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

Институт электронного обучения
Специальность 240403 Химическая технология природных энергоносителей и углеродных материалов
Кафедра Химической технологии топлива и химической кибернетики

ДИПЛОМНЫЙ ПРОЕКТ/РАБОТА

Тема работы
Повышение эффективности производства дизельных топлив с использованием метода математического моделирования

УДК 665.75:519.6

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
З-5201	Отставнов Александр Александрович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Белинская Н.С			

КОНСУЛЬТАНТЫ:

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	Антоневич О.А.	к.б.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Юрьев Е.М.	к.т.н		

Томск – 2016 г.

Код результата	Результат обучения
Общекультурные компетенции	
Р1	Способность понимать и анализировать социальные и экономические проблемы и процессы; готовность применять базовые методы гуманитарных, социальных и экономических наук в различных видах профессиональной и социальной деятельности.
Р2	Демонстрировать понимание сущности и значения информации в развитии современного общества, владение основными методами, способами и средствами получения, хранения, переработки информации; использование современных технических средств и информационных технологий в профессиональной области для решения коммуникативных задач.
Р3	Способность самостоятельно применять методы и средства познания, обучения и самоконтроля; осознавать перспективность интеллектуального, культурного, нравственного, физического и профессионального саморазвития и самосовершенствования; уметь критически оценивать свои достоинства и недостатки.
Р4	Способность эффективно работать индивидуально и в качестве члена команды, демонстрируя навыки руководства коллективом исполнителей, в том числе над междисциплинарными проектами; уметь проявлять личную ответственность, приверженность профессиональной этике и нормам ведения профессиональной деятельности.
Р5	Демонстрировать знание социальных, правовых, культурных и экологических аспектов профессиональной деятельности, знание вопросов охраны здоровья, безопасности жизнедеятельности и труда на электроэнергетических и электротехнических производствах.
Р6	Осуществлять коммуникации в профессиональной среде и в обществе в целом, в том числе на иностранном языке; анализировать существующую и разрабатывать самостоятельно техническую документацию; четко излагать и защищать результаты профессиональной деятельности.
Общепрофессиональные компетенции	
Р7	Способность применять основные законы естественнонаучных дисциплин, методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования в профессиональной деятельности с целью моделирования элементов, систем и объектов химической технологии.
Р8	Способность применять стандартные методы расчета и средства автоматизации проектирования; принимать участие в выборе и проектировании элементов, систем и объектов химической технологии в соответствии с техническими заданиями.
Р9	Способность применять современные методы разработки энергосберегающих и экологически чистых технологий, обеспечивающих безопасность жизнедеятельности людей и их защиту от возможных последствий аварий, катастроф и стихийных бедствий; применять способы рационального использования сырьевых, энергетических и других видов ресурсов на нефтеперерабатывающих производствах.
Р10	Готовностью обеспечивать соблюдение производственной и трудовой дисциплины на нефтеперерабатывающем производстве; осваивать новые технологические процессы производства продукции; обеспечивать соблюдение заданных параметров технологического процесса и качества продукции.

Код результата	Результат обучения
Р11	Способность проводить предварительное технико-экономическое обоснование проектных решений; выполнять организационно-плановые расчеты по созданию или реорганизации производственных участков, планировать работу персонала и фондов оплаты труда; определять и обеспечивать эффективные режимы технологического процесса.
Р12	Способность проводить эксперименты по заданным методикам с обработкой и анализом результатов; планировать экспериментальные исследования.
Р13	Способность участвовать в работе над инновационными проектами, используя базовые методы исследовательской деятельности на основе систематического изучения научно-технической информации, отечественного и зарубежного опыта, патентных исследований по соответствующему профилю подготовки.
Р14	Способностью к монтажу, регулировке, испытаниям, сдаче в эксплуатацию, наладке и опытной проверке оборудования химической технологии.
Р15	Готовность осваивать новое оборудование химической технологии; проверять техническое состояние и остаточный ресурс оборудования и организации профилактических осмотров и текущего ремонта.
Р16	Способность разрабатывать рабочую проектную и научно-техническую документацию, выполнять проектно-конструкторские работы в соответствии со стандартами, техническими условиями и другими нормативными документами; использовать нормативные документы по качеству, стандартизации и сертификации объектов химической технологии, организовывать метрологическое обеспечение; подготавливать документацию для создания системы менеджмента качества; составлять оперативную документацию, предусмотренную правилами технической эксплуатации оборудования и организации работы.
Специальные профессиональные компетенции Профиль «Химическая технология природных энергоносителей и углеродных материалов»	
Р17	Владение основными принципами превращения горючих ископаемых и углеродных материалов
Р18	Навыки самостоятельного объяснения особенностей и закономерностей процессов, протекающих при переработке топлива
Р19	Владение знаниями производственно-технологической деятельности
Р20	Умение прогнозировать характер, свойства и область применения получаемых продуктов переработки горючих ископаемых.

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

Институт электронного образования
Направление подготовки (специальность) 240403 Химическая технология природных энергоносителей и углеродных материалов
Кафедра Химической технологии топлива и химической кибернетики

УТВЕРЖДАЮ:
Зав. кафедрой

_____ _____ _____
(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Дипломной работы

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

Студенту:

Группа	ФИО
З-5201	Отставнов Александр Александрович

Тема работы:

Повышение эффективности производства дизельных топлив с использованием метода математического моделирования	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	03 марта 2016 № 1778/С

Срок сдачи студентом выполненной работы:	21 июня 2016

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе *(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).*	Объект исследования: установка каталитической депарафинизации дизельных топлив Л-24-10/2000 ООО «ПО «Киришинефтеоргсинтез». Исходными данными являются составы сырья и продуктов, состав водородсодержащего газа, технологические параметры.
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. Обзор литературы 1.1. Характеристика и применение дизельного топлива 1.2. Современные требования, предъявляемые к качеству дизельных топлив для холодных климатических зон 1.3. Низкотемпературные свойства дизельных топлив. Назначение процесса депарафинизации 1.4. Механизмы реакций на катализаторе депарафинизации 1.5. Постановка цели и задач исследования 2. Объект и методы исследования

	2.1 Технология процесса каталитической депарафинизации 2.2. Характеристика сырья и продуктов, технологических режимов установки каталитической депарафинизации 2.3. Метод математического моделирования в решении задач нефтепереработки 3. Расчеты и аналитика 3.1. Кинетическая модель процесса каталитической депарафинизации 3.2. Компьютерная моделирующая система процесса каталитической депарафинизации 3.3. Исследование влияния температуры в реакторе депарафинизации на показатели процесса 3.4. Исследование влияния расхода сырья в реактор депарафинизации показатели процесса 3.5. Подбор оптимальных технологических параметров работы реактора депарафинизации 4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение 5. Социальная ответственность
Перечень графического материала *(с точным указанием обязательных чертежей)*	

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы
(с указанием разделов)

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Рыжакина Татьяна Гавриловна
Социальная ответственность	Антоневич Ольга Алексеевна

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

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	3 марта 2016

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Белинская Н.С.			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
З-5201	Отставнов Александр Александрович		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
З-5201	Отставнов Александр Александрович

Институт	Институт электронного обучения	**Кафедра**	Химической технологии топлива и химической кибернетики
Уровень образования	Специалитет	**Направление/специальность**	240403 Химическая технология природных энергоносителей и углеродных материалов

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:	
1. *Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих*	*-стоимость оборудования и материалов*
2. *Нормы и нормативы расходования ресурсов*	*- размер оплаты труда*
3. *Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования*	*- норма отчислений в социальные фонды*
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. *Оценка коммерческого потенциала научно-технического исследования (НИ)*	*-оценка технического уровня новшества*
2. *Формирование плана и графика разработки и внедрения (НИ)*	*-планирование выполнения проекта;* *-определение трудоемкости выполнения работ*
3. *Составление бюджета научного исследования (НИ)*	*-расчет капитальных вложений в проект*
4. *Оценка ресурсной, финансовой, социальной, бюджетной эффективности НИ и потенциальных рисков*	*-определение экономического эффекта* *-расчет основных показателей экономической эффективности*
Перечень графического материала *(с точным указанием обязательных чертежей)*	
1. *Оценка конкурентоспособности НИ* 2. *Матрица SWOT* 3. *Оценка перспективности нового продукта* 4. *График разработки НИ* 5. *Инвестиционный план. Бюджет НИ* 6. *Основные показатели эффективности НИ* 7. *Риски НИ*	

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	3 марта 2016

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Рыжакина Т.Г.	к.э.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
З-5201	Отставнов Александр Алекасандрович		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
З-5201	Отставнов Александр Александрович

Институт	Институт электронного обучения	**Кафедра**	Химической технологии топлива и химической кибернетики
Уровень образования	Специалитет	**Направление/специальность**	240403 Химическая технология природных энергоносителей и углеродных материалов

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	*Установка каталитической депарафинизации Л-24-10/2000, применяется на НПЗ для удаления высокомолекулярных парафинов нормального строения из нефтяных фракций*
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Производственная безопасность 1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности: – физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой; – действие фактора на организм человека; – приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); – предлагаемые средства защиты; – (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства). 1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности: – механические опасности (источники, средства защиты; – термические опасности (источники, средства защиты); – электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты); – пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения).	*1.1 повышенная запыленность и загазованность воздуха рабочей зоны (ГОСТ 12.1.005-88. ССБТ); повышенный уровень шума на рабочем месте (ГОСТ 12.1.003–83 ССБТ);* *1.2. –электробезопасность – статическое электричество (специальная одежда антиэлектростатическая; средства защиты рук антиэлектростатическая; специальная обувь антиэлектростатическая; предохранительные приспособления антиэлектростатические (браслеты и кольца));* *- пожаровзрывобезопасность (причины: отступление от норм установленного технологического режима эксплуатации; разгерметизация фланцев трубопроводов или аппаратов с нефтепродуктами; неисправность средств сигнализации и блокировки технологического процесса; несоблюдение инструкций по промышленной безопасности и противопожарных правил. Средства пожаротушения: ручные порошковые огнетушители ОП-5, ОП-10, ОП-50, углекислотные огнетушители ОУ-6, пожарные ящики с песком в комплекте пожарные рукава).*

2. Экологическая безопасность: – защита селитебной зоны – анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы); – анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы); – анализ воздействия объекта на литосферу (отходы); – разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды.	*– Анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы):* *Среди загрязнений воздушной среды выбросами НПЗ основными являются углеводороды и сернистый газ.* *– Анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы):* *Нефти и нефтепродукты, сбрасываемые со сточными водами: сырая нефть, мазут, бензин, керосин, бензол, толуол, ксилол, этилен.* *– Анализ воздействия объекта на литосферу (отходы):* *Накапливаются такие выбросы, как углеводороды, нефти оксиды азота, серы, фенол, аммиак, а также тяжелые металлы, вымываемые снегом из атмосферы.* *Почва загрязняется нефтепродуктами и выбросами этих предприятий в радиусе до 3-х км, и глубиной до 60-80 см.*
3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях: – перечень возможных ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения; – выбор наиболее типичной ЧС; – разработка превентивных мер по предупреждению ЧС; – разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий.	*- Пожары, взрывы, угроза взрывов;* *- Пожаровзрывоопасность веществ и материалов;* *- Меры:* *1. строгое соблюдение норм технологического режима - порядка и правил ведения технологических процессов на всех составляющих установки;* *2. обязательное выполнение обслуживающим персоналом производственных инструкций, правил по производственной безопасности, пожарной и газовой безопасности,* *3. бесперебойное снабжение установки сырьём, паром, водой, электроэнергией, воздухом КИП, азотом;* *4. выполнение всего комплекса технических и организационных мероприятий по поддержанию на высоком уровне пожаровзрывобезопасности всего технологического оборудования, технической надёжности КИП и обеспечивающих систем;* *5. высокий уровень профессиональной подготовки промышленно-производственного персонала;* *6. постоянная готовность сил и средств к локализации аварий и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций;* *- Во всех помещениях на производстве предусмотрена пожарная сигнализация. Сигналы от датчиков пожарной сигнализации подаются на щиты управления. В качестве датчиков*

	используются пожарные извещатели взрывозащищенные. Для тушения пожаров или возгораний на установке применяются следующие средства пожаротушения: ручные порошковые огнетушители ОП-5, ОП-10, ОП-50; углекислотные огнетушители ОУ-6; пожарные ящики с песком в комплекте; пожарные рукава. На территории установки установлены пожарные щиты, укомплектованные огнетушителями ОП-5, ОП-10, ОУ-6, кошмой, лопатами.
4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.	*1) Согласно статье 224 ТК РФ у сотрудников, которые заняты на работах во вредных или опасных условиях, продолжительность рабочего времени сокращается на 4 часа в неделю [21].* *2) Компоновка оборудования, зданий и сооружений выполнена в соответствии с действующими «Ведомственными указаниями проектирования предприятий, зданий и сооружений нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности» (ВУПП-88) [22].*

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	10 января 2016 г.

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Антоневич О.А.	к.б.н		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
З-5201	Отставнов Александр Александрович		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 110 с., 13 рис., 46 таблиц, 42 источника, 1 приложение.

Ключевые слова: ДИЗЕЛЬНОЕ ТОПЛИВО, НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ СВОЙСТВА, ДЕПАРАФИНИЗАЦИЯ, РЕАКЦИИ НА КАТАЛИЗАТОРЕ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, РЕАКТОР ДЕПАРАФИНИЗАЦИИ, ДИЗЕЛЬНАЯ ФРАКЦИЯ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ, ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

Объектом исследования является процесс каталитической депарафинизации дизельных топлив.

Целью работы является повышение эффективности производства дизельных топлив путем исследования влияние технологических параметров в реакторе депарафинизации на состав, свойства и выход процесса и оптимизации технологического режима в зависимости от состава сырья.

В процессе исследования проводились расчеты на математической модели процесса депарафинизации.

В результате исследования выявлены закономерности изменения компонентного состава, температуры помутнения и выхода продукта относительно изменяющихся технологических параметров.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: температура, расход сырья, плотность сырья, расход ЦВСГ, квенч ВСГ, плотность ВСГ, давление, состав сырья, состав ВСГ, состав продукта.

Степень внедрения: частичная.

Область применения: установки каталитической депарафинизации нефтеперерабатывающих предприятий.

Экономическая значимость работы: результаты исследования могут использоваться для повышения ресурсоэффективности производства дизельных топлив.

Определения, обозначения, сокращения, нормативные ссылки

Нормативные ссылки

В настоящей работе использованы ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ Р 1.5-2012 Стандартизация в Российской Федерации. Стандарты национальные. Правила построения, изложения, оформления и обозначения.

ГОСТ 3.1105-2011 Единая система технологической документации (ЕСТД). Формы и правила оформления документов общего назначения.

ГОСТ 7.32-2001 СИБИД. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления.

ГОСТ 8.417-2002 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Единицы величин.

Определения

В данной работе приведены следующие термины к определениям:

гидродепарафинизация: Процесс переработки нефти, направленный на удаление нормальных алканов из нефтяных фракций.

математическая модель: Приближенное описание объекта моделирования, выраженное с помощью математической символики.

Обозначения и сокращения

ДТ – дизельное топливо;

ВСГ – водородсодержащий газ;

ПТФ – предельная температура фильтрации;

МАУ – моноциклические ароматические углеводороды;

ПАУ – полициклические ароматические углеводороды;

Оглавление

Введение……..……. 14
Глава 1. Обзор литературы……..16
1.1 Характеристика и применение дизельного топлива……...16
1.2 Современные требования, предъявляемые к качеству дизельных топлив для холодных климатических зон……...21
1.3 Низкотемпературные свойства дизельных топлив. Назначение процесса депарафинизации……..29
1.4 Механизмы реакций на катализаторе депарафинизации……33
1.5 Постановка цели и задач исследования……....38
Глава 2. Объект и методы исследования……40
2.1 Технология процесса каталитической депарафинизации……...41
2.2 Характеристика сырья и продуктов, технологических режимов установки каталитической депарафинизации……42
2.3 Метод математического моделирования в решении задач нефтепереработки……..46
Глава 3. Расчеты и аналитика……...49
3.1 Кинетическая модель процесса каталитической депарафинизации…...54
3.2 Компьютерная моделирующая система процесса каталитической депарафинизации……...54
3.3 Исследование влияния температуры в реакторе депарафинизации на показатели процесса……..55
3.4 Исследование влияния расхода сырья в реактор депарафинизации показатели процесса……..61
3.5 Подбор оптимальных технологических параметров работы реактора депарафинизации……...65
Глава 4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение……68
Глава 5. Социальная ответственность……92

Заключение……...104
Список использованных источников…….105
Приложение А Взрывопожарная и пожарная опасность, санитарная характеристика производственных зданий, помещений, зон и наружных установок……..109

Введение

Высокий выход продукта и минимизация затрат ресурсов без потери качества продукта является основной задачей нефтеперерабатывающих предприятий при оптимизации и прогнозировании производств компонентов дизельного топлива. Производство этих компонентов является многоступенчатой химико-технологической системой с взаимосвязанными стадиями, такими как гидроочистка, депарафинизация, стабилизация и ректификация. Оптимизировать такую систему становится возможным при повышении эффективности каждого сопряжённого процесса и аппарата методом математического моделирования с учетом их взаимосвязи.

В настоящее время актуальной проблемой остается повышение ресурсоэффективности процессов переработки широкой дизельной фракции, содержащей парафиновые, нафтеновые, ароматические и олефиновые углеводороды, для производства компонентов дизельных топлив и бензинов.

Актуальным является совершенствование процесса депарафинизации с использованием метода математического моделирования для расчета параметров приближенных к оптимальным.

Целью работы является повышение эффективности производства дизельных топлив путем исследования влияние технологических параметров в реакторе депарафинизации на состав, свойства и выход процесса и оптимизации технологического режима в зависимости от состава сырья.

Объект исследования: процесс каталитической депарафинизации дизельных топлив.

Предмет исследования: закономерности влияния технологических параметров процесса каталитической депарафинизации дизельных фракций нефти на состав, свойства и выход продукта.

Научная или практическая новизна: установлены закономерности изменения степени конверсии высокомолекулярных парафинов нормального

строения при регулировании температуры и расхода в реакторе депарафинизации.

Практическая значимость результатов ВКР: оптимальные режимы работы реактора депарафинизации могут использоваться на ООО «ПО «Киришинефтеоргсинтез» (г. Кириши, Ленинградская область), что позволит достичь оптимальный выход компонентов дизельного топлива с требуемыми низкотемпературными характеристиками при минимизации затрат.

1 Обзор литературы

1.1 Характеристика и применение дизельного топлива

Дизельное топливо – один из самых массовых продуктов, применяемых на автомобильном транспорте.

Получение дизельного топлива происходит путем прямой перегонки и в каталитических процессах переработки керосино-дизельных фракций нефти. Дизельное топливо состоит в основном из керосиновых, газойлевых, а иногда и лигроиновых фракций. В групповой состав дизельного топлива преимущественно входят парафиновые и нафтеновые углеводороды, а также незначительное количество ароматических углеводородов.

Топливная экономичность дизельных двигателей превосходит бензиновые примерно на 30 – 35 %.

За счет производства из отбензиненной нефти, дизельное топливо обладает лучшей химической и физической стабильностью, что уменьшает потери дизельного топлива при транспортировке, хранении и применении, относительно бензина.

Технико-экономические требования к дизельным топливам идентичны требованиям к бензинам. Так как рабочий процесс дизельного двигателя имеет свои особенности, помимо стандартных, предъявляются и специфические требования.

По частоте вращения коленчатого вала различают тихоходные и быстроходные дизельные топлива. Значительная часть грузовых автомобилей и сельскохозяйственной техники в настоящее время оснащены быстроходными дизелями, а суда речного и морского флота, а также стационарные силовые установки – преимущественно тихоходными.

По сравнению с бензиновыми, дизельные двигатели имеют следующие преимущества:

– на 30 – 35 % меньше расходуют более дешевое топливо;

– средняя температура рабочего цикла в дизеле ниже, что облегчает его охлаждение;

– применение в дизелях более тяжелого по сравнению с бензином топлива обеспечивает пожарную безопасность, облегчает его транспортирование и хранение;

– допускают большие перегрузки и отличаются большей устойчивостью в работе;

– выхлопные газы менее токсичны;

– за счет значительно меньшего времени контакта топлива с воздухом полностью устраняется опасность возникновения детонационного сгорания;

– практически неограниченная возможность обеднения горючей смеси, что позволяет изменять мощность дизеля только путем регулирования подачи топлива при постоянном расходе воздуха;

– возможность использования топлив с различной испаряемостью: среднедистиллятных, утяжеленных, а при определенных условиях и легких, типа бензина и керосина.

Основные недостатки дизельных топлив

– большая удельная масса;

– меньшая быстроходность;

– большая затрудненность в условиях зимнего запуска.

Наиболее важные показатели качества топлив для быстроходных дизелей: воспламеняемость, испаряемость, вязкость, коррозионная активность, низкотемпературные и экологические свойства.

Свойства дизельного топлива, влияющие на безотказность работы двигателя, мощность и расход топлива, – это, прежде всего, свойства, характеризующие надежность подачи дизельного топлива в цилиндры двигателя, качество горючей смеси, склонность к самовоспламеняемости, а также свойства, определяющие протекание процесса сгорания смеси [1].

Для дизельного топлива необходимо указывать кинематическую вязкость. Топливо в системе дизельного двигателя играет роль смазочного

материала. От нее зависит качество его распыления в цилиндре дизеля, дальнобойность струи, четкость начала и конца подачи топлива форсункой. Высокая вязкость топлива приводит к затруднениям при фильтрации, к перебоям подачи топлива насосом, ухудшению распыливания и неполному сгоранию. Отрицательно сказывается на работе двигателя и топливо с слишком малой вязкостью. В этом случае нарушается дозировка топлива вследствие его просачивания между плунжером и гильзой насоса высокого давления. Происходит также подтекание топлива через распыливающие отверстия форсунок и, как следствие, закоксовывание их. Кроме того, при слишком малой вязкости топлива дальнобойность его струи оказывается недостаточной вследствие чрезмерного распыливания. Поэтому топливо в основном сосредоточивается и сгорает вокруг форсунки вместо равномерного распределения по всей камере сгорания. Недостаточная вязкость приводит к неоднородности рабочей смеси, ухудшению процесса сгорания и перегреву форсунок, что может вызвать повышенный износ подвижных деталей, подающих топливо, и, прежде всего, плунжерной пары высокого давления, для которых топливо является одновременно и смазкой.

Самовоспламеняемость – это способность дизельного топлива воспламеняться без источника зажигания. Самовоспламеняемость топлива оценивается цетановым числом, и от нее зависит характер протекания процесса-сгорания топлива в цилиндрах двигателя. Для нормальной работы двигателя требуется, чтобы топливо самовоспламенялось и в дальнейшем постоянно сгорало, вызывая интенсивное, но достаточно плавное нарастание давления. В этом случае будет иметь, место так называемая мягкая работа двигателя, т.е. не будет перегрузки его деталей, будет развиваться максимальная мощность и обеспечиваться необходимая топливная экономичность. Если же топливо самовоспламеняется не своевременно, а с запаздыванием, то это приводит к жесткой работе двигателя, напоминающей работу карбюраторного двигателя с детонацией. При жесткой работе детали двигателя работают с перегрузкой, что

приводит к ускоренному их износу и даже поломкам, перерасходу топлива, дымному выхлопу и снижению мощности.

Цетановое число дизельного топлива – важный показатель, характеризующий его воспламеняемость и пусковые свойства. Цетановое число зависит от фракционного и группового углеводородного состава топлива. Как, правило, при облегчении фракционного состава цетановое число понижается, с утяжелением дизельных топлив цетановые числа растут.

Наиболее высокие цетановые числа характерны для парафиновых углеводородов нормального строения. Чем больше молекулярный вес н-алкана, тем выше значение цетанового числа. В случае если алкан имеет разветвленное строение, его цетановое число ниже по сравнению с н-алканом с тем же числом атомов углерода, и чем больше в молекуле заместителей, тем больше разница в значениях цетановых чисел между парафинами нормального и изостроения. В зависимости от степени разветвленности эта разность может составлять 1-4 пункта. Алкены имеют более низкое цетановое число, чем соответствующие им по строению алканы. Цетановое число циклоалканов значительно ниже, чем нормальных алканов. Наиболее низкие цетановые числа имеют ароматические углеводороды. Следовательно, чем больше в топливе парафиновых углеводородов, тем выше его цетановое число; чем больше ароматических углеводородов, тем оно ниже.

Интенсивность износа деталей двигателя зависит от коррозионных свойств топлива, самовоспламеняемости и наличия в нем механических примесей. В зависимости от качества топлива интенсивность износа деталей двигателя может возрастать более чем в 2 раза. Из-за недостаточного качества топлива увеличиваются затраты на техническое обслуживание двигателя, так как появляется необходимость в проведении работ или же их приходится выполнять через более короткие межсмотровые пробеги.

Коррозионные свойства дизельных топлив, как и бензинов, зависят от содержания в них серы и сернистых соединений, щелочей, минеральных и органических кислот. Наиболее агрессивными являются активная сера,

минеральные кислоты и щелочи. Поэтому их присутствие в дизельном топливе не допускается даже в незначительных количествах.

Кислотность характеризует содержание органических кислот в дизельном топливе и не должна превышать 5 мг КОН на 100 $см^3$ топлива.

Содержание водорастворимых кислот и щелочей в дизельном топливе не допускается.

В зависимости от содержания в дизельном топливе смолистых веществ и непредельных углеводородов проявляется его способность к образованию отложений и нагара в камере сгорания, на клапанах, форсунках и других деталях двигателя. Отложения нарушают нормальный режим работы двигателя (перегрев, ухудшение продувки и очистки от отработавших газов), приводят к ухудшению топливной экономичности и снижению мощности. Закоксование, например, распыливающих отверстий форсунки вызывает нарушение подачи топлива, а иногда обрыв головок форсунок. Причиной образования нагара могут также служить высокая вязкость и плохая испаряемость топлива.

Коксуемость выражается количеством в процентах образовавшегося твердого углистого остатка (кокса) после коксования навески топлива в специальном приборе. Коксуемость 10 % остатка не должна быть больше 0,3 % по всем маркам топлив.

Содержание золы определяется количеством в процентах остатка, образовавшегося после сжигания навески испытуемого топлива при помощи фитиля из бумажного обеззоленного фильтра и прокаливания твердого остатка до постоянного веса. Зола повышает нагарообразование в двигателе и может, попадая в масло, вызывать ускоренный износ. Техническими условиями содержание золы допускается не более 0,01 % для всех марок дизельного топлива.

Температура вспышки ограничивает содержание в топливе наиболее легких фракций и характеризует его огнеопасность. Температура вспышки – это наименьшая температура, до которой нужно нагреть дизельное топливо в закрытом тигле, чтобы его пары образовали с воздухом смесь, вспыхивающую

при поднесении к ней пламени. Температура вспышки должна быть не ниже 35 °С для всех марок дизельного топлива.

1.2 Современные требования, предъявляемые к качеству дизельных топлив для холодных климатических зон

Дизельное топливо это один из важнейших крупномасштабных продуктов нефтепереработки, обеспечивающий функционирование транспортного сообщения различных отраслей народного хозяйства и масштабно использующийся отдельными потребителями. Текущий этап развития мировой экономики способствует стабильной положительной динамике спроса на дизельное топливо, что вынуждает ужесточать требования к его качеству. На нефтеперерабатывающих предприятиях России производство ДТ возрастает ежегодно в среднем на 2 – 5 %, в 2014 г. производство ДТ составило 77,3 млн. т по сравнению с 72,0 млн. т в 2013 г. В перспективе планируется намного более значительное повышение объемов производства, связанное с планируемым вводом в эксплуатацию комплексов глубокой переработки нефти, в том числе установок гидрокрекинга на российский нефтеперерабатывающих заводах (НПЗ).

Фракционный и химический состав ДТ имеет свои особенности, которые определяют зависимость его свойств от температурных условий применения, в связи с этим, различают ДТ для умеренного, холодного, арктического климата. Из-за географического положения и климата значительной части регионов страны, наблюдается дефицит производства низкозастывающих ДТ. Существующая потребность в ДТ удовлетворяется лишь на половину. Текущая статистика показывает важность и востребованность мероприятий, реализация которых будет способствовать сглаживанию существующего дефицита.

В настоящее время в России экологические и эксплуатационные характеристики дизельных топлив регулируются Техническими условиями, а также Техническим регламентом Таможенного союза ТР ТС 013/2011 «О

требованиях к автомобильному и авиационному бензину, дизельному и судовому топливу, топливу для реактивных двигателей и мазуту»

Техническими условиями устанавливаются следующими Государственными стандартами:

– ГОСТ Р 52368-2005 (ЕН 590:2009) «Топливо дизельное ЕВРО. Технические условия (с Изменением №1)»;

– ГОСТ Р 55475-2013 «Топливо дизельное зимнее и арктическое депарафинированное. Технические условия»;

– ГОСТ 32511-2013 (EN 590:2009) «Топливо дизельное ЕВРО. Технические условия».

Технический регламент Таможенного союза в большей степени регулирует экологические характеристики топлив, а также устанавливает сроки обязательного перехода на выпуск топлива того или иного класса.

Актуальные требования к качеству ДТ для зимнего и арктического климата в соответствии с вышеуказанными документами приведены в таблицах 1-4.

Таблица 1 – Требования к качеству ДТ для холодного и арктического климата в соответствии с ГОСТ Р 52368-2005

Наименование показателя	Значение для класса				
	0	1	2	3	4
Предельная температура фильтруемости, °С, не	минус	минус	минус	минус	минус
Температура помутнения, °С, не выше	минус	минус	минус	минус	минус
Плотность при 15 °С, кг/м^3	800-845	800-845	800-840	800-840	800-840
Кинематическая вязкость при 40 °С, мм^2/с	1,50-4,00	1,50-4,00	1,50-4,00	1,40-4,00	1,20-4,00
Цетановое число не менее	49,0	49,0	48,0	47,0	47,0
Цетановый индекс, не менее	46,0	46,0	46,0	43,0	43,0
Фракционный состав: До температуры 180 °С, %(по объему), не более До температуры 340 °С, %(по объему), не менее	 10 95	 10 95	 10 95	 10 95	 10 95
Температура вспышки в закрытом тигле, °С, выше	55	55	40	30	30

Продолжение таблицы 1

Наименование показателя	Значение для класса				
	0	1	2	3	4
Полициклические ароматические углеводороды, % (по массе), не более	8,0				
Содержание серы, мг/кг, не более, для топлива: вид I вид II III	350 50 10				
Коксуемость 10 %-ного остатка разгонки, % (по массе), не более	0,30				
Зольность, % (по массе), не более	0,01				
Содержание воды, мг/кг, не более	200				
Общее загрязнение, мг/кг, не более	24				
Коррозия медной пластинки (3 ч при 50 °С), единицы по шкале	Класс 1				
Окислительная стабильность: общее количество осадка, г/м^3, не более	25				
Смазывающая способность: скорректированный диаметр пятна износа при 60 °С, мкм, не более	460				
Содержание метиловых эфиров жирных кислот, % (по объему), не более	7,0				

Таблица 2 – Требования к качеству ДТ зимнего и арктического в соответствии с ГОСТ Р 55475-2013

Наименование показателя	Значение для класса				
	З минус 32	З минус 38	А минус 44	А минус 48	А минус 52
Цетановое число, не менее	48,0	47,0			
Цетановый индекс, не менее	46,0	43,0			
Плотность при 15 °С, кг/м^3	800,0-855,0				
Массовая доля полициклических ароматических углеводородов*, %, не более	8,0				

Продолжение таблицы 2

Наименование показателя	Значение для класса				
	З минус 32	З минус 38	А минус 44	А минус 48	А минус 52
Массовая доля серы, мг/кг, не более: К3 К4 К5	350 50 10				
Температура вспышки в закрытом тигле, °С, не ниже	40	30			
Коксуемость 10 %-ного остатка разгонки, % мас., не более	0,30				
Зольность, % мас., не более	0,01				
Массовая доля воды, мг/кг, не более	200				
Общее загрязнение, мг/кг, не более 60 °С, мкм, не более	24				
Коррозия медной пластинки (3 ч при 50 °С), единицы по шкале	Класс 1				
Окислительная стабильность: общее количество осадка, г/м^3, не более	25				
Смазывающая способность: скорректированный диаметр пятна износа при 60 °С, мкм, не более	460				
Кинематическая вязкость при 40 °С, мм^2/с	1,500-4,500		1,400-4,500		1,200-4,000
Фракционный состав: перегоняется до температуры 180 °С, % об., не более 95 % б °С	10 360				
Температура помутнения, °С, не выше	минус 22	минус 28	минус 34	минус 38	минус 42
Предельная температура фильтруемости, °С, не выше	минус 32	минус 38	минус 44	минус 48	минус 52
Примечание – *Для топлива экологических классов К3 и К4 содержание полициклических ароматических углеводородов должно быть не более 11 %, для топлива экологического класса К5 – не более 8 %.					

Таблица 3 – Требования к качеству ДТ для холодного и арктического климата в соответствии с ГОСТ 32511-2013

Наименование показателя	Значение для класса				
	0	1	2	3	4
Предельная температура фильтруемости, °С, не выше	минус 20	минус 26	минус 32	минус 38	минус 44
Температура помутнения, °С, не выше	минус 10	минус 16	минус 22	минус 28	минус 34
Плотность при 15 °С, кг/м^3	800,0-845,0	800,0-845,0	800,0-840,0	800,0-840,0	800,0-840,0
Кинематическая вязкость при 40 °С, мм^2/с	1,500-4,000	1,500-4,000	1,500-4,000	1,400-4,000	1,200-4,000
Цетановое число, не менее	49,0	49,0	48,0	47,0	47,0
Цетановый индекс, не менее	46,0	46,0	46,0	43,0	43,0
Фракционный состав: до 180 °С перегоняется, % об., не более до 360 °С перегоняется, % об., не менее	 10 95	 10 95	 10 95	 10 95	 10 95
Температура вспышки, определяемая в закрытом тигле, °С, не ниже	55	55	40	30	30
Массовая доля полициклических ароматических углеводородов, %, не более	8,0				
Массовая доля серы, мг/кг, не более, для топлива: К3 К4 К5	 350 50 10				
Коксуемость 10 %-ного остатка разгонки, % мас., не более	0,3				
Зольность, % мас., не более	0,01				
Содержание воды, мг/кг, не более	200				
Общее загрязнение, мг/кг, не более	24				
Коррозия медной пластинки (3 ч при 50 °С),	Класс 1				
Окислительная стабильность: общее количество осадка, г/м^3, не более	25				
Смазывающая способность: скорректированный диаметр пятна износа (wsd 1,4) при 60 °С, мкм, не более	460				

Таблица 4 – Требования к качеству зимнего и арктического дизельного топлива в соответствии с Техническим регламентом Таможенного Союза ТР ТС 013/2011

Характеристики дизельного топлива, единица измерения	Нормы в отношении экологического класса		
Массовая доля серы, мг/кг, не более	350	50	10
Температура вспышки в закрытом тигле, °С, не ниже	30	30	30
Фракционный состав – 95 процентов объемных перегоняется при температуре, °С, не выше	360	360	360
Массовая доля полициклических ароматических углеводородов*, %, не более	11	11	8
Цетановое число	47	47	47
Смазывающая способность, мкм, не более	460	460	460
Предельная температура фильтруемости, °С, не выше: дизельного топлива зимнего дизельного топлива арктического	 минус 20 минус 38	 минус 20 минус 38	 минус 20 минус 38

Одним из важнейших критериев эксплуатационной эффективности ДТ, применяемых в условиях холодных климатических зон, являются хорошие низкотемпературные свойства, значениями которых определяется функционирование системы питания двигателей при отрицательных температурах окружающей среды и в условиях хранения топлива. Низкотемпературные свойства определяются, в первую очередь, содержанием нормальных алканов и характеризуются тремя показателями: температурой помутнения, температурой застывания и предельной температурой фильтруемости (ПТФ). В соответствии с ГОСТ Р 52368-2005, ГОСТ Р 55475-2013 и ГОСТ 32511-2013 нормируются температура помутнения и ПТФ, согласно ТР ТС 013/2011 – только ПТФ. Значение температуры застывания в настоящее время Техническими условиями не регламентируется.

Наибольшее влияние на низкотемпературные свойства оказывает концентрация нормальных парафиновых углеводородов с числом углеродных атомов в молекуле от 15 до 29, характеризующихся высокими температурами плавления. Даже небольшое содержание таких углеводородов резко ухудшает низкотемпературные свойства. Введение 1 % мас. н-алкана C_{24} повышает температуру помутнения с минус 72 до 0 °С. Изомеры парафиновых углеводородов имеют более низкие значения температуры помутнения и ПТФ, следовательно, являются желательными компонентами при получении низкозастывающих топлив.

На территории РФ допускается выпуск дизельного топлива ЕВРО для холодного и арктического климата в соответствии с ГОСТ Р 52368-2005 классов 0, 1, 2, 3 и 4 с ПТФ соответственно не выше минус 20, минус 26, минус 32, минус 38 и минус 44 °С, в соответствии с ГОСТ 32511-2013 – топлива дизельного ЕВРО зимнего классов 0, 1, 2, 3 (ДТ-З-К3 (К4, К5)) с ПТФ соответственно не выше минус 20, минус 26, минус 32, минус 38 °С, и арктического (ДТ-А-К3 (К4, К5)) – с ПТФ не выше минус 44 °С.

В соответствии с ГОСТ Р 55475-2013, регламентирующим качество депарафинированного дизельного топлива, допускается выпуск пяти классов: зимнее – ДТ-З-К3(К4, К5) минус 32 и ДТ-З-К3(К4, К5) минус 38, арктическое – ДТ-А-К3(К4, К5) минус 44, ДТ-А-К3(К4, К5) минус 48 и ДТ-А-К3(К4, К5) минус 52, в которых ограничение по ПТФ указаны в обозначении класса (не выше указанного значения).

Техническим регламентом Таможенного Союза ТР ТС 013/2011 предельная температура фильтруемости регламентируется для дизельных топлив зимнего и арктического и определяется значениями минус 20 и минус 38 °С, соответственно.

У большинства дизельных топлив, вырабатываемых отечественными нефтеперерабатывающими предприятиями, цетановое число не соответствует требованиям современных спецификаций. Как правило, в настоящее время на Российских НПЗ повышение цетанового числа дизельного топлива

обеспечивается вводом цетаноповышающих присадок. В основном используются присадки европейских фирм, допущенные к применению на территории Российской Федерации: Dodicet-5073 (Clariant), KerobrizolEHN (BASF), Paradyne-668 (Infineum), Hitec4103W (Ethyl). Все эти присадки на основе 2-этилгексилнитрата, их эффективность приблизительно одинакова и зависит не столько от марки присадки, сколько от природы дизельного топлива, в которое они вводятся [5].

С точки зрения экологической безопасности к низкозастывающим ДТ предъявляются требования, аналогичные устанавливаемым к топливам для условий умеренного климата.

В соответствии с современными требованиями содержание полициклических ароматических углеводородов не должно превышать 8 % мас. В ГОСТ Р 52368-2005 такое значение введено Изменением №1 от 1 марта 2012 г., ранее регламентированное значение составляло 11 % мас., что свидетельствует о тенденции повышения качества экологических характеристик дизельного топлива. По ГОСТ 32511-2013 для всех топлив нормируется значение не выше 8 % мас. полициклических ароматических углеводородов.

В Европейских странах установленная допустимая концентрация полициклических ароматических углеводородов не должна превышать 2 % мас. [5]. Необходимость введения аналогичных требований в недалеком будущем станет актуальной задачей для Российской Федерации.

Экологические характеристики дизельных топлив также определяются содержанием серы. Процесс гидроочистки, используемый для снижения содержания серы в дизельном топливе, в настоящее время на рынке отечественных и зарубежных технологий представлен в достаточном объеме. Технологии совершенны и позволяют получать дизельное топливо с содержанием серы менее 50 и 10 мг/кг (виды II и III в соответствии с ГОСТ Р 52368-2005, классы К4, К5 – в соответствии с ГОСТ Р 55475-2013 и ГОСТ 32511-2013, классы 4 и 5 в соответствии с Техническим Регламентом Таможенного Союза 013/2011).

1.3 Низкотемпературные свойства ДТ. Назначение процесса депарафинизации

Низкотемпературные свойства дизельных топлив являются одной из важнейших его характеристик, которая характеризует подвижность топлива при отрицательной температуре. Температурные свойства определяют условия хранения и транспортировки дизельных топлив.

Низкотемпературные свойства характеризуются температурами: застывания, помутнения и предельной фильтруемости, которые определяют способность проходить через фильтры и обеспечивать прокачку по трубопроводам в условиях низких температур.

Температура помутнения – температура, при которой из топлива начинают выпадать первые кристаллы парафина, которые при дальнейшем понижении температуры растут, соединяются вместе и оседают на фильтрах, через которые пропускают топливо для очистки его от механических примесей. При использовании дизельных топлив с высокой температурой помутнения возникает опасность забивки этих фильтров кристаллами парафина [7]. Температура помутнения – это максимальная температура, при которой визуально наблюдается фазовая неоднородность топлива [8].

Температура застывания – это температура, при которой топливо полностью теряет подвижность. Это происходит из-за образования кристаллической сетки, возникающей при сращивании крупных кристаллов парафина при дальнейшем охлаждении топлива.

Предельная температура фильтруемости – минимальная температура, при которой заданный объем топлива перекачивается через стандартный фильтр за определенный промежуток времени [7].

Реализация проектов в области получения дизельных топлив, эффективных в условиях низких температур, требует комплексного подхода, позволяющего обеспечить значительное повышение качества топлива и

доведение его до экологически обоснованных стандартов. Данное условие является определяющим для получения российскими нефтеперерабатывающими предприятиями дизельного топлива современного уровня качества и выведения отечественных технологий на высокий технический уровень.

Нивелирование дефицита дизельных топлив для холодного и арктического климата в настоящее время возможно только за счет широкомасштабного внедрения современных гидрогенизационных процессов их производства и создания катализаторов, позволяющих осуществить промышленную реализацию технологий в соответствии с принципами энерго- и ресурсоэффективности.

Наиболее часто применяемые в российской практике получения низкозастывающих дизельных топлив методы сокращения температурных интервалов кипения, разбавления дизтоплива керосиновой фракцией и применения депрессорных присадок, на сегодняшний день не являются технологически и экономически обоснованным по ряду объективных причин.

При снижении температуры конца кипения дизельного топлива и смешении с керосином улучшению низкотемпературных свойств топлива сопутствует общее ухудшение его качества, а именно, снижение цетанового числа, вязкости, температуры вспышки, повышение степени износа двигателя, а также сложность подбора оптимального состава дизельного топлива, удовлетворяющего требованиям стандартов по показателям фракционного состава (позиция по ГОСТ 32511 / ГОСТ 55475: до 180 °С перегоняется не более 10 % об.). Кроме того, указанные способы не лишены недостатков с экономической точки зрения, поскольку их использование приводит к снижению выхода суммы светлых нефтепродуктов и уменьшению объема выпуска реактивного топлива, что является неприемлемым, учитывая факт повышения в настоящее время спроса на топливо ТС-1.

Производство зимних и арктических ДТ введением депрессорных присадок не приводит к ухудшению качества целевого продукта, однако существует ряд других ограничений применения данного метода. К ним

относятся высокая стоимость присадок, проблема подбора оптимальной присадки и оптимального дозирования в зависимости от конкретного состава топлива, а также инертность действия присадок в отношении изменения температуры помутнения.

Как указывалось, выше, низкотемпературные свойства ДТ напрямую зависят от содержания в них алканов нормального строения, обладающих наиболее высокими температурами помутнения/застывания и ПТФ, поэтому наиболее эффективным является использование процессов, направленных на уменьшение концентрации в дизельных фракциях таких углеводородов. Поскольку изменение группового состава дизельного топлива в сторону снижения содержания н-алканов будет приводить к снижению цетанового числа, выбор процесса и глубины его протекания должен определяться не только требуемыми низкотемпературными свойствами, но и возможностью получения топлива с приемлемыми цетановыми характеристиками.

Процессы карбамидной депарафинизации и депарафинизации с использованием селективных растворителей в настоящее время для дизельных топлив не используются, поскольку характеризуются сложным технологическим оформлением, низкой энергоэффективностью, и обеспечивают невысокие выходы целевых продуктов, что обусловлено удалением нормальных парафинов из состава дизельной фракции.

Сегодня основными промышленными процессами, применение которых позволяет снизить содержание нормальных алканов в дизельных топливах, являются технологии каталитической гидродепарафинизации и изодепарафинизации (изомеризационной депарафинизации). В качестве синонима процесса изодепарафинизации часто применяют название «гидроизомеризация». Различия в применяемых катализаторах, а соответственно механизме протекания химических превращений обуславливают основные особенности рассматриваемых процессов.

Наиболее перспективным с точки зрения технологических и экономических характеристик представляется процесс изомеризационной

депарафинизации, поскольку при его протекании практически не меняется фракционный состав получаемых продуктов, в связи с чем, сохраняется высокий выход целевого дизельного топлива, и не происходит существенного снижения его цетанового числа (как правило, характерно для процессов на основе платиновых катализаторов). В процессе гидродепарафинизации снижение концентрации н-алканов в дизельной фракции происходит за счет их разрушения в результате крекинга, что приводит к снижению выхода целевого продукта и его обогащению нафтеновыми и ароматическими углеводородами, вследствие чего цетановое число снижается в значительной степени по сравнению с показателем в исходной фракции. Выход целевого продукта в процессе гидродепарафинизации практически не удается поднять выше 88 – 90 % мас., в то время как, при изодепарафинизации (гидроизомеризации) выход дизельного топлива с улучшенными низкотемпературными характеристиками может достигать 97 – 98 % мас.

Оба процесса проводятся на бифункциональных катализаторах, содержащих гидрирующие металлы, а в качестве кислотного компонента – цеолиты или цеолитоподобные структуры. Установлено, что реакции изомеризации и распада углеводородов идут на одних и тех же центрах катализатора (кислотных), при этом крекинг изопарафиновых углеводородов, имеющих тот же молекулярный вес, что и нормальные парафины, протекает значительно легче. Таким образом, катализатор гидродепарафинизации должен обеспечивать функцию селективного гидрокрекирования нормальных парафинов, а катализатор изодепарафинизации для получения глубоко изомеризованных продуктов без значительного разложения сырья должен проявлять высокую активность в отношении реакций изомеризации высококипящих парафиновых углеводородов и минимальную активность в отношении реакций гидрокрекинга. В этом заключается основная сложность подбора оптимального состава катализатора изодепарафинизации, обеспечивающего высокий выход целевого продукта и высокую селективность в отношении образования изомерных алканов.

Для определения роли отдельных компонентов катализатора в обеспечении общего каталитического действия системы целесообразным представляется изучение химизма и механизма основных реакций, протекающих в рассматриваемых термогидрокаталитических процессах.

1.4 Механизмы реакций на катализаторе депарафинизации

Химизм термогидрокаталитического процесса производства низкозастывающего ДТ обусловлен его целевым назначением, которое в данном случае заключается в необходимости снижения в составе дизельных фракций концентрации алканов нормального строения с длинной цепью. Таким образом, основными химическим реакциями, в результате которых обеспечивается улучшение низкотемпературных характеристик ДТ, являются гидроизомеризация и селективный гидрокрекинг *н*-алканов исходного сырья.

Реакции гидроизомеризации н-алканов являются равновесными, их описание для н-алканов с числом атомов углерода в цепи более четырех может быть представлено следующими уравнениями [9, 10]:

– адсорбция и дегидрирование алкана на металлическом центре катализатора:

$$n\text{-}C_nH_{2n+2} - H_2 \leftrightarrow n\text{-}C_nH_{2n} + H_2 \quad (1)$$

– образование карбоний-иона:

$$n\text{-}C_nH_{2n} + H^+ \leftrightarrow n\text{-}C_nH^+_{2n+1} - H^+ \quad (2)$$

$$n\text{-}C_nH_{2n+2} + H^+ \leftrightarrow н\text{-}C_nH_{2n+1}{}^+ + H_2 - H_2 \quad (3)$$

– перегруппировка карбоний-иона (изомеризация):

$$n\text{-}C_nH^+_{2n+1} \leftrightarrow i\text{-}C_nH^+_{2n+1} \quad (4)$$

– гидрирование образующегося изомерного алкена на металлическом центре катализатора с образованием изоалкана:

$$i\text{-}C_nH^+_{2n+1} - H^+ \leftrightarrow i\text{-}C_nH_{2n} + H^+ \quad (5)$$

$$i\text{-}C_nH_{2n} + H_2 \leftrightarrow n\text{-}C_nH_{2n+2} - H_2 \quad (6)$$

Таким образом, согласно принятому механизму реакции гидрирования-дегидрирования (реакции (6), (1)) протекают на металлических центрах катализатора, образование и перегруппировка карбокатионов – на кислотных. Лимитирующей стадией процесса, определяющей его скорость, является стадия перегруппировки карбокатиона (реакция (4)).

Как видно из представленной схемы, скорости реакций гидроизомеризации обратно пропорциональны давлению водорода. Это связано с тем, что увеличение давления водорода приводит к снижению содержания в реакционной смеси олефинов, которые образуются на стадии (1) и превращаются в карбокатионы на стадии (2), что ведет к уменьшению общей скорости процесса. Однако присутствие водорода в процессе необходимо для гидрирования изоалкенов, образующихся на стадии (6), а также для поддержания стабильности работы катализатора [9, 10].

Эффективное протекание реакций гидрирования-дегидрирования в процессе гидроизомеризации достигается за счет использования катализатора, содержащего, помимо кислотного компонента, достаточное количество активного гидрирующего металла [9, 10]. Возможность образования карбоний-иона по реакции (3) подтверждает возможность проведения процесса на катализаторах, не содержащих металлы, однако в данном случае интенсивность процесса будет ограничиваться повышенной степенью дезактивации катализатора из-за отсутствия компонентов, обеспечивающих гидрирование предшественников кокса. В свою очередь, металлы VIII группы способны изомеризовать н-алканы и в отсутствие кислотных центров, однако считается, что при использовании бифункциональных катализаторов доля реакций изомеризации, протекающих исключительно на металлических центрах, относительно невелика [11].

В рамках представленного выше механизма различают два типа перегруппировки карбокатиона: А – без изменения степени разветвления, В – с изменением степени разветвления. Схема превращения представлена на рисунке 1.1.

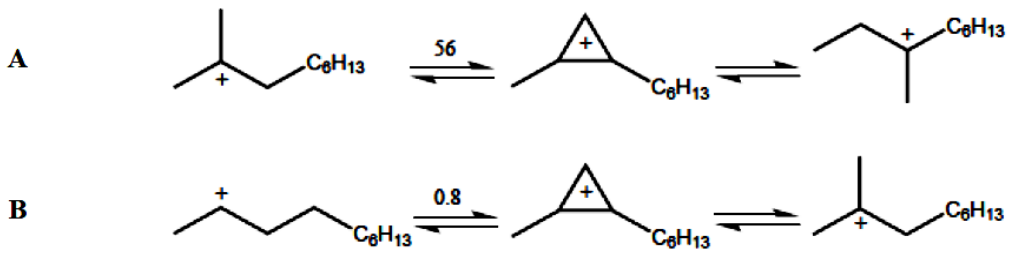

Рисунок 1.1 – Механизмы перегруппировки карбокатиона C_{10} [11] (цифры над стрелками обозначают относительную скорость реакции)

Механизм гидроизомеризации, представленный выше реакциями (1)–(6), является общепринятым. Существуют точки зрения, согласно которым изомеризация может проходить через образование циклического карбониевого иона с последующим его крекированием. Таким механизмом, представленным на рисунке 1.2, могут быть объяснены некоторые побочные реакции, в частности образование нафтенов. Увеличение их концентрации в целевом продукте является нежелательным, поскольку способствует чрезмерному повышению его вязкости [12].

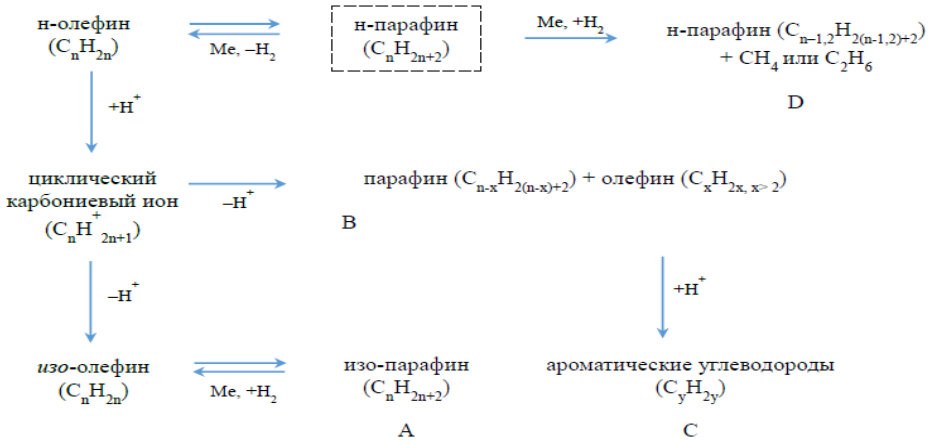

Рисунок 1.2 – Механизм реакций гидроизомеризации с образованием циклического карбониевого иона

Улучшение низкотемпературных характеристик ДТ за счет реакций селективного гидрокрекинга н-алканов в порах цеолита катализатора происходит таким образом, что превращению подвергаются только парафины с прямой цепью, поскольку размер канала цеолита не обеспечивает прохождение в поры молекул разветвленных углеводородов.

Например:

$CH_3–(CH_2)_{12}–CH_3 \rightarrow CH_3–CH_2–CH_2–CH_2–CH_2–CH_2–CH_2–CH_2–CH_2–CH_2–CH_3 +$

н-тетрадекан н-ундекан

$+ CH_2=CH–CH_3$ (7)

пропилен

Образующийся пропилен насыщается водородом, участвующим в процессе:

$CH_2=CH–CH_3 + H_2 \rightarrow CH_3–CH_2–CH_3$ (8)

пропилен пропан

В результате происходит образование углеводородов дизельной фракции с более короткой цепью (реакция (7)), которые характеризуются лучшими низкотемпературными свойствами по сравнению с компонентами исходного сырья. В качестве побочных продуктов процесса, образующихся в результате крекинга, выделяется газ (реакция (8)) и бензиновая фракция (углеводороды, выкипающие в ее пределах), за счет чего выход целевой продукции снижается.

Реакции гидроизомеризации и гидрокрекинга парафинов происходят в рамках одного процесса. Протекание реакций (1), (5) и (7) может способствовать накоплению в реакционном пространстве непредельных углеводородов. В связи с этим возникают побочные реакции олигомеризации, снижающие селективность процесса. Олефины легко реагируют с карбокатионами с образованием молекул с большей длиной углеродной цепи:

$$C_6H_{13^+} + C_6H_{12} \rightarrow C_{12}H_{25^+} \quad (9)$$

Тяжелые углеводороды, образующиеся в результате реакций олигомеризации, трудно десорбируются с поверхности катализатора и могут приводить к его закоксовыванию. Кроме того, они легко подвергаются крекингу, что снижает общую селективность процесса. Протекание реакций олигомеризации подавляется путем поддержания низкой равновесной концентрации олефинов в реакционной смеси, что достигается за счет использования катализаторов с сильной гидрирующей активностью и повышения давления водорода.

Высокая гидрирующая активность катализатора определяется не только природой металла, но и степенью его дисперсности на поверхности катализатора – чем она выше, тем с большей эффективностью происходит гидрирование изоалкенов, образующихся на промежуточной стадии гидроизомеризации, либо олигомеров олефинов, что способствует предотвращению их деструкции с образованием более низкомолекулярных соединений [13].

В реакциях гидроизомеризации металл играет более важную роль, чем в реакциях крекинга, поскольку, как упоминалось выше, реакции изомеризации и крекинга протекают на одних и тех же центрах кислотного компонента катализатора, и образование изоалканов требует баланса металлических и кислотных центров, при котором будут эффективно проходить все стадии процесса гидроизомеризации. Определение такого баланса позволит максимально снизить степень крекинга и исключить значительное образование побочных низкомолекулярных продуктов.

Помимо основных компонентов (кислотного и гидрирования-дегидрирования), на эффективность катализаторов для осуществления термогидрокаталитических процессов улучшения низкотемпературных характеристик ДТ оказывают влияние связующие компоненты (связующее), а также промоторы и модификаторы, которые также могут быть включены в состав катализаторов.

Связующее выполняет функцию инертного разбавителя, структурного промотора, создающего оптимальную пористую структуру, оказывает влияние на формирование активных фаз и механическую прочность катализатора. Промоторы и модификаторы также могут способствовать улучшению текстурных характеристик катализатора, повышению прочности, снижению степени дезактивации катализатора и образования кокса.

Каждый компонент в составе катализатора вносит вклад в общее каталитическое действие системы, в результате которого процесс протекает в определенном направлении. Можно сделать вывод о том, что катализатор, эффективный в улучшении низкотемпературных характеристик ДТ, должен

отвечать ряду критериев, соответствие которым достигается регулированием его состава. К основным критериям относятся:

– оптимальный баланс кислотных и металлических центров,

– оптимальные текстурные характеристики,

– высокая дисперсность металла на поверхности катализатора.

1.5 Постановка цели и задач исследования

Обзор литературы позволил выявить, что дизельное топливо является одним из ключевых продуктов нефтепереработки. При этом наблюдается тенденция к повышению спроса на дизельное топливо в последние годы, особенно спрос растет на дизельные топлива, пригодные для применения в холодные климатические условия. Это обусловлено, прежде всего, тем, что большая часть Российской Федерации расположена в зонах холодного климата, а также освоением северных территорий, включая Арктику. Это, в свою очередь, привело к внедрению процесса каталитической депарафинизации на многие нефтеперерабатывающие заводы России, позволяющего производить компоненты летнего, зимнего и арктического вида дизельного топлива.

Так как процесс является новым для российской нефтепереработки, его закономерности недостаточно изучены, а в условиях постоянного изменения состава сырья, поступающего на заводы и, соответственно, на установки депарафинизации, исследование закономерностей процесса каталитической депарафинизации, а также его оптимизация в зависимости от состава сырья представляются актуальным.

Исходя из этого, цель работы состоит в повышении эффективности производства дизельных топлив путем исследования влияние технологических параметров в реакторе депарафинизации на состав, свойства и выход продукта процесса и оптимизации технологического режима в зависимости от состава сырья.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести исследование влияния температуры в реакторе депарафинизации на содержание н-парафинов в продукте, низкотемпературные свойства и выход продукта;

2. Провести исследование влияния расхода сырья в реактор депарафинизации на содержание н-парафинов в продукте, низкотемпературные свойства и выход продукта;

3. Осуществить подбор оптимальных технологических параметров работы реактора депарафинизации в зависимости от состава сырья.

2 Объект и методы исследования

2.1 Технология процесса каталитической депарафинизации

Установка гидродепарафинизации позволяет вовлекать в производство дизельных топлив атмосферный газойль за счет облегчения его углеводородного состава и депарафинизации, а также позволяет облагораживать бензин висбрекинга, что дает возможность получать дополнительный объем сырья для установок каталитического риформинга и изомеризации

Суть процесса заключается в гидрировании сернистых, азот- и кислородсодержащих соединений, полиароматических углеводородов и гидродепарафинизации углеводородов C_{10+} с целью улучшения низкотемпературных свойств продуктов [14].

Схема основных потоков установки гидродепарафинизации смеси атмосферного газойля и бензина висбрекинга Л-24-10/2000 ООО «КИНЕФ» представлена на рисунке 2.1.

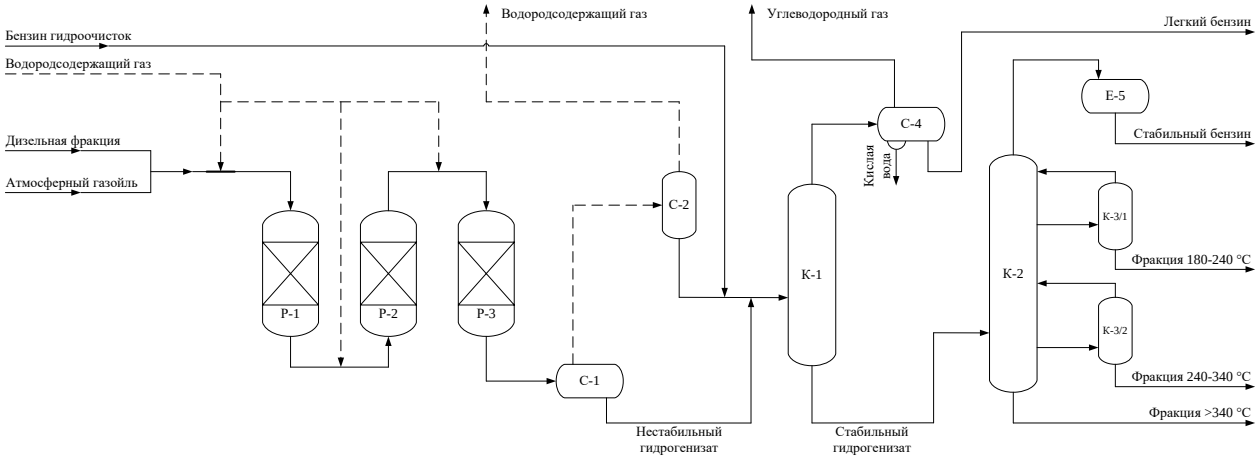

Рисунок 2.1 – Схема основных потоков установки Л-24-10/2000 ООО «КИНЕФ»

Р-1 и Р-2 – реакторы гидроочистки, Р-3 – реактор гидродепарафинизации С-1 – сепаратор высокого давления; С-2 – сепаратор низкого давления; К-1 –

стабилизационная колонна; К-2 – ректификационная колонна; К-3/1, 3/2 – отпарные колонны (стрипинги); С-4, Е-5 – рефлюксные ёмкости.

В качестве катализатора гидроочистки применяется NiO – MoO_3. В процессе депарафинизации используется CoO – MoO_3 катализатор. Для осуществления реакций процесса депарафинизации в реакторы поступает водородсодержащий газ (ВСГ). Также для регулирования температуры процесса между реакторами подается охлаждающийквенч ВСГ.

Глубокое обессеривание и депарафинизация сырья обеспечивается при повышенном давлении (9,0 МПа) и за счет применения современных катализаторов фирм Axens и Sud-Chemie. В результате процесса получают дизельные фракции, бензин и углеводородный газ.

Дизельные фракции 180-240 °С и 240-340 °С используются в качестве компонентов летнего и зимнего дизельного топлива, остаток – фракция, выкипающая при температуре более 340 °С, может направляться на приготовление котельного топлива.

Углеводородный газ, после очистки от сероводорода, используется как топливо для печей установки, избыток углеводородного газа сбрасывается в топливную сеть.

Углеводородный состав бензиновой фракции установки гидродепарафинизации значительно отличается от состава прямогонных бензинов, ранее используемых на установке риформинга, повышенным содержанием олефинов (до 5 %) и изоалканов (до 40 %), что приводит к необходимости корректировки технологических режимов.

2.2 Характеристика сырья и продуктов, технологических режимов установки каталитической депарафинизации

Параметры технологического режима, характеристика сырья и продуктов: стабильного бензина, фракций 180-240+240-340 и >340 установки каталитической депарафинизации ООО «КИНЕФ» предоставленны в таблицах 5 – 9.

Таблица 5 – Параметры технологического режима

Параметры технологического режима	22.04.15 8:00	23.04.15 8:00	24.04.15 8:00
Температура, °С			
Вход на Р-3(на момент отбора)	360	365	370
Р-3, 1 слой (ср)	360	364	364
Р-3, 2 слой (ср)	350	354	354
Р-3, 3 слой (ср)	353	357	357
Р-3, 4 слой (ср)	368	374	374
Выход из Р-3	365	371	371
Давление, МПа			
Вход Р-3	7,13	7,18	7,12
Выход из Р-3	6,91	6,97	6,91
Реакторный блок (поз. РС-1338)	8,5	8,5	8,5
Расход, м3/ч			
Дизельная фракция в парк	233	232	237
Атмосферный газойль в парк	67	63	52
Сырье на установку	295	295	296
Сырье в тройник смешения	345	346	345
Бензин- отгон с установок г/о	13,6	14,0	14,0
Бензин висбкрекинга	10,8	11,0	11,2
Свежий ВСГ из зав. Сети	55900	52100	53200
Свежий ВСГ от ЗГПН	12900	13100	13000
Свежий ВСГ от ПК-1,2	61400	61500	61400
ЦВСГ	147900	150500	149000
ЦВСГ в тройник смешения	88300	83700	83900
Квенч в Р-2	20700	21200	21000
Квенч в Р-3	3200	4580	0
Стаб. г/генизат из К-1 в К-2	408	395	389
Легкий бензин с установки	31,6	35,6	42,0
УВГ из К-5 на ГРП	8400	8800	8700
Стаб. Бензин с установки	29,0	30,0	30,0
Фр. 180-260 °С с установки	17,4	17,4	17,4
Фр. 240-340 °С с установки	165	165	165
Фр. >340°С с установки	69	64	68
Сероводород с установки	2410	2460	2490

Таблица 6 – Смесевое сырье установки Л-24-10/2000

Показатели		22.04.15	23.04.15	24.04.15
Плотность при 20°С, кг/м^3		842,5	843,3	843,7
Плотность при 15°С, кг/м^3		847,5	848,4	847,7
Температура выкипания, °С	НК	ASTM D 86 97	ASTM D 86 114	ASTM D 86 112
	5%	198	210	201
	10%	232	237	232
	20%	258	261	256
	30%	273	275	274
	40%	285	287	287
	50%	296	299	299
	60%	308	310	311
	70%	321	322	323
	80%	334	336	336
	90%	349	352	352
	95%	361	363	366
	96%	-	367	-
	КК	370	370	370
Выход, % об.		98.0	98.0	97.0
Содержание азота, ppm		201.3	198.9	191.0
Температура помутнения, °С		+2	-1	+1
Соед-ние ароматических ув.,		28.28	28.41	28.43
В том числе:				
Моноароматические ув, %мас.		18.40	18.49	18.46
Диароматические ув, %мас.		9.38	9.39	9.44
Три+ ароматические, %мас.		0.50	0.53	0.53
Соединения н-парафинов, %мас.		18.01	17.56	17.0

Таблица 7 – Стабильный бензин из Е-5

Показатели		22.04.15	23.04.15	24.04.15
Плотность при 20°С, кг/м^3		736,5	736,1	738,0
Плотность при 15°С, кг/м^3		740,5	740,2	742,1
Температура выкипания, °С	Метод	ASTM D 86	ASTM D 86	ASTM D 86
	НК	101	101	104
	5%	107	107	109
	10%	108	108	110
	20%	111	110	112
	30%	114	113	114
	40%	117	116	117
	50%	120	119	120
	60%	124	123	124
	70%	128	128	128
	80%	133	133	134
	90%	139	139	140
	95%	144	144	145
	96%	145	145	146
	КК	152	151	154

Продолжение таблицы 7

Показатели	22.04.15	23.04.15	24.04.15

Выход, % об.	99	98	98
Содержание серы, %мас.	0,0007	0,0006	0,0006
Содержание мерк.серы, %мас.	0,0008	0,0008	0,0007
Бромное чисто, rBr_2/100 г н/п	3,30	3,37	3,25

Таблица 8 – Фракция 180-240+240-340 ºС

Показатели		22.04.15	23.04.15	24.04.15
Плотность при 20°С, кг/м^3		827,4	829,5	829,5
Плотность при 15°С, кг/м^3		830,8	833,0	833,1
Температура выкипания, °С	Метод	ASTM D 86	ASTM D 86	ASTM D 86
	НК	177	177	171
	5%	195	197	191
	10%	208	210	204
	20%	226	227	221
	30%	241	241	236
	40%	253	253	249
	50%	263	263	259
	60%	272	272	269
	70%	282	282	278
	80%	294	294	290
	90%	311	310	305
	95%	324	323	318
	96%	328	326	321
	КК	333	333	328
Выход, % об.		99,0	99,0	99,0
Температура помутнения, °С		-29	-31	-38
Температура предельной		-32	-37	-44
Сод-ние ароматических ув. %мас.		21,08	21,19	21,84
В том чиле:				
Моноароматические ув, %мас.		19,81	19,85	20,13
Диароматические ув, %мас.		1,24	1,32	1,66
Три+ ароматические, %мас.		0,03	0,02	0,05
Соединения н-парафинов, %мас.		10,75	9,42	8,19

Таблица 9 – Фракция >340

Показатели		22.04.15	23.04.15	24.04.15
Плотность при 20°С, кг/м^3		855,1	858,3	860,5
Плотность при 15°С, кг/м^3		858,3	861,3	863,4
Температура выкипания, °С	Метод	ASTM D 86	ASTM D 86	ASTM D279 86
	НК	285	289	310
	5%	310	318	317
	10%	313	321	322
	20%	324	325	330
	30%	331	332	338/
	40%	338	339	344

Продолжение таблицы 9

Показатели		22.04.15	23.04.15	24.04.15
Температура выкипания, °С	Метод	ASTM D 86	ASTM D 86	ASTM D279 86
	50%	346	345	351
	60%	354	352	360
	70%	361	360	369
	80%	372	370	383
	90%	389	384	398
	95%	408	399	402
	96%	418	403	413
	КК	430	417	98,0
Показатели		22.04.15	23.04.15	24.04.15
Выход, % об.		96,8	98,0	70,9
До 360 °С перегоняется, % об		67,9	69,4	-16
Температура помутнения, °С		-3	-10	
Температура предельной фильтруемости, °С		-3	-9	25,70
Сод-ние ароматических ув. %мас.		24,13	25,22	
В том чиле:				
Моноароматические ув, %мас.		20,49	21,01	20,94
Диароматические ув, %мас.		3,44	3,95	4,42
Три+ ароматические, %мас.		0,20	0,26	0,34
Соединения н-парафинов, %мас.		5,89	3,98	2,91

Для сравнения состава сырья и продукта фракции 180-240+240-340 ºС составлена таблица 10.

Таблица 10 – Характеристика сырья и фракции 180-240+240-340 ºС процесса каталитической депарафинизации

Показатели		Сырье			Фракция 180-240+240-340 ºС		
		22.04.15	24.04.15	23.04.15	22.04.15	24.04.15	23.04.15
Температура выкипания, °С	НК	97	114	112	177	177	171
	КК	370	370	370	333	333	328
Температура помутнения, °С		плюс 2	минус 1	плюс 1	минус 29	минус 31	минус 38
Содержание н-парафинов, %мас.		18,01	17,56	17,0	10,75	9,42	8,19

Как видно из таблицы 10 процесс каталитической депарафинизации позволяет значительно улучшить низкотемпературные свойства компонентов

дизельных топлив за счет снижения содержания парафинов нормального строения путем селективного гидрокрекинга с последующей изомеризацией, а также получать стабильный бензин, используемый как компонент автомобильных бензинов.

2.3 Метод математического моделирования в решении задач нефтепереработки

Каталитические процессы переработки нефтяных фракций являются основой сегодняшних технологий переработки нефти, обеспечивающих производство современных топлив и ценных углеводородных полупродуктов для нужд нефтехимии. Эффективность работы каталитических процессов во многом определяет общую эффективность нефтеперерабатывающих предприятий. Поэтому задачи оптимизации существующих установок и разработки новых каталитических процессов актуальны как в национальном, так и в международном масштабах.

Такие процессы в своем большинстве объективно весьма сложны, поскольку включают в себя большое количество различных реакций с участием большого числа реакционных компонентов. Поэтому успешное решение этих задач возможно только на основе активного применения современных средств и методов математического моделирования.

Основы современных методов математического моделирования каталитических процессов были заложены М.Г. Слинько в его классических работах [16-18]. Принципиальными сторонами этого подхода были идеологическая ориентация на физическую содержательность моделей, сбалансированное сочетание вычислительного и натурного экспериментов, а также применение многоуровневых стратифицированных моделей, построенных с помощью пространственно-временного иерархического подхода, начиная с молекулярного уровня. Такой подход оказался более сложным, чем кибернетический, основанный на широком использовании физически

несодержательных эмпирических моделей [19], однако математическое моделирование обладает гораздо большей точностью описания и несопоставимо более мощным прогностическими свойствами, позволяющими осуществлять эффективное масштабирование и оптимизацию различных каталитических процессов в широком диапазоне параметров их осуществления.

Следует отметить, что общие модели реакторов в каталитических процессах нефтепереработки и нефтехимии в большинстве случаев аналогичны хорошо изученным моделям каталитических реакторов с твердым катализатором и газообразной реакционной средой, а вся специфика процессов, по сути, отражается в кинетических моделях, описывающих скорости протекающих каталитических реакций. Соответственно, сложность таких процессов обычно концентрируется именно в кинетических моделях.

Вследствие сложности химизма этих процессов, а также большого количества индивидуальных компонентов реакционной смеси и индивидуальных реакций их полные кинетические модели весьма громоздки, а определение их параметров на основании экспериментальных данных является слишком трудозатратной (а иногда и невозможной) работой с практической точки зрения. По этой причине такие модели не применяются в научной и инженерной практике, вместо них используются различные упрощения, основанные на группировке индивидуальных реагентов и индивидуальных реакций в групповые псевдореагенты и групповые реакции, соответственно. Это позволяет существенно упростить кинетические модели и уменьшить число определяемых параметров в них, но при этом происходит естественное снижение точности модели и ее прогностической мощности. В целом эффективность применяемых моделей определяется именно успешностью компромисса между простотой и точностью.

Принципиально важно, что модели, построенные с применением такого подхода, отличаются не только простотой и высокой точностью описания, но также и высокой прогностической силой, позволяющей использовать ее в областях параметров осуществления процессов, выходящих за пределы

имеющихся экспериментальных массивов, на которых они построены. В этом плане модели перспективны для применения в целях масштабирования и оптимизации процессов нефтепереработки [19].

4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

4.1. Предпроектный анализ

4.1.1. Потенциальные потребители результатов исследования

Продукт: оптимизация процесса депарафинизации установки Л-24-10/2000 находящейся на ООО «КИНЕФ» с применением математической моделирующей программы «Депарафинизация».

Целевой рынок: предприятия нефтеперерабатывающей отрасли промышленности.

4.1.2. Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Таблица 19 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес крите-рия	Баллы			Конкуренто-способность		
		$Б_ф$	$Б_{к1}$	$Б_{к2}$	$К_ф$	$К_{к1}$	$К_{к2}$
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Повышение производительности труда	0,06	5	4	4	0,3	0,24	0,24
2. Ресурсоэффективность	0,1	4	3	4	0,4	0,3	0,4
3. Энергоэкономичность	0,09	4	3	4	0,36	0,27	0,36
4. Выход продукта	0,08	4	5	4	0,32	0,4	0,32
5. Качество продукта	0,09	4	5	4	0,3	0,4	0,3

					6	5	6
6. Точность исследования	0,03	3	4	3	0,09	0,12	0,09
7. Удобство расчета	0,03	4	3	5	0,12	0,09	0,15
8. Стоимость исследования	0,04	5	3	3	0,2	0,12	0,12
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Конкурентоспособность продукта	0,07	5	4	3	0,35	0,28	0,21
2. Уровень проникновения на рынок	0,07	4	5	5	0,28	0,35	0,35
3. Цена	0,07	5	4	4	0,35	0,28	0,28
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0,08	5	5	5	0,4	0,4	0,4
5. Послепродажное обслуживание	0,06	5	3	2	0,3	0,18	0,12
6. Финансирование научной разработки	0,03	4	5	4	0,12	0,15	0,12
7. Срок выхода на рынок	0,04	5	4	4	0,2	0,16	0,16
8. Наличие сертификации разработки	0,06	4	5	4	0,24	0,3	0,24
Итого	**1**	**70**	**65**	**62**	**4,39**	**4,09**	**3,92**

4.1.3. SWOT-анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта.

Таблица 20 - SWOT-анализ

	Сильные стороны научно-исследовательского проекта: С1. Заявленная экономичность и энергоэффективность технологии. С2. Актуальность промышленной технологии. С3. Квалифицированный персонал С5. Возможность перерасчета на месте	**Слабые стороны научно-исследовательского проекта:** Сл1.Длительность исследования Сл2.Требуется большое количество экспериментов Сл3.Отсутствие эксперементальной масштабной модели установки
Возможности: В1. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ В2. Появление дополнительного спроса на исследование В3. Снижение таможенных пошлин на сырье и материалы, используемые при научных исследованиях В4. Повышение стоимости конкурентных разработок	СиВ: Исследование влияния технологических параметров процесса гидродепарафинизации с помощью математической модели , с целью оптимизации её работы, получения продукта с конкурентными преимуществами с оптимальной себестоимостью, высоким качеством и инжиниринговой услугой	СЛиВ: 1.Набор дополнительного персонала работающего над процессом оптимизации 2.Создание инжинирингового отдела по данной методитке анализа 3.Приобретения необходимого оборудования для проведения испытания опытного образца

В5. Получение грантов на исследования		
Угрозы: У1. Отсутствие спроса на новые технологии производства У2.Развитая конкуренция технологий производства У3.Введение дополнительных государственных требований к сертификации продукции	СВиУ: 1.Продвижение методики исследования для повышения спроса 2.Создание конкурентных преимуществ готового продукта 3.Сертификация и стандартизация продукта	СЛиУ: 1. Набор дополнительного персонала работающего над процессом оптимизации 2. Создание инжинирингового отдела по данной методитке анализа 3.Приобретения необходимого оборудования для проведения испытания опытного образца 4. Продвижение методики исследования с целью создания спроса 5.Создание конкурентных преимуществ готового продукта 6.Сертификация и стандартизация продукта

4.1.4. Оценка готовности проекта к коммерциализации

Таблица 21 – Бланк оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации

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

11.	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	1	2
12.	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	1	2
13.	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	1	4
14.	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	1	1
15.	Проработан механизм реализации научного проекта	2	3
	ИТОГО БАЛЛОВ	32	47

4.1.5 Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования

Проанализировав основные методы коммерциализации за самый оптимальный принят инжиниринговый метод. Благодаря этому методу можно будет сотрудничать сразу с несколькими организациями и улучшать методику исследования за счёт большего количества данных, что позволит найти лучший способ оптимизации.

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 22 - Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	**Ожидания заинтересованных сторон**
ООО «КИНЕФ»	Оптимизация/усовершенствование существующей технологии

Таблица 23 - Цели и результат проекта

Цели проекта:	Разработка методов эксплуатации установок гидродепарафинизации с применением математической модели с целью оптимизации процесса, улучшения ресурсоэффективности и энергоемкости.
Ожидаемые результаты проекта:	Улучшение производительности производства
Критерии приемки результата проекта:	Адекватность результатов
Требования к результату проекта:	**Требование:**
	Стандартизация готового продукта

Организационная структура проекта

Таблица 24 - Рабочая группа проекта

№ п/п	**ФИО, основное место работы, должность**	**Роль в проекте**	**Функции**	**Трудо-затраты, час.**
	Белинская Наталья Сергеевна, НИ ТПУ, кафедра ХТТ и ХК, ассистент	Руководитель	Координация деятельности проекта	80

	Отставнов Александр Александрович, НИ ТПУ, кафедра ХТТ и ХК, специалитет	Исполнитель	Выполнение НИР	485
ИТОГО:				565

Таблица 25 - Ограничения проекта

Фактор	Ограничения/ допущения
3.1. Бюджет проекта	81486528,6 руб
3.1.1. Источник финансирования	ООО «КИНЕФ»
3.2. Сроки проекта:	3.03.16-31.05.16
3.2.1. Дата утверждения плана управления проектом	3.03.16
3.2.2. Дата завершения проекта	31.05.16

4.3. Планирование управления научно-техническим проектом

4.3.1. Иерархическая структура работ проекта

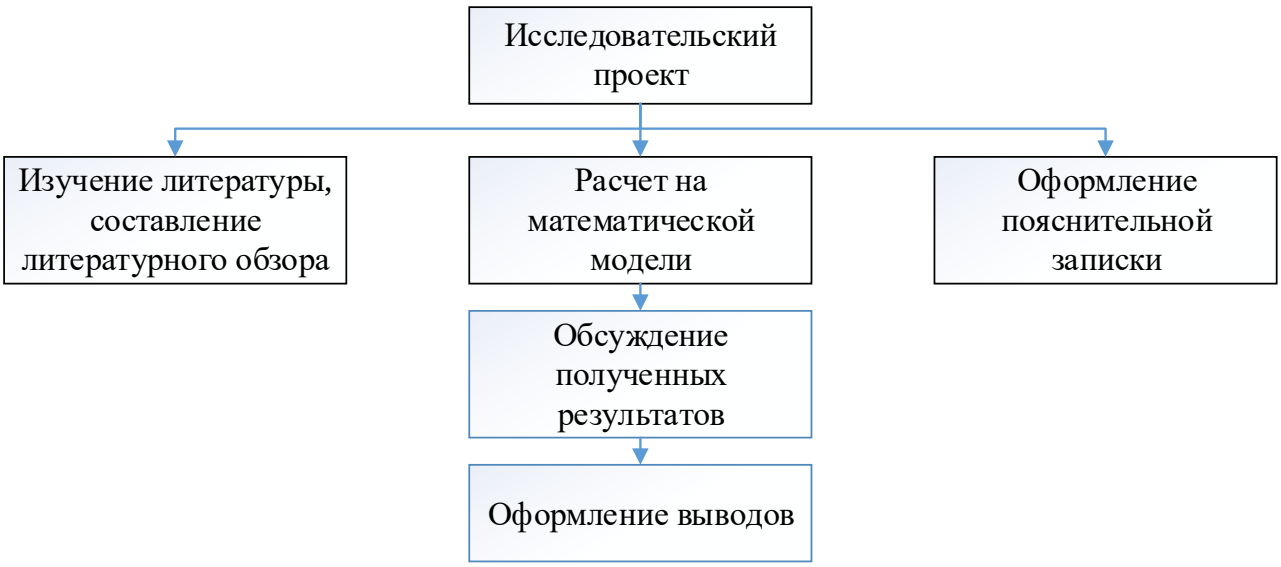

Рисунок 1 – Иерархическая структура работ проекта

4.3.2. План проекта

Линейный график представляется в виде таблицы (табл. 26).

Таблица 26 - Календарный план проекта

Название	**Длительность, дни**	**Дата начала работ**	**Дата окончания работ**	**Состав участников**
Изучение литературы, составление литературного обзора	50	10.01	28.02	Отставнов Александр Александрович
Расчет на математической модели	21	03.03	24.03	Отставнов Александр Александрович
Обсуждение полученных результатов	14	27.03	10.04	Отставнов Александр Александрович, Белинская Наталья Сергеевна
Оформление выводов	14	13.04	27.04	Отставнов Александр Александрович
Оформление пояснительной записки	21	10.05	31.05	Отставнов Александр Александрович
Итого:	120	10.01	31.05	

Таблица 27 - Календарный план-график проведения НИОКР по теме

Вид работ	Исполнители	$T_{к}$, кал,дн.	Продолжительность выполнения работ													
			янв		февр			март			апрель			май		
			2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Изучение литературы, составление литературного обзора	Инженер	50														
Расчет на математической модели	Инженер	21														
Обсуждение полученных результатов	Инженер, руководитель	14														
Оформление выводов	Инженер	14														
Оформление пояснительной записки	Инженер	21														

Таблица 28 – Параметры сетевого графика

Название работы	**№ раб.**	$T_{кал}$	$t_{рн}$	$t_{ро}$	$t_{пн}$	$t_{по}$	$R_п$	$R_с$
Изучение литературы, составление литературного обзора	1	50	0	50	0	50	0	0
Расчет на математической модели	2	21	50	71	50	71		0
Обсуждение полученных результатов	3	14	71	85	71	85		0
Оформление выводов	4	14	85	99	85	99		0
Оформление пояснительной записки	5	21	99	120	99	120		0
Резерв времени полного пути $R(L_п)$	0							
Критический путь $T_{кр}$	120							

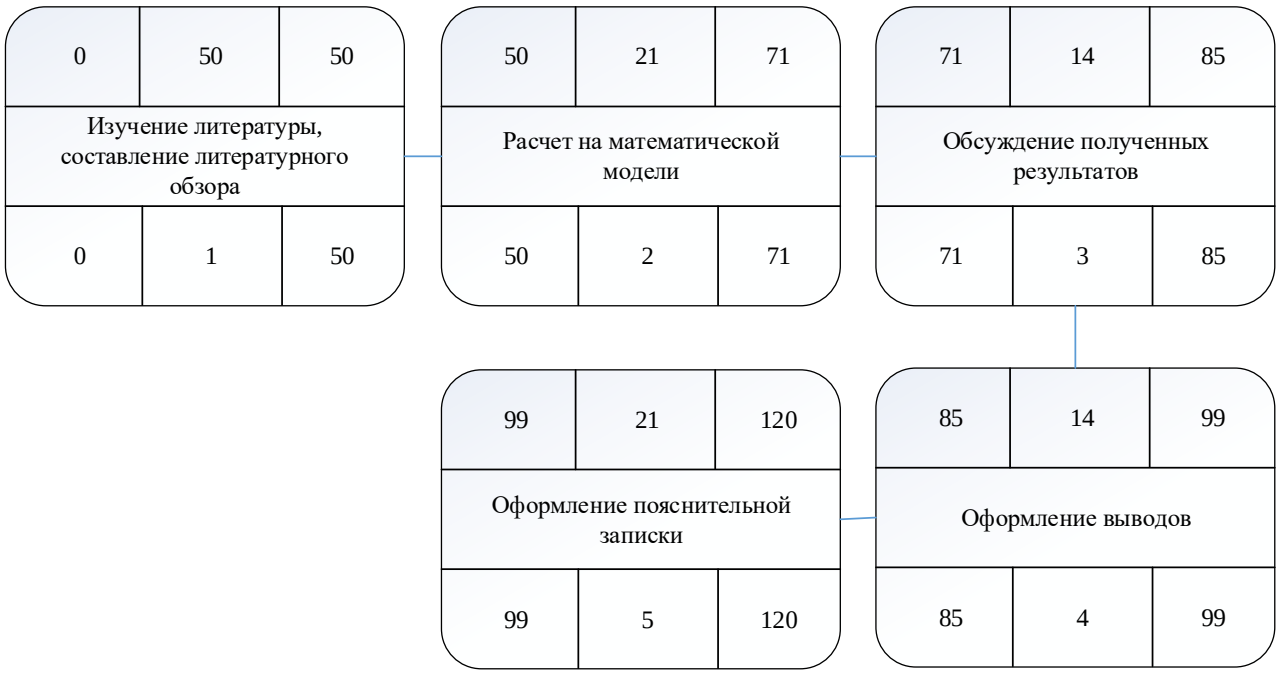

Рисунок 4.1 - Сетевой план-график выполнения НИР

4.3.3. Бюджет научного исследования

Сырье, материалы, покупные изделия и полуфабрикаты (за вычетом отходов)

Таблица 29 - Группировка затрат по статьям

Статьи						
Сырье, материалы (за вычетом возвратных отходов), покупные изделия и полуфабрикаты, тыс.руб	Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ, тыс.руб	Основная заработная плата, тыс.руб	Дополнительная заработная плата, тыс.руб	Отчисления на социальные нужды, тыс.руб	Накладные расходы, тыс.руб	Итого плановая себестоимость, тыс.руб
81483801	851	761,6	91,4	255,9	767,7	81486528,6

Таблица 30 - Сырье, материалы, комплектующие изделия и покупные полуфабрикаты

Наименование	Марка, размер	Кол-во	Цена за единицу, руб.	Сумма, млн. руб.
Газойль		931392	31000	28873,2
Дизельная фракция		1169007	22000	25718,2
Электроэнергия		3320666	2,31	7670,7
Всего за материалы				62262,1
Транспортно-заготовительные расходы (3-5%)				3113,1
Итого по статье $C_м$				65375,2

Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ

Таблица 31 - Расчет затрат по статье «Спецоборудование для научных работ»

№ п/п	Наименование оборудования	Кол-во единиц оборудования	Цена единицы оборудования, тыс.руб.	Общая стоимость оборудования, тыс.руб.
1.	Датчик расхода турбинный МИГ	3	92	276
2	АРН-ЛАБ-11 Автоматический аппарат для определения фракционного состава нефти и нефтепродуктов	1	575	575

Основная заработная плата

Таблица 32 - Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	**Руководитель**	**Инженер**	**Лаборант**
Календарное число дней	365	365	365
Количество нерабочих дней - выходные дни - праздничные дни	 90 28	 90 28	 90 28

Потери рабочего времени - отпуск - невыходы по болезни	24 0	24 0	24 0
Действительный годовой фонд рабочего времени	223	223	223

Таблица 33 - Расчёт основной заработной платы

Исполнители	$З_б$, руб.	$k_р$	$З_м$, руб	$З_{дн}$, руб.	$Т_р$, раб.дн.	$З_{осн}$, руб.
Руководитель	38000	1	38000	1908,5	223	425595,5
Инженер	10000	1	10000	502,24	223	112000
Лаборант	20000	1	20000	1004,48	223	224000

Дополнительная заработная плата научно-производственного персонала

Таблица 34 - Заработная плата исполнителей НТИ

Заработная плата	**Руководитель**	**Инженер**	**Лаборант**
Основная зарплата	425595,5	112000	224000
Дополнительная зарплата	51071,46	13440	26880
Итого по статье $C_{зп}$	476666,96	125440	250880

Отчисления на социальные нужды

Статья включает в себя отчисления во внебюджетные фонды.

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

где $k_{внеб}$ =30 % коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

Таблица 35 - Отчисления на социальные нужды

	Руководитель	**Инженер**	**Лаборант**
Зарплата	476666,96	125440	250880
Отчисления на социальные нужды	143000	37632	75264

Накладные расходы

Накладные расходы принимаются 80-100% от суммы основной и дополнительной заработной платы, работников.

$$C_{\text{накл}} = k_{\text{накл}} \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}})$$

Итого накладные расходы составили 767688 рублей.

4.3.4. Организационная структура проекта

Таблица 36 - Выбор организационной структуры научного проекта

Критерии выбора	**Функциональная**	**Матричная**	**Проектная**
Степень неопределенности условий реализации проекта	Низкая	Высокая	Высокая
Технология проекта	Стандартная	Сложная	Новая
Сложность проекта	Низкая	Средняя	Высокая
Взаимозависимость между отдельными частями проекта	Низкая	Средняя	Высокая
Критичность фактора времени (обязательства по срокам завершения работ)	Низкая	Средняя	Высокая
Взаимосвязь и взаимозависимость проекта от организаций более высокого уровня	Высокая	Средняя	Низкая

Вывод: на основе проведенного анализа выбора организационной структуры научного проекта, было выявлено, что наиболее выгодной является проектная структура.

4.3.5. План управления коммуникациями проекта

Таблица 37 – Пример плана управления коммуникациями

№ п/п	**Какая** информация передается	**Кто** передает информацию	**Кому** передается информация	**Когда** передает информацию
1.	Статус проекта	Исполнитель проекта	Руководителю проекта	Еженедельно (среда)
2.	Обмен информацией о текущем состоянии проекта	Исполнитель проекта	Руководителю проекта	Еженедельно (среда)
3.	Документы и правки по проекту	Руководитель проекта	Исполнителю проекта	Еженедельно (пятница)
4.	О выполнении работы	Исполнитель проекта	Руководителю проекта	Не позже дня окончания работы по графику

4.3.6. Реестр рисков проекта

Таблица 38 – Риски проекта

№	Риск	Потенциальное воздействие	Вероятность насту	Влияние риска (1-5)	Уровень риска	Способы смягчения риска	Условия наступления

			плени я (1-5)				
1	Задержка поставки товара	Задержка исследования	4	3	Высокий	Оплата ущерба фирмой	Отсутствие товара у поставщика; проблемы с доставкой
2	Непредви денные поломки оборудова ния	Потеря важных данных	3	4	средний	Дополнительные копии информации	Поломка оборудования с невозможностью восстановления
3	Ошибки в рассчетах	Неправильная работа системы или нерабочая система	3	5	высокий	Проверка кадрами с более высокой квалификацией	Недостаток квалификации
4	Превышен ие бюджета	Невозможност ь продолжать исследование	3	4	средний	Восполнение бюджета своими средствами, поиск инвесторов	Ошибочное распределение бюджета

4.4. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Эффективность научного ресурсосберегающего проекта включает в себя социальную эффективность, экономическую и бюджетную эффективность. Показатели общественной эффективности учитывают социально-экономические последствия осуществления инвестиционного проекта как для общества в целом, в том числе непосредственные результаты и затраты проекта, так и затраты, и результаты в смежных секторах экономики, экологические, социальные и иные внеэкономические эффекты.

Показатели экономической эффективности проекта учитывают финансовые последствия его осуществления для предприятия, реализующего данный проект. В этом случае показатели эффективности проекта в целом характеризуют с экономической точки зрения технические, технологические и организационные проектные решения.

Бюджетная эффективность характеризуется участием государства в проекте с точки зрения расходов и доходов бюджетов всех уровней.

4.4.1 Оценка абсолютной эффективности исследования

В основе проектного подхода к инвестиционной деятельности предприятия лежит принцип денежных потоков (cash flow). Особенностью является его прогнозный и долгосрочный характер, поэтому в применяемом подходе к анализу учитываются фактор времени и фактор риска. Для оценки общей экономической эффективности инноваций согласно «Методическим рекомендациям по оценке эффективности инвестиционных проектов…» в качестве основных показателей рекомендуются:

- чистый доход;
- чистый дисконтированный доход;
- внутренняя норма доходности;
- потребность в дополнительном финансировании;
- срок окупаемости;
- индексы доходности затрат и инвестиций и др.

Таблица 39 – План денежных потоков

№	Показатель, млн.руб	Номер шага (периода)расчета (*t*)					
		0	1	2	3	4	5
Операционная деятельность							
1	Выручка без НДС	0	85000	85340	85681	86024	86368
2	Полные текущие издержки, в том числе:	0,0	-62263	-62288	-62313	-62338	-62363
3	прямые материальные затраты	0,0	-54591	-54613	-54635	-54657	-54679
4	ФОТ основных рабочих, включая взносы во внебюджетные фонды	0,0	-1,109	-1,109	-1,110	-1,110	-1,111
5	Силовая энергия	0,0	-7671	-7674	-7677	-7680	-7683

6	Денежный поток от производственной (операционной) деятельности (п.1-п.2)	0,0	22737	23052	23368	23686	24005
Инвестиционная деятельность							
7	Поступление инвестиций	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
8	Капиталовложения, обслуживание инвестиций	-65375	0	0,0	0,0	0,0	0,0
9	Сальдо от инвестиционной деятельности (п.7+п.8)	-65375	0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	Сальдо суммарного потока (п.6+п.9)	-65375	22737	23052	23368	23686	24005
11	Сальдо накопленного потока	-65375	-42638	-19586	3782	27468	51473
12	Коэффициент дисконтирования при ставке дохода 10%	1,00	0,8333	0,6944	0,5787	0,4823	0,4019
13	Дисконтированное сальдо суммарного потока (стр.10*´стр.12)	-65375	18947	16007	13523	11424	9648
14	Дисконтированные инвестиции (стр.8*стр.12)	-65375	0	0,0	0,0	0,0	0,0

ЧД=51473 млн. рублей.

ЧДД проекта при норме дисконта Е=20%; ЧДД= 4174 млн. рублей, что означает что проект эффективен.

Потребность в финансировании ПФ= 42638 млн рублей.

Срок окупаемости

$t = \frac{-C_{н2}}{C_{сум1}} = \frac{19586}{22737} = 0{,}85$, второго года.

Расчет индекса доходности инвестиций(ИД):

$ИД = 1 + \frac{ЧД}{К} = 1 + \frac{51473}{65375} = 1{,}8$

Сумма дисконтированных инвестиций ДК=65375.

Расчет дисконтного индекса доходности:

$$ИДД = 1 + \frac{ЧДД}{ДК} = 1 + \frac{4174}{65375} = 1{,}064$$

4.4.2 Оценка сравнительной эффективности исследования

Таблица 40 – Группировка затрат по статьям аналогов разработки

Вариант исполнения аналога №	Сырье, материалы (за вычетом возвратных отходов), покупные изделия и полуфабрикаты	Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	Основная заработная плата	Отчисления на социальные нужды	Итого плановая себестоимость
1	89562148	851	761,6	255,9	89564016,5
2	76985412	851	761,6	46070	77033094,6

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{ф}}^{\text{p}} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}} = \frac{81483801}{89564016,5} = 0,91$$

$$I_{\text{ф}}^{a1} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}} = \frac{77033094,6}{89564016,5} = 0,86$$

$$I_{\text{ф}}^{a2} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}} = \frac{89564016,5}{89564016,5} = 1$$

где I_{ϕ}^{p} - 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 удешевление стоимости разработки в разы.

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

$$I_m^a = \sum_{i=1}^{n} a_i b_i^a \quad , \qquad I_m^p = \sum_{i=1}^{n} a_i b_i^p \quad ,$$

где I_m – интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов; a_i – весовой коэффициент i-го параметра;

b_i^a, b_i^p – бальная оценка i-го параметра для аналога и разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

n – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности рекомендуется проводить в форме таблицы, пример которой приведен ниже.

Таблица 41 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Аналог 1	Аналог 2
1. Способствует росту производительности труда пользователя	0,1	5	4	3
2. Удобство в эксплуатации (соответствует	0,15	4	3	4

требованиям потребителей)				
3. Помехоустойчивость	0,15	5	4	3
4. Энергосбережение	0,20	5	4	2
5. Надежность	0,25	5	5	5
6. Материалоемкость	0,15	1	2	3
ИТОГО	1	25	22	20

$$I_m^p = 5\times0{,}1+4\times0{,}15+5\times0{,}15+5\times0{,}20+5\times0{,}25+1\times0{,}15 = 4{,}25$$

$$I_1^A = 4\times0{,}1+3\times0{,}15+4\times0{,}15+4\times0{,}20+5\times0{,}25+2\times0{,}15 = 3{,}8$$

$$I_2^A = 3\times0{,}1+4\times0{,}15+3\times0{,}15+2\times0{,}20+5\times0{,}25+3\times0{,}15 = 3{,}45$$

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

$$I_{\text{финр}}^{\text{р}} = \frac{I_m^p}{I_{\text{ф}}^p} = \frac{4{,}25}{0{,}91} = 4.67$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{а1}} = \frac{I_m^{a1}}{I_{\text{ф}}^{a1}} = \frac{3{,}8}{0{,}86} = 4{,}42$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{р}} = \frac{I_m^{a2}}{I_{\text{ф}}^{a2}} = \frac{3{,}45}{1} = 3{,}45$$

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

$$\text{Э}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{финр}}^{\text{р}}}{I_{\text{финр}}^{a1}} = \frac{4.67}{4{,}42} = 1{,}06$$

$$Э_{ср} = \frac{I^{р}_{финр}}{I^{а2}_{финр}} = \frac{4,67}{3,45} = 1,35$$

где Эср – сравнительная эффективность проекта; $I^{р}_{тэ}$ – интегральный показатель разработки; $I^{а}_{тэ}$ – интегральный технико-экономический показатель аналога.

Таблица 42 - Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Аналог 1	Аналог 2	Разработка
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,86	1	0,91
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	3,8	3,45	4,25
3	Интегральный показатель эффективности	4,42	3,45	4,67
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,06		1,35

Сравнение значений интегральных показателей эффективности позволяет судить о приемлемости существующего варианта решения поставленной в дипломной работе технической задачи с позиции финансовой и ресурсной эффективности.