

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

Институт природных ресурсов
Направление подготовки 18.03.01 «Химическая технология»
Кафедра химической технологии топлива и химической кибернетики

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы	
Исследование группового состава сырья процесса каталитического крекинга	

УДК 66.011

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2Д2В	Шафран Татьяна Александровна		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ассистент	Долганова Ирэна Олеговна	К.Т.Н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент кафедры менеджмента	Рыжакина Татьяна Гавриловна	К.ЭК.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
профессор кафедры ЭБЖ	Ахмеджанов Рафик Равильевич	д.б.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ХТТ и ХК	Юрьев Егор Михайлович	К.Т.Н.		

ПЛАНИРУЕМЫ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ (ООП «Химическая технология»18.03.01)

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС ВПО, критериев и/или заинтересованных сторон
<i>Профессиональные компетенции</i>		
P1	Применять базовые и специальные, математические, естественнонаучные, социально-экономические и профессиональные знания в профессиональной деятельности	Требования ФГОС (ПК-1,2,3,19,20), Критерий 5 АИОР (п.1.1), CDIO(п. 1.1, 4.1, 4.3, 4.8)
P2	Применять знания в области современных химических технологий для решения производственных задач	Требования ФГОС (ПК-7,11,17,18, ОК-8), Критерий 5 АИОР (пп.1.1,1.2), CDIO (п. 1.1, 3.2, 4.2, 4.3, 4.5, 4.6)
P3	Ставить и решать задачи производственного анализа, связанные с созданием и переработкой материалов с использованием моделирования объектов и процессов химической технологии	Требования ФГОС (ПК-1,5,8,9, ОК-2,3), Критерий 5 АИОР (пп.1.2), CDIO (1.2, 2.1, 4.5)
P4	Разрабатывать <i>новые</i> технологические процессы, проектировать и использовать новое оборудование химической технологии, <i>проектировать объекты химической технологии в контексте предприятия, общества и окружающей среды</i>	Требования ФГОС (ПК-11,26,27,28), Критерий 5 АИОР (п.1.3) CDIO (п.1.3, 4.4, 4.7)
P5	Проводить теоретические и экспериментальные исследования в области современных химических технологий	Требования ФГОС (ПК-4,21,22,23,24,25, ОК-4,6), Критерий 5 АИОР (п.1.4), CDIO (п. 2.2)
P6	Внедрять, эксплуатировать и обслуживать современное высокотехнологичное оборудование, обеспечивать его высокую эффективность, <i>выводить на рынок новые материалы</i> , соблюдать правила охраны здоровья и безопасности труда на химико-технологическом производстве, выполнять требования по защите окружающей среды.	Требования ФГОС (ПК-6,10,12,13,14,15, ОК-6,13,15), Критерий 5 АИОР (п.1.5) CDIO (п. 4.1, 4.7, 4.8, 3.1, 4.6)
<i>Общекультурные компетенции</i>		
P7	Демонстрировать знания социальных, этических и культурных аспектов профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-5,9,10,11), Критерий 5 АИОР (пп.2.4,2.5), CDIO (п. 2.5)
P8	Самостоятельно учиться и непрерывно повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-1,2,7,8,12), Критерий 5 АИОР (2.6), CDIO (п. 2.4)
P9	<i>Активно</i> владеть <i>иностранным языком</i> на уровне, позволяющем разрабатывать документацию, презентовать результаты профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-14) , Критерий 5 АИОР (п.2.2), CDIO (п. 3.2, 3.3)
P10	Эффективно работать индивидуально и в коллективе, <i>демонстрировать лидерство в инженерной деятельности и инженерном предпринимательстве</i> , ответственность за результаты работы и готовность следовать корпоративной культуре организации.	Требования ФГОС (ОК-3,4) , Критерий 5 АИОР (пп.1.6, 2.3) CDIO (п. 4.7, 4.8, 3.1)

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

Институт природных ресурсов
Направление подготовки 18.03.01 «Химическая технология»
Кафедра химической технологии топлива и химической кибернетики

УТВЕРЖДАЮ:
Зав. кафедрой ХТТ и ХК

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

бакалаврской работы

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

Студенту:

Группа	ФИО
2Д2В	Шафран Татьяне Александровне

Тема работы:

Исследование группового состава сырья процесса каталитического крекинга	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	1749/С

Срок сдачи студентом выполненной работы:	01.06.2016
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе <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>	Объект исследования – гидроочищенный вакуумный дистиллят, перерабатываемый на установке каталитического крекинга комбинированной установки глубокой переработки мазута С-200 КТ-1/1 НПЗ Западной Сибири. Фракционный состав вакуумного дистиллята на установке НПЗ Западной Сибири – 350-520⁰С, содержание серы в сырье – не более 0,35 % мас., производительность установки каталитического крекинга составляет 2400 тыс. т/год по сырью, режим работы – непрерывный. Секция С-200 установки КТ-1/1 предназначена для производства компонентов бензина, легкого и тяжелого газойля, жирного газа, являющегося сырьем для нефтехимической промышленности (производство алкилата), а также кокса.
--	--

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i>	1 Литературный обзор 1.1 Анализ современного состояния и перспективы развития процессов глубокой переработки углеводородного сырья 1.2 Конструктивные особенности аппаратурного оформления реакторно-регенераторного блока каталитического крекинга 1.3 Характеристика катализаторов каталитического крекинга 1.4 Физико-химические основы процесса каталитического крекинга 1.5 Расчетные методы определения группового состава тяжелых нефтяных фракций 2 Объект и методы исследования 2.1 Промышленная технология каталитического крекинга вакуумного дистиллята установки НПЗ Западной Сибири 2.2 Характеристика сырья и продуктов процесса каталитического крекинга промышленной установки КТ-1/1НПЗ Западной Сибири 2.3 Методы исследования 3 Экспериментальная часть 3.1 Лабораторные исследования по определению группового состава сырья и продуктов каталитического крекинга установки НПЗ Западной Сибири 3.2 Сопоставление результатов расчета по определению группового состава вакуумного дистиллята по методикам TOTAL и API 3.3 Разработка расчетной методики по определению группового состава гидроочищенного вакуумного дистиллята каталитического крекинга на основании данных о фракционном составе и плотности фракции с учетом парафинистой природы 3.4 Влияние состава сырья на показатели процесса каталитического крекинга 4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение 5 Социальная ответственность Заключение Список публикаций Список используемых источников
Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	Технологическая схема процесса каталитического крекинга вакуумного дистиллята
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i>	
Раздел	Консультант
«Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	доцент кафедры менеджмента, к.э.н., Рыжакина Татьяна Гавриловна

«Социальная ответственность»	профессор кафедры ЭБЖ, д.б.н., Ахмеджанов Рафик Равильевич
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	10.02.2016
---	------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ассистент	Долганова Ирэна Олеговна	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2Д2В	Шафран Татьяна Александровна		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 105 стр., 25 рисунков, 35 таблиц, 54 источника, 4 приложения.

Ключевые слова: каталитический крекинг, групповой состав, гидроочищенный вакуумный дистиллят, математическая модель, выход светлых фракций, кокс.

Объектом исследования является гидроочищенный вакуумный дистиллят, перерабатываемый на промышленной установке каталитического крекинга комбинированной установки глубокой переработки мазута С-200 КТ-1/1.

Цель работы – разработка расчетной методики для определения группового состава гидроочищенного вакуумного дистиллята каталитического крекинга на основании данных о фракционном составе и плотности.

В результате проведенных исследований была разработана расчетная методика для определения содержания парафиновых, нафтеновых, ароматических углеводородов и смолистых соединений для высокопарафинистой фракции вакуумного дистиллята – сырья каталитического крекинга, на основании данных о фракционном составе и плотности. Проведенные расчеты на модели реактора каталитического крекинга позволили спрогнозировать выход продуктов крекинга в зависимости от группового состава перерабатываемого сырья.

Область применения: на нефтеперерабатывающих заводах, где реализован процесс каталитического крекинга.

Экономическая значимость работы заключается в возможности прогнозирования выхода жирного газа, легкого и тяжелого газойля, кокса, нестабильного бензина, а также его группового состава и октанового числа после реактора с применением математической модели в зависимости от состава перерабатываемого сырья.

Определения, обозначения, сокращения, нормативные ссылки

Обозначения и сокращения:

КК – каталитический крекинг;

НПЗ – нефтеперерабатывающий завод;

УВ – углеводороды;

ЦСК – цеолитсодержащий катализатор;

РРБ – реакторно-регенераторного блок;

ППФ – пропан-пропиленовая фракция;

ББФ – бутан-бутиленовая фракция;

ПК – персональный компьютер;

ВПм – вакуумная перегонка мазута;

ГО – гидроочистка;

ПДК – предельно-допустимая концентрация;

ЭМП – электромагнитное поле;

ПЭВМ – персональные электронно-вычислительные машины

Нормативные ссылки

В настоящей работе использованы ссылки на следующие стандарты:

– ГОСТ 12.1.007-76 ССБТ. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности.

– ГОСТ 12.1.005-88. ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.

– СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы».

– СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы».

– СН 2.2.4/2.1.8.562-96 «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки».

- СН 2.2.4/2.1.8.566-96 «Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий».
- СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений».
- ГН 2.2.5.1313-03 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны».
- ГОСТ 17.0.0.02-79. Метрологическое обеспечение контроля загрязненности атмосферы, поверхностных вод и почвы.
- ГОСТ Р 22.0.01-94. Безопасность в чрезвычайных ситуациях.
- Межгосударственный стандарт ГОСТ 12.0.230-2007 «Система стандартов безопасности труда. Система управления охраной труда. Общие требования. ILO-OSH 2001».

Оглавление

	Введение	12
1	Литературный обзор	15
1.1	Анализ современного состояния и перспективы развития процессов глубокой переработки углеводородного сырья	15
1.2	Конструктивные особенности аппаратного оформления реакторно-регенераторного блока каталитического крекинга	17
1.3	Характеристика катализаторов каталитического крекинга	24
1.4	Физико-химические основы процесса каталитического крекинга	29
1.4.1	Крекинг парафиновых углеводородов	30
1.4.2	Крекинг нафтеновых углеводородов	31
1.4.3	Реакции олефиновых углеводородов	32
1.4.4	Крекинг ароматических углеводородов	32
1.5	Расчетные методы определения группового состава тяжелых нефтяных фракций	33
1.5.1	Методика для расчета структурно-группового состава нефтяных фракций n-d-M	34
1.5.2	Методика для расчета группового состава нефтяных фракций TOTAL	35
1.5.3	Методика для расчета группового состава нефтяных фракций API	36
2	Объект и методы исследования	38
2.1	Промышленная технология каталитического крекинга вакуумного дистиллята установки НПЗ Западной Сибири	38
2.2	Характеристика сырья и продуктов процесса каталитического крекинга промышленной установки КТ-1/1 НПЗ Западной Сибири	40

2.3	Методы исследования	41
3	Экспериментальная часть	43
3.1	Лабораторные исследования по определению группового состава сырья и продуктов каталитического крекинга установки НПЗ Западной Сибири	43
3.2	Сопоставление результатов расчета по определению группового состава вакуумного дистиллята по методикам TOTAL и API	44
3.3	Разработка расчетной методики по определению группового состава гидроочищенного вакуумного дистиллята каталитического крекинга на основании данных о фракционном составе и плотности фракции с учетом парафинистой природы	45
3.4	Влияние состава сырья на показатели процесса каталитического крекинга	52
3.4.1	Описание математической модели процесса каталитического крекинга	52
3.4.2	Численные исследования влияния состава сырья на выход продуктов каталитического крекинга с применением математической модели процесса	54
4	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	59
4.1	Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	59
4.1.1	Потенциальные потребители результатов исследования	59
4.1.2	Анализ конкурентных технических решений	59
4.1.3	SWOT-анализ	61
4.2	Планирование научно-исследовательских работ	61

4.2.1	Структура работ в рамках научного исследования	61
4.2.2	Определение трудоемкости выполнения работ	61
4.2.3	Разработка графика проведения научного исследования	62
4.2.4	Бюджет научно-технического исследования (НТИ)	63
4.3	Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	66
5	Социальная ответственность	68
5.1	Производственная безопасность	68
5.1.1	Анализ вредных и опасных факторов, возникающих на производстве	68
5.1.2	Анализ вредных и опасных факторов на рабочем месте	69
5.1.3	Мероприятия по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов	71
5.2	Экологическая безопасность	73
5.3	Безопасность в чрезвычайных ситуациях	74
5.4	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	75
	Заключение	76
	Список публикаций	78
	Список использованных источников	80
	Приложение А	
	Приложение Б	
	Приложение В	
	Приложение Г	

Введение

Процессы глубокой переработки нефтяного сырья, такие как каталитический крекинг, гидрокрекинг, каталитическая гидродепарафинизация, гидроочистка тяжелых фракций углеводородов и др. занимают важнейшее место в нефтеперерабатывающей отрасли в мировом масштабе и позволяют производить ценное сырье для других процессов нефтепереработки и нефтехимии (компаундирование бензинов, производство метил-трет-бутилового эфира, производство дизельного топлива, процессы коксования).

Основным подходом к решению задач оптимизации таких сложных процессов является метод математического и кинетико-термодинамического моделирования [1-2]. На кафедре химической технологии топлива и химической кибернетики Томского политехнического университета в течение нескольких десятков лет развивается направление по моделированию многокомпонентных каталитических процессов переработки легкого углеводородного сырья, и в настоящее время активно ведутся работы по экспериментальному исследованию и моделированию процесса глубокой переработки нефтяного сырья – каталитического крекинга [3].

Математическая модель реактора каталитического крекинга позволяет рассчитывать основные показатели процесса – выход жирного газа, легкого и тяжелого газойля, кокса, а также групповой состав нестабильного бензина и его октановое число с учетом состава перерабатываемого сырья и параметров технологического режима реакторно-регенераторного блока.

Состав перерабатываемого сырья оказывает существенное влияние на выход и состав продуктов процесса каталитического крекинга, наряду с технологическими параметрами эксплуатации промышленной установки, типом катализатора крекинга, гидродинамическими особенностями промышленного аппарата и др. Количество кокса, накапливаемого на поверхности цеолитсодержащего катализатора в лифт-реакторе в большей степени зависит от состава перерабатываемого сырья. Динамика

коксонакопления, в свою очередь, определяет количество тепла, выделяемого при регенерации и температуру циркулирующего катализатора, и значит, температуру процесса, от которой главным образом зависит состав и выход светлых фракций с установки каталитического крекинга.

Целью работы стала разработка расчетной методики для определения группового состава гидроочищенного вакуумного дистиллята каталитического крекинга на основании данных о фракционном составе и плотности и оценка влияния состава сырья на выход светлых фракций и кокса в технологии каталитического крекинга. Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Изучить существующие расчетные методики по определению группового состава нефтяных фракций с учетом физико-химических свойств нефтяного сырья.

2. Провести расчет группового состава гидроочищенного вакуумного дистиллята каталитического крекинга согласно существующим методикам и сопоставить результаты по расчету группового состава по методикам с результатами лабораторных исследований.

3. Разработать расчетную методику для определения содержания парафиновых, нафтеновых, ароматических углеводородов и смолистых соединений для высокопарафинистой фракции вакуумного дистиллята – сырья каталитического крекинга, на основании данных о фракционном составе и плотности.

4. Проверить разработанную расчётную методику на адекватность, сравнив расчетные значения по групповому составу гидроочищенного вакуумного дистиллята с результатами лабораторных исследований.

5. Провести оценку влияния группового состава вакуумного дистиллята на выход светлых фракций и кокса с установки каталитического крекинга с применением математической модели процесса.

Объектом исследования в данной работе является гидроочищенный вакуумный дистиллят, перерабатываемый на установке каталитического

крекинга комбинированной установки глубокой переработки мазута С-200 КТ-1/1НПЗ Западной Сибири.

Результаты научного исследования могут быть использованы для расчета группового состава вакуумного дистиллята на основании данных о фракционном составе и плотности и прогнозирования выхода светлых фракций и кокса в технологии каталитического крекинга с учетом состава перерабатываемого сырья с применением математической модели процесса.

1 Литературный обзор

Процесс каталитического крекинга (далее КК) занимает важнейшее место в схемах современных нефтеперерабатывающих заводов (далее НПЗ). Роль КК, несмотря на бурное развитие гидрокрекинга, остается весьма существенной как в зарубежной практике, так и в отечественной.

КК представляет собой физико-химический процесс по превращению высокомолекулярных углеводородов – далее УВ (атмосферных газойлей, получаемых при прямой перегонки нефти, вакуумных газойлей или их смеси) в высокооктановый бензин, легкие дистиллятные топлива и обогащенные олефином легкие газы при соответствующих технологических условиях процесса.

В данной главе рассмотрен анализ современного состояния и перспективы развития процессов глубокой переработки углеводородного сырья, в частности КК и гидрокрекинга в отечественной промышленности, приведены варианты технологий с применением цеолитсодержащих катализаторов (далее ЦСК) и конструктивного оформления реакторно-регенераторного блока (далее РРБ), разработанных ведущими нефтяными компаниями, большое внимание уделено физико-химическим основам КК и расчетным методикам по определению группового состава тяжелых нефтяных фракций.

1.1 Анализ современного состояния и перспективы развития процессов глубокой переработки углеводородного сырья

В настоящее время в России нефтеперерабатывающая промышленность испытывает глубокий кризис, этому подтверждению соответствует невысокая глубина переработки нефти – около 73,0%, против 85-95,0% в развитых государствах – 95,0% в США и Канаде, порядка 90,0% в Европе [4] и только НПЗ ПАО АНК «Башнефть» и ПАО «Газпромнефть» соответствуют уровню мировых стандартов – 84,80 и 81,53% соответственно.

Средняя глубина переработки нефти на НПЗ крупнейших вертикально-интегрированных нефтяных компаний представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Средняя глубина переработки нефти по данным [5-9]

№ п/п	Компания	Средняя глубина переработки нефти, %
1	ПАО АНК «Башнефть»	84,80
2	ПАО «Газпромнефть»	81,53
3	ПАО «ЛУКОЙЛ»	77,10
4	ОАО НК «Роснефть»	68,40
5	ОАО «Сургутнефтегаз»	56,90

Кроме того российские НПЗ уступают развитым странам по технологическому уровню и по доле углубляющих процессов. Мощности вторичной переработки нефти в США находятся на уровне 140,0% от мощностей первичной переработки, в то время как 91,0% первичных мощностей нефтепереработки по миру, в России же мощности вторичной переработки не превышают 70,0% мощностей первичной переработки нефти [10]. Доля углубляющих процессов, направленных на увеличение выхода светлых нефтепродуктов, в России составляет всего лишь 20,3%, тогда как в Японии – 32,6%, Западной Европе – 42,9% и США – 73,3% [11].

Данное положение России в сфере нефтепереработки можно объяснить тем, что на большинстве НПЗ отсутствуют вторичные процессы, прежде всего, изомеризации, алкилирования, КК и гидрокрекинга. Для России на сегодняшний день базовым процессом вторичной переработки нефти после гидроочистки является риформинг, в зарубежных странах – КК и гидрокрекинг.

В доказательство этому, приведём сравнение мощностей КК и гидрокрекинга в России и США. Так, мощности КК и гидрокрекинга в США составляют 35,0% и 9,0% от объема переработки нефти, для России данные показатели находятся на уровне 10,0% и 0,4% соответственно [10].

Сегодня многие компании планируют модернизацию своих НПЗ и уже начали строительство новых комплексов по глубокой переработки углеводородного сырья с целью выведения нефтеперерабатывающей отрасли

из кризиса.

В сфере переработки и коммерции стратегия ПАО АНК «Башнефть» предусматривает строительство установки замедленного коксования до 2020 года. В планах компании является так же увеличение глубины переработки нефти до 98% и выхода светлых нефтепродуктов до 75% [5].

ПАО «Газпромнефть» предлагает выполнение крупных инновационных проектов до 2025 года [12]:

- строительство комплекса гидрокрекинга (лицензиар Chevron Lummus Global) и установки замедленного коксования (лицензиар Foster Wheeler) на Омском НПЗ;
- строительство гидрокрекинга вакуумного газойля (лицензиар Shell Global Solutions) и реконструкцию действующей установки КК Г-43/107 на Московском НПЗ.

Осуществление вышеуказанных мероприятий на ПАО «Газпромнефть» позволит достичь глубины переработки нефти до 95%. При неизменном объеме переработки, за счет введения вторичных процессов, выпуск моторного топлива может увеличиться на 17,0%.

ОАО НК «Роснефть» в настоящее время в рамках реализации программы ведет работы [13]:

- по реконструкции действующих установок изомеризации, алкилирования, риформинга и КК, предназначенных для получения высокооктановых компонентов бензина и гидроочистки моторных топлив, предназначенных для производства высококачественных компонентов дизельного и авиационного топлива.
- по строительству установок гидрокрекинга.

1.2 Конструктивные особенности аппаратурного оформления реакторно-регенераторного блока каталитического крекинга

За период своего развития КК усовершенствовался, как в отношении применяемых катализаторов, так и способа контакта сырья и катализатора.

Начиная с 1930-х годов были построены первые установки КК со стационарным слоем катализатора, где в качестве катализатора применяли природную глину. Однако такие установки на сегодняшний день утратили свое значение и были модернизированы, в связи с внедрением шариковых катализаторов в промышленность, а затем ЦСК.

В последующие годы своего развития возникли установки КК с движущимся слоем катализатора. Недостатком установок такого типа стали ограниченные возможности системы пневмотранспорта крупногранулированного катализатора и неэффективное использование ЦСК в этой технологии, поэтому данные установки так же были реконструированы и позднее построены установки с кипящим слоем и лифт-реактором.

Технологические схемы установок КК обычно состоят из РРБ и блока ректификации. В реакторе происходит крекирование углеводородного сырья до продуктов, содержащих УВ от метана и высококипящих компонентов. В регенераторе осуществляется выжиг кокса с поверхности катализатора за счет подачи потока горячего воздуха. Ректификационная колонна предназначена для разделения смеси продуктов крекинга, верхним продуктом колонны являются углеводородные газы, бензин и легкий газойль отбираются в виде боковых погонов, нижним продуктом является высококипящие фракции – тяжелый газойль.

Ниже рассмотрены основные конструкции РРБ различных зарубежных компаний.

В 1947-м году компания Universal Oil Products (UOP) разработала и внедрила в промышленность установку КК с вертикальным расположением реактора и регенератора.

Особенностью данной конструкции являются длинный лифт-реактор, вертикальная транспортная линия для катализатора, расположение реактора и регенератора (рисунок 1.1). Сырье, распыленное водяным паром, смешивается с регенерированным микросферическим катализатором, поступающим из регенератора. При контакте с горячим катализатором происходит

испарение жидких нефтепродуктов.

Пары нефтепродуктов, продвигаясь по прямоточному реактору в смеси с катализатором подвергаются каталитическому крекированию. На выходе из прямоточного реактора смесь из катализатора, водяного пара и продуктов крекинга поступают в отстойную зону реактора, расположенного в верхней части.

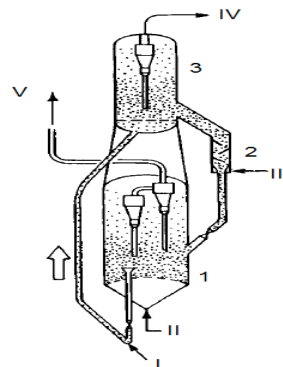


Рисунок 1.1 – Конструкция установки КК компании UOP [14]: 1 – регенератор; 2 – отпарная секция; 3 – реактор; I – сырье; II – воздух; III – водяной пар; IV – продукты на ректификацию; V – дымовые газы

Из отстойной зоны пары нефтепродуктов через группы циклонов направляются в ректификационную колонну, а закоксованный катализатор после отпарной секции под действием силы тяжести самотеком поступает в регенератор, расположенный в нижней части конструкции, где осуществляется выжиг кокса с его поверхности.

Вскоре работами данной компании было обнаружено, что лучшая селективность и наибольшая глубина крекинга достигается в зоне смешения сырья и катализатора, а не в кипящем слое. В связи с этим, данная компания занялась дальнейшими разработками конструкций установок КК и позднее представила более усовершенствованную конструкцию КК с отдельным расположением реактора и регенератора.

Компании Exxon Mobil совместно с Engineering начиная с 1952-го года специализируются на производстве установок для использования ЦСК. Принципиальная конструкция установки КК (модель IV) представлена на рисунке 1.2. Данная установка отличается от всех других типов конструкций, что РРБ соединен с помощью U-образных отводов. Циркуляция катализатора по U-образным отводам из реактора в регенератор и в обратном направлении осуществляется за счет дифференциального давления между реактором и регенератором. Преимуществом таких конструкций является

меньший абразивный износ внутренних поверхностей отводов за счет невысоких скоростей пневмовзвеси.

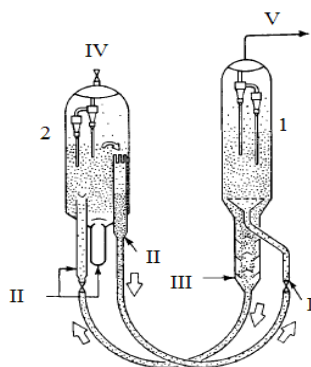


Рисунок 1.2 – Конструкция установки КК (модель IV) компании Exxon Mobil [14]: 1 – реактор; 2 – регенератор; I – сырье; II – воздух; III – пар; IV – дымовые газы; V – продукты крекинга на ректификацию

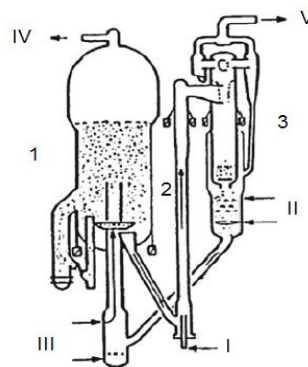


Рисунок 1.3 – Конструкция установки КК компании Shell [15]: 1 – регенератор; 2 – лифт-реактор; 3 – отпарная колонна; I – сырье; II – водяной пар; III – воздух; IV – дымовые газы; V – продукты крекинга на ректификацию

Впервые вертикальный лифт-реактор в установки КК был введен лишь 1955-м году компанией Shell в американском штате Алабама. Типичная конструкция установки КК с лифт-реактором представлена на рисунке 1.3. Она содержит три совмещенных аппарата: лифт-реактор, регенератор и вынесенную отпарную колонну.

Как и в предыдущих установках КК, крекирование углеводородного сырья сначала происходит в лифт-реакторе, а затем продолжается в псевдоожиженном слое катализатора. Недостатком данной конструкции является сложность транспорта катализатора и его потеря, поэтому в последующие годы своего развития все нефтеперерабатывающие компании стали выпускать конструкции установок КК с совмещенным лифт-реактор и отпарной секцией.

В 1967-м году дочерняя компания Texaco Development предложила иной вариант конструкции РРБ КК (рисунок 1.4).

Отличительной особенностью данной установки является осуществление раздельного крекинга (свежее углеводородное сырье крекируется в лифт-реакторе, а рециркулирующий тяжелый газойль сначала в отдельном лифт-реакторе, а затем в реакторе с псевдоожиженным слоем катализатора).

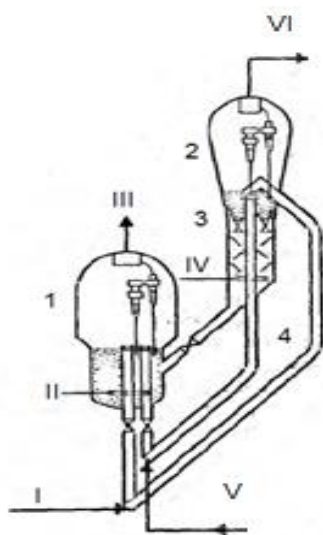


Рисунок 1.4 – Конструкция установки КК компании Техасо [16]: 1 – регенератор; 2 – реактор; 3 – отпарная зона; 4 – ректификационная колонна; I–сырье; II – воздух; III – дымовые газы; IV – водяной пар; V – рециркулирующий газойль; VI – продукты на ректификацию

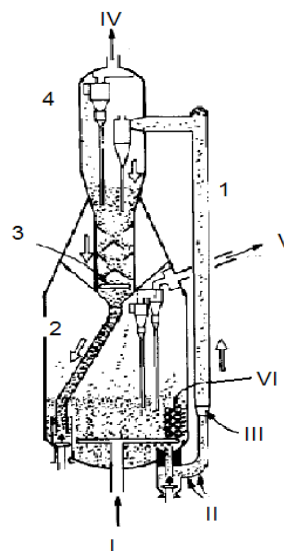


Рисунок 1.5 – Конструкция установки КК компании М. W. Kellog [14]: 1 – лифт-реактор; 2 – двухступенчатый регенератор; 3 – отпарная секция; 4 – разделительная секция; I–воздух; II – водяной пар; III – сырье; IV – продукты на ректификацию; V – дымовые газы; VI – паровые змеевики

Одновременно компании М. W. Kellog и UOP в 1973-м году ввели в промышленную эксплуатацию новые конструкции установок КК, которые основаны на принципе проточного реактора (рисунок 1.5, 1.6), которые быстро распространились и стали основой для реконструкции существующих установок.

В появившейся разработке компании М. W. Kellog (рисунок 1.5) транспортная линия присоединена в установку с вертикальным расположением РРБ. Данная установка КК отличается от всех предыдущих тем, что поток катализатора продвигается вверх по лифт-реактору, после чего меняет свое направление и поступает в отпарную секцию. Двухступенчатая регенерация позволяет снизить содержание кокса на поверхности катализатора до 0,05 % мас.

После того, как было доказано целесообразное применение конструкций с вертикальным лифт-реактором, большинство компаний стали проводить исследования по улучшению работы распределителей сырья и подбору нужных геометрических характеристик форсунок.

На рисунке 1.6 представлено 7 форсунок для подачи сырья в реактор, необходимых для равномерного распределения сырья по всему объему реактора, но на практике может и встречаться меньшее количество форсунок.

В связи с осложнениями в поставках нефти в конце 1970-х гг. и ухудшением экономических показателей большинства НПЗ, внимание производителей было сосредоточено на переработку тяжелого сырья, в частности атмосферных остатков [17].

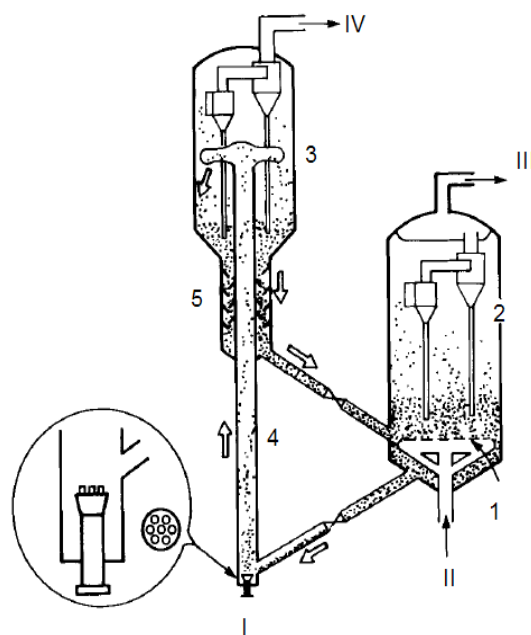


Рисунок 1.6 – Конструкция установки КК компании UOP [14]: 1 – сборная камера; 2 – регенератор; 3 – реактор; 4 – лифт-реактор; 5 – отпарная секция; I – сырье; II – воздух; III – дымовые газы; IV – продукты на ректификацию

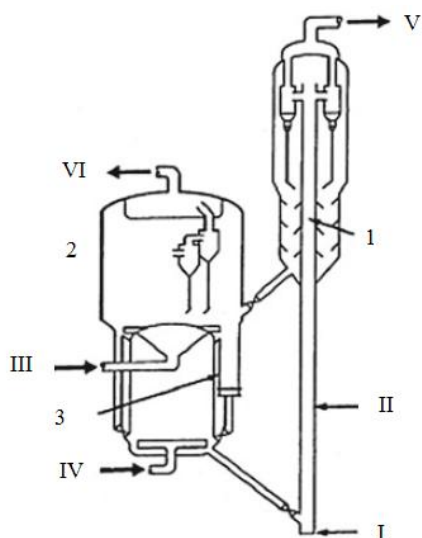


Рисунок 1.7 – Конструкция установки КК RCC компании Asland Oil и UOP [18]: 1 – лифт-реактор; 2 – двухступенчатый регенератор; 3 – линия транспортировки катализатора; I – газ для подъема катализатора; II – сырье; III – воздух в первую ступень регенерации; IV – воздух во вторую ступень регенерации; V – продукты на ректификацию; VI – дымовые газы

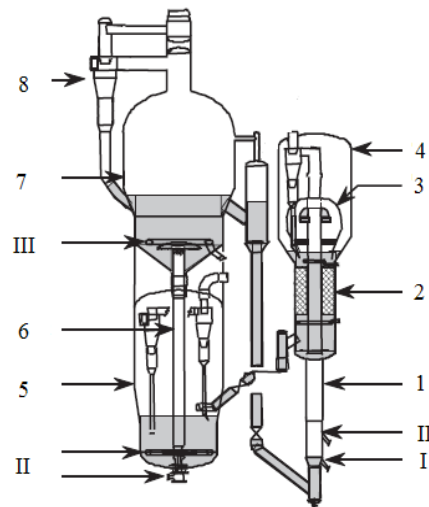


Рисунок 1.8 – Конструкция установки КК R2R компании Axens / IFP и Stone & Webster [19]: 1 – лифт-реактор; 2 – стриперы; 3 – сепаратор; 4 – реактор; 5 – регенератор первой ступени; 6 – лифт подъема катализатора; 7 – регенератор второй ступени; 8 – циклоны; I – сырье; II – рециркулят; III – воздух

В 1982-м году совместными усилиями компании Asland Oil и UOP, в

1985-м году компания Axens/IFP и Stone&Webster (рисунок 1.7, 1.8) и в 1990-м году компания Kellog / Mobil НОС разработали концепцию КК в псевдооживленном слое катализатора с целью переработки тяжелых нефтяных фракций, как мазут и гудрон.

Общей чертой таких установок КК стал двухступенчатый регенератор, который способствовал регулированию теплового баланса установки благодаря тому, что первая ступень работала в режиме частичного выжига кокса с поверхности катализатора, а вторая – полного. Но в отличие от системы RCC у R2R первая ступень регенерации расположена снизу, а вторая – наверху.

На ряде российских НПЗ в настоящее время работают десять установок КК с использованием современного микросферического катализатора, из них:

- по одной установке от ОАО НК «Роснефть» в АО «АНХК» (г. Ангарск), АО «РНПК» (г. Рязань) АО «НК НПЗ» (г. Самара) и ОАО «Сызранский НПЗ»;
- по две установки в АО «ГАЗПРОМНЕФТЬ-ОНПЗ» (г. Омск) и АО «ГАЗПРОМНЕФТЬ-МНПЗ» (г. Москва);
- по одной установке от ПАО «ЛУКОЙЛ» в ООО «ЛУКОЙЛ-Нижегороднефтеоргсинтез» (г. Кстово недалеко от Нижнего Новгорода) и ООО ЛУКОЙЛ-Пермнефтеоргсинтез.

В приложении А на рисунке А.1 представлена технологическая схема блока КК отечественной комбинированной установки ГК-3 АО «АНХК», разработанная Грозненским научно-исследовательским институтом г. Грозный (ГРОЗГИПРОНЕФТЕХИМ). Мощность установки ГК-3 по перерабатываемому сырью – обессоленной нефти, составляет 4,185 млн. тонн в год (520,5 т/ч), из них 1,07 млн. тонн в год – мощность блока КК по перерабатываемому вакуумному газойлю [20].

Как видно из рисунка А.1, что конструкция РРБ схожа с первой конструкцией компании UOP (1947 г.), но главное отличие заключается в

расположение реактора и регенератора. Реактор под действием высокого давления находится в нижней части конструкции, регенератор – верхней.

Основными параметрами, характеризующими режим работы реактора данной установки являются расход сырья, подаваемого в прямоточный реактор ($70\text{--}185\text{ м}^3/\text{ч}$), расход водяного пара на распыл сырья ($1200\text{--}4000\text{ кг/ч}$), температура сырья на входе ($180\text{--}360^\circ\text{C}$), температура внутри прямоточного реактора ($490\text{--}550^\circ\text{C}$) и давление в реакторе ($0,5\text{--}1,2\text{ кгс/см}^2$).

Технологическая схема установки КК вакуумного газойля 43-103, введённая в эксплуатацию в 1972 году АО «ГАЗПРОМНЕФТЬ-ОНПЗ», представлена в приложении А на рисунке А.2.

Производительность данной установки по сырью составляет 1500 тыс. тонн в год, проект выполнен институтом «ВНИПИНефть» по разработкам «ВНИИНП».

Основными параметрами, характеризующими режим работы реакторного блока установки 43-103 являются расход сырья, подаваемого в прямоточный реактор ($130\text{--}240\text{ м}^3/\text{ч}$), расход водяного пара на распыл сырья 1000 кг/ч , температура сырья на входе ($120\text{--}360^\circ\text{C}$), температура внутри прямоточного реактора ($490\text{--}525^\circ\text{C}$) и давление в реакторе до $1,2\text{ кгс/см}^2$.

1.3 Характеристика катализаторов каталитического крекинга

В настоящее время подавляющее большинство установок КК работают с использованием синтетических микросферических ЦСК. Современные катализаторы состоят из трех составных частей: носителя, цеолита, различных добавок.

В ранних катализаторах в качестве матрицы использовали синтетические алюмосиликаты, которые получали с помощью осаждения алюмокремнегеля с последующей термохимической обработкой водными растворами. Такие матрицы состояли преимущественно из глинозема. В современных катализаторах матрицей служит синтезированные алюмосиликаты, которые в своем составе содержат глинозем ($30\text{--}45\%\text{ мас.}$),

стабилизатор – каолин и связующий – высокогидратированные гидрогели или силикатные и алюмосиликатные золи.

Носитель (или матрица) играет важное значение в каталитических системах. Матрица, в первую очередь, должна обеспечить сохранение каталитических свойств цеолитов и предохранять катализатор от воздействия каталитических ядов при технологических условиях проведения процесса, а во-вторых, придать необходимую механическую прочность частицам катализатора.

В зависимости от химического состава перерабатываемого сырья, матрица может быть активной или неактивной. Неактивная матрица выполняет лишь функцию подвода молекул сырья к цеолитам и отвода от него продуктов крекинга, активная матрица вдобавок к предыдущей функции осуществляет и крекирование крупных УВ сырьевого потока на своей поверхности.

Цеолиты являются ключевыми компонентами любых современных катализаторов КК. Они представляют собой водные алюмосиликаты щелочных или щелочно-земельных металлов. В катализаторах первого поколения использовали природные цеолиты: шабазит $(\text{CaNa}_2)[\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{12}] \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, натролит $\text{Na}_2[\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}] \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ гейландит $\text{CaAl}_2\text{S}_6\text{O}_{16} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, однако данные типы цеолитов утратили свое промышленное назначение в связи с получением синтетических цеолитов, которые обладают более высокой термopаровой стабильностью и активностью, по сравнению с первыми.

Синтетические цеолиты состоят из кремниево- и алюминиево-кислородных тетраэдров (рисунок 1.9), соединяясь вместе, они образуют кубооктаэдры, из которых строятся элементарные ячейки различных цеолитов. Т.к. атом алюминия является трёхвалентным, а в кристаллической решетке он образует четыре связи, то такой фрагмент приобретает частично отрицательный заряд, который компенсирует катионы металлов или протон водорода.

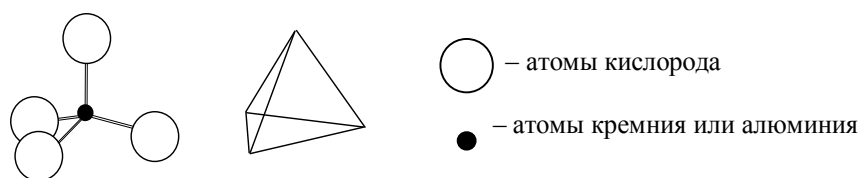


Рисунок 1.9 – Алюминиево- и кремневокислородные тетраэдры
синтетических цеолитов

В настоящее время широкое применение нашли синтетические цеолиты типа X, Y и ZSM-5. Первые два типа цеолитов имеют схожую природу и отличаются от последнего цеолита размером пор и невысоким соотношением Si/Al. Цеолиты типа Y и ZSM-5 представляют наибольший интерес для КК.

Элементарная ячейка цеолита типа Y имеет четыре входных окна диаметром 7,3-13,0 Å (0,73-1,3 нм) и двенадцатичленных кислородных колец (рисунок 1.10 слева) [22]. Соотношение Si/Al находится в диапазоне от 4,0 и выше, цеолиты с Si/Al выше 5,0 называют ультрастабильными. Данные цеолиты имеют повышенную кислотостойкость, термостойкость и каталитическую активность в реакциях изомеризации и крекинга.

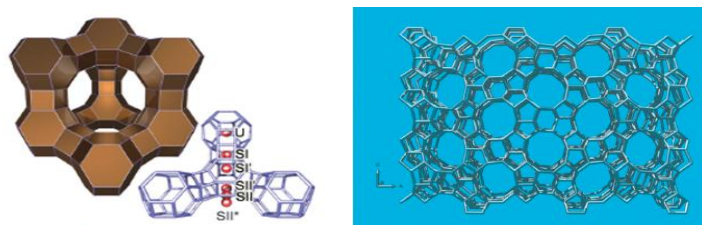


Рисунок 1.10 – Элементарные ячейки цеолитов типа Y и ZSM-5 [22]

Элементарная ячейка 3-D модели цеолита типа ZSM-5 состоит из четыре входных окна эллиптической формы диаметром 5,1-5,6 Å (0,51-0,56 нм) [23] и десятчленных кислородных колец (рисунок 1.10 справа). Соотношение Si/Al для цеолита типа ZSM-5 может достигать до 50. Значительная реакционная способность для таких цеолитов и соответствующий размер пор позволяют проводить с их использованием селективный крекинг парафиновых УВ в соответствии с зарубежной технологией глубокого КК Deep Catalytic Cracking и получать низкомолеку-

лярные олефины [24].

Для каталитических процессов цеолиты обычно синтезируют в сильнощелочной форме (натриевой форме). Однако присутствие ионов натрия в цеолите будет вызывать интенсификацию реакцию дегидрирования УВ, в результате чего будет снижен выход и качество целевого продукта КК–бензина. Поэтому в цеолитах ионы металлов замещают на редкоземельные элементы – лантан, неодим, гольмий и др.

Чтобы воздействовать на процесс КК, в матрицу и в цеолиты добавляют различные добавки. В работе [25] на пилотной установке КК исследованы различные добавки – La, P-La, Mg, Ca, Sr и F к цеолиту типа ZSM-5, которые были направлены на увеличение выхода олефиновых УВ – этилена, пропилена и бутадиена. Наибольший выход этилена – 32%, 38% был получен с использованием добавок P-La и La к цеолиту соответственно, максимальный выход бутадиена – 11-14% был достигнут с помощью добавок в виде щелочно-земельных металлов Mg, Ca, Sr и наибольший выход пропилена – 33-36% с помощью добавок в виде ионов F.

В отечественной промышленности для получения оптимального выхода бензина и жирного газа, богатого пропан-пропиленной фракцией (далее ППФ) и бутан-бутиленовой фракцией (далее ББФ), используют бифункциональные катализаторы, при равном содержании цеолитов типа Y и ZSM-5.

В источнике [26] был проведен анализ двух отечественных катализаторов производства АО «ГАЗПРОМНЕФТЬ-ОМПЗ», бицеолитный катализатор в составе имел равное содержание ультрастабильного цеолита типа Y и типа ZSM-5, катализатор ЛЮКС состоял преимущественно из цеолита типа ZSM-5 в количестве 82% и 18% цеолита типа Y. Каталитическую активность образцов определяли на лабораторной установке проточного типа МАК-2М с неподвижным слоем катализатора, в качестве сырья использовали гидроочищенный вакуумный газойль.

Результаты исследования показали, что при температуре 540-560⁰С и

соотношении катализатор : сырье 3-9, суммарный выход ППФ и ББФ для бицеолитного катализатора достигает 42 – 44% мас. и 28—30% мас. – «ЛЮКС», выход бензина при одинаковых условиях на катализаторе «ЛЮКС» – 37% мас., что существенно выше, чем на бицеолитном катализаторе – 20% мас. и выход кокса оказался больше для катализатора «ЛЮКС».

В зарубежной практике встречаются и другие типы цеолитов. В статье [27] проведено исследование цеолита типа морденит MCM-41 с упорядоченной гексагональной кристаллической решеткой в виде добавки к ультрастабильному цеолиту типа Y.

Каталитическая активность образца была протестирована на пилотной установке КК в Китае. Результаты исследования показали, что при крекинге вакуумного газойля с применением каталитической системы Y/MCM-41, пропитанной раствором Na_2SiO_3 наблюдается увеличение выхода бензиновой фракции с 41,50 до 41,82 % мас. и жидких продуктов с 66,65 до 68,18% мас., а также увеличение конверсии сырья с 68,19 до 69,72 %, по сравнению с цеолитсодержащим катализатором в декатионированной форме HY.

Вводя в кристаллические решетки цеолитов катионы отличные от щелочных или щелочно-земельных металлов (например Ga, Ge) и анионы различных кислотных остатков, например фторид-ионы, можно получить другие структуры цеолитов, отличные от цеолитов типа Y и ZSM-5.

На рисунке 1.11 представлены недавние разработки по синтезу новых цеолитов в зависимости от размера их пор. Цеолит типа ITQ-13 является аналогом цеолита типа ZSM-5, но в отличие от цеолита ZSM-5 на его поверхности имеются поры

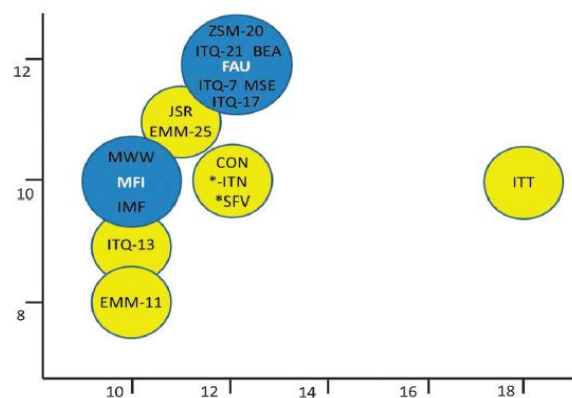


Рисунок 1.11 – Новые синтезированные цеолиты для катализаторов КК [22]

различного диаметра – 9 и 10 Å. Согласно работе [28] у данного цеолита зафиксированы кислотные центры, которые по силе превышают кислотные центры ZSM-5, а следовательно, используя катализатор на основе цеолита ITQ-13 можно получить повышенный выход газообразных УВ.

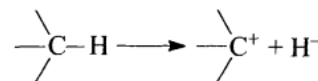
Цеолит типа ZSM-20 и ITQ-21 имеют схожие структуры с цеолитом типа Y. Однако данные типы цеолитов показывают высокую термическую стабильность, по сравнению с цеолитом типа Y [29].

В настоящее время основными фирмами, занимающиеся производством катализаторов для КК, являются Grace, Akzo-Nobel, Engelhard, Exxon, Mobil Oil, Union Carbide, Akzo Chemie и др. Они выпускают широкий набор катализаторов для переработки различного типа сырья и получения широкого спектра продуктов.

1.4 Физико-химические основы процесса каталитического крекинга

Химические реакции КК осуществляются по карбоний-ионному цепному механизму [30].

Карбоний-ионы образуются при гетеролитическом разрыве связи C-H в молекулах УВ:



Причем наиболее стабильным является третичный карбоний-ион, отличающийся высокой реакционной способностью. Карбоний-ионы являются промежуточными веществами в процессе КК их образование возможно на брэндстедовском и льюисовском центрах, находящихся на поверхности катализатора.

Реакционная способность различных УВ в условиях крекинга объясняется избирательностью адсорбции на поверхности катализатора – в первую очередь адсорбируются ненасыщенные УВ (олефиновые УВ, ароматические УВ с наличием боковых связей). Наименьшей адсорбируемостью обладают парафиновые и полиароматические УВ. Промежуточное место занимают нафтеновые УВ.

Образование карбоний-иона на брэндстедовском центре представлено на рисунке 1.12, на льюисовском центре – на рисунке 1.13.

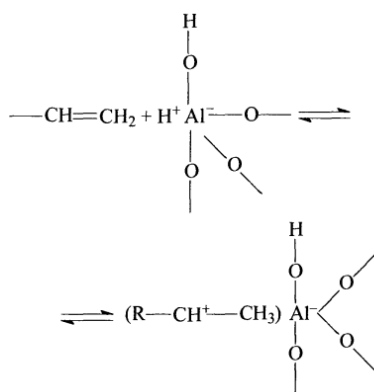


Рисунок 1.12 – Образование карбоний-иона на брэндстедовском центре [12]

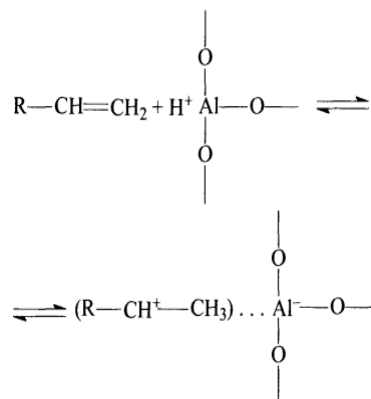


Рисунок 1.13 – Образование карбоний-иона на льюисовском центре [13]

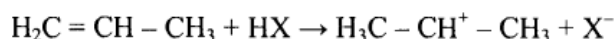
1.4.1 Крекинг парафиновых углеводородов

Парафиновые УВ крекируются на поверхности катализатора с образованием парафинов меньшей молекулярной массы и олефиновых УВ.

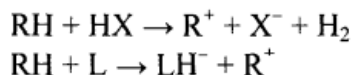
Механизм превращения парафиновых УВ состоит из трех стадий: зарождения, развития и обрыва цепи.

Зарождение цепи может проходить двумя путями:

– молекула н-парафинов подвергаются неглубокому термическому крекингу с образованием олефинов, которые в свою очередь присоединяют протон от катализатора, образуют карбкатион:

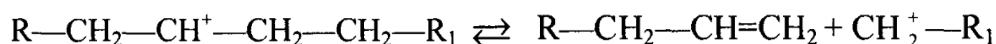


– образование карбкатионов однако, возможно и при взаимодействии н-парафиновых УВ с катализатором в виде кислоты Брэндстеда (НХ) или Льюиса (L) [32]:



Стадия продолжения цепи заключается в расщеплении карбоний-иона (путем обратной реакции алкилирования) на меньший карбоний-ион (адсорбированный) и на молекулу олефина. Данная стадия подчиняется β-

правилу, т.е. крекированная связь С-С находится в β-положении относительно атома углерода, несущего положительный заряд:



Таким образом, образуются α-олефин и первичный карбоний-ион, которые являются не устойчивыми, поэтому на следующем этапе возможно ожидать перегруппировки в изомеры олефинов (путем переноса двойной связи) и карбоний-ионов (образование вторичного или третичного карбоний-иона).

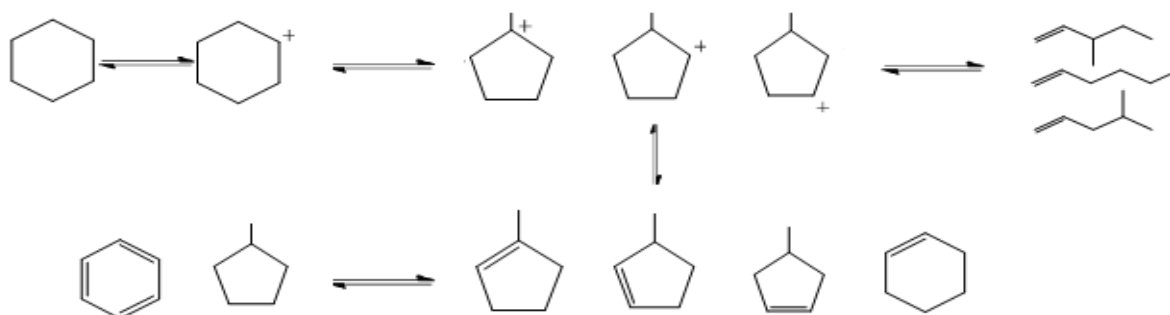
Обрыв цепи происходит при взаимодействии карбоний-иона с основным центром катализатора, при этом карбкатион теряет протон и превращается в олефин.

1.4.2 Крекинг нафтеновых углеводородов

Для нафтеновых УВ характерны реакции:

- расщепления кольца с образованием олефинов;
- дегидрирования с образованием ароматических УВ и конденсированных структур – кокса.

Общую схему крекинга нафтеновых УВ можно представить следующим образом:



Стадия зарождения цепи аналогична парафиновым УВ.

Стадия развития проходит при участии карбкатионов в мономолекулярных и бимолекулярных реакциях, при этом может наблюдаться разрыв как С-С, так и С-Н связей.

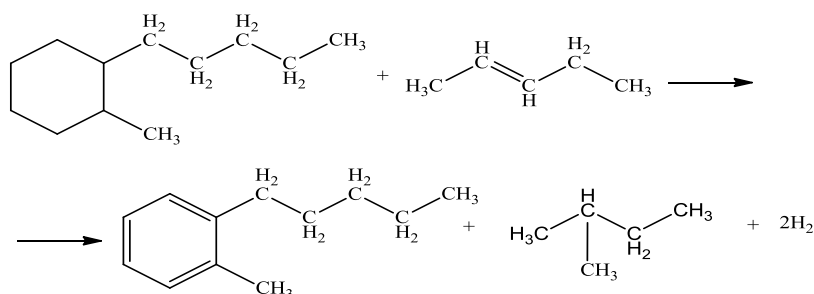
Стоит отметить, что расщепление кольца происходит у низших нафтеновых УВ (с малыми циклами C_3 и C_4), системы с C_5 , C_6 и большими кольцами реагируют с той же скоростью что и соответствующие парафины, и медленнее, чем реакционноспособные первичные олефины.

Шестичленные нафтены активно вступают в реакции дегидрирования с образованием ароматических структур.

1.4.3 Реакции олефиновых углеводородов

Олефиновые УВ вступают в химические реакции через стадию образования карбокатиона (См. механизм превращения парафиновых УВ, зарождение цепи по 1-му пути). Таким образом образуются насыщенные и ненасыщенные УВ меньшей молекулярной массы (согласно β -правилу) и газ, богатый ППФ и ББФ.

В результате реакций перераспределения водорода между олефиновыми и нафтеновыми УВ, присутствующими в реакционной среде образуются ароматические УВ и изопарафины:

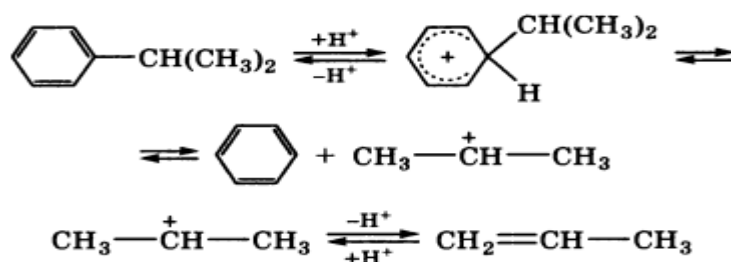


1.4.4 Крекинг ароматических углеводородов

В случае ароматических соединений крекингу подвергаются не бензольные кольца, а боковые цепи (за исключением метильной группы), которые при обычных условиях расщепляются на олефиновые УВ.

Скорость крекинга боковой цепи R соединения C_6H_5R возрастает при переходе от первичного к вторичному и третичному атому C, связанному с ядром, а в пределах данного класса увеличивается с увеличением с увеличением цепи. Метильные группы при крекинге не отщепляются.

Крекинг кумола является примером реакции деалкилирования боковой цепи:



Кроме того, ароматическим УВ присуща прочная адсорбция на активных центрах катализатора..

Механизм превращения реакций в процессе КК определяет высокое содержание изопарафиновых, олефиновых и ароматических УВ в бензиновой фракции. При этом важно оптимизировать скорость протекания реакций перераспределения водорода, поскольку образование ароматических УВ с последующей поликонденсацией способствует образованию кокса на поверхности ЦСК.

Низкое содержание кокса на поверхности катализатора не позволит достичь требуемой температуры циркулирующего катализатора (после выжига кокса в регенераторе), а следовательно и температуры процесса в лифт-реакторе.

1.5 Расчетные методы определения группового состава тяжелых нефтяных фракций

Тяжелые нефтяные фракции представляют собой многокомпонентную смесь с преобладанием высокомолекулярных УВ (парафиновых, нафтеновых и ароматических) и смолистых соединений, а также асфальтенов, карбенов, карбоидов, органических соединений, содержащих тяжелые металлы (V, Ni, Fe, Mn и др.) и гетероатомы (S, O, N, F).

Самые совершенные лабораторные методы анализа смесей сложного состава, начиная от газовой хроматографии и заканчивая высокоэффективной жидкостной хроматографии в сочетании с масс-

спектрометрией, не позволяют разделить вышеуказанную систему на компоненты. Данные методы позволяют идентифицировать лишь более простые по составу легкие нефтяные фракции (к.к до 350⁰С) , однако для характеристики тяжелого нефтяного сырья на НПЗ, информация о полном компонентом составе не требуется. Наиболее важна информация о групповом и фракционном составе тяжелых нефтяных фракций.

На сегодняшний день, как правило, в лабораториях НПЗ химические анализы по определению группового состава тяжелых нефтяных фракций не осуществляются на регулярной основе из-за длительности проведения анализов, при этом, измерение физико-химических свойств нефтяных фракций, согласно графикам контроля, осуществляется ежедневно. Основными, из которых являются плотность, содержание общей серы, фракционный состав и др., которые могут быть использованы для определения группового состава (содержания парафиновых, нафтеновых, ароматических УВ и смол) тяжелой нефтяной фракции сырьевого потока КК.

Работы по связи фракционного и группового состава тяжёлых фракций ведутся с 50-ых годов. В литературных данных представлены запатентованные корреляции (n-d-M, TOTAL, API) физико-химических свойств с групповым составом нефтяных фракций [33]. Но каждый метод имеет ряд ограничений по диапазону применения.

1.5.1 Методика для расчета структурно-группового состава нефтяных фракций n-d-M

В 1951-м году Van Nes и Van Westen предложили методику n-d-M для расчета структурно-группового состава нефтяных фракций. Корреляция n-d-M – методика, использующая показатель преломления (n), плотность (d) и молекулярную массу (M) для определения структурно-группового состава нефтяных фракций, позволяет определить содержание углерода в структуре нафтеновых (%C_N), ароматических колец (%C_A) и парафиновых (%C_P) цепях, а так же число нафтеновых (R_N) и ароматических колец (R_A) во фракции [34].

Для расчета структурно-группового состава нефтяных фракций в качестве исходных данных необходимо иметь более детальные лабораторные анализы по плотности при 15°C , кинематической вязкости при двух температурах – $54,4^{\circ}\text{C}$ и $98,89^{\circ}\text{C}$, фракционному составу и по содержанию серы во фракции.

Блок-схема для расчета структурно-группового состава нефтяных фракций согласно методике n-d-M приведена ниже на рисунке 1.14.



Рисунок 1.14 – Блок-схема расчета структурно-группового состава согласно методики n-d-M

1.5.2 Методика для расчета группового состава нефтяных фракций TOTAL

При помощи корреляций TOTAL можно рассчитать только составляющую группового состава – массовое содержание ароматических УВ во фракции (C_A), используя результаты лабораторных анализов по фракционному составу, плотности при 15°C и анилиновой точке.

Блок-схема для расчета содержания ароматических УВ во фракции согласно методике TOTAL приведена ниже на рисунке 1.15.

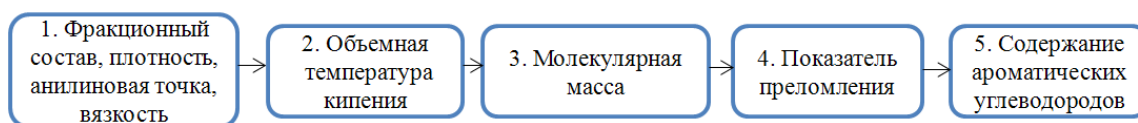


Рисунок 1.15 – Блок-схема расчета группового состава методики TOTAL

Трудностью применения данного метода является использование в качестве исходных данных лабораторные анализы по определению анилиновой точки фракции, которые в условиях лаборатории являются длительными и трудоемкими, т. к. сначала необходимо провести предварительное разделение фракции на силикагеле, а затем для деароматизированной фракции зафиксировать анилиновую точку (AP), как температуру помутнения смеси путем неоднократного повторения.

Согласно [33] корреляция TOTAL достаточно точно прогнозирует содержание ароматических УВ в сырье КК, особенно содержащего остатки.

В приложении А приведена последовательность расчета концентрации ароматических УВ в сырьевом потоке КК согласно методике TOTAL [35].

Однако полный групповой состав нефтяных фракций можно рассчитать с использованием методики – API (в переводе с англ. методика Американского Нефтяного Института).

1.5.3 Методика для расчета группового состава нефтяных фракций API

Методика API – обобщенный метод прогнозирования мольной концентрации парафиновых (x_P), нафтеновых (x_N) и ароматических УВ (x_A) во фракции. Корреляция API сочетает в себе корреляции двух предыдущих методик n-d-M и TOTAL.

Согласно данной методике необходимо рассчитать дополнительные физико-химические свойства фракции и выбрать из них два таких свойства, которые были бы различны для групп УВ. Так, в 1980-м году Riazі M. R. и Daubert T. E. предложили определять групповой состав нефтяных фракций на основании вязкостно-весовой константы (VGC) и интерцепта рефракции (R_i). Для расчета группового состава по методике API в качестве исходных данных необходимо иметь результаты лабораторных анализов по фракционному составу, плотности при 15⁰С и кинематической вязкости при

210⁰F (100⁰C) в условных секундах Сейболта (УСС).

Методика API позволяет рассчитывать групповой состав для легких нефтяных фракций с молекулярной массой (ММ) в диапазоне 70<ММ<200 и тяжёлых фракций 200<ММ<600.

Блок-схема для расчета мольной концентрации групп УВ во фракции согласно методике API приведена ниже на рисунке 1.16.

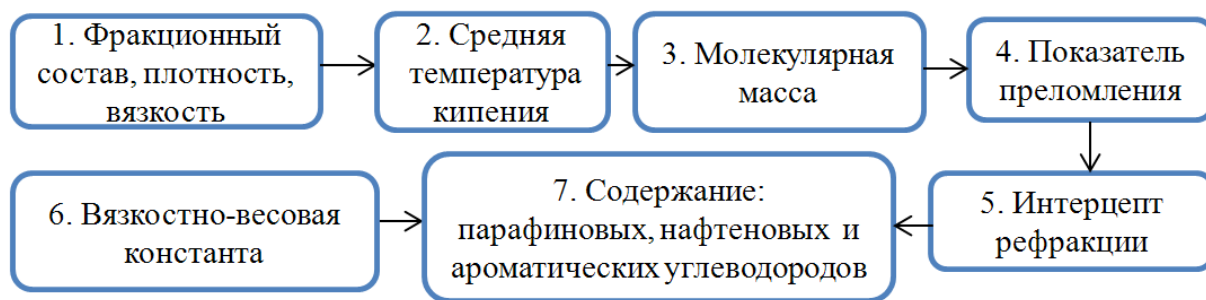


Рисунок 1.16 – Блок-схема расчета группового состава методики API

В приложении А приведена последовательность расчета мольной долевой концентрации групп УВ для фракции в диапазоне 200<ММ<600 согласно методике API [36].

Позднее Riazi M. R. и Daubert T. E. в 1986-м году опубликовали работу [37] по расчету группового состава нефтяных фракций на основании лабораторных анализов по фракционному составу и плотности с использованием:

- интерцпта рефракции (R_i) и соотношения C/H;
- соотношения C/H и величины $m=f$ (ММ, R_i) являющейся функцией ММ и показателя преломления (R_i) для фракции. В приложении А представлены корреляции для расчета мольной концентрации парафиновых, нафтеновых и ароматических УВ с использованием величин C/H, m , R_i [37].

В последней работе [38] авторы предлагают рассчитывать групповой состав нефтяных фракций на основании лишь лабораторных анализов по плотности и показателю преломления фракции.

2 Объект и методы исследования

2.1 Промышленная технология каталитического крекинга вакуумного дистиллята установки НПЗ Западной Сибири

Технология КК на установке НПЗ Западной Сибири реализована в составе комбинированной установки глубокой переработки мазута КТ-1/1 на секции С-200.

На рисунке 2.1 представлена упрощенная схема комбинированной установки глубокой переработки мазута КТ-1/1 НПЗ Западной Сибири, в которой КК реализован на секции С-200.

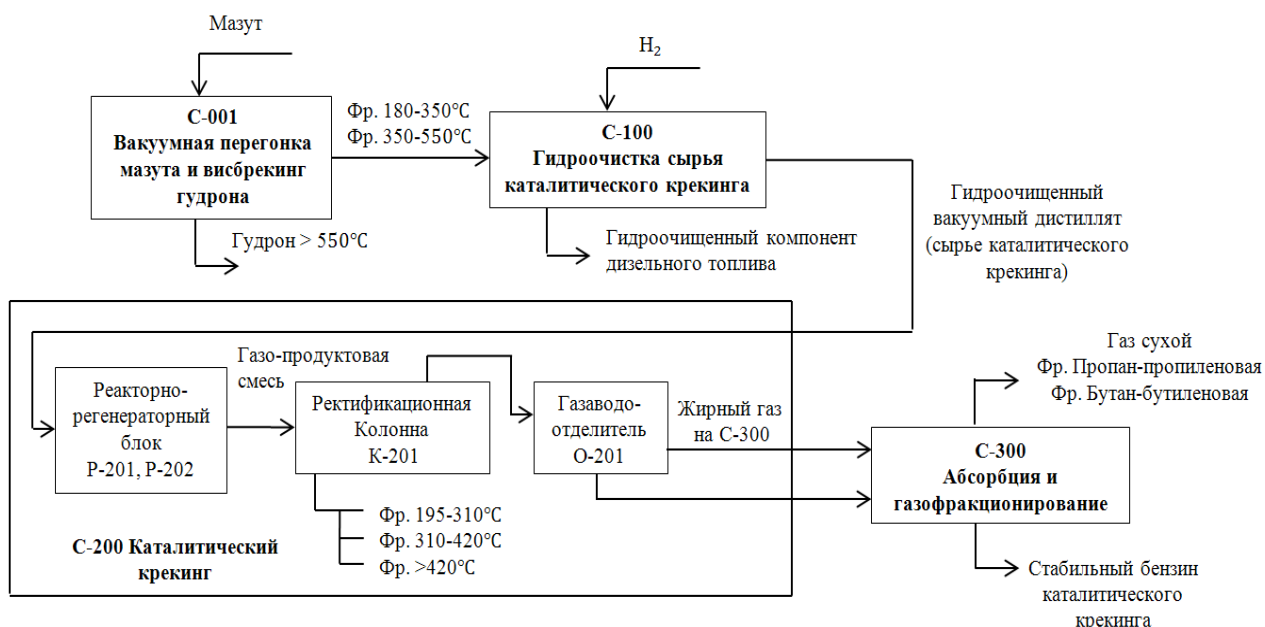


Рисунок 2.1 – Упрощенная схема комбинированной установки КТ-1/1 НПЗ Западной Сибири

Технологический процесс КК НПЗ Западной Сибири реализован в лифт-реакторе в восходящем потоке микросферического ЦСК (рисунок 2.2). Проектная производительность установки КК НПЗ Западной Сибири после реконструкции составляет 2,4 млн. тонн в год.

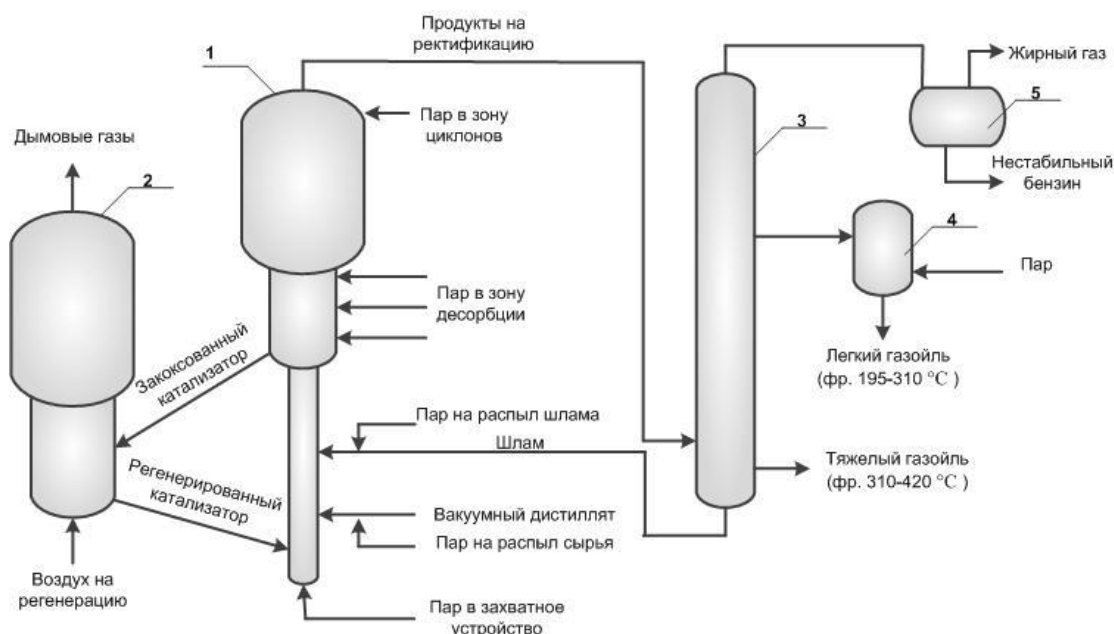


Рисунок 2.2 – Технологическая схема процесса КК НПЗ Западной Сибири: 1 – реактор; 2 – регенератор; 3– колонна ректификации продуктов крекинга; 4 – отпарная колонна; 5 – отстойник

Материальный баланс установки КК НПЗ Западной Сибири представлен в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Материальный баланс установки КК НПЗ Западной Сибири

Наименование	Расход	Отбор
	т/сут	%
Поступило:		
Вакуумный дистиллят	6634,2	100,0
Получено:		
Жирный газ	1027,4	15,49
Нестаб.бензин	3929,2	59,23
Фр.195-310	773,3	11,66
Фр.310-420	583,1	8,79
Фр.>420		
Кокс выжигаемый	293,37	4,42
Дебаланс	27,8	0,42

Диапазон изменения параметров технологического режима на соответствующей установке представлен в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Технологический режим работы лифт-реактора (интервал по регламенту)

Параметры процесса	Значения
Расход сырья на установку, м ³ /ч	160-420
Температура сырья на входе реактор, °C	240-350

Продолжение таблицы 2.2

Расход шлама в реактор, м ³ /ч	Не более 20
Расход пара в захватное устройство лифт-реактора, кг/ч	2000-14000
Расход водяного пара в верхний барботер зоны десорбера, кг/ч	Не менее 1400
Расход водяного пара в средний барботер зоны десорбера, кг/ч	Не менее 360
Расход водяного пара в нижний барботер зоны десорбера, кг/ч	Не менее 360
Температура регенерированного катализатора, °С	630-700
Температура на выходе из баллистического сепаратора, °С	495-535
Давление, кгс/см ²	0,8-1,6

2.2 Характеристика сырья и продуктов процесса каталитического крекинга промышленной установки КТ-1/1 НПЗ Западной Сибири

Сырьем для установки КК является гидроочищенный вакуумный дистиллят. Физико-химические свойства сырья на основании экспериментальных данных с промышленной установки КК НПЗ Западной Сибири приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Физико-химические свойства гидроочищенного вакуумного дистиллята НПЗ Западной Сибири

Физико-химические свойства	Значения
Фракционный состав, °С	350-520
Относительная плотность при 15 ⁰ С	0,8910-0,9140
Коксуемость, %	0,05-0,25
Содержание серы, % мас.	0,03-0,07
Кинематическая вязкость при 50 ⁰ С, мм ² /с	30-38
Кинематическая вязкость при 100 ⁰ С, мм ² /с	6,5-6,8

В процессе КК образуется широкий спектр продуктов: жирный газ, бензиновая фракция, легкий и тяжелый газойль, а так же фр. > 420⁰С.

Жирный газ и нестабильный бензин используются в качестве сырья на установке газодифракционирования и стабилизации бензина с целью получения ППФ и ББФ и компонента автомобильного бензина.

Легкий газойль (фр.195-310⁰С) используется в качестве компонента дизельного топлива.

Тяжелый газойль (фр.310-420⁰С) используется в качестве сырья для производства технического углерода (сажи), сырья для производства кокса или в качестве компонента котельного топлива.

Фракция более 420⁰С используется в качестве компонента котельного топлива или в смеси с тяжелым газойлем КК – в качестве сырья для производства кокса.

2.3 Методы исследования

Для определения группового и структурно-группового состава сырья, легкого и тяжелого газойля КК проведено жидкостно-адсорбционное хроматографическое разделение на силикагеле марки АСК с размером зерен 0,2 – 0,3 мм по методике ВНИИ НП. Десорбцией с помощью растворителей с различной полярностью (гексан, смесь гексана и толуола, смесь этилового спирта и толуола) последовательно извлечены фракции УВ. УВ разделены по показателю преломления с использованием рефрактометра ИРФ-22 на парафино-нафтеновую фракцию, фракцию ароматических УВ. Структурно-групповой состав парафино-нафтеновых фракций определен по методу n-d-m, для фракции ароматических УВ по методу Хазельвуда.

Молекулярная масса сырья и продуктов КК определена криоскопическим методом с использованием лабораторного оборудования CRYETTEWR, который фиксирует температуру замерзания образцов.

Общее содержание серы в сырье определено с применением рентгенофлуоресцентного энергодисперсионного анализатора серы «СПЕКТРОСКАН SL».

В качестве аналитического оборудования для установления качественного состава сырья установки КК использован хромато-масс-спектрометр Hewlett Packard 6890 Gas Chromatograph System с 5973 Mass Selective Detector с применением программного обеспечения GC Chemstation.

Для определения индивидуального состава бензиновой фракции проведены лабораторные исследования методом газо-жидкостной

хроматографии с применением газового хроматографа «ХРОМАТЕК – КРИСТАЛЛ 5000» исполнение 2 с пламенно-ионизационным детектором, программного обеспечения «Хроматэк Аналитик» для управления, сбора и обработки хроматографической информации, капиллярной колонки ДВ-1, 100·0,25·0,5.

4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Компьютерные модели, предназначенные для получения моторных топлив (бензина, дизельного топлива, реактивное топлива) из тяжелых нефтяных фракций, являются востребованным продуктом на рынке моделирующих систем, так как они позволяют проводить мониторинг процессов (главной целью которых является увеличение глубины переработки нефти в отечественной промышленности) и оптимизацию всего процесса в режиме реального времени.

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

4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Целевой рынок – это 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).

4.1.2 Анализ конкурентных технических решений

Детальный анализ конкурирующих разработок, существующих на рынке, необходимо проводить систематически, поскольку рынки пребывают в постоянном движении. Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести

оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить направления для ее будущего повышения.

Целесообразно проводить данный анализ с помощью оценочной карты, пример которой приведен в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		Конкурентоспособность	
		Б _ф	Б _{кл}	К _ф	К _{кл}
1	2	3	4	6	7
Технические критерии оценки ресурсоэффективности					
1. Повышение производительности	0,07	4	3	0,28	0,21
2. Энергоэкономичность	0,05	5	4	0,25	0,20
3. Достоверность	0,26	5	4	1,30	1,04
4. Простота использования	0,04	4	4	0,16	0,16
Экономические критерии оценки эффективности					
1. Конкурентоспособность продукта	0,25	3	4	0,75	1,00
2. Уровень проникновения на рынок	0,07	3	4	0,21	0,28
3. Цена	0,09	4	3	0,36	0,27
4. Финансирование научной разработки	0,08	5	5	0,40	0,40
5. Срок выхода на рынок	0,05	4	4	0,20	0,20
6. Наличие сертификации разработки	0,04	4	2	0,16	0,08
Итого	1			4,07	3,84

В таблице 4.1 Б_ф и Б_{кл} – продукты (разрабатываемые математические модели процесса КК), объектами исследования которых являются установки КК для выработки максимального выхода бензина и жирного газа соответственно.

Итогом данного анализа, действительно способным заинтересовать партнеров и инвесторов, может стать выработка конкурентных преимуществ, которые помогут создаваемому проекту завоевать доверие покупателей посредством предложения разработки, заметно отличающихся либо высоким уровнем качества при стандартном наборе определяющих его параметров, либо нестандартным набором свойств, интересующих покупателя. Отношение конкурентоспособностей К_ф и К_{кл} больше 1, а следовательно отечественную модель КК можно признать конкурентоспособной.

4.1.3 SWOT-анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта. Результаты итоговой матрицы SWOT-анализа представлены в приложении В таблице В.1.

4.2 Планирование научно-исследовательских работ

4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Для выполнения научных исследований формируется рабочая группа, в состав которой входят: бакалавр, научный руководитель, консультант по части социальной ответственности (СО) и консультант по экономической части (ЭЧ) выпускной квалификационной работы. Перечень этапов и работ в рамках проведения научного исследования и распределение исполнителей по видам работ приведены в приложении В таблице В.2.

4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости $t_{ожі}$ используется формула:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{mini} + 2t_{maxi}}{5}, \quad (4.1)$$

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

t_{mini} – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;

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

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях T_p , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями по формуле:

$$T_{pi} = \frac{t_{ожi}}{Ч_i}, \quad (4.2)$$

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

$t_{ожi}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.

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

Временные показатели проведения научного исследования приведены в приложении В таблице В.3.

4.2.3 Разработка графика проведения научного исследования

При выполнении дипломных работ студенты становятся участниками сравнительно небольших по объему научных тем, поэтому наиболее удобным и наглядным является построение ленточного графика проведения научных работ в форме диаграммы Ганта.

Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}}, \quad (4.3)$$

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

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

$k_{\text{кал}}$ – коэффициент календарности.

В свою очередь коэффициент календарности определяется по формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}}, \quad (4.4)$$

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

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

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

На проведение научного исследования отведен период из четырех основных месяцев и половина мая на исправление недочетов, тогда количество календарных дней составит 140. Количество выходных и праздничных дней примем 16 и 6 соответственно.

Календарный план-график проведения научного исследования по разработке кинетической модели КК приведен в приложении В таблице В.4.

4.2.4 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)

В процессе формирования бюджета НТИ используется следующая группировка затрат по статьям: материальные затраты НТИ; основная заработная плата исполнителей темы; дополнительная заработная плата исполнителей темы; отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления); накладные расходы.

Материальные затраты и затраты на оборудование для данного НТИ представлены в приложении В таблицах В.5, В.6.

Для оборудования нужно рассчитать величину годовой амортизации по следующей формуле:

$$A_{\text{год}} = \frac{C_{\text{перв}}}{T_{\text{пи}}}, \quad (4.5)$$

где $C_{\text{перв}}$ – первоначальная стоимость, руб;

$T_{\text{пи}}$ – время полезного использования, год.

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

$$Z_{\text{зп}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}, \quad (4.6)$$

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

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

Основная заработная плата ($Z_{\text{осн}}$) руководителя от предприятия:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_p, \quad (4.7)$$

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

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

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d}, \quad (4.8)$$

где Z_m – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года: при отпуске в 24 раб. дня $M = 11,2$ месяца, 5-дневная неделя; при отпуске в 48 раб. дней $M = 10,4$ месяца, 6-дневная неделя;

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

Баланс рабочего времени каждого работника НТИ приведён в приложении В таблице В.7.

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_m = Z_{\text{тс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_d) \cdot k_p, \quad (4.9)$$

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

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

k_d – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2 – 0,5

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

Расчет основной и общей заработной платы исполнителей работы приведен в приложении В таблицах В.8, В.9.

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

Величина этих отчислений определяется по следующей формуле:

$$З_{внеб} = k_{внеб} \cdot (З_{осн} + З_{доп}), \quad (4.10)$$

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

Тарифы страховых взносов в 2016 году остались на прежнем уровне в соответствии с постановлением Правительства РФ от 26.11.2015 № 1265, т. е. есть общий совокупный тариф все также составляет 30%, в в том числе:

- ✓ 22 процента в ПФ РФ;
- ✓ 2,9 процента в ФСС России;
- ✓ 5,1 процента – в ФФОМС.

Отчисления во внебюджетные фонды представлены в приложении В таблице В.10.

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

$$З_{накл} = (\text{сумма статей } 1 \div 5) \cdot k_{нр}, \quad (4.11)$$

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

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

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

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект приведен в приложении В таблице В.11.

Как видно из таблицы В.11, основные затраты НТИ приходятся на покупку специального оборудования для проведения НТИ.

4.3 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической 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 финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{\text{pi}}}{\Phi_{\text{max}}}, \quad (4.12)$$

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

Φ_{pi} – стоимость i -го варианта исполнения;

Φ_{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 разах (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 следующим образом:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i, \quad (4.13)$$

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

a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки;

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

n – число параметров сравнения.

Результаты по расчету интегрального показателя ресурсоэффективности представлены в приложении В таблице В.12.

Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки для исполнителя 1 и 2:

$$I_{p-ucn1} = 5 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,25 + 4 \cdot 0,20 + 5 \cdot 0,25 = 4,65;$$

$$I_{p-ucn2} = 4 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,25 + 4 \cdot 0,20 + 3 \cdot 0,25 = 3,75.$$

Результаты эффективности разработки приведены в приложении В таблице В.13.

В результате проведенной работы была спроектирована и создана конкурентоспособная разработка, отвечающая современным требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения. Сравнительный анализ интегральных показателей эффективности показывает, что предпочтительно использовать математическую модель КК, направленную на получение максимального выхода высокооктанового бензина, в связи с ростом производительности, минимальной погрешностью результатов и высокой надежностью по сравнению с моделью КК, направленной на получение высокого выхода жирного газа.

Список публикаций

1. Computer simulator for student training to effective exploitation the catalytic cracking unit / G. Y. Nazarova, G. R. Burumbaeva, **T. A. Shafran**, A. Y. Svarovskii // Pet. Coal. – 2016. Vol.58, №1. – 76-82.

2. **Шафран Т.А.**, Назарова Г.Ю. Расчетный метод определения группового состава вакуумного дистиллята на основании данных о фракционном составе и плотности фракции // Проблемы геологии и освоения недр: труды XX Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых учёных, посвященного 120-летию со дня основания Томского политехнического университета, 4-8 Апреля, 2016, Томск. – Томск: Изд-во ТПУ, 2016 (в печати).

3. **Шафран Т. А.**, Назарова Г. Ю. Прогнозирование группового состава вакуумного дитиллята на основе экспериментальных данных о физико-химических свойствах // Химия и химическая технология в XXI веке: материалы XVII Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых имени профессора Л.П. Кулёва, посвященной 120-летию Томского политехнического университета (г. Томск, 17–20 мая 2016 г.) / Томский политехнический университет. — Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2016. – с 396.

4. Ивашкина Е. Н., Иванчина Э. Д., Назарова Г. Ю., **Шафран Т. А.**, Стебенева В. И. Прогнозирование группового состава бензиновой фракции с установки каталитического крекинга с применением математической модели процесса // Химия и химическая технология: материалы всероссийской научно-технической конференции, 27-28 Мая, 2016, Ангарск. – Ангарск: Ангарский государственный технический университет, 2016 (в печати).

5. **Шафран Т.А.** Влияние циркуляции катализатора на выход бензиновой фракции каталитического крекинга // Химия под знаком СИГМА: исследования, инновации, технологии: Тезисы V Всероссийской

научной молодежной школы – конференции, 15-20 Мая, 2016, Омск / ИППУ
СО РАН. – Омск: ИППУ СО РАН, 2016. – 386 с.