добавление к Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> олова в качестве промотора повышает стабильность и селективность катализатора в отношении реакций изомеризации и ароматизации. Этот катализатор подвергается непрерывной регенерации, так как селективность катализатора по ароматическим соединениям более значительна

по сравнению с его устойчивостью к дезактивации. Основные особенности, преимущества и недостатки каждого типа процессов каталитического риформинга представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Некоторые из основных особенностей, преимуществ и недостатков каждого типа процессов каталитического риформинга [41]

Тип	Особенности и условия ведения процесса				Преимущества	Недостатки
	Давление, МПа	Температура, °С	ОЧ	Каталитическая система		
SRCRP	Высокое давление (от 1,4 до 2)	Высокая температура (480-510)	85-100	Неподвижный слой катализатора	-	- Для регенерации катализатора нужна остановка; - Интервал между регенерациями от шести месяцев до двух лет.
CRCRP	Низкое Давление (около 1,4)	Высокая температура (515-520)	100 - 104	Неподвижный слой катализатора	- Не требует остановки для регенерации катализатора; - Активность катализатора, конверсия, чистота водорода.	- Интервал между регенерациями от пары недель до нескольких месяцев; - Сложное переключение реакторов, повышенные меры безопасности.
CCRRP	Низкое давление (0,35)	Высокая температура (515 -528)	95-108	Движущийся слой катализатора	- Не требует остановки, т.к. регенерация непрерывная; - Непрерывное производство водорода с большим выходом; - Более высокая активность катализатора.	-



## 1.8 Модели процесса каталитического риформинга

Каталитический риформинг бензиновых фракций является одним из важнейших процессов переработки нефти и используется для получения как ароматических углеводородов, так и высокооктановых бензинов. Экономическая выгода данного процесса достаточно высока. Поэтому проблема формулировки математической модели для нахождения оптимальных параметров процесса является актуальной.

Процесс риформинга чрезвычайно сложен с химической и технологической точек зрения, так что решение этих задач на сегодня возможно только на основе применения современных средств математического моделирования [42,43].

Существует множество различных кинетических моделей реакций каталитического риформинга.

Первые попытки моделирования кинетики реакций каталитического риформинга были опубликованы более 50 лет назад.

Одна из первых работ, посвященных математическому моделированию процесса каталитического риформинга, была опубликована Смитом в 1959 году [43]. Она представляла собой упрощенную модель процесса, которая учитывала конверсию не отдельных углеводородов, а группы углеводородов одного гомологического ряда – парафинового, нафтенового и ароматического. Модель оперирует некоторыми гипотетическими компонентами, которые характеризуются средними свойствами для каждой группы углеводородов. Автор данной модели пренебрег превращениями внутри отдельных групп (изомеризация парафиновых и нафтеновых углеводородов, деалкилирование алкилароматических углеводородов и расщепление более тяжелых компонентов, не приводящее к образованию газообразных продуктов, которые также рассматриваются как отдельная группа), то есть считает свойства гипотетических компонентов постоянными на протяжении всего процесса, не

учитываются также различия в свойствах отдельных компонентов внутри группы [43].

### 1.8.1 Краткий обзор существующих математических моделей каталитического риформинга

Математические модели каталитического риформинга можно разделить на две группы:

- 1) аналитические модели, построенные на основе теоретического анализа физикохимических процессов, протекающих в исследуемом объекте.
- 2) эмпирические модели, разработанные для конкретных объектов управления [44].

К одной из ранних математических моделей первой группы можно отнести модель процесса риформинга бензиновой фракции в виде системы интегро-дифференциальных уравнений, учитывающую внутригрупповое распределение реакционной способности углеводородов. [45]:

$$\begin{aligned} \frac{dC_i(x, \tau)}{d\tau} &= \sum_{m=1}^P k_m(x) C_i(x, \tau) + \sum_{m=1}^P k_m(x) C_i(x, \tau) C_{H_2} + \\ &+ \sum_{s=1}^n C_{H_2} \int_{x_i}^b k_m(x) C_s(x', \tau) v_m(x, x') \delta(x' - x_j) dx'; \\ \frac{dT(\tau)}{d\tau} &= -\frac{1}{C_p^{см}} \sum_{j=1}^n \Delta H_j \int_{x_i}^b k_j(x') C_j(x') \delta(x' - x_j) dx', \quad (1) \end{aligned}$$

Где  $C_i(x, \tau)$ ,  $k_m(x)$  – функции распределения концентраций углеводородов и констант скоростей реакций;  $v_m(x, x')$  – функции распределения вероятностей разрыва связей при гидрокрекинге парафиновых углеводородов;  $\tau$  – время пребывания реагентов в зоне реакции;  $T(\tau)$  – изменение температуры в ходе процесса;  $C_p^{см}$  – теплоемкость смеси;  $\Delta H_j$  – средняя для данной группы энтальпия реакций;  $x$  – число атомов углерода в молекуле углеводорода;  $I$  – количество групп углеводородов (парафины, изопарафины, циклопентаны,

циклогексаны, ароматические);  $m$  – количество групповых реакций, протекающих в процессе ( $m = I - I4$ );  $I$  – порядок реакций по водороду.

Математическая модель (1) послужила основой для построения системы автоматического проектирования реакторного узла каталитического риформинга бензиновых фракций.

Известны и другие модели первой группы, одна из которых, например, представляет собой совокупность пятидесяти трех дифференциальных уравнений, учитывающих превращения двадцати компонентов реакционной смеси [46]. Такая модель имеет существенный недостаток, связанный с неучетом взаимного влияния реакций. Помимо этого, анализировать сырье в промышленных условиях с определением содержания двадцати компонентов неудобно, и от точности определения хотя бы одного из компонентов существенно зависит конечный результат. Такой анализ требует большого запаса времени, в течение которого качество сырья может измениться.

Кинетические модели первой группы достаточно полно отражают физико-химические закономерности процесса риформинга, и при отсутствии возмущений адекватны описываемому процессу в широком диапазоне изменения режимных параметров. Однако кинетические модели не учитывают в явном виде наблюдаемые возмущения (изменение состава сырья), получаются сложными, требуют большого объема информации, и их реализация в режиме управления оказывается трудной или невозможной. Поэтому в большинстве случаев такие модели для построения оптимальных систем управления оказываются неудобными.

В качестве примера эмпирической модели второй группы выступает модель каталитического риформинга, представляющая собой систему уравнений материального и теплового балансов [45]:

$$G \cdot \frac{\partial C_i}{\partial z} = -u \cdot \frac{\partial C_i}{\partial r} - \varphi \cdot \frac{\partial C_i}{\partial l} + \frac{1}{l} \int_0^l W_j(l) a_j(l) dl ;$$

$$\rho^{см} \cdot C_p^{см} \cdot G \cdot \frac{\partial T}{\partial z} = -u \cdot \rho^{см} \cdot C_p^{см} \cdot G \cdot \frac{\partial T}{\partial r} -$$

$$- \varphi \cdot \rho^{кат} \cdot C_p^{кат} \cdot \frac{\partial T}{\partial l} + \sum Q_j \cdot \frac{1}{l} \int_0^l W_j(l) a_j(l) dl .$$

Начальные условия:  $z = 0$   $C_i = 0$ ,  $T = 0$ ; при  $l = 0$   $C_i = C_{i,0}$ ,  $T = T_{ex}$  (на входе в реактор); при  $r = 0$   $C_i = C_{i,0}$ ,  $T = T_{ex}$ , где  $z$  – объём переработанного сырья, м<sup>3</sup>;  $G$  – расход сырья, м<sup>3</sup>/ч;  $u$  – линейная скорость потока, м/ч;  $l$  – длина слоя катализатора в реакторе, м;  $\varphi$  – скорость движения катализатора, м/ч;  $W_j$  – суммарная скорость протекания реакций, моль/(м<sup>3</sup>\*ч);  $\rho^{см}$ ,  $\rho^{кат}$  – плотность смеси и катализатора, кг/м<sup>3</sup>;  $C_p^{см}$ ,  $C_p^{кат}$  – теплоемкость смеси и катализатора, Дж/(кг\*К);  $Q_j$  – тепловой эффект химической реакции, Дж/моль;  $T$  – температура, К.

Данная модель позволяет моделировать процесс риформинга с движущимся зернистым слоем катализатора.

Математические модели второй группы удобнее первой с точки зрения построения оптимальных систем уравнения. Так, математическая модель, разработанная в [46], представлена в виде группы регрессионных уравнений, которые выражают зависимость выхода стабильного катализата от основных параметров процесса. Коэффициенты модели определяются экспериментально. В работе [47] математическая модель каталитического риформинга получена методами математической статистики на основе экспериментальных данных, накопленных при нормальном режиме работы агрегатов. Эти и другие рассмотренные эмпирически модели процесса риформинга разрабатывались без учета существующих возмущений объекта. Исследования, проведенные в [48], показали эффективность применения вероятностных моделей по сравнению с

традиционными подходами к решению задачи оптимизации качества целевого продукта риформинга. В [49] статистическими методами был проведен сравнительный анализ алгоритмов управления процессом риформинга при различных параметрах случайных возмущений. Основным возмущением, от которого зависит результат функционирования процесса, является случайное изменение каких-либо свойств сырья при протекании его от одного резервуара к другому. При этом возможно изменение качества целевого продукта. Поэтому для учета свойств сырья в разрабатываемой модели процесса производят переход от детерминированной модели к вероятностной.

Можно сделать вывод о том, что общей проблемой построения математической модели каталитического риформинга является отсутствие учета неизмеримых возмущающих воздействий и изменения внутрисистемных параметров объекта [16].

## **2 Объект и методы исследования**

Объектом исследования являются промышленные платино-рениевые катализаторы риформинга различных марок.

Цель работы – исследование различных промышленных катализаторов риформинга для оптимизации процесса и повышения его эффективности с использованием метода математического моделирования.

В процессе исследования проводились:

1) Мониторинг установки риформинга ЛЧ-35-11/1000 с целью определения технологических параметров работы катализатора, срока его службы, а также прогнозирования дальнейшей работы.

2) Прогнозирование замены катализатора с учетом его пористой структуры и различного типа сырья (лёгкого или более тяжелого) с целью выбора оптимального, выход и октановое число продуктов, полученных с использованием которого будет максимальным при минимальных затратах на регенерацию.

3) Формирование рекомендаций для эффективного ведения промышленного процесса в оптимальной области.

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

В настоящее время перспективность научного исследования определяется не столько масштабом открытия, оценить которое на первых этапах жизненного цикла высокотехнологического и ресурсоэффективного продукта бывает достаточно трудно, сколько коммерческой ценностью разработки. Оценка коммерческой ценности разработки является необходимым условием при поиске источников финансирования для проведения научного исследования и коммерциализации его результатов.

Целью раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является определение перспективности и успешности научно-технического исследования, оценка его эффективности, уровня возможных рисков, разработка механизма управления и сопровождения конкретных проектных решений на этапе реализации.

Для достижения обозначенной цели необходимо решить следующие задачи:

- организовать работы по научному исследованию;
- осуществить планирование этапов выполнения исследования;
- оценить коммерческий потенциал и перспективность проведения научного исследования;
- рассчитать бюджет проводимого научно-технического исследования;
- произвести оценку социальной и экономической эффективности исследования.

Исследования проводились в ТПУ с использованием программного обеспечения (ПО). Целью исследования является сравнение различных типов катализаторов процесса риформинга бензинов методом математического моделирования и прогнозирование качества процесса при их применении. В качестве объекта исследования были выбраны различные типы катализаторов процесса риформинга.

## 4.1 Предпроектный анализ

### 4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

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

**Сегментирование** – это разделение покупателей на однородные группы, для каждой из которых может потребоваться определенный товар (услуга) [51].

Для данной работы:


- **Продукт:** математическая модель процесса реформинга;
- **Целевой рынок:** предприятия нефтеперерабатывающей промышленности;
- **Сегментирование:** вторичная переработка углеводородного сырья.

Был проведен анализ рынка и выбраны два наиболее значимых критерия для построения карты сегментирования: основной потребитель и вид услуги. Карта представлена в таблице 12.




Таблица 12 – Карта сегментирования

		Вид услуги		
		Оказание услуг по исследованию и оптимизации	Продажа программного продукта	Продажа тренировочной версии
Потребитель	Мелкие			
	Средние			
	Крупные			
	Образовательные учреждения			
	Проектные организации			

 – Invensys Process Systems, Великобритания

 – Aspen Technologies, США

 – ChemFort, Россия

В таблице показано, какие ниши на рынке услуг по применению математической модели не заняты конкурентами и где уровень конкуренции низок:

- для мелких ПНЗ необходим доступный по цене продукт;
- в основном организации не предоставляют пробной версии продукта.

#### 4.1.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить направления для ее будущего повышения.

В таблице 13 представлен сравнительный анализ математической модели (М), разработанной в рамках выполнения ВКР и двух конкурентных моделей Chemcad (К1) и Aspen Hysys (К2).

Таблица 13 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б <sub>М</sub>	Б <sub>К1</sub>	Б <sub>К2</sub>	К <sub>М</sub>	К <sub>К1</sub>	К <sub>К2</sub>
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
Повышение производительности установки	0,09	5	2	2	0,45	0,18	0,18
Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,07	5	3	3	0,35	0,21	0,21
Энергоэкономичность	0,1	5	4	3	0,5	0,4	0,3
Надежность	0,07	5	4	4	0,35	0,28	0,28
Безопасность	0,04	5	5	5	0,2	0,2	0,2
Экономические критерии оценки эффективности							
Конкурентоспособность продукта	0,2	5	3	2	1	0,6	0,4
Уровень проникновения на рынок	0,07	4	5	4	0,28	0,35	0,28
Цена	0,08	5	3	4	0,4	0,24	0,32
Предполагаемый срок эксплуатации	0,08	5	5	5	0,4	0,4	0,4
Послепродажное обслуживание	0,07	5	5	2	0,35	0,35	0,14
Финансирование научной разработки	0,03	4	4	4	0,12	0,12	0,12

Продолжение таблицы 13

Срок выхода на рынок	0,05	5	3	3	0,25	0,15	0,15
Наличие сертификации разработки	0,05	5	5	5	0,25	0,25	0,25
Итого	1	63	51	46	4,9	3,73	3,23

Критерии оценки подбираются, исходя из выбранных объектов сравнения с учетом их технических и экономических особенностей разработки, создания и эксплуатации.

Вес показателей в сумме должны составлять 1. Позиция разработки и конкурентов оценивается по каждому показателю по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная.

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum V_i \cdot B_i$$

где: K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

$V_i$  – вес показателя (в долях единицы);

$B_i$  – балл  $i$ -го показателя.

Разрабатываемая математическая модель является конкурентоспособной на рынке, главным преимуществом которой, является чувствительность к составу перерабатываемого сырья.

### 4.1.3 SWOT-анализ

SWOT – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта (таблица 14). Применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта. Анализ проводится в 3 этапа.

*Первый этап* заключается в описании сильных и слабых сторон проекта, в выявлении возможностей и угроз для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде.

Таблица 14 – Матрица SWOT-анализа

	<b>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</b> С1: Возможность оптимизации ведущего процесса переработки нефти С2: Чувствительность к изменению состава сырья С3: Относительно небольшая стоимость С4: Проведение исследований без вмешательства в работу предприятия	<b>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</b> Сл1: Высокая конкуренция на рынке по аналогичным продуктам для исследования процесса Сл2: Недостаток экспериментальных данных с промышленных установок Сл3: Отсутствие данных для проверки модели на адекватность
<b>Возможности:</b> В1: Использование инновационной инфраструктуры ТПУ В2: Внедрение на Российские НПЗ разработанного продукта и, как следствие, повышение спроса на него		
В3: Тенденции к ресурсоэффективному и сберегающему производству В4: Использование продукта в качестве тренажера для образовательных учреждений		

Продолжение таблицы 14

<p><b>Угрозы:</b>          Уз1: Появление улучшенной модели на рынке в более короткие сроки          Уз2: Отсутствие спроса на продукцию, так как основные ниши рынка заняты продуктами конкурентов          Уз3: Нежелание предприятий по внедрению инновационного проекта</p>		
---	--	--

*Второй этап* состоит в выявлении соответствия сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта внешним условиям окружающей среды.

Интерактивная матрица проекта представлена в таблице 14. Каждый фактор помечается либо знаком «+» (означает сильное соответствие сильных сторон возможностям), либо знаком «-» (что означает слабое соответствие); «0» – если есть сомнения в том, что поставить «+» или «-».

Выявление соответствия сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта внешним условиям окружающей среды (таблица 15).

Таблица 15 – Интерактивная матрица проекта

		Сильные стороны проекта			
		C1	C2	C3	C4
Возможности проекта	B1	+	+	0	-
	B2	+	+	+	+
	B3	+	-	0	+
	B4	-	0	+	-

Итоговая матрица SWOT-анализа представлена в таблице 16.

В рамках *третьего этапа* должна быть составлена итоговая матрица SWOT-анализа (таблица 16).

Таблица 16 –SWOT-анализ

	<p><b>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</b>  С1: Возможность оптимизации ведущего процесса переработки нефти  С2: Чувствительность к изменению состава сырья  С3: Относительно небольшая стоимость  С4: Проведение исследований без вмешательства в работу предприятия</p>	<p><b>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</b>  Сл1: Высокая конкуренция на рынке по аналогичным продуктам для исследования процесса  Сл2: Недостаток экспериментальных данных с промышленных установок  Сл3: Отсутствие данных для проверки модели на адекватность</p>
<p><b>Возможности:</b>  В1: Использование инновационной инфраструктуры ТПУ  В2: Внедрение на Российские НПЗ разработанного продукта и, как следствие, повышение спроса на него  В3: Тенденции к ресурсоэффективному и сберегающему производству  В4: Использование продукта в качестве тренажера для образовательных учреждений</p>	<p>С и В:  1. Оптимизация производств по основным направлениям ресурсосбережения и ресурсоэффективности  2. Разработка математической модели процесса каталитического риформинга для быстрого и полного расчета необходимых параметров  3. Продвижение продукта на зарубежные рынки</p>	<p>Сл и В:  1. Разработка улучшенных методов продвижения на рынке  2. Использование инновационного потенциала ТПУ в совершенствовании продукта и повышении его конкурентоспособности  3. Приобретение необходимых экспериментальных данных с промышленных установок  4. Разработка научного исследования</p>
<p><b>Угрозы:</b>  Уз1: Появление улучшенной модели на рынке в более короткие сроки  Уз2: Отсутствие спроса на продукцию, так как основные ниши рынка заняты продуктами конкурентов  Уз3: Нежелание предприятий по внедрению инновационного проекта</p>	<p>С и У:  1. Разработка более выгодных предложений для потребителей, чем у конкурентов  2. Продвижение новой технологии оптимизации процесса с применением математической модели</p>	<p>Сл и У:  1. Разработка предложений для пробного использования продукта с целью привлечения потребителей  2. Продолжение разработки продукта, поиск критериев для проверки адекватности модели  3. Заключение взаимовыгодных договоров с предприятиями с целью получения экспериментальных данных для проверки модели</p>

В данном разделе был проведен SWOT–анализ, представленный в таблице 16. По его результатам были выявлены сильные и слабые стороны проекта, а также угрозы и возможности. Так же было выявлено то, как можно компенсировать слабые стороны проекта за счет его возможностей и нейтрализовать угрозы с помощью сильных сторон проекта. Результаты SWOT– анализа учитываются при разработке структуры работ, выполняемых в рамках научно-исследовательского проекта.

#### **4.1.4 Оценка готовности проекта к коммерциализации**

На какой бы стадии жизненного цикла не находилась научная разработка полезно оценить степень ее готовности к коммерциализации и выяснить уровень собственных знаний для ее проведения (или завершения). Для этого заполнена специальную форма, содержащая показатели о степени проработанности проекта с позиции коммерциализации и компетенциям разработчика научного проекта (таблица 17).

При проведении анализа по таблице, по каждому показателю ставится оценка по пятибалльной шкале. При оценке степени проработанности научного проекта 1 балл означает не проработанность проекта, 2 балла – слабую проработанность, 3 балла – выполнено, но в качестве не уверен, 4 балла – выполнено качественно, 5 баллов – имеется положительное заключение независимого эксперта. Для оценки уровня имеющихся знаний у разработчика система баллов принимает следующий вид: 1 означает не знаком или мало знаю, 2 – в объеме теоретических знаний, 3 – знаю теорию и практические примеры применения, 4 – знаю теорию и самостоятельно выполняю, 5 – знаю теорию, выполняю и могу консультировать.

Таблица 17 – Оценка степени готовности проекта к коммерциализации

№ п/п	Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
1.	Определен имеющийся научно-технический задел	5	5
2.	Определены перспективные направления коммерциализации научно-технического задела	4	5
3.	Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке	4	4
4.	Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок	4	4
5.	Определены авторы и осуществлена охрана их прав	3	4
6.	Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	4	4
7.	Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	3	4
8.	Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	4	5
9.	Определены пути продвижения научной разработки на рынок	4	4
10.	Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	4	5
11.	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	3	4
12.	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	2	3
13.	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	2	4
14.	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	2	3
15.	Проработан механизм реализации научного проекта	4	4
	<b>ИТОГО БАЛЛОВ</b>	59	62



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

$$B_{\text{сум}} = \sum B_i$$

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

$B_i$  – балл по  $i$ -му показателю.

Значение  $B_{\text{сум}}$  позволяет говорить о мере готовности научной разработки и ее разработчика к коммерциализации. В итоге получилось, что разработка является перспективной, а уровень имеющихся знаний у разработчика выше среднего.

По результатам оценки выделяются слабые стороны исследования, для дальнейшего улучшения необходимо проработать вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот. Также слабой стороной можно считать команду и финансирование коммерциализации научной разработки.

#### **4.1.5 Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования**

Для коммерциализации результатов, проведенного исследования будут использоваться следующие методы: инжиниринг и передача интеллектуальной собственности.

Инжиниринг будет предполагать предоставление на основе договора инжиниринга одной стороной, именуемой консультантом, другой стороне, именуемой заказчиком, комплекса или отдельных видов инженерно-технических услуг, связанных с проектированием, строительством и вводом объекта в эксплуатацию, с разработкой новых технологических процессов на предприятии заказчика.

Передача интеллектуальной собственности будет производиться в уставной капитал предприятия или государства.

Данные методы коммерциализации будут наиболее продуктивными в отношении данного проекта.

## 4.2 Инициация проекта

Группа процессов инициации состоит из процессов, которые выполняются для определения нового проекта или новой фазы существующего. В рамках процессов инициации определяются изначальные цели и содержание и фиксируются изначальные финансовые ресурсы. Определяются внутренние и внешние заинтересованные стороны проекта, которые будут взаимодействовать и влиять на общий результат научного проекта. Данная информация закрепляется в Уставе проекта (таблица 18).

Таблица 18 – Заинтересованные стороны проекта

<b>Заинтересованные стороны проекта</b>	<b>Ожидания заинтересованных сторон</b>
НИ ТПУ	Выпуск высококвалифицированных специалистов
НПЗ и другие нефтехимические предприятия	Получение исследований различных типов катализаторов процесса риформинга бензинов методом математического моделирования и получение спрогнозированных возможных результатов качества процесса при их применении

В таблице 19 представлена иерархия целей проекта и критерии достижения целей.

Таблица 19 – Цели и результат проекта

<b>Цели проекта:</b>	Исследование различных типов катализаторов процесса риформинга бензинов методом математического моделирования и прогнозирование качества процесса при их применении
<b>Ожидаемые результаты проекта:</b>	Получить результаты исследования различных типов катализаторов процесса каталитического риформинга бензинов с помощью методов математического моделирования и спрогнозировать качества процесса при их использовании

Продолжение таблицы 19

<b>Критерии приемки результата проекта:</b>	Расчёт основных параметров процесса с помощью математической модели, их сравнение при работе установки с различными типами катализатора, а также построение зависимостей и графиков. Анализ полученных данных и соответствующие выводы по проекту.
<b>Требования к результату проекта:</b>	<b>Требование:</b>
	Ознакомиться с литературой и характеристиками процесса риформинга
	Рассчитать основные параметры процесса каталитического риформинга с помощью математической модели
	Анализ полученных данных и построение графиков, диаграмм, таблиц
	Оформление вывода, прогноз качества процесса риформинга при использовании различных катализаторов

В таблице 20 представлена организационная структура проекта (роль каждого участника, их функции, трудозатраты).

Таблица 20 – Рабочая группа проекта

<b>№ п/п</b>	<b>ФИО, основное место работы, должность</b>	<b>Роль в проекте</b>	<b>Функции</b>	<b>Трудозатраты, час.</b>
1.	Чернякова Е.С., НИ ТПУ, доцент ОХИ ИШПР	Руководитель проекта	Консультирование, координация деятельности, определение задач, контроль выполнения.	600
2.	Федоров И.Е магистрант ОХИ ИШПР	Исполнитель по проекту	Анализ литературных источников, расчёт основных параметров процесса, анализ полученных данных, оформление отчёта, прогнозирование результатов, написание работы	1600
<b>ИТОГО:</b>				2200

### 4.3 Планирование управления научно-техническим проектом

Группа процессов планирования состоит из процессов, осуществляемых для определения общего содержания работ, уточнения целей и разработки последовательности действий, требуемых для достижения данных целей.

План управления научным проектом должен включать в себя следующие элементы:

- иерархическая структура работ проекта;
- контрольные события проекта;
- план проекта;
- бюджет научного исследования.

#### 4.3.1 Иерархическая структура работ проекта

Иерархическая структура работ (ИСР) – детализация укрупненной структуры работ. В процессе создания ИСР структурируется и определяется содержание всего проекта (рисунок 22).



Рисунок 22 – Иерархическая структура работ


















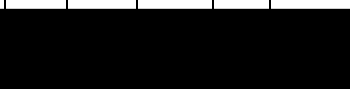
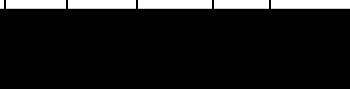
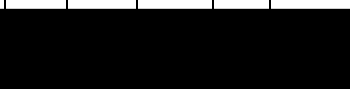
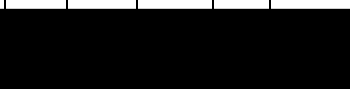
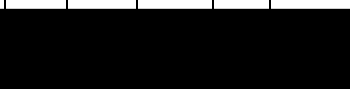
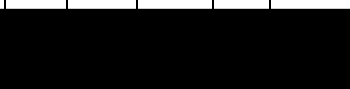
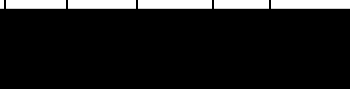
### 4.3.2 План проект

В рамках планирования научного проекта построены календарный график проекта (таблица 21, 22).

Таблица 21– Календарный план проекта

Название	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников
Утверждение темы магистерской диссертации	7	01.09.19	07.09.19	Чернякова Е.С Федоров И.Е
Согласование плана работ	7	08.09.19	15.09.19	Чернякова Е.С Федоров И.Е
Литературный обзор	138	16.09.19	31.01.20	Федоров И.Е
Обработка полученных данных и обсуждение результатов	292	01.02.20	20.12.20	Чернякова Е.С Федоров И.Е
Написание отчета	162	21.12.20	31.05.21	Федоров И.Е
<b>Итого:</b>	606			

Таблица 22 – Календарный план график проведения НИОКР по теме

Наименование этапа	Т, дней	2019				2020												2021						
		Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май		
Утверждение темы магистерской диссертации	7																							
Согласование плана работ	7																							
Литературный обзор	138																							
Обработка полученных данных и обсуждение результатов	292																							
Написание отчета	162																							



- Федоров И.Е



- Чернякова Е.С, Федоров И.Е

#### 4.4 Бюджет научного исследования

При планировании бюджета научного исследования должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов планируемых расходов, необходимых для его выполнения. В процессе формирования бюджета, планируемые затраты сгруппированы по статьям. В данном исследовании выделены следующие статьи:

1. Сырье, материалы, покупные изделия и полуфабрикаты;
2. Специальное оборудование для научных работ;
3. Заработная плата;
4. Отчисления на социальные нужды;
5. Научные и производственные командировки;
6. Оплата работ, выполняемых сторонними организациями и предприятиями;
7. Накладные расходы.

*Сырье, материалы, покупные изделия и полуфабрикаты (за вычетом отходов).* В эту статью включаются затраты на приобретение всех видов материалов, комплектующих изделий и полуфабрикатов, необходимых для выполнения работ по данной теме (таблица 23).

Таблица 23 – Расчет затрат по статье «Сырье и материалы»

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена на ед., руб.	$k_T$	Затраты на материалы, (З <sub>м</sub> ), руб.
Бумага	уп.	1	265	0,2	318
Ручка	шт.	7	30		252
Тетрадь	шт.	2	15		36
Карандаш	шт.	3	30		108
Картридж для принтера	шт.	1	1300		1560
<b>Итого:</b>					<b>2274</b>

*Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ.* В данную статью включены все затраты, связанные с приобретением специального оборудования, необходимого для проведения работ по теме НИР (таблица 24).

Таблица 24 – Расчет затрат по статье «Спецоборудование для научных работ»

№ п/п	Наименование оборудования	Кол-во единиц оборудования	Общая стоимость оборудования, руб.
1.	Персональный компьютер	1	11 000
2.	Программное обеспечение Microsoft Office	1	6000
3.	Программное обеспечение Testir-Kinef	1	6000
4.	Принтер HP	1	2 000
<b>Итого:</b>			<b>25 000</b>

*Расчет основной заработной платы.* В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, рабочих макетных мастерских и опытных производств, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы оплаты труда. Расчет основной заработной платы сводится в таблице 14.

$$C_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп}$$

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

$Z_{доп}$  – дополнительная заработная плата

Основная заработная плата ( $Z_{осн}$ ) руководителя (лаборанта, инженера) от предприятия (при наличии руководителя от предприятия) рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_{раб}$$

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

$T_{раб}$  – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.;

$Z_{дн}$  – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:



$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}}$$

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

$M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

при отпуске в 28 раб. дня  $M = 11,2$  месяца, 5-дневная неделя;

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

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

Расчет заработной платы научно – производственного и прочего персонала проекта проводили с учетом работы 2-х человек – научного руководителя и исполнителя. Баланс рабочего времени исполнителей представлен в таблице 25.

Таблица 25 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Магистрант
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней		
- выходные дни	44	48
- праздничные дни	14	14
Потери рабочего времени		
- отпуск	48	28
- невыходы по болезни	3	2
Действительный годовой фонд рабочего времени	256	273

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{б}} * (k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) * k_{\text{р}}, \text{ где}$$

$Z_{\text{б}}$  – базовый оклад, руб.;

$k_{\text{пр}}$  – премиальный коэффициент (определяется Положением об оплате труда);

$k_{\text{д}}$  – коэффициент доплат и надбавок;

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

При расчете заработной платы научно-производственного и прочего персонала проекта учитывались месячные должностные оклады работников, которые рассчитывались по формуле:

$$Z_m = Z_b * K_p, \text{ где}$$

$Z_b$  – базовый оклад, руб.;

$K_p$  – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Согласно информации сайта Томского политехнического университета, должностной оклад (ППС) доцента кандидата наук в 2021 году без учета РК составил 33664 руб. Расчет основной заработной платы приведен в таблице 26.

Таблица 26 – Расчет основной заработной платы

Исполнители	$Z_b$ , руб.	$k_{пр}$	$k_d$	$k_p$	$Z_m$ , руб.	$Z_{дн}$ , руб.	$T_p$ , раб. дн.	$Z_{осн}$ , руб.
Руководитель	33664	1	0,02	1,3	44638	1813	256	464128
Магистрант	2100	-	-	1,3	2730	112	273	30576

*Дополнительная заработная плата научно-производственного персонала.*

В данную статью включается сумма выплат, предусмотренных законодательством о труде, например, оплата очередных и дополнительных отпусков; оплата времени, связанного с выполнением государственных и общественных обязанностей; выплата вознаграждения за выслугу лет и т.п. (в среднем – 12 % от суммы основной заработной платы).

Дополнительная заработная плата рассчитывается исходя из 10-15% от основной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнении темы:

$$Z_{доп} = Z_{осн} * k_{доп}, \text{ где}$$

$Z_{доп}$  – дополнительная заработная плата, руб.;

$k_{доп}$  – коэффициент дополнительной зарплаты;

$Z_{осн}$  – основная заработная плата, руб.

В таблице 27 приведена форма расчёта основной и дополнительной заработной платы.

Таблица 27 – Заработная плата исполнителей НИИ

Заработная плата	Руководитель	Магистрант
Основная зарплата	464128	30576
Дополнительная зарплата	55695	3669
Итого по статье С <sub>зп</sub>	<b>519823</b>	<b>34245</b>

*Отчисления на социальные нужды.* Статья включает в себя отчисления во внебюджетные фонды.

$$C_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} * (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}), \text{ где}$$

$k_{\text{внеб}}$  – коэффициент отчисления на уплату во внебюджетные фонды.

На 2014 г. в соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 № 212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%. На основании пункта 1 ст.58 закона №212-ФЗ для учреждений, осуществляющих образовательную и научную деятельность в 2014 году водится пониженная ставка – 27,1 %. Стипендиальные выплаты студентам, магистрам и аспирантам не облагаются налогом.

Отчисления на социальные нужды составляют:

$$C_{\text{внеб}} = 0,3 * (464128 + 55695) = 155947 \text{ рублей}$$

*Научные и производственные командировки.* В эту статью включаются расходы по командировкам научного и производственного персонала, связанного с непосредственным выполнением конкретного проекта, величина которых принимается в размере 10% от основной и дополнительной заработной платы всего персонала, занятого на выполнении данной темы.

Затраты на научные и производственные командировки составляют 55408 руб.

*Накладные расходы.* Расчет накладных расходов провели по следующей формуле:

$$C_{\text{накл}} = k_{\text{накл}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}) = 0,8 \cdot (519823 + 34245) = 443254$$

где  $k_{\text{накл}}$  – коэффициент накладных расходов принят 0,8.

Таблица 28 – Затраты научно-исследовательской работы

Вид исследования	Затраты по статьям									
	Сырье, материалы (за вычетом возвратных отходов), покупные изделия и полуфабрикаты	Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	Основная заработная плата	Дополнительная заработная плата	Отчисления на социальные нужды	Научные и производственные командировки	Оплата работ, выполняемых сторонними организациями и предприятиями	Прочие прямые расходы	Накладные расходы	Итого плановая себестоимость
Данное исследование	2274	25000	494704	59364	155947	55408	-	-	443254	<b>1235951</b>
Аналог	3500	56300	714562	85747	240093	80031	-	-	640247	<b>1820480</b>

Таким образом, затраты проекта составляет 1235951 которые приведены в таблице 28.

#### 4.4.1 Организационная структура проекта

Данный проект представлен в виде проектной организационной структуры. Проектная организационная структура проекта представлена на рисунке 23.



Рисунок 23 – Проектная структура проекта

#### 4.4.2 План управления коммуникациями проекта

План управления коммуникациями отражает требования к коммуникациям со стороны участников проекта (таблица 29).

Таблица 29 – План управления коммуникациями

№ п/п	Какая информация передается	Кто передает информацию	Кому передается информация	Когда передает информацию
1.	Статус проекта	Исполнитель	Руководителю	Еженедельно (понедельник)
2.	Обмен информацией о текущем состоянии проекта	Исполнитель	Руководителю	Ежемесячно (конец месяца)
3.	Документы и информация по проекту	Исполнитель	Руководителю	Не позже сроков графиков и к. точек
4.	О выполнении контрольной точки	Исполнитель	Руководителю	Не позже дня контрольного события по плану управления

#### 4.4.3 Реестр рисков проекта

Идентифицированные риски проекта включают в себя возможные неопределенные события, которые могут возникнуть в проекте и вызвать последствия, которые повлекут за собой нежелательные эффекты.

Информация по возможным рискам сведена в таблицу 30.

Таблица 30 – Реестр рисков

№	Риск	Вероятность наступления	Влияние риска	Уровень риска	Способы смягчения риска	Условия наступления
1	Неточность расчётов основных параметров	1	5	Низкий	Пересчёт, проверка полученных результатов	Невнимательность, спешка
2	Ошибка в составлении мат. модели	3	5	Средний	Более детальный подход к работе, внимательность к деталям	Сбой в расчетах ПО
3	Отсутствие интереса потребителей к результатам исследования	2	5	Низкий	Привлечение предприятий, публикация результатов	Отсутствие результатов исследования

#### 4.5 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности

##### 4.5.1 Оценка абсолютной эффективности исследования

В основе проектного подхода к инвестиционной деятельности предприятия лежит принцип денежных потоков. Особенностью является его прогнозный и долгосрочный характер, поэтому в применяемом подходе к анализу учитываются фактор времени и фактор риска. Для оценки общей экономической эффективности используются следующие основные показатели:

- чистая текущая стоимость (NPV);
- индекс доходности (PI);
- внутренняя ставка доходности (IRR);
- срок окупаемости (DPP).

Чистая текущая стоимость (NPV) – это показатель экономической эффективности инвестиционного проекта, который рассчитывается путём дисконтирования (приведения к текущей стоимости, т.е. на момент инвестирования) ожидаемых денежных потоков (как доходов, так и расходов).

Расчёт NPV осуществляется по следующей формуле:

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{ЧДП_{опt}}{(1+i)^t} - I_0$$

где: ЧДП<sub>опt</sub> – чистые денежные поступления от операционной деятельности;

$I_0$  – разовые инвестиции, осуществляемые в нулевом году;

$t$  – номер шага расчета ( $t= 0, 1, 2 \dots n$ )

$n$  – горизонт расчета;

$i$  – ставка дисконтирования (желаемый уровень доходности инвестируемых средств).

Расчёт NPV позволяет судить о целесообразности инвестирования денежных средств. Если  $NPV > 0$ , то проект оказывается эффективным.

Расчет чистой текущей стоимости представлен в таблице 31. При расчете рентабельность проекта составляла 20 %, амортизационные отчисления 10 %.

Таблица 31 – Расчет чистой текущей стоимости по проекту в целом

№	Наименование показателей	Шаг расчета				
		0	1	2	3	4
1	Выручка от реализации, руб.	0	1483141	1483141	1483141	1483141
2	Итого приток, руб.	0	1483141	1483141	1483141	1483141
3	Инвестиционные издержки, руб.	-1235951	0	0	0	0
4	Операционные затраты, руб.	0	432582,85	432582,85	432582,85	432582,85
5	Налогооблагаемая прибыль(1-4)	0	1050558,15	1050558,15	1050558,15	1050558,15
6	Налоги 20 %, руб.(5*20%)	0	210111,63	210111,63	210111,63	210111,63

Продолжение таблицы 31

7	Чистая прибыль, руб.(5-6)	0	840446,52	840446,52	840446,52	840446,52
8	Чистый денежный поток (ЧДП), руб.(чистая прибыль+амортизация)	-1235951	842946,52	842946,52	842946,52	842946,52
9	Коэффициент дисконтирования (КД)	1,0	0,909	0,826	0,751	0,683
10	Чистый дисконтированный денежный поток (ЧДД), руб.(8*9)	-1235951	766238,38	696273,83	633052,84	531056,31
11	$\sum$ ЧДД		2626621,36			
12	<b>Итого NPV, руб.</b>		<b>1390670,36</b>			

Коэффициент дисконтирования рассчитан по формуле:

$$КД = \frac{1}{(1 + i)^t}$$

где:  $i$  – ставка дисконтирования, 10 %;

$t$  – шаг расчета.

Таким образом, чистая текущая стоимость по проекту в целом составляет 1390670,36 рублей, что позволяет судить об его эффективности.

*Индекс доходности (PI)* – показатель эффективности инвестиции, представляющий собой отношение дисконтированных доходов к размеру инвестиционного капитала. Данный показатель позволяет определить инвестиционную эффективность вложений в данный проект. Индекс доходности рассчитывается по формуле:

$$PI = \sum_{t=1}^n \frac{ЧДП_t}{(1+i)^t} / I_0$$

где: ЧДД - чистый денежный поток, руб.;

$I_0$  – начальный инвестиционный капитал, руб.

Таким образом PI для данного проекта составляет:

$$PI = \frac{2626621,36}{1235951} = 2,13$$

Так как  $PI > 1$ , то проект является эффективным.



*Внутренняя ставка доходности (IRR)*. Значение ставки, при которой обращается в нуль, носит название «внутренней ставки доходности» или IRR. Формальное определение «внутренней ставки доходности» заключается в том, что это та ставка дисконтирования, при которой суммы дисконтированных притоков денежных средств равны сумме дисконтированных оттоков или =0. По разности между IRR и ставкой дисконтирования  $i$  можно судить о запасе экономической прочности инвестиционного проекта. Чем ближе IRR к ставке дисконтирования  $i$ , тем больше риск от инвестирования в данный проект.

Между чистой текущей стоимостью (NPV) и ставкой дисконтирования ( $i$ ) существует обратная зависимость. Эта зависимость представлена в таблице 32 и на рисунке 24.

Таблица 32 – Зависимость NPV от ставки дисконтирования

№	Наименование показателя	0	1	2	3	4	NPV, руб.
1	Чистые денежные потоки, руб.	-1235951	842946,52	842946,52	842946,52	842946,52	
2	Коэффициент дисконтирования						
	0,1	1	0,909	0,826	0,751	0,683	
	0,2	1	0,833	0,694	0,578	0,482	
	0,3	1	0,769	0,592	0,455	0,350	
	0,4	1	0,714	0,510	0,364	0,260	
	0,5	1	0,667	0,444	0,295	0,198	
	0,6	1	0,625	0,390	0,244	0,153	
	0,7	1	0,588	0,335	0,203	0,112	
	0,8	1	0,556	0,309	0,171	0,095	
	0,9	1	0,526	0,277	0,146	0,077	
	1	1	0,500	0,250	0,125	0,062	
3	Дисконтированный денежный поток, руб.						
	0,1	-1235951	766238,4	696273,8	633052,8	575732,5	1435347
	0,2	-1235951	702174,5	585004,9	487223,1	406300,2	944751,6
	0,3	-1235951	648225,9	499024,3	383540,7	295031,3	589871,2
	0,4	-1235951	601863,8	429902,7	306832,5	219166,1	321814,2
	0,5	-1235951	562245,3	374268,3	248669,2	166903,4	116135,2
	0,6	-1235951	526841,6	328749,1	205679	128970,8	-45710,5
	0,7	-1235951	495652,6	282387,1	171118,1	94410,01	-192383
	0,8	-1235951	468678,3	260470,5	144143,9	80079,92	-282578
	0,9	-1235951	443389,9	233496,2	123070,2	64906,88	-371088
	1,0	-1235951	421473,3	210736,6	105368,3	52262,68	-446110

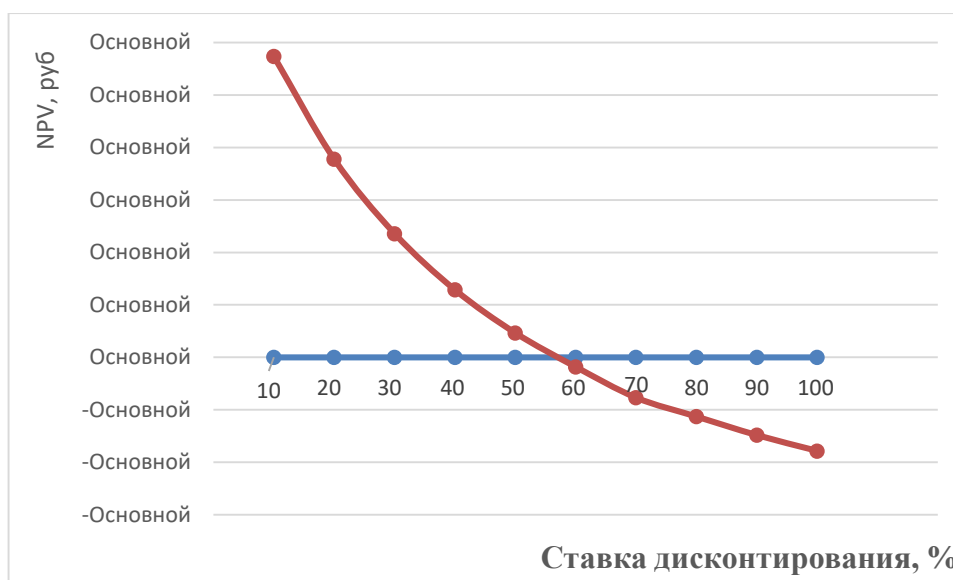


Рисунок 24 – Зависимость NPV от ставки дисконтирования

Из таблицы и графика следует, что по мере роста ставки дисконтирования чистая текущая стоимость уменьшается, становясь отрицательной. Значение ставки, при которой NPV обращается в нуль, носит название «внутренней ставки доходности» или «внутренней нормы прибыли». Из графика получаем, что IRR составляет 0,57.

Запас экономической прочности проекта:  $57\% - 20\% = 37\%$

*Дисконтированный срок окупаемости.* Как отмечалось ранее, одним из недостатков показателя простого срока окупаемости является игнорирование в процессе его расчета разности ценности денег во времени.

Этот недостаток устраняется путем определения дисконтированного срока окупаемости. То есть это время, за которое денежные средства должны совершить оборот.

Наиболее приемлемым методом установления дисконтированного срока окупаемости является расчет кумулятивного (нарастающим итогом) денежного потока (таблица 33).

Таблица 33 – Дисконтированный срок окупаемости

№	Наименование показателя	Шаг расчета				
		0	1	2	3	4
1	Дисконтированный чистый денежный поток ( $i = 0,20$ ), руб.	-1235951	766238,38	696273,83	633052,84	531056,31
2	То же нарастающим итогом, руб.	-1235951	-469712,62	226561,21	859614,05	1390670,36
3	Дисконтированный срок окупаемости	<b><math>PP_{дск} = 1 + (469712,62 / 696273,83) = 1,67</math></b> года				

Социальная эффективность научного проекта учитывает социально-экономические последствия осуществления научного проекта для общества в целом или отдельных категорий населения или групп лиц, в том числе как непосредственные результаты проекта, так и «внешние» результаты в смежных секторах экономики: социальные, экологические и иные внеэкономические эффекты (таблица 34).

Таблица 34 – Критерии социальной эффективности

ДО	ПОСЛЕ
Отсутствие информации об эффективности использования катализаторов процесса реформинга, а также их основных параметров	Получены данные по каждому из типов катализаторов и рассчитаны все основные параметры
Отсутствие математической модели, необходимой для прогнозирования протекания процесса каталитического реформинга	Разработана математическая модель и спрогнозировано протекание процесса каталитического реформинга

#### 4.5.2 Оценка сравнительной эффективности 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 соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется по следующей формуле:

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

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

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

$\Phi_{\text{max}}$  – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение бюджета затрат разработки в размах (значение больше единицы), либо соответствующее численное удешевление стоимости разработки в размах (значение меньше единицы, но больше нуля).

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить по следующей формуле:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i$$

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

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

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

$n$  – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности приведен в форме таблицы (таблица 35).

Таблица 35 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии \ ПО	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Аналог 1	Аналог 2
1. Выход продукта)	0,20	5	3	4
2. Удобство в эксплуатации	0,15	5	3	3
3. Надежность	0,15	4	4	4
4. Безопасность	0,15	4	3	4
5. Простота эксплуатации	0,15	4	4	5
6. Возможность автоматизации данных	0,20	5	4	3
Итого	1	27	21	23

$$I_m^p = 5 \cdot 0,20 + 5 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,20 = 4,55$$

$$I_1^A = 3 \cdot 0,20 + 3 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,15 + 3 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,20 = 3,50$$

$$I_2^A = 4 \cdot 0,20 + 3 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,15 + 3 \cdot 0,20 = 3,80$$

Интегральный показатель эффективности разработки  $I_{финр}^p$  и аналога  $I_{финр}^a$  определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{финр}^p = \frac{I_m^p}{I_{ф}^p}; I_{финр}^a = \frac{I_m^a}{I_{ф}^a}$$

Сравнение интегрального показателя эффективности текущего проекта и аналогов позволит определить сравнительную эффективность проекта. Сравнительная эффективность проекта определяется по формуле:

$$\mathcal{E}_{ср} = \frac{I_{финр}^p}{I_{финр}^a}$$

где:  $\mathcal{E}_{ср}$  – сравнительная эффективность проекта;

$I_{финр}^p$  – интегральный показатель разработки;

$I_{\text{финр}}^a$  – интегральный технико-экономический показатель аналога.

Сравнительная эффективность разработки по сравнению с аналогами представлена в таблице 36.

Таблица 36 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Разработка	Аналог 1	Аналог 2
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,68	0,61	0,52
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,55	3,50	3,80
3	Интегральный показатель эффективности	6,69	5,73	7,3
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,17	1,16	0,91

**Вывод по разделу:** Сравнение значений интегральных показателей эффективности позволяет понять, что разработанный вариант проведения проекта является наиболее эффективным при решении поставленной в магистерской диссертации технической задачи с позиции финансовой и ресурсной эффективности.

В ходе выполнения раздела финансового менеджмента определена чистая текущая стоимость, (NPV), равная 1390670,36 руб.; индекс доходности  $PI=2,13$ , внутренняя ставка доходности  $IRR=57\%$ , срок окупаемости  $PP_{дск}=1,67$  года.

Таким образом мы имеем ресурсоэффективный проект с высоким запасом финансовой прочности и коротким сроком окупаемости.

## **5. Социальная ответственность**

### **Введение**

В данном разделе магистерской диссертации объектом исследования является процесс каталитического риформинга нефтяного сырья и его катализаторы.

Процесс каталитического риформинга позволяет получать высокооктановые бензины из низкооктановых. Во время протекания процесса катализатор должен поглощать металлы и другие примеси, содержащиеся в сырье.

Рабочим местом является компьютер с установленными программным обеспечением (ПО Testir\_Kinef и Microsoft Office) в НИ ТПУ. С помощью данных программ были рассчитаны основные параметры различных типов катализаторов. Разработанная математическая модель может использоваться на промышленной установке для прогнозирования выбора катализатора при текущем режиме, а также для определения оптимальных параметров процесса в зависимости от состава сырья.

Целью раздела является анализ опасных и вредных факторов, существующих на промышленной установке при неправильном ведении технологического процесса, анализ мероприятий по ограничению воздействия этих опасных и вредных факторов на рабочий персонал, создание безопасных условий труда, перечисление организационных и технических мер, предусмотренных для чрезвычайных ситуаций, а также изучения вопроса обеспечения экологической безопасности.

Область применения данного исследования с глобальной стороны затрагивает все географические районы Российской Федерации, нуждающиеся в получении продуктов высокого качества при протекании процесса риформинга.

## **5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**

Работе на установке каталитического риформинга бензинов относится к вредному для здоровья рабочего персонала производству, это связано с тем, что целью процесса риформинга является переработка нефтепродуктов и получение продуктов, обладающих токсическим действием на организм человека.

К работе с вредными (особо вредными), опасными (особо опасными) условиями труда не допускаются лица, не достигшие восемнадцатилетнего возраста.

Также запрещается работа женщинам с вредными (особо вредными), опасными (особо опасными) условиями труда.

При первичном трудоустройстве и приёме на работу с вредными (особо вредными), опасными (особо опасными) условиями труда необходимо проведение обязательных медицинских осмотров работников.

Согласно Трудовому Кодексу РФ (статья 219), лица, занятые на работах с вредными и опасными условиями труда, должны получать определенные гарантии и компенсации. Они, в свою очередь, устанавливаются Трудовым Кодексом РФ, коллективным договором, соглашением, локальными актами, трудовым договором с работодателем. Размер компенсации, порядок и условия прописаны в статьях 92, 117 и 147 ТК РФ.

Продолжительность рабочего времени для сотрудников, занятых на вредном производстве, не должна быть более 36 часов в неделю. Для каждого конкретного сотрудника это время устанавливается трудовым договором после проведения специальной оценки условий труда. Допускается увеличение рабочего времени до 40 часов в неделю, но только с письменного согласия работника, прописанного в трудовом договоре. При этом сотруднику полагается денежная компенсация, которая по размеру соответствует отраслевым или межотраслевым соглашениям. При 36-часовой рабочей неделе смена не должна длиться более 8-ми часов, а при 30-часовой – на ежедневный труд должно



отводиться максимум 6 часов. Опять же с согласия работника длительность смены может быть увеличена до 12 и 8 часов соответственно.

В статье 117 ТК РФ указано, что лица, работающие на предприятиях с вредными и опасными условиями труда, имеют право рассчитывать на получение дополнительного оплачиваемого отпуска. Его максимальная продолжительность не превышает 7 дней. По письменному соглашению работодателя с работником отпуск можно заменить денежной компенсацией. Ее размер устанавливается также отраслевыми (межотраслевыми) соглашениями и коллективными договорами.

Руководство предприятия обязано обеспечить своих сотрудников всеми средствами, которые необходимы для соблюдения требований по охране труда и безопасности. Работодатель должен закупить, а также обеспечить хранение, ремонт, стирку средств индивидуальной защиты [52].

### **5.1.1 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя**

Экспериментальная часть работы магистра осуществлялась в компьютерном классе отделения химической инженерии Томского политехнического университета, оборудованном системами отопления, кондиционирования воздуха и естественным и искусственным освещением.

При компоновке рабочей зоны обязательно нужно учитывать различные факторы, способные оказать влияние на человека. В помещении компьютерного класса обязательно должна быть хорошая вентиляционная система. Также, в рабочей зоне необходимо хорошее естественное и искусственное освещение, рассчитанное с учётом размеров помещения. Все персональные компьютеры и МФУ должны отвечать требованиям техники пожарной безопасности, помимо этого они должны иметь изоляцию и заземление. Для хранения верхней одежды обязательно наличие шкафа в аудитории. Для безопасной работы и предотвращения чрезвычайных ситуаций все студенты и преподаватели обязаны

проходить обучение и инструктаж по технике безопасности и работе с оборудованием.

## 5.2 Производственная безопасность

Персонал, работающий на установке каталитического риформинга бензинов, выполняет работу, связанную с токсичными и вредными веществами, повышенным уровнем шума и запыленностью, и предполагает для персонала специальную оценку условий труда.

В соответствии с ГОСТ 12.0.003-2015 «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация» перечень опасных и вредных факторов, характерных для рабочей среды представлены в таблице 37 [53].

Таблица 37 – Опасные и вредные факторы по ГОСТ 12.0.003-2015

Источник фактора (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разработка	Изготовление	Эксплуатация	
Акустические колебания в производственной среде (повышенный уровень шума)		+	+	ГОСТ 12.1.003- 2014 Шум. Общие требования безопасности.
Микроклиматические параметры воздушной среды (температура, относительная влажность воздуха, запыленность воздуха, загазованность воздуха)	+	+	+	Параметры безопасности труда устанавливаются ГОСТ 12.4.011-89.

Продолжение таблицы 28

Световая среда (отсутствие или недостаток естественного/искусственного освещения)		+	+	ГОСТ Р 55710-2013. Освещение рабочих мест внутри зданий. Нормы и методы измерений
Опасные или вредные производственные факторы связанные с электрическим током, вызываемым разницей электрических потенциалов, под действие которого попадает рабочий	+	+	+	ГОСТ 12.1.019-2017 Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.
Токсические вещества	+	+	+	ГН 2.2.5.3532-18. Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны.

*Акустические колебания в производственной среде (повышенный уровень шума)*

На установке каталитического риформинга основными источниками шума, как правило, являются блочные насосные станции, вытяжная вентиляция и трубчатые печи.

Длительное воздействие шума способно привести к развитию у работника потери слуха, увеличению риска артериальной гипертензии, болезней сердечнососудистой, нервной системы и др.

В соответствии с ГОСТ 12.1.003-2014 уровень шума не должен превышать 80 дБ. [56]

Перечень основных организационных мероприятий по борьбе с шумом представлен ниже:

- ✓ Размещение оборудования, являющегося источником шума, в отдельных помещениях;
- ✓ Расположение цехов с повышенным уровнем шума отдельно от малошумных помещений;
- ✓ Применение средств индивидуальной защиты органов слуха от шума, проведение санитарно – профилактических мероприятий для рабочего персонала.

Средствами индивидуальной защиты являются ушные вкладыши (беруши), наушники.

*Микроклиматические параметры воздушной среды (температура, относительная влажность воздуха, запыленность воздуха, загазованность воздуха)*

В состав нефти и нефтепродуктов входят легкоиспаряющиеся вещества, опасные для здоровья и жизни человека.

По степени воздействия на организм человека нефть относится к 3-му классу опасности в соответствии с ГОСТ 12.1.007-76 [54].

Влияние и воздействия на организм человека:

Нефть и нефтепродукты содержат легкоиспаряющиеся вещества, вредные и опасные для здоровья людей, а также серосодержащие, азотсодержащие и кислородсодержащие компоненты.

При контакте кожи с нефтью и нефтепродуктами появляется сухость, пигментация и стойкая эритема, а также возможно образование угрей, различных бородавок и тд.

Отравление парами нефти способно вызвать поовышенную возбудимость центральной нервной системы, снижение давления и обоняния.

Для предотвращения отравления при работе на нефтеперерабатывающем производстве применяют средства индивидуальной защиты (СИЗ) по ГОСТ 12.4.011-89 [55], ГОСТ 12.4.103-2020.

Для индивидуальной защиты людей в местах, где концентрация паров нефти превышает ПДК, применяют в работе противогазы марки БКФ, шланговые противогазы марки ПШ-1 или аналогичные в соответствии с ГОСТ 12.4.034-2017.

Для защиты кожи руки применяются защитные мази и пасты, а также перчатки и рукавицы.

Для защиты органов зрения применяются защитные очки.

Места возможного выделения химических веществ в воздух рабочей зоны оборудованы местными вытяжными устройствами.

#### *Световая среда*

*(отсутствие или недостаток естественного/искусственного освещения)*

Правильная организация освещения на рабочем месте обеспечивает сохранность зрения оператора и нормальное состояние его нервной системы, здоровья в целом. Также хорошее и правильное освещение способствует безопасной работе оператора и ведению им технологического процесса.

На рабочем месте необходимо проведение нормированного искусственного освещения с использованием необходимых ламп по шкале освещенности. Для общего освещения производственных помещений следует

использовать светодиодные лампы и энергоэффективные разрядные источники света.

В качестве искусственного освещения используются люминесцентные лампы ЛБ – белого цвета или ЛТБ – тепло-белого цвета, мощностью 20,40 или 60 Вт.

На производстве, где осуществляется постоянное наблюдение за ходом производственного процесса, освещенность при системе общего освещения составляет 300 лк, коэффициент естественного освещения при верхнем или комбинированном освещении равен 3%.

Рекомендуемая освещенность при работе оператора с контрольно-измерительными приборами и автоматикой, а также работой над сменными журналами и документацией должна составлять 400 лк. [57]

Рекомендуемое значение яркости в поле зрения оператора должно лежать в пределах 2,5 %.

*Опасные или вредные производственные факторы связанные с электрическим током, вызываемым разницей электрических потенциалов, под действие которого попадает рабочий*

Чтобы протекание технологического процесса было безопасным и бесперерывным, необходимо создать благоприятные условия труда для рабочего персонала, связанного с работой на установке каталитического риформинга.

При нарушении правил эксплуатации или неисправностей электрооборудования возникает опасность воздействия электрического тока на человека. Электробезопасность обеспечивается в соответствии с ГОСТ 12.1.019-2017 [58] и относится к особо опасной категории.

Источниками электрической опасности чаще всего являются:

- ✓ оголенные части проводов или отсутствие изоляции на них;
- ✓ отсутствие или нарушение заземления на оборудовании;
- ✓ замыкание электрических цепей;
- ✓ скачки статического напряжения;

Во избежание травм и несчастных случаев в качестве защиты рабочему персоналу предоставляется специальная одежда: диэлектрические перчатки, обувь без металлических вставок и набоек. Все ремонтные и профилактические работы, связанные с электрооборудованием и электрическими сетями необходимо проводить при отключенной электросети.

Электробезопасность работающего персонала должна обеспечиваться выполнением следующих мероприятий [58]:

- ✓ Соблюдение соответствующих расстояний до токоведущих частей;
- ✓ Изоляция токопроводимых частей;
- ✓ Применение защитной блокировки аппаратов и ограждающих устройств для предотвращения ошибочных операций и доступа к токоведущим частям;
- ✓ Использование предупреждающей сигнализации, надписей и плакатов;
- ✓ Применение устройств для снижения напряженности электрических и магнитных полей до допустимых значений;
- ✓ Использование средств индивидуальной защиты.

### *Токсические вещества*

Основными вредными веществами на промышленной установке каталитического риформинга, оказывающие влияние как на атмосферу, так и на рабочий персонал, являются углеводородные газы, катализаторная пыль, МТБЭ, метанол, сернистый ангидрид, окись углерода, окислы азота и сероводород.

Согласно ГН 2.2.5.3532-18 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны» установлены следующие величины ПДК в рабочей зоне [62]:

Таблица 38 – Предельно допустимые концентрации вредных веществ в воздухе рабочей зоны

Наименование вредного вещества	ПДК в рабочей зоне, мг/м <sup>3</sup>
Катализаторная пыль кат.риформинга	6/2
Сернистый ангидрид	10
Дигидросульфид (сероводород)	10
Окислы азота	5
Метанол	15/5
Углеводороды алифатические предельные C <sub>1</sub> -C <sub>10</sub>	900/300
2-метокси-2-метилпропан (МТБЭ)	300/100
Натрия гидроокись	0,5
Моноэтаноламин (МЭА)	0,5
Углеводороды непредельные C <sub>2</sub> -C <sub>5</sub>	300/100

### 5.2.1 Расчет искусственного освещения

Источники света, применяемые для искусственного освещения, делят на две группы - газоразрядные лампы и лампы накаливания. Для общего освещения, как правило, применяются газоразрядные лампы как энергетически более экономичные и обладающие большим сроком службы. Наиболее распространёнными являются люминесцентные лампы. В операторной и насосной, в качестве искусственного освещения, используются лампы дневного света (ЛД).



Таблица 39 – Основные характеристики люминесцентных ламп

Мощность, Вт	Напряжение сети, В	Световой поток ЛД, лм
15	127	700
20	127	880
30	220	1650
40	220	2300
65	220	3750
80	220	4250
125	220	-

Интегральным критерием оптимальности расположения светильников является величина  $\lambda = L/h$ , характеризующая наилучшее относительное расстояние между светильниками. Уменьшение  $\lambda$  удорожает устройство и обслуживание освещения, а чрезмерное увеличение ведёт к резкой неравномерности освещённости. В таблице 40 приведены значения  $\lambda$  для разных светильников.

Таблица 40 – Наилучшее расположение светильников

Наименование светильников	$\lambda$
Люминесцентные с защитной решеткой ОДР, ОДОР, ШЛД, ШОД	1,1-1,3
Люминесцентные без защитной решетки типов ОД, ОДО	1,4
ПВЛ	1,5
ГС, ЛЦ	1,6
У, ПУ с отражателем	1,8

Продолжение таблицы 40

ШМ,ПУ без отражателя, плафоны	2,3
СЗ-4-ДРЛ	1,0

Помещение, с размерами: длина  $A = 25$  м; ширина  $B = 12$  м;  $H = 5$  м.

Высота рабочей поверхности  $h_{pn} = 1$  м. Требуется создать освещение  $E = 300$  лк. Коэффициент отражения стен  $R_c = 70\%$ , потолка  $R_n = 50\%$ .

Коэффициент запаса,  $k = 1,5$ , коэффициент неравномерности  $Z = 1,1$ .

Расстояние между светильниками  $L$  определяется:

$$L = \lambda * h = 1,2 * 3,5 = 4,2 \text{ м}$$

где  $h$  – расчетная высота светильника над рабочей поверхностью, рассчитанная по формуле:

$$h = (H - h_c) - h_{pn} = (5 - 0,5) - 1 = 3,5 \text{ м.}$$

где  $H$  – высота помещения;

$h_c$  – расстояние светильника от перекрытия;

$h_{pn}$  – высота рабочей поверхности над полом.

Количество рядов светильников с люминесцентными лампами определяется по формуле:

$$n_{\text{ряд}} = \frac{(B - \frac{2}{3} * L)}{L} + 1 = \frac{12 - \frac{2}{3} * 4,2}{4,2} + 1 = 3,19$$

где  $n_{\text{ряд}}$  – количество рядов;

$B$  – ширина помещения;

$L$  – расстояние между рядами светильников.

Количество светильников с люминесцентными лампами определяется по формуле:

$$n_{\text{св}} = \frac{(A - \frac{2}{3} * L)}{l_{\text{св}} + 0,5} = \frac{25 - \frac{2}{3} * 4,2}{1,23 + 0,5} = 12,83, \text{ примем} = 13.$$

где  $n_{\text{св}}$  – количество светильников в ряду;

$A$  – длина помещения, м;

$l_{\text{св}}$  – длина светильника, м.

Размещаем светильники в 3 ряда. В каждом ряду можно установить 13 светильников типа ОДР мощностью 40 Вт (с длиной 1,23 м), при этом разрывы между светильниками в ряду составят 50 см. Учитывая, что в каждом светильнике установлено 2 лампы, общее число ламп в помещении  $N_{\text{л}}=78$ .

Находим индекс помещения:

$$i = S / (h * (A+B)) = 300 / (3,5 * (25+12)) = 2,32$$

По таблице определяем коэффициент использования светового потока:

$$\eta = 0,6$$

Определяем потребный световой поток ламп в каждом из рядов:

$$\Phi = \frac{E_{\text{н}} * S * K_{\text{з}} * Z}{N_{\text{л}} * \eta} = \frac{300 * 300 * 1,5 * 1,1}{78 * 0,6} = 3173$$

Из таблицы выбираем ближайшую стандартную лампу – ЛТБ 40 Вт с потоком 2850 лм. Делаем проверку выполнения условия:

$$-10 \% \leq \frac{\Phi_{\text{л.станд}} - \Phi_{\text{л.расч}}}{\Phi_{\text{л.станд}}} * 100\% \leq +20\%$$

Получаем:

$$-10\% \leq 11,33 \% \leq +20\%$$

Определяем электрическую мощность осветительной установки:

$$P = 78 * 40 = 3120 \text{ Вт}$$

### 5.3 Экологическая безопасность

На сегодняшний день нефтедобывающая и нефтеперерабатывающая отрасли одни из самых востребованных для экономики страны, в то же время для этих отраслей свойственно негативное влияние на окружающую среду.

1. *Анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы):* По изученным данным выбросами НПЗ являются углеводороды и сернистый газ, что является загрязнением для воздушной среды.

2. *Анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы):*

Помимо положительного экономического влияния НПЗ на условия жизни населения, отходы НПЗ, попадая в водные объекты, отрицательно влияют на бытовые и санитарные условия жизни, качество воды и водопользования населения, впоследствии нанося этим и экономический ущерб народному хозяйству и даже воздействуя на другие цепочки питания и изменения ареалов проживания животных и птиц. Это связано с особенностями веществ, которые являются отходами и сбрасываемые со сточными водами НПЗ в водоемы, и, прежде всего нефти. Нефти и нефтепродукты, сбрасываемые со сточными водами: сырая нефть, мазут, бензин, керосин, бензол, толуол, ксилол, этилен [61].

3. *Анализ воздействия объекта на литосферу (отходы):*

Почва очень восприимчива к любым внешним изменениям, так как служит резервуаром, где загрязнения могут накапливаться в большом количестве. К сожалению, последнее столетие количество промышленных выбросов, поступающих в биосферу, превышает в десятки и сотни раз уровень некоторых веществ, естественно циркулирующих в ней. Загрязнение почвенного покрова происходит в результате адсорбции атмосферных выбросов, складирования и захоронения отходов производств.

Накапливаются такие выбросы, как углеводороды, нефти оксиды азота, серы, фенол, аммиак, а также тяжелые металлы, вымываемые снегом из атмосферы. При исследованиях почвы в районах вблизи размещения предприятий нефтепереработки и нефтехимии почвенный покров загрязняется нефтепродуктами и выбросами этих предприятий в радиусе до 3-х км., а по некоторым источникам и до 5 км., и глубиной до 60-80 см. [60]

Таким образом, процесс работы установки каталитического риформинга оказывает неблагоприятное воздействие во всех этапах и на все объекты окружающей среды, а именно атмосферный воздух, водные объекты, почву, загрязняя их отходами своего производства.

#### **5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

Возможными чрезвычайными ситуациями на данном рабочем месте являются:

- ✓ ЧС, связанная с авариями (пожары, взрывы, выброс вредных веществ в окружающую среду);
- ✓ ЧС, связанная со стихийными бедствиями (землетрясения, наводнения, ураганы, смерчи, снежные бури, заносы, оползни, обвалы, эпидемии, лесные и торфяные пожары);
- ✓ ЧС конфликтного характера (вооруженное нападение, волнения в отдельных районах, вызванные выступлениями экстремистских групп, применения оружия массового поражения).

Учитывая характер работы и наличие вычислительной техники в помещении (ПК, МФУ) наиболее вероятной чрезвычайной ситуацией можно выделить возникновение пожара. Пожар способен навредить здоровью и жизни людей, а также привести к порче имущества.

На рабочем месте за компьютером причинами пожара могут быть:

- токи короткого замыкания;
- отсутствие изоляции или заземления;
- неисправная работа ПК или другого вычислительного оборудования;
- неисправность электросетей;
- неправильная работа пользователей или нарушение ими техники безопасности;
- нарушение работы техники из-за больших перегрузок.

Исходя из вышесказанного, в соответствии с ГОСТ 12.1.004-91 при посещении компьютерного класса и пользовании компьютером, а также другой техникой необходимо соблюдать следующие нормы безопасности [59]:

- работать только за исправным компьютером и оборудованием;
- иметь средства первичного пожаротушения (огнетушитель);
- обеспечить возможность безопасного и беспрепятственного движения людей по эвакуационным путям;
- установить количество, размеры и соответствующее конструктивное исполнение эвакуационных путей и выходов;
- не превышать допустимую оборудованием нагрузку.

Полная изоляция проводки и кабелей, а также заземление техники и компьютеров может служить хорошим вариантом предотвращения пожара.

При обнаружении любых признаков возгорания необходимо немедленно заявить о данном факте в пожарную службу по телефонному номеру 01 или 112. Также нужно предупредить работников и персонал в соседних аудиториях, соблюдать покой и не паниковать.

Здание оборудовано датчиками автоматического пожаротушения, с помощью звуковой системы происходит оповещение всех сотрудников и студентов о немедленной эвакуации из здания. После этого необходимо направиться к выходу, следуя плану эвакуации при пожарах и других ЧС (рисунок 25).

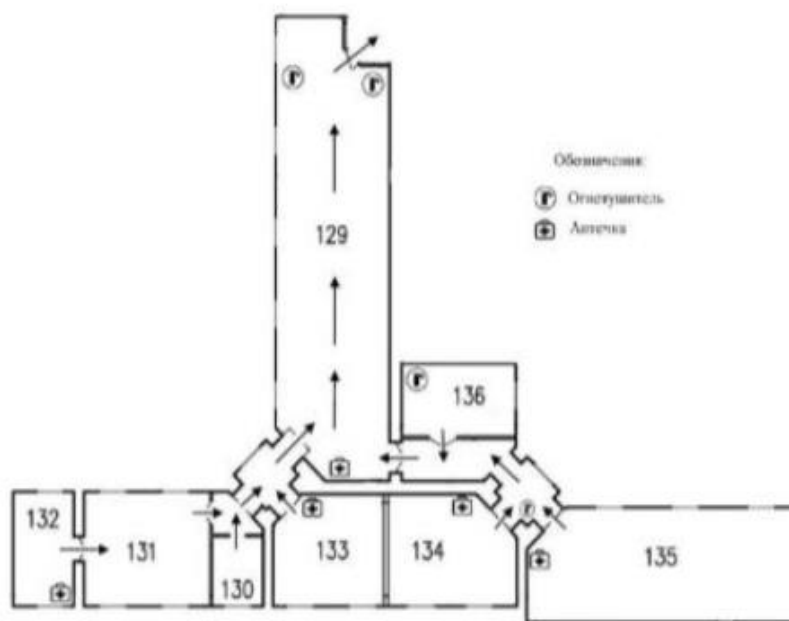


Рисунок 25 - План эвакуации при пожарах и других ЧС

## Вывод по разделу

В данном разделе, были рассмотрены основные правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности на нефтеперерабатывающем предприятии. Также был проведен анализ опасных и вредных производственных факторов на НПЗ, к которым относятся: повышенный уровень шума на рабочем месте; повышенная запыленность и загазованность воздуха рабочей зоны; средства индивидуальной защиты; повышенный уровень статистического электричества; пожаровзрывоопасность. В результате, был проведен расчёт искусственного освещения помещения работы оператора. По итогам расчёта, в операторной на установке каталитического риформинга возможно разместить 3 ряда светильников, по 13 светильников в каждом ряду, типа ОДР мощностью 40 Вт. Общее число ламп в помещении  $N_{л}=78$ . Электрическая мощность осветительной установки = 3120 Вт. Также были рассмотрены вопросы экологической безопасности и безопасности в чрезвычайных ситуациях. Таким образом, можно сделать вывод, что возникновение аварийных и чрезвычайных ситуаций на нефтеперерабатывающем предприятии может причинить большой ущерб окружающей среде. Во избежание аварийных ситуаций на всех крупных предприятиях действуют собственные службы, отвечающие за промышленную безопасность. Например, противопожарная служба, газоспасательная служба, кроме того, проходят подготовку нештатные аварийно-спасательные формирования из числа работников. Обязательно каждое предприятие должно иметь план ликвидации аварийных ситуаций, а работники регулярно проходить инструктаж, участвовать в профилактических мероприятиях. Слаженность работы персонала и обеспечение промышленной безопасности предприятия существенно влияют на исход вероятной аварии.



## Заключение

В данной работе для исследования использовалась компьютерная моделирующая система «Testir\_Kinef», разработанная на базе Томского политехнического университета. С ее помощью были определены кинетические закономерности процесса, проведен расчет основных параметров эффективности, а также мониторинг работы промышленной установки каталитического риформинга.

Объектом исследования являются промышленные платино-рениевые катализаторы риформинга различных марок. Также был проведен мониторинг установки риформинга ЛЧ-35-11/1000 с целью определения технологических параметров работы катализатора, срока его службы и прогнозирования дальнейшей работы.

Для оценки активности катализатора и степени его дезактивации были рассчитаны текущие и оптимальные параметры (рис. 1 и 2). Оптимальными параметрами принято считать такие условия работы катализатора, при которых наблюдается нормальное протекание технологического процесса на производстве.

Стоит отметить, что высокая интенсивность коксообразования в начальный период работы установки связана именно с характером подъема температуры в процессе эксплуатации.

Длительность межрегенерационного периода при переработке более лёгкого (нафтенистого) сырья выше, чем у более тяжелого (парафинистого) на 2,5 месяца (при регенерации катализатора с уровнем закоксованности 25% мас.)

В результате работы подтвердилось, что повышение температуры способствует повышению октанового числа катализата, определенное по исследовательскому методу. Повышение температуры ускоряет протекание всех реакций риформинга, это приводит как к увеличению содержания ароматических углеводородов в продукте, следовательно, к повышению его

качества, так и к увеличению содержания кокса на катализаторе, то есть уменьшению срока службы.

Выполненные расчеты по оценке потенциала катализаторов риформинга показывают достаточно высокие значения их стабильности. Оптимальная активность этих катализаторов лежит в области 0,80-0,90 отн.ед., что говорит о достаточном запасе стабильности их работы.

Анализ полученных результатов показал, что катализаторы PR-9 и R-98 обладают наибольшей закоксованностью при использовании сырья с характеристиками  $n\text{-П/и-П}=0,98$  и Парафины/(Нафтены+Арены)=1,55. Их использование при переработке высокопарафинистого сырья в исследуемом режиме работы технологической установки является малоэффективным. Наименьшей закоксованностью обладают катализаторы ПР-71 и ПР-81, а значит они смогут обеспечить оптимальную работу установки при переработке тяжелого сырья.

При исследовании другого сырья с характеристиками  $n\text{-П/и-П}=1,07$  и Парафины/(Нафтены+Арены)=0,99. Наибольшей закоксованностью обладают катализаторы PR-15 и RG-582. Их использование при переработке высоконафтенистого сырья в исследуемом режиме работы технологической установки является также малоэффективным. Наименьшей закоксованностью обладают катализаторы R-86 и RG-682, а значит они смогут обеспечить оптимальную работу установки при переработке лёгкого сырья.

Прогнозирование замены катализатора установки позволяет подобрать оптимальный технологический режим для получения качественного продукта при минимальных затратах.

Проделанные расчеты наглядно демонстрируют возможности использования математической модели процесса и основанной на ней компьютерной программы при решении разнообразных технологических задач. Подбор оптимальных технологических условий позволит оптимизировать

установку каталитического риформинга и увеличить экономичность её эксплуатации.

Также была проведена оценка коммерческой ценности разработки, определены основные потребители, также выявлены слабые места проекта и возможные угрозы, связанные с его реализацией. Для них были найдены решения на основании сильных сторон проекта и возможностей. Было проведено планирование научно-исследовательских работ. В процессе формирования бюджета НИИ были рассчитаны основные затраты по всем статьям проекта. Определение эффективности показало, что полученный вариант решения является оптимальным как с финансовой стороны, так и с позиции ресурсной эффективности.

Проанализирован характер действия при разработке и внедрению в эксплуатацию математической модели процесса риформинга на производстве. Выявлены основные вредные и опасные факторы при эксплуатации модели, как на рабочем месте, так и на производстве. Рассмотрены мероприятия по минимизации вредных выбросов в окружающую среду. А также проведен краткий обзор чрезвычайных ситуаций и мероприятия по их устранению.

## Список использованных источников

1. Ахметов С.А. Технология переработки нефти и газа: Учебное пособие для вузов / С.А. Ахметов. – Уфа: Гилем, 2012. 672 с.
2. Кузьмина Р.И. (ред.) Каталитический риформинг углеводородов [Электронный ресурс] / Р.И. Кузьмина. – Саратов: Издательство СЮИ МВД России, 2010. – 252.
3. Технологический регламент ТОО «ПНХЗ» комбинированной установки ЛК - 6УС ТОО «ПНХЗ». Секция 200 – Каталитический риформинг. №П1-02.02 СП-301 ТР-1-2-13.
4. Мейерс Р.А. (ред.) Основные процессы нефтепереработки. Справочник: пер. с англ. 3-го изд. [Электронный ресурс] / Р.А. Мейерс и др. – СПб.: ЦОП «Профессия», 2011. – 944 с.
5. Солодова Н.Л. Каталитический риформинг: учебное пособие [Электронный ресурс] / Н.Л. Солодова, А.И. Абдуллин, Е.А. Емельянычева. – Казань: Изд-во КНИТУ, 2016. – 96 с.
6. Кондрашева Н.К. (ред.) Технологические расчеты и теория каталитического риформинга бензина: Учебное пособие / Н.К. Кондрашева, Д.О.Кондрашев, К.Г. Абдульминев. – Уфа: ООО «Монография», 2008. – 160 с.
7. Abdullah M. Catalytic Naphtha Reforming: Encyclopedia of Chemical Processing [Электронный ресурс] / Abdullah M. Aitani. – New York: Taylor and Francis:, 2007. – С. 397-406.
8. James G. Speight The Refinery of the Future [Электронный ресурс] / Publishing is an imprint of Elsevier, 2011. – 416 с.
9. Кирьянов Д.И. Современное состояние процесса каталитического риформинга бензиновых фракций . Опыт производства и промышленной эксплуатации катализаторов риформинга серии ПР [Электронный ресурс] / Д.И. Кирьянов, М.Д. Смоликов, В.В. Пашков, А.Г. Проскура, Е.В. Затолкина, И.Е. Удрас, А.С. Белый // Российский хим. журн.

– 2007. - № 4. – С. 60-68. Гуреев А.А. Производство высокооктановых бензинов [Электронный ресурс] / А.А. Гуреев, Ю.М. Жоров, Е.В. Смирдович. – М.: Химия, 1981. – 224 с.

10. Бесков В.С. Общая химическая технология и основы промышленной экологии: Учебник для вузов / В.С. Бесков, В.С. Сафторонов. – М.: Химия, 1999.

– 472 с.

11. Магарил, Р.З. Теоретические основы химических процессов переработки нефти [Электронный ресурс] / Р.З. Магарил. – М.: Химия, 1976. - 311 с.

12. Маслянский Г.Н. Каталитический риформинг бензинов. Химия и технология / Г.Н. Маслянский, Р.Н. Шапиро. – Л.: Химия, 1985.-213 с.

13. Corma A. Zeolites in Oil Refining and Petrochemistry [Электронный ресурс] / Corma A., Derouane E.G., Lemos F., Naccache C., Ribeiro F.R. [Электронный ресурс] // Zeolite Microporous Solids: Synthesis, Structure, and Reactivity. NATO ASI Series (Series C: Mathematical and Physical Sciences). – 1992. с. 373-463.

14. Pieck CL, Sad MR, Parera JM. Chlorination of Pt–Re/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> during naphtha reforming [Электронный ресурс] // J Chem Tech Biotechnol 1996;67:61–6.

15. V.A. Mazzieri, C.L. Pieck, C.R. Vera, J.C. Yori, J.M. Grau Effect of Ge content on the metal and acid properties of Pt-Re-Ge/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Cl catalysts for naphtha reforming [Электронный ресурс] // Applied Catalysis A: General 353 (2009) 93–100.

16. Borgna A, Garetto TF, Apesteguia CR, Moraweck B. Formation of bimetallic alloys in naphtha reforming Pt–Ge/ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalysts: an EXAFS study [Электронный ресурс] // Appl Catal A 1999;182:189–97.

17. Vanina A. Mazzieri, Javier M. Grau, Carlos R. Vera, Juan C. Yori, Jose.

M. Parera, Carlos L. Pieck Role of Sn in Pt–Re–Sn/ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–Cl catalysts for naphtha reforming [Электронный ресурс] // Catalysis Today 107–108 (2005) 643–650.

18. L.S. Carvalho, C.L. Pieck, M.C. Rangel, N.S. Figoli, C.R. Vera, J.M. Parera Trimetallic naphtha reforming catalysts II. Properties of the acid function and influence of the order of addition of the metallic precursors on Pt-Re-Sn/ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Cl [Электронный ресурс] // Applied Catalysis A: General 269 (2004) 105–116.

19. Luciene S. Carvalhoa, Karla C.S. Conceiçãoa, Vanina A. Mazzieric, Patricio Reyesd, Carlos L. Pieckc, Maria do Carmo Rangel Pt–Re–Ge/ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalystsfor n-octane reforming: Influence of the order of addition of the metal precursors [Электронный ресурс] // Applied Catalysis A: General 419– 420 (2012) 156– 163.

20. Viswanadham N, Kamble R, Sharma A, Kumar M, Saxena AK. Effect of Re on product yields and deactivation patterns of naphtha reforming catalyst [Электронный ресурс] // J Mol Catal A: Chem 2008;282:74

21. Boutzeloit M, Benitez VM, Mazzieri VA, Especel C, Epron F, Vera CR, et al. Effect of the method of addition of Ge on the catalytic properties of Pt–Re/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Pt–Ir/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> naphtha reforming catalysts [Электронный ресурс] // Catal Commun 2006;7:627 32.

22. Epron F, Carnevillier C, Marécot P. Catalytic properties in n-heptane reforming of Pt–Sn and Pt–Ir–Sn/ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalysts prepared by surface redox reaction [Электронный ресурс] // Appl Catal A Gen 2005;295:157–69.

23. Мартынов В.Л., Луцкий Д.С., Безматерных А. Применение полиметаллических модифицированных катализаторов в процессе каталитического риформинга. Современная техника и технологии, №5, 2015.

24. Смидович Е.В. Технология переработки нефти и газа [Электронный ресурс] / Е.В. Смидович. – Ч.2. – М.: Химия, 1968. – 375 с.

25. Лич Б. (ред.) Катализ в промышленности: пер. с англ.

[Электронный ресурс] / Б. Лич, Ю. Сандерс, Э. Шлоссмахер. – М.: Мир, 1986.

26. Мухлецов И.П. Технология катализаторов / И.П. Мухленов, Е.И. Добкина, В.И. Дерюжкина, В.Е. Сороко. – СПб.: Химия, 1979. – 328 с.

27. Колесников И.М. Катализ в нефтегазовой области: Учебное пособие [Электронный ресурс] / И.М. Колесников. – М.: Издательский центр РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2013. – 484 с. Т.1: Катализ в промышленности. – 312 с.

28. Mohamed A. Fahim, Taher A. Al-Sahhaf, Amal Elkilani Fundamentals of Petroleum Refining [Электронный ресурс]. – Elsevier, 2010. – 493 с.

29. Uttam Ray Chaudhuri Fundamentals of Petroleum and Petrochemical Engineering [Электронный ресурс]. – CRC Press Taylor and Francis Group, 2011. – 380 с.

30. David S. J. «Stan» Jones, Peter R. Pujado Handbook of Petroleum Processing [Электронный ресурс]. – Springer, 2006. – 1356 с.

31. James G. Speight The Chemistry and Technology of Petroleum [Электронный ресурс]. - CRC Press Taylor and Francis Group, 2006. – 955 с.

32. Владимиров А.И. Установки каталитического риформинга [Электронный ресурс]. – М.: Нефть и газ, 1993. – 60 с.

33. Ластовкин Г.А. (ред.). Промышленные установки каталитического риформинга / Г.А. Ластовкин. – П.: Химия, 1984. – 231 с.

34. Davood Iranshahia, Ahmad Golrokha, Ehsan Pourazadib, Samrand Saeidic, Fausto Gallucci Progress in spherical packed-bed reactors: Opportunities for refineries and chemical industries [Электронный ресурс] // Chemical Engineering & Processing: Process Intensification 132 (2018) 16–24.

35. M.R. Rahimpour Enhancement of hydrogen production in a novel fluidized-bed membrane reactor for naphtha reforming [Электронный ресурс] // International journal of hydrogen energy 34 (2009) 2235 – 2251.

36. Khosravanipour Mostafazadeh A, Rahimpour MR. A membrane catalytic bed concept for naphtha reforming in the presence of catalyst deactivation [Электронный ресурс] // Chem Eng Process Process Intensification 2009;48: 683–94.
37. Iranshahi D, Pourazadi E, Paymooni K, Rahimpour MR. Utilizing DE optimization approach to boost hydrogen and octane number in a novel radial-flow assisted membrane naphtha reactor [Электронный ресурс] // Chem Eng Sci 2012;68:236–49.
38. Iranshahi D, Pourazadi E, Paymooni K, Rahimpour MR, Jahanmiri A, Moghtaderi B. A dynamic membrane reactor concept for naphtha reforming, considering radial-flow patterns for both sweeping gas and reacting materials [Электронный ресурс] // Chem Eng J 2011;178:264–75.
39. Jorge Ancheyta Modeling and Simulation of Catalytic Reactors for Petroleum Refining [Электронный ресурс]. – A John Wiley & Sons, 2011. – 525 с.
40. Babaqi S, Badiea, Takriff S. Mohd, Kamarudin S.K., Ali Othman Nur Tantiyani, Muneer Othman, Ba-Abbad Muneer / Comparison of Catalytic Reforming Processes for Process Integration Opportunities: Brief Review [Электронный ресурс] // International Journal of Applied Engineering Research. – 2016. – № 11. – С. 9984- 9989.
41. Кравцов А.В. Компьютерное прогнозирование работы промышленных катализаторов процессов риформинга и изомеризации углеводородов бензиновой фракции: учебное пособие [Электронный ресурс] / А.В. Кравцов, Э.Д. Иванчина, Е.С. Шарова, Н.В. Чеканцев, Д.С. Полубоярцев; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 129 с.
42. Emilia D. Ivanchina, Ekaterina S. Sharova, Inna V. Yakupova. Mathematical modelling method application for optimisation of catalytic reforming process [Электронный ресурс] // Procedia Chemistry 10 (2014) 197 – 202.



43. Zagoruiko A.N. Unsteady-state kinetic simulation of naphtha reforming and coke combustion processes in the fixed and moving catalyst beds [Электронный ресурс] / A.N. Zagoruiko, A.S. Belyi, M.D. Smolikov, A.S. Noskov // Catalysis Today, 2013. Загоруйко А. Н.

44. Истомин А.Л., Кривов М.В. Построение математической модели установки каталитического риформинга в нефтеперерабатывающем производстве // Сб. науч. тр. Ангарской гос. техн. акад. 2014. Т. 1, № 1. С. 110-117.

45. Кравцов А.В., Москвин В.С., Бесков В.С., Плешакова О.Е., Ушева Н.В. Моделирование процесса каталитического риформинга бензинов: тем. обзор. М.: ЦНИИТЭнефтехим, 2012. 69 с

46. Крейн Дж. Модель процесса каталитического риформинга. Труды IV Международного нефтяного конгресса / Дж. Крейн. М.: Гостоптехиздат, 2009. 34 с

47. Жоров Ю.М. Моделирование физико-химических процессов нефтепереработки и нефтехимии. М.: Химия, 2011. 213 с.

48. Зейналов М.Ф. Управление установкой двухступенчатого каталитического крекинга в условиях неопределенности: дис. ...канд. техн. наук. Баку, 1986. 100 с.

49. Симарзин В.В., Борзенко Н.М., Рабинович Б.А., Серебрянский А.Я. Субоптимальные алгоритмы управления процессом каталитического крекинга // Труды ЦНИИКА, 2014. Вып. 55. С. 21-23.

50. Проталинский О.М., Савельев А.Н., Щербатов И.А. Оптимальное управление технологическим процессом Клауса в условиях неопределенности // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Сер. Технические науки. 2006. № Спец. вып. С. 19а-25.

51. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие [Электронный ресурс] /

Н.А Гаврикова, И.Г. Видяев, Г.Н Серикова; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета. -2014. -73 с.

52. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 27.12.2018).

53. ГОСТ 12.0.003-2015. Система стандартов по безопасности труда. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.

54. ГОСТ 12.1.007-76. Система стандартов по безопасности труда. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности.

55. ГОСТ 12.4.011-89. Система стандартов безопасности труда. Средства защиты работающих. Общие требования и классификация

56. ГОСТ 12.1.003-2014. Система стандартов безопасности труда. Шум. Общие требования безопасности.

57. ГОСТ Р 55710-2013. Освещение рабочих мест внутри зданий. Нормы и методы измерений.

58. ГОСТ 12.1.019-2017. Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.

59. ГОСТ 12.1.004-91. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования.

60. [https://studwood.ru/1246738/ekologiya/zagryaznenie\\_pochvy](https://studwood.ru/1246738/ekologiya/zagryaznenie_pochvy)

61. ГОСТ 17.1.3.13-86. Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к охране поверхностных вод от загрязнения.

62. ГН 2.2.5.3532-18 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны»

63. Rahimpour M.R., Jafari M, Iranshahi D. Appl Energy.2013. p 79-93

64. Antos George J., Aitani Abdullah M. Catalytic naphtha reforming. NY.: Marcel Dekker. 2004. p 234-239.

65. UOP LLC. <http://www.uop.com/overview>.

66. US Patent 5011805, Dehydrogenation, dehydrocyclization and reforming catalyst (Inventor: Ralph Dessau, Assignee: Mobil Oil Corporation).

67. Catalytic reforming of hydrocarbons [Text]: handbook / ed. prof. Kuzmina R.I - Saratov: Publishing house of the SUI of the Ministry of Internal Affairs of Russia, 2010. p 252-253.
68. Zharkov B.B. New developments in the field of catalytic reforming of gasolines // Tekhnologii TEK. 2003. p 10-13.
69. Erzhenkov A.S., Levchenko B.G., Koronotov N.N., Bely A.S., Kiryanov D.I. Oil refining and petrochemistry. 2011. p 17-20.
70. Parera J.M. Catalytic Naphtha Reforming. Marcel Dekker. 1995. p. 112-116.