



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

Школа Инженерная школа природных ресурсов
Направление подготовки 18.04.01. Химическая технология
ООП/ОПОП Химическая технология высокомолекулярных соединений
Отделение школы Отделение химической инженерии

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА МАГИСТРАНТА

Тема работы
Синтез мономеров на основе эфиров дикарбоновых кислот и полимеров на их основе УДК 678.774.34:66.09

Обучающийся

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2ДМ11	Опейкин Игорь Николаевич		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Сорока Людмила Станиславовна	К.Х.Н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Криницина Зоя Васильевна	К.Т.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Сечин Андрей Александрович	К.Т.Н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП/ОПОП/должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Гавриленко Михаил Алексеевич	д.х.н., доцент		



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

Перечень компетенций ООП

Код компетенции СУОС	Наименование компетенции СУОС
Универсальные компетенции	
УК(У)-1	Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действия
УК(У)-2	Способен управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла
УК(У)-3	Способен организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной цели
УК(У)-4	Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном(ых) языке(ах), для академического и профессионального взаимодействия
УК(У)-5	Способен анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия
УК(У)-6	Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки
Общепрофессиональные компетенции	
ОПК(У)-1	Способен организовывать самостоятельную и коллективную научно-исследовательскую работу, разрабатывать планы и программы проведения научных исследований и технических разработок
ОПК(У)-2	Способен использовать современные приборы и методики, организовывать проведение экспериментов и испытаний, проводить их обработку и анализировать их результаты
ОПК(У)-3	Способен разрабатывать нормы выработки, технологические нормативы на расход материалов, заготовок, топлива и электроэнергии, контролировать параметры технологического процесса, выбирать оборудование и технологическую оснастку
ОПК(У)-4	Способен находить оптимальные решения при создании продукции с учетом требований качества, надежности и стоимости, а также сроков исполнения, безопасности жизнедеятельности и экологической чистоты
Профессиональные компетенции	
ПК(У)-1	Способен проводить научно-исследовательские и опытно-конструкторские разработки при исследовании самостоятельных тем
ПК(У)-2	Способен проводить поиск, обработку, анализ и систематизацию научно-технической информации по теме исследования, выбирать методики и средства решения задачи
ПК(У)-3	Способен осуществлять технологическое и методическое сопровождение в области синтеза и переработки полимерных материалов
ПК(У)-4	Способен проектировать и организовывать учебный процесс по образовательным программам с использованием современных образовательных технологий

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

Школа Инженерная школа природных ресурсов
 Направление подготовки 18.04.01. Химическая технология
 ООП/ОПОП Химическая технология высокомолекулярных соединений
 Отделение школы Отделение химической инженерии

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП/ОПОП
Гавриленко М. А.

 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы магистранта

Обучающийся

Группа	ФИО
2ДМ11	Опейкин Игорь Николаевич

Тема работы:

Синтез мономеров на основе эфиров дикарбоновых кислот и полимеров на их основе	
Утверждена приказом директора (номер, дата)	№ 32-59/с от 01.02.2023

Срок сдачи студентом выполненной работы:	01 июня 2023 г.
--	-----------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе:	1. Объект исследования: получение мономера на основе эфиров дикарбоновых кислот, для дальнейшего получения полимера на его основе. 2. Исходное сырье / целевой продукт: малеиновый ангидрид, олигомер молочной кислоты, циклопентадиен 3. Требования к процессу: адекватность результатов 4. Требования к продукту: стандартизация готового продукта
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	1. Литературный и патентный обзор по тематике исследования. 2. Экспериментальная часть (проведение лабораторных исследований). 3. Результаты исследования и их обсуждение. 4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение. 5. Социальная ответственность.
Перечень графического материала	Презентация (15 слайдов)

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Криницина З.В.
Социальная ответственность	Сечин А.А.
Раздел на иностранном языке	Сыскина А. А.
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
<p>На русском языке: введение, литературный обзор, экспериментальная часть, результаты и их обсуждение, финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение, социальная ответственность, заключение</p> <p>На английском языке: Synthesis of monomers based on esters of dicarboxylic acids and polymers based on them.</p>	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	01.10.2021
---	------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Сорока Людмила Станиславовна	к.х.н.		01.10.2021

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2ДМ11	Опейкин Игорь Николаевич		01.10.2021

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

Студенту:

Группа	ФИО
2ДМ11	Опейкину Игорю Николаевичу

Школа	Инженерная школа природных ресурсов	Отделение школы (НОЦ)	Отделение химической инженерии
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	18.04.01 «Химическая технология»

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

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

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p>1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</p> <p>2. Планирование и формирование бюджета научных исследований</p> <p>3. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</p>	<p>Анализ конкурентных технических решений</p> <p>План проекта (календарный план НТИ) Бюджет проекта исследования (затраты на выполнение НТИ)</p> <p>Проведение оценки ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ</p>
--	---

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

<p>1. Оценка конкурентоспособности технических решений</p> <p>2. Диаграмма Исикавы</p> <p>3. График проведения и бюджет НИ</p> <p>4. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ</p>	
--	--

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	02.02.2023
--	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОСГН ШБИП ТПУ	Креницына Зоя Васильевна	к.т.н., доцент		02.02.2023

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2ДМ11	Опейкин Игорь Николаевич		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа		ФИО	
2ДМ11		Опейкин Игорь Николаевич	
Школа	Инженерная школа природных ресурсов	Отделение (НОЦ)	Отделение химической инженерии
Уровень образования	магистратура	Направление/специальность	18.04.01 Химическая технология

Тема ВКР:

Синтез мономеров на основе эфиров дикарбоновых кислот и полимеров на их основе	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
<p>Введение</p> <ul style="list-style-type: none"> – Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика) и области его применения. – Описание рабочей зоны (рабочего места) при разработке проектного решения/при эксплуатации 	<p><i>Объект исследования:</i> получение мономера на основе эфиров дикарбоновых кислот, для дальнейшего получение полимера на его основе</p> <p><i>Область применения:</i> медицина, упаковка, тканная инженерия</p> <p><i>Рабочая зона:</i> лаборатория</p> <p><i>Размеры помещения:</i> 6x15 м</p> <p><i>Количество и наименование оборудования рабочей зоны:</i> электронагреватель, установка для вакуумной перегонки, роторный испаритель</p>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<p>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности <u>при разработке проектного решения/при эксплуатации:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	<p>Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 № 197-ФЗ</p> <p>Федеральный закон от 28.12.2013 №426-ФЗ «О специальной оценке условий труда»</p> <p>ГОСТ 12.2.033-78. Рабочее место при выполнении работ стоя. Общие эргономические требования</p>
<p>2. Производственная безопасность <u>при разработке проектного решения/при эксплуатации:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> – Анализ выявленных вредных и опасных производственных факторов – Расчет уровня опасного или вредного производственного фактора 	<p>Опасные факторы:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Действие химических веществ; 2. Поражение электрическим током; 3. Возникновение пожара. <p>Вредные факторы:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Повышенный уровень шума; 2. Недостаток необходимого искусственного освещения; 3. Производственные факторы, связанные с аномальными микроклиматическими параметрами воздушной среды на местонахождении работающего; 4. Нервно-психические перегрузки, монотонность трудового процесса. <p>Требуемые средства коллективной и индивидуальной защиты от выявленных факторов: защитные очки, респиратор, резиновые перчатки,</p>

	халат, приточно-вытяжная вентиляция, шумопоглощающие средства, люминесцентные лампы. Расчет: расчет системы искусственного освещения
3. Экологическая безопасность <u>при разработке проектного решения/при эксплуатации</u>	Воздействие на литосферу: бытовые отходы Воздействие на гидросферу: производственные сточные воды Воздействие на атмосферу: выбросы из вентиляционных систем
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях <u>при разработке проектного решения/при эксплуатации</u>	Возможные ЧС: Природные катастрофы (наводнение, землетрясение) Техногенные аварии (пожар, воздействие ядовитых веществ, террористические акты) Наиболее типичная ЧС: воздействие ядовитых веществ
Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
02.02.2023	

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Сечин Андрей Александрович	К.Т.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2ДМ11	Опейкин Игорь Николаевич		

Реферат

Выпускная квалификационная работа 96 страниц, 17 рисунков, 16 таблиц, 47 источников, 1 приложение.

Ключевые слова: малеиновый ангидрид, олигомеры молочной кислоты, циклопентадиен, реакция этерификации, реакция Дильса – Альдера, метатезисная полимеризация.

Объектом исследования является реакция синтеза мономера на основе 5-норборнен-2,3-дикарбоновой кислоты и олигомеров молочной кислоты.

Цель работы – исследование синтеза мономеров на основе сложных эфиров дикарбоновых кислот и последующая разработка полимеров из этих мономеров.

В процессе исследования осуществляли реакции этерификации, реакции Дильса-Альдера, метатезисную полимеризацию, выделение и очистку основного продукта от побочных продуктов реакции.

В результате исследования получали мономер на основе сложных эфиров малеиновой кислоты, полимер на основе данного мономера.

Область применения: покрытия и пленки, клеи и герметики, текстиль и волокна.

Экономическая эффективность работы обеспечивается нахождением технических решений, обеспечивающих мало- и безотходное получение мономеров на основе эфиров дикарбоновых кислот.

Обозначения и сокращения

В данной работе применены следующие обозначения и сокращения с соответствующими расшифровками:

ЦПД – циклопентадиен;

ДЦПД – дициклопентадиен

ГМ-МС – газовая хромато-масс-спектрометрия

ПДК – предельно допустимая концентрация

СИЗ – средства индивидуальной защиты

ЧС – чрезвычайная ситуация

Оглавление

Литературный обзор	16
1.1 Реакции этерификации	16
2.4.2 Механизм реакции этерификации	17
1.1.2 Первая стадия получения мономера	19
1.2 Реакции Дильса-Альдера.....	20
1.2.1 Механизм реакции Дильса-Альдера	22
1.2.2 Реакция Дильса-Альдера между циклопентадиеном и эфиром малеиновой кислоты.....	25
1.3 Реакции метатезисной полимеризации.....	26
1.3.1 Механизм метатезисной полимеризации	27
1.3.2 Стадия полимеризации полученного мономера	29
1.4 Характеристики исходных веществ	31
1.4.1 Малеиновый ангидрид.....	31
1.4.2 Олигомеры молочной кислоты	32
1.4.3 Циклопентадиен	34
1.5 Области применения.....	37
2 Объект и методы исследования	39
2.1 Реагенты	39
2.2 Методика определения молекулярной массы олигомера молочной кислоты	40
2.3 Методика очистки малеинового ангидрида	41
2.5 Методика проведения этерификации малеинового ангидрида с олигомером молочной кислоты.....	43
2.6 Методика получения мономера на основе ЦПД и эфира малеиновой кислоты	43
2.7 Методика полимеризации	44
3 Результаты и их обсуждение.....	46
3.1 Определение молекулярной массы олигомера молочной кислоты	46

3.2 Результаты первой стадии получения мономера.....	47
3.3 Результаты второй стадии получения мономера.....	49
3.4 Результаты стадии полимеризации	51
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	52
4.1 Предпроектный анализ	52
4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования	52
4.1.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	52
4.2 Диаграмма Исикавы.....	53
4.3 Оценка готовности проекта к коммерциализации.....	55
4.4 Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования.....	56
4.5 Цели и результаты проекта	56
4.6 План проекта.....	57
4.8 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.....	62
Выводы по разделу.....	64
5 Социальная ответственность.....	65
5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	65
5.1.1 Специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства	65
5.1.2 Организационные мероприятия по компоновке рабочей зоны.....	66
5.2 Производственная безопасность.....	67
5.2.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть в лаборатории при проведении исследований	67
5.2.2 Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов	69
5.2.2.1 Освещенность. Расчет искусственного освещения	69
5.2.2.2 Повышенный уровень шума и вибрации.....	72
5.2.2.3 Работа с химическими реактивами	73

5.2.2.4 Электрический ток	74
5.3 Экологическая безопасность.....	74
5.3.1 Анализ влияния процесса исследования на окружающую среду	74
5.3.2 Обоснование мероприятий по защите окружающей среды	75
5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	76
5.4.1 Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть в лаборатории при проведении исследований	77
5.4.2 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действий в случае возникновения ЧС	77
Выводы по разделу.....	79
Заключение	80
Список использованных источников	81
Приложение I.....	84

Введение

Актуальность работы. Синтез мономеров на основе сложных эфиров дикарбоновых кислот и последующая разработка полимеров, полученных из этих мономеров, привлекли значительное внимание в последние годы.

В стремлении к созданию устойчивых и экологически чистых материалов разработка полимеров из возобновляемых ресурсов приобрела решающее значение. Сложные эфиры дикарбоновых кислот представляют собой многообещающее направление для синтеза мономеров благодаря их изобилию, низкой стоимости и потенциалу возобновляемых источников. Эти мономеры обладают разнообразными структурными возможностями и могут быть адаптированы для достижения желаемых свойств, таких как механическая прочность, термостойкость и совместимость с другими материалами. Полученные полимеры находят применение в таких областях, как упаковка, покрытия и клеи. Таким образом, синтез мономеров на основе сложных эфиров дикарбоновых кислот и последующая разработка полимеров, полученных из этих мономеров, имеют большое значение в современном научном и промышленном масштабе.

Цель работы: синтез и полимеризация мономеров на основе 5-норборнен-2,3-дикарбоновой кислоты и олигомеров молочной кислоты.

Для достижения цели были поставлены следующие *задачи*:

1. Изучить существующие методики производства мономеров и полимеров на основе производных норборнена и олигомеров молочной кислоты.
2. Синтезировать мономер на основе 5-норборнен-2,3-дикарбоновой кислоты и олигомеров молочной кислоты и исследовать его свойства.
3. Провести реакцию полимеризации, исследовать свойства полученного полимера.

Новизна работы: впервые получен мономер с использованием олигомеров молочной кислоты. Проведена метатезисная полимеризация

полученного мономера с использованием катализатора Ховейды-Граббса 2 поколения.

Практическая значимость работы: синтезированный мономер может быть использован в полимеризации для придания отличительных свойств образующихся продуктов.

Литературный обзор

1.1 Реакции этерификации

Для введения в молекулу мономера, пригодную для метатезисной полимеризации, линкера, представляющего собой олигомер молочной кислоты в данной работе предложено использовать двухстадийный синтеза. На первой стадии предложено получить моно или ди-замещенный эфир малеиновой кислоты реакцией этерификации кислоты с олигомерами молочной кислоты. На второй стадии предложено провести реакцию Дильса Альдера полученного эфира с циклопентадиеном.

Реакции этерификации играют решающую роль в синтезе мономеров, которые являются строительными блоками для полимеров. Эти реакции включают реакцию между спиртом и карбоновой кислотой (или ее производным) с образованием сложноэфирной связи. Процесс этерификации может катализироваться кислотами, основаниями или ферментами, в зависимости от конкретных условий реакции и желаемого результата.

В контексте синтеза мономеров реакции этерификации часто используются для введения специфических функциональных групп или модификации структуры исходных материалов. Тщательно подбирая компоненты спирта и карбоновой кислоты, а также условия реакции, можно получить широкий спектр сложноэфирных мономеров с индивидуальными свойствами [1].

Одним из распространенных примеров является синтез полиэфирных мономеров. Полиэфиры широко используются в различных областях применения, включая текстиль, упаковку и биомедицинские материалы. Реакция этерификации между диолом (например, этиленгликолем) и двухкислотой (например, терефталевой кислотой) приводит к образованию полиэфирного мономера, такого как этилентерефталат. Этот мономер впоследствии может быть полимеризован с образованием полиэфирного полимера.

Другим примером является синтез мономеров лактона, которые являются важными строительными блоками для биоразлагаемых полимеров. Мономеры лактона могут быть получены в результате реакции этерификации между гидроксикислотой (например, гидроксимасляной кислотой) и хлоридом кислоты (например, адипоилхлоридом). Полученные в результате мономеры лактона, такие как поли (ϵ -капролактон), обладают уникальной способностью к биологическому разложению и используются в таких областях, как системы доставки лекарств и тканевая инженерия [2].

Таким образом, реакции этерификации являются основополагающими в синтезе мономеров для полимеризации. Благодаря избирательному выбору компонентов спирта и карбоновой кислоты и оптимизации условий реакции этерификация позволяет получать разнообразные мономеры с индивидуальными свойствами. Эти мономеры служат основой для разработки широкого спектра функциональных и высокоэффективных полимеров.

2.4.2 Механизм реакции этерификации

Реакция этерификации — это химический процесс, который включает образование сложноэфирного соединения в результате реакции спирта (или фенола) с органической кислотой (или карбоновой кислотой) в присутствии кислотного катализатора. Механизм этерификации обычно протекает через следующие этапы (рисунок 1) [3]:

1) Протонирование. Кислотный катализатор, часто сильная минеральная кислота, такая как серная кислота (H_2SO_4) или соляная кислота (HCl), протонирует карбоновую кислоту, отдавая протон (H^+). Это протонирование делает карбоновую кислоту более реакционноспособной и восприимчивой к нуклеофильной атаке.

2) Нуклеофильная атака. Молекула спирта, действуя как нуклеофил, отдает электронную пару от своего атома кислорода атому углерода

протонированной карбоновой кислоты. Эта стадия приводит к образованию тетраэдрического промежуточного продукта.

3) Удаление воды. На этой стадии молекула воды удаляется из тетраэдрического промежуточного продукта, что приводит к образованию сложноэфирного соединения. Удалению воды обычно способствует кислотный катализатор, который также может действовать как обезвоживающий агент.

4) Перенос протона. Кислотный катализатор удаляет протон из новообразованного сложного эфира, регенерируя карбоновую кислоту и завершая реакцию этерификации. Кислотный катализатор может участвовать во множестве реакций этерификации, способствуя образованию сложноэфирных продуктов.

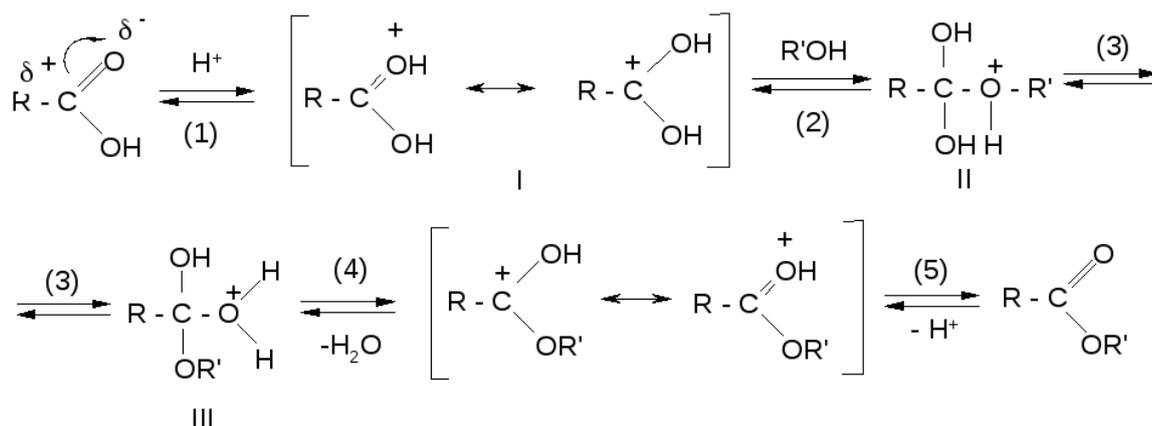


Рисунок 1 — Схема протекания реакции этерификации:

1 – протонирование; 2, 3 – нуклеофильная атака; 4 – удаление воды; 5 – перенос протона

В целом, реакция этерификации включает нуклеофильное добавление спирта к протонированной карбоновой кислоте с последующим удалением воды с образованием сложного эфира. Присутствие кислотного катализатора повышает скорость реакции за счет протонирования карбоновой кислоты и облегчения удаления воды. Выбор реагентов, катализатора и условий реакции может влиять на выход и селективность реакции этерификации.

1.1.2 Первая стадия получения мономера

Для получения промежуточного продукта при синтезе планируемого мономера может быть использована реакция этерификации между малеиновым ангидридом и олигомером молочной кислоты. Эта реакция включает взаимодействие гидроксильных групп, присутствующих в олигомерах молочной кислоты, с ангидридной функциональной группой малеинового ангидрида, приводящее к образованию сложноэфирных связей (рисунок 2).

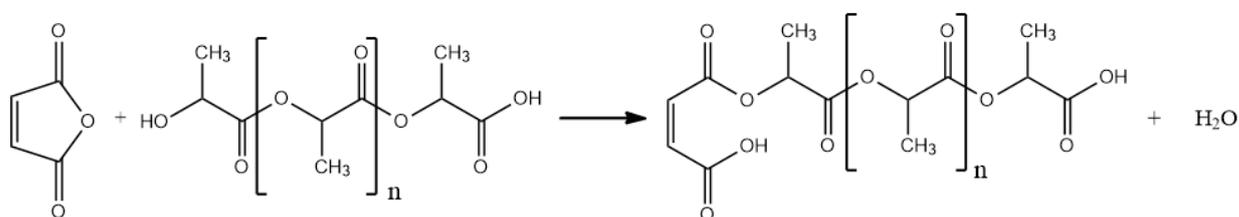


Рисунок 2 — Реакция этерификации между малеиновым ангидридом и олигомером молочной кислоты

Реакцию можно проводить в подходящих условиях реакции, которые обычно включают присутствие катализатора и контроль параметров реакции, таких как температура, время реакции и стехиометрия. Катализаторы, обычно используемые для реакций этерификации, включают кислотные катализаторы, такие как серная кислота или *p*-толуолсульфоновая кислота [4].

В ходе реакции малеиновый ангидрид вступает в реакцию с гидроксильными группами олигомеров молочной кислоты, что приводит к образованию сложноэфирных связей. Этот процесс этерификации приводит к превращению карбоновых кислотных групп олигомеров молочной кислоты в сложноэфирные функциональные группы.

Ход реакции этерификации можно контролировать с помощью различных аналитических методов, таких как инфракрасная спектроскопия с преобразованием Фурье (ИКФС) или спектроскопия ядерного магнитного

резонанса (ЯМР). Эти методы могут подтвердить образование сложноэфирных связей и предоставить информацию о степени этерификации [5].

Полученный в результате реакции этерификации малеинового ангидрида и олигомера молочной кислоты продукт представляет собой мономер с эфирными функциональными свойствами. Этот продукт может обладать улучшенными свойствами по сравнению с исходными материалами, такими как повышенная термостойкость, механическая прочность и применимость в различных областях.

Дальнейшие характеристики и испытания полученного продукта, такие как термический анализ, механические испытания и исследования совместимости, необходимы для оценки его пригодности для конкретных применений. Кроме того, следует исследовать влияние условий реакции, катализаторов и стехиометрии на свойства продукта, чтобы оптимизировать процесс этерификации и достичь желаемых эксплуатационных характеристик продукта.

1.2 Реакции Дильса-Альдера

Вторая стадия рассматриваемого процесса, это взаимодействие полученного эфира малеиновой кислоты с циклопентадиеном.

Реакции Дильса-Альдера представляют собой класс реакций циклоприсоединения, которые включают образование нового циклического соединения посредством комбинации сопряженного диена и диенофила. Эти реакции названы в честь химиков Отто Дильса и Курта Альдера, которые были удостоены Нобелевской премии по химии в 1950 году за открытие этой мощной синтетической методики [6].

Реакция Дильса-Альдера протекает по согласованному механизму, где диен, представляющий собой молекулу с чередующимися двойными связями, действует как компонент, богатый электронами, а диенофил, представляющий собой молекулу с электроноакцепторными группами, действует как компонент с

дефицитом электронов. Реакция происходит за счет образования новых σ -связей и разрыва существующих π -связей (рисунок 3).

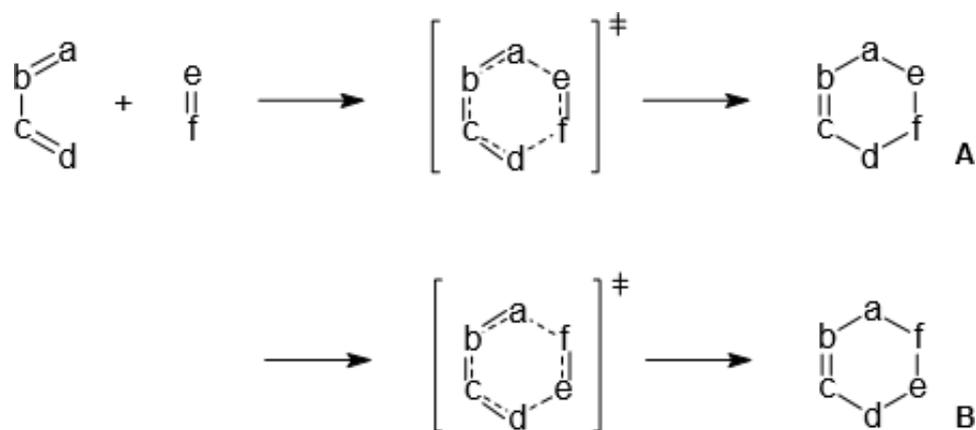


Рисунок 3 — Схематическое представление реакции Дильса-Альдера

Реакция обычно протекает в мягких условиях, таких как при комнатной температуре или при слабом нагревании, и не требует присутствия катализатора. Однако для некоторых реакций может быть полезно использование кислотного катализатора Льюиса для повышения скорости реакции или контроля регио- и стереохимии продукта.

Реакции Дильса-Альдера широко используются в органическом синтезе благодаря их универсальности и способности быстро создавать сложные циклические структуры с превосходным регио- и стереоконтролем. Они являются мощным инструментом для образования шестичленных колец и могут быть применены для синтеза натуральных продуктов, фармацевтических препаратов, полимеров и многих других органических соединений [7].

Одним из важных аспектов реакций Дильса-Альдера является способность контролировать региоселективность, которая относится к предпочтительному участку образования связи на диене и диенофиле. На региоселективность могут влиять различные факторы, такие как природа диена и диенофила, стерические эффекты, электронные эффекты и присутствие заместителей. Изменяя эти факторы, химики могут избирательно направлять реакцию с получением желаемого региоизомера.

В дополнение к региоселективности большое значение также имеет стереохимия продукта Дильса-Альдера. В зависимости от относительной конфигурации диена и диенофила, а также условий реакции, реакция может приводить к образованию различных стереоизомеров, включая эндо- и экзо-продукты. Выбор исходных материалов и условий реакции может быть использован для контроля стереохимии и получения желаемого стереоизомера [8].

В целом, реакции Дильса-Альдера предоставляют химикам мощный синтетический инструмент для эффективного и селективного получения сложных циклических соединений. Их универсальность и широкая применимость сделали их краеугольным камнем органического синтеза, позволяющим быстро и эффективно синтезировать разнообразные органические молекулы.

Реакции Дильса-Альдера оказали значительное влияние на органический синтез, позволив получать сложные циклические соединения с высокой эффективностью и селективностью. Их широкое применение в синтезе натуральных продуктов, медицинской химии, материаловедении, синтезе макроциклов и щелочной химии подчеркивает универсальность и полезность реакций Дильса-Альдера как мощного инструмента в современной органической химии.

1.2.1 Механизм реакции Дильса-Альдера

Реакция Дильса-Альдера — это перициклическая реакция, которая включает согласованное циклоприсоединение сопряженного диена и диенофила. Реакция протекает по ступенчатому механизму с участием нескольких промежуточных продуктов. Механизм реакции Дильса-Альдера можно разделить на следующие стадии [6]:

- 1) Формирование комплекса основного состояния:

Реакция начинается с взаимодействия между диеном и диенофилом, приводящего к образованию комплекса в основном состоянии. Диен обычно принимает s-цис-конформацию, где π -связи копланарны, что обеспечивает эффективное перекрытие орбиталей с диенофилом. Диен и диенофил сближаются друг с другом сквозным образом, располагая свои π -системы в непосредственной близости.

2) Формирование переходного состояния:

Поскольку диен и диенофил находятся в непосредственной близости друг от друга, реакция протекает через переходное состояние. В этом переходном состоянии π -электроны диена взаимодействуют с π^* (пустой) орбиталью диенофила. Перекрытие этих орбиталей позволяет образовывать две новые σ -связи при разрыве π -связей.

3) Образование циклоаддукта:

Переходное состояние быстро переходит к образованию циклического продукта, известного как циклоаддукт. π -электроны диена взаимодействуют с π^* -орбиталью диенофила, что приводит к образованию двух новых σ -связей. Одновременно π -связи диена и диенофила разрываются, образуя новую кольцевую систему с чередующимися одинарными и двойными связями.

4) Сохранение ароматичности:

Во время циклоприсоединения ароматичность исходного диена и диенофила либо сохраняется, либо восстанавливается. Это достигается циклической перегруппировкой π -электронов для поддержания замкнутого цикла сопряжения, что способствует стабильности циклоприсоединения.

5) Стереохимия:

Реакция Дильса-Альдера проявляет стереохимию, приводящую к образованию двух возможных стереоизомеров: эндо- и экзо-продуктов. Эндопродукт характеризуется тем, что диенофильный заместитель расположен внутри вновь образованного кольца, в то время как экзопродукт имеет заместитель, расположенный вне кольца. Стереохимия циклоприсоединения

определяется относительной ориентацией диена и диенофила во время реакции (рисунок 4).

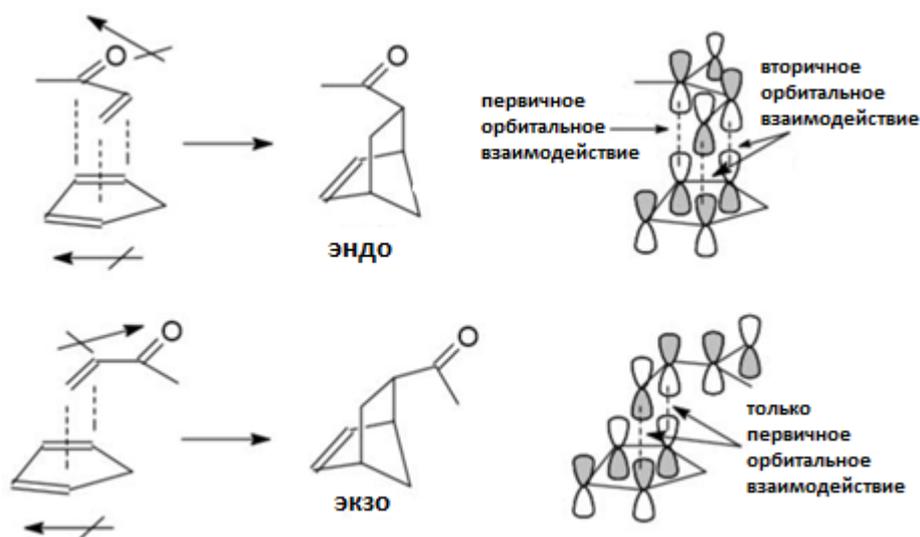


Рисунок 4 — Эндо- и экзо-путь для реакции Дильса-Альдера на примере реакции циклопентадиена с метилвинилкетонем

б) Перестановки и исключения:

В некоторых случаях после образования цикло-аддукта могут происходить перегруппировки или реакции элиминации, приводящие к образованию различных продуктов или облегчающие последующие превращения. На эти перестройки могут влиять такие факторы, как пространственные помехи, электронные эффекты и условия реакции.

Общий механизм реакции Дильса-Альдера в высокой степени регио- и стереоспецифичен, и выбор диена и диенофила, а также условий реакции могут существенно повлиять на исход реакции. Реакция Дильса-Альдера широко используется в органическом синтезе для построения сложных кольцевых систем и получения разнообразных химических структур с точным контролем регио- и стереоселективности.

1.2.2 Реакция Дильса-Альдера между циклопентадиеном и эфиром малеиновой кислоты

Реакция Дильса-Альдера между циклопентадиеном (ЦПД) и эфиром малеиновой кислоты является хорошо известным и широко изучаемым превращением в органической химии. Эта реакция включает циклоприсоединение сопряженного диена (ЦПД) и диенофила (сложного эфира малеиновой кислоты) с образованием циклического аддукта.

Вот общая схема реакции Дильса-Альдера между ЦПД и сложным эфиром малеиновой кислоты:

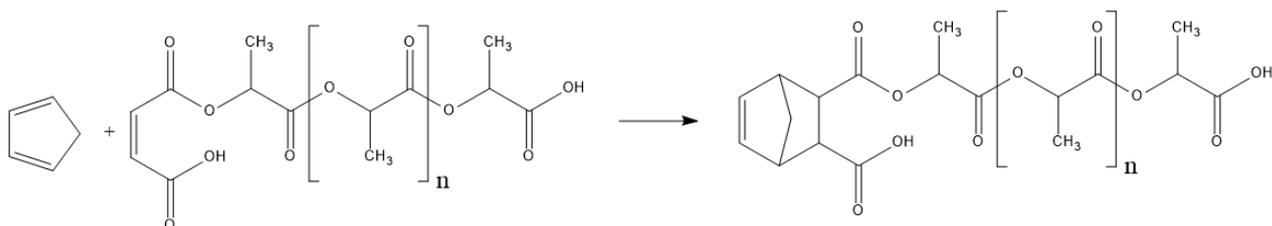


Рисунок 5 — Реакция Дильса-Альдера между ЦПД и сложным эфиром малеиновой кислоты

Реакция обычно протекает в мягких условиях, часто при комнатной температуре или слегка повышенных температурах, в присутствии кислотного катализатора Льюиса, такого как хлорид цинка ($ZnCl_2$) или хлорид алюминия ($AlCl_3$). Кислотный катализатор Льюиса помогает активировать диенофил и способствует образованию циклоаддукта [9].

Полученный аддукт Дильса-Альдера представляет собой циклическое соединение, содержащее новое шестичленное кольцо, образованное добавлением диена и диенофила. Региохимия и стереохимия продукта зависят от ориентации диена и диенофила в ходе реакции. Эндопродукт образуется, когда диенофильный заместитель располагается внутри вновь образованного кольца, в то время как экзопродукт имеет заместитель, расположенный вне кольца [10].

Реакция Дильса-Альдера между ЦПД и эфиром малеиновой кислоты была широко изучена благодаря ее синтетической полезности и образованию ценных строительных блоков для органического синтеза. Образующиеся циклоподобные продукты могут служить промежуточными продуктами для синтеза различных соединений, включая циклические соединения, натуральные продукты, фармацевтические препараты и полимеры.

1.3 Реакции метатезисной полимеризации

Метатезисная полимеризация — это универсальный и мощный синтетический метод, используемый для образования полимеров путем обмена химическими группами между мономерами. Она включает в себя использование катализаторов из переходных металлов для облегчения перестройки двойных связей, приводящей к образованию новых полимерных цепей [11].

Полимеризация методом метатезиса обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционными методами полимеризации. Во-первых, это позволяет синтезировать полимеры с четко определенной архитектурой, такие как линейные, разветвленные и блок-сополимеры. Контролируемый характер реакции позволяет точно контролировать молекулярную массу и полидисперсность, что приводит к получению полимеров с узким распределением молекулярной массы. Кроме того, использование катализаторов из переходных металлов обеспечивает превосходную переносимость функциональных групп, позволяя вводить широкий спектр мономеров с различной химической структурой.

Области применения реакций метатезисной полимеризации широки и разнообразны. Эти реакции были использованы при синтезе материалов для различных отраслей промышленности, включая покрытия, клеи, биомедицинские приложения и электронику. Способность точно контролировать структуру и свойства полимера посредством метатезисной полимеризации открывает возможности для создания специальных материалов с желаемыми

характеристиками, такими как повышенная механическая прочность, термостойкость и биосовместимость [12].

Синтез мономеров на основе ЦПД включает в себя различные стратегии, направленные на функционализацию ЦПД-кольца или модификацию боковых цепей для введения определенных химических групп и настройки свойств получаемых полимеров. Одним из распространенных подходов является дериватизация ЦПД-кольца посредством таких реакций, как циклоприсоединение Дильса-Альдера, которое позволяет включать различные функциональные группы. Кроме того, замена одного или нескольких атомов водорода в молекуле ЦПД различными химическими фрагментами позволяет синтезировать мономеры с индивидуальными свойствами. Выбор заместителей и условий реакции может быть оптимизирован для контроля реакционной способности и полимеризуемости образующихся мономеров [13].

1.3.1 Механизм метатезисной полимеризации

Механизм метатезисной полимеризации включает активацию катализатора (рисунок 6) из переходного металла, обычно из семейства катализаторов Граббса или Шрока.

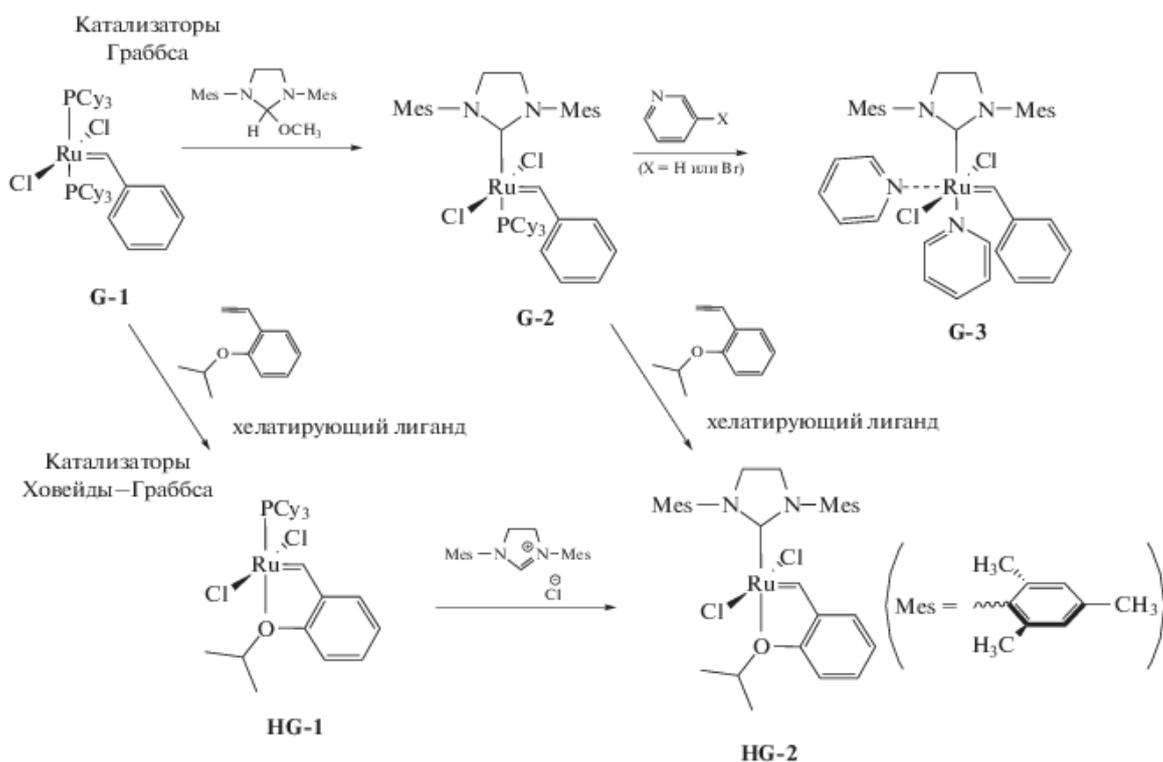


Рисунок 6 — Катализаторы Граббса и Ховейда-Граббса

Эти катализаторы содержат металлический центр, часто рутений или молибден, который может координироваться с несколькими реагентами и облегчать обмен химическими группами. Реакция полимеризации протекает в несколько ключевых этапов (рисунок 7) [13]:

1) Инициирование. Катализатор из переходного металла связывается с двойной связью мономера, образуя промежуточное соединение металл-карбен. Эта стадия активирует мономер для последующих реакций.

2) Рост цепи. Активированный мономер вступает в реакцию с другим мономером или существующей полимерной цепью, что приводит к образованию новой углерод-углеродной связи. Этот этап повторяется последовательно, что приводит к росту полимерной цепи.

3) Обрыв цепи. Процесс полимеризации может быть прекращен различными способами, включая добавление останавливающего агента или удаление активного катализатора. Этот этап обеспечивает контролируемый рост полимерной цепи и получение желаемого полимерного продукта.

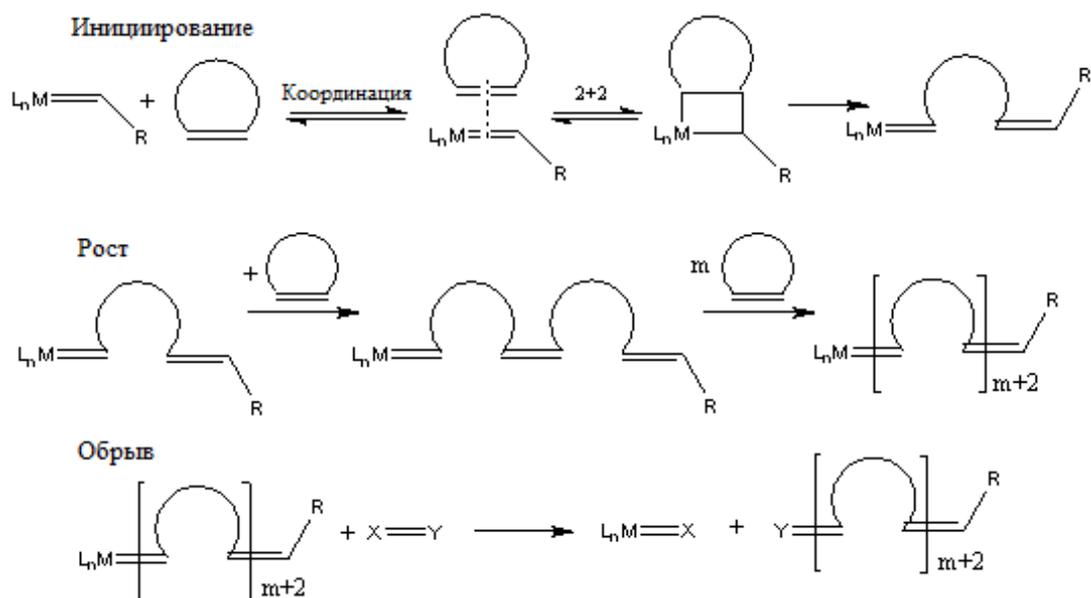


Рисунок 7 — Стадии процесса метатезисной полимеризации

Важно отметить, что механизм метатезисной полимеризации может варьироваться в зависимости от конкретной каталитической системы, мономеров и используемых условий реакции. Различные комплексы переходных металлов могут проявлять различную реакционную способность и селективность, что приводит к различиям в механизме и результирующих полимерных структурах. Кроме того, выбор мономеров и их функциональных групп может влиять на процесс полимеризации и свойства синтезируемых полимеров [14].

В целом, полимеризация методом метатезиса предлагает универсальный подход к синтезу четко определенных полимеров с контролируемой архитектурой. Способность обмениваться химическими группами между мономерами под действием катализаторов из переходных металлов позволяет производить современные материалы с индивидуальными свойствами для различных применений.

1.3.2 Стадия полимеризации полученного мономера

Сложные эфиры норборнена, которые содержат норборненовое ядро и сложноэфирные функциональные группы, подвергаются метатезисной

полимеризации посредством обмена химическими группами, облегчаемого катализаторами из переходных металлов (рисунок 8). Этот метод полимеризации позволяет получать четко определенные полимеры с высокой молекулярной массой и контролируемой структурой [14].

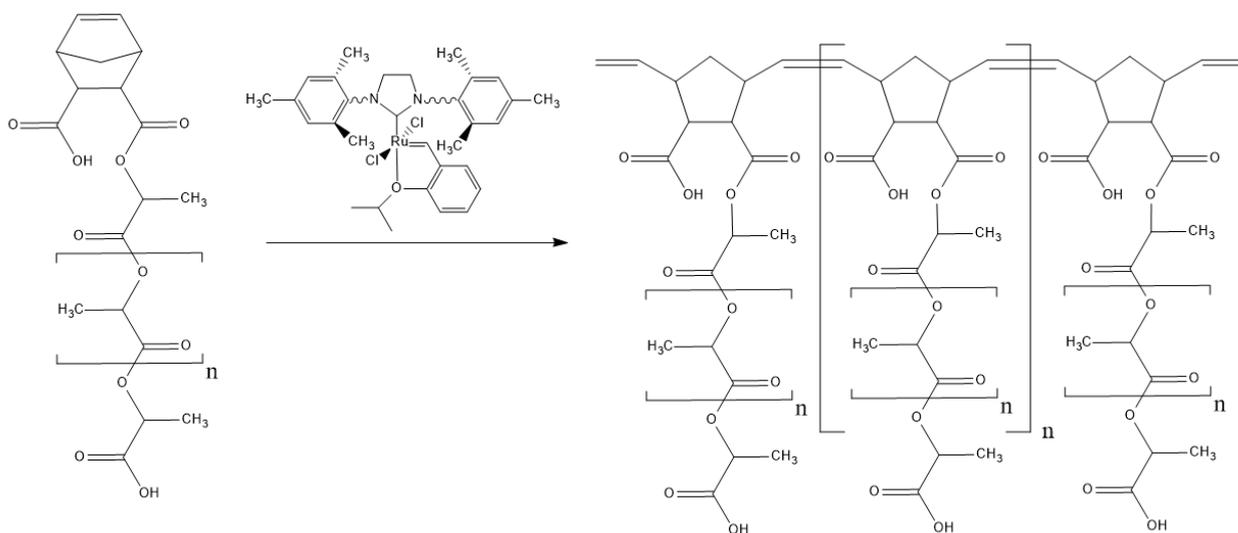


Рисунок 8 — Стадия полимеризации мономера на основе эфира дикарбоновой кислоты

Процесс полимеризации метатезиса может быть прекращен с помощью различных средств для контроля длины цепи и функциональности концевых групп.

Прекращение может происходить путем добавления прекращающего агента, такого как небольшая молекула или функционализированное соединение, которое вступает в реакцию с активными частицами, останавливая дальнейшую полимеризацию [15].

Альтернативно, прекращение может быть достигнуто путем удаления активного катализатора из реакционной системы либо посредством процессов разложения, либо дезактивации.

1.4 Характеристики исходных веществ

1.4.1 Малеиновый ангидрид

Малеиновый ангидрид является широко используемым исходным соединением для синтеза мономеров в различных реакциях полимеризации. Это циклический дикарбоновый ангидрид, состоящий из пятичленного кольца с двумя карбоксильными группами. Благодаря своей уникальной структуре и реакционной способности малеиновый ангидрид служит универсальным строительным материалом для получения разнообразных мономеров с желаемыми свойствами.

Реакционная способность малеинового ангидрида обусловлена наличием в нем высокоэлектрофильной двойной связи, которая легко подвергается реакциям присоединения с нуклеофилами. Путем селективной модификации молекулы малеинового ангидрида можно вводить различные функциональные группы, что позволяет создавать мономеры со специфическими характеристиками [16].

Одной из известных реакций с участием малеинового ангидрида является реакция Дильса-Альдера, в результате которой образуется циклоаддукт (рисунок 9).

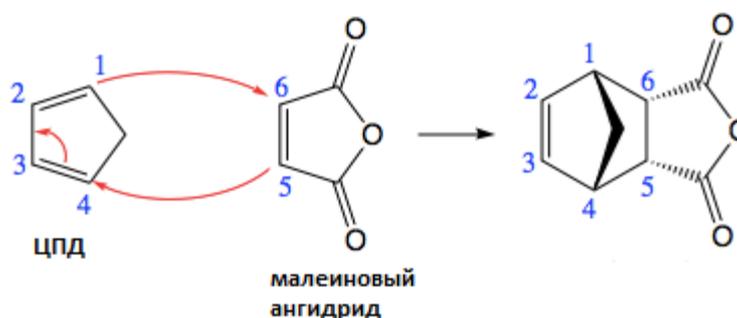


Рисунок 9 — Реакция Дильса-Альдера между малеиновым ангидридом и ЦПД

Посредством этой реакции малеиновый ангидрид может вступать в реакцию с диенами с образованием бициклических структур, включая ненасыщенность диена в мономерное звено. Полученные циклоаддукты затем могут быть дополнительно функционализированы для обеспечения дополнительной функциональности или реактивности [17].

Кроме того, малеиновый ангидрид может подвергаться реакциям этерификации со спиртами с получением сложноэфирных производных. Этот процесс включает нуклеофильную атаку спирта на ангидрид, приводящую к образованию сложноэфирной связи. Используя различные спирты, можно получить широкий спектр сложноэфирных мономеров, каждый из которых придает получаемым полимерам уникальные свойства.

Малеиновый ангидрид может подвергаться реакциям сополимеризации с другими мономерами для получения сополимеров с заданными свойствами. Такая универсальность позволяет встраивать звенья, полученные из малеинового ангидрида, в полимерную цепь, открывая возможности для улучшения таких свойств, как термостойкость, адгезия и совместимость с другими материалами [18].

Таким образом, малеиновый ангидрид служит ценным исходным соединением для синтеза мономеров. Его реакционная способность и способность подвергаться различным химическим превращениям делают его универсальным строительным материалом для разработки индивидуальных мономеров и полимеров с разнообразными свойствами. Манипулирование малеиновым ангидридом обеспечивает платформу для разработки и синтеза передовых материалов для широкого спектра применений.

1.4.2 Олигомеры молочной кислоты

Олигомеры молочной кислоты появились в качестве многообещающих исходных продуктов для синтеза мономеров. Олигомеры молочной кислоты, полученные из возобновляемых источников, таких как биомасса или процессы

ферментации, представляют собой устойчивую альтернативу производству полимеров на биологической основе. Многочисленные исследования были посвящены синтезу и использованию мономеров, полученных из олигомеров молочной кислоты. Используя химические превращения, такие как этерификация и переэтерификация, можно получить функциональные мономеры. Полученные полимеры обладают уникальными свойствами и демонстрируют устойчивость в различных областях применения. Исследования были сосредоточены на понимании влияния условий реакции, катализаторов и длины олигомерной цепи на структуру и свойства мономера. Также были исследованы кинетика и механизмы реакций полимеризации с использованием олигомеров молочной кислоты в качестве мономеров. В целом, олигомеры молочной кислоты обладают значительным потенциалом в качестве возобновляемых исходных продуктов для получения мономеров, способствуя разработке устойчивых и безвредных для окружающей среды полимеров. Будущие исследования направлены на оптимизацию методов синтеза, исследование новых структур мономеров и расширение спектра применений в химии полимеров [19].

Кроме того, использование олигомеров молочной кислоты в качестве исходных продуктов для получения мономеров дает ряд преимуществ. Во-первых, молочную кислоту получают из возобновляемых источников, таких как кукуруза или сахарный тростник, что делает ее экологически чистым вариантом по сравнению с мономерами на основе нефтехимии. Это согласуется с растущим спросом на экологически чистые материалы и снижением зависимости от ископаемого топлива.

Олигомеры молочной кислоты обладают структурной универсальностью, позволяющей создавать мономеры с определенными функциональными возможностями и свойствами. Модифицируя структуру олигомера посредством контролируемых реакций, полученные мономеры могут проявлять желаемые характеристики, такие как повышенная реакционная способность, улучшенная растворимость или улучшенные механические свойства [20].

Синтез мономеров из олигомеров молочной кислоты часто включает реакции этерификации или переэтерификации, которые являются хорошо зарекомендовавшими себя и эффективными процессами. Эти реакции могут проводиться в мягких условиях и с использованием различных катализаторов, что обеспечивает высокую степень контроля структуры мономера и свойств полимера [21].

Полученные мономеры, полученные из олигомеров молочной кислоты, могут быть дополнительно полимеризованы с помощью различных методов полимеризации, включая полимеризацию с раскрытием кольца или конденсационную полимеризацию. Такая универсальность позволяет разрабатывать широкий спектр полимеров с разнообразными применениями, таких как биоразлагаемые упаковочные материалы, биомедицинские устройства и экологически чистые покрытия [22].

В целом, использование олигомеров молочной кислоты в качестве исходных продуктов для получения мономеров представляет собой многообещающее направление в синтезе полимеров. Он сочетает в себе преимущества возобновляемого сырья, простые способы синтеза и возможность адаптировать свойства получаемых полимеров. Ожидается, что дальнейшие исследования в этой области позволят выявить новые стратегии синтеза мономеров из олигомеров молочной кислоты и расширить их применение в различных отраслях промышленности.

1.4.3 Циклопентадиен

Циклопентадиен, циклическое диеновое соединение, служит ценным исходным материалом для синтеза мономеров в различных реакциях полимеризации. Его уникальная реакционная способность и структурные характеристики делают его привлекательным строительным материалом для разработки различных полимеров. Вот некоторые ключевые аспекты, связанные

с использованием ЦПД в качестве исходного материала для синтеза мономера [23]:

1) Реакции Дильса-Альдера. ЦПД широко используется в реакциях Дильса-Альдера, универсальном синтетическом методе образования циклоприсоединений. Взаимодействуя с ЦПД и подходящими диенофилами, можно синтезировать различные мономеры. Затем эти мономеры могут быть полимеризованы с получением полимеров с желаемыми свойствами.

2) Функционализация. ЦПД может подвергаться реакциям функционализации для введения в его структуру определенных групп или функциональных свойств. Такая функционализация позволяет создавать индивидуальные мономеры с желаемыми свойствами, такими как улучшенная реакционная способность, растворимость или совместимость с другими материалами.

3) Полимеризация. Мономеры, полученные из ЦПД, могут быть полимеризованы с использованием различных методов, таких как радикальная полимеризация или координационная полимеризация. Эти методы полимеризации позволяют получать полимеры с различными молекулярными массами, структурой и свойствами.

Полимеры, синтезированные из мономеров, полученных из ЦПД, находят применение в различных областях. Например, полциклопентадиен (ПЦПД) — это терморезистивный полимер с превосходной термостойкостью и стабильностью размеров, что делает его пригодным для применения в автомобильной, аэрокосмической и электронной промышленности.

Важно отметить, что на реакционную способность и стабильность циклопентадиена может влиять его димеризация с образованием дициклопентадиена (ДЦПД) [24].

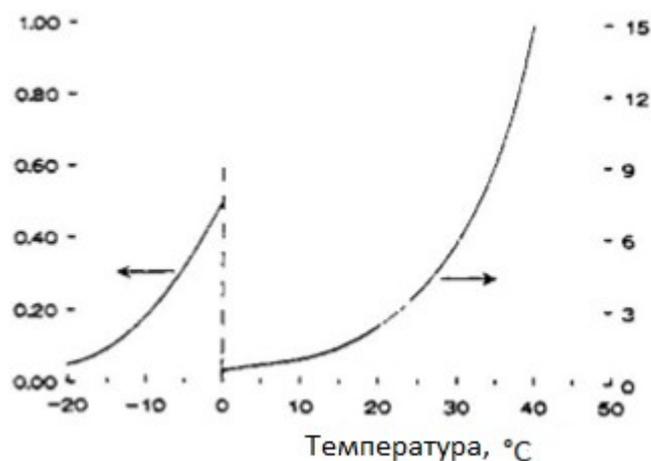


Рисунок 8 — Скорость димеризации ЦПД (моль-% / ч)

Как показано на рисунке 8, ЦПД димеризуется при комнатной температуре, скорость димеризации возрастает с повышением температуры: 2,5 моль-% / час при температуре 20 °C и 15 % при 40 °C. Эти реакции не могут быть ингибированы химическими веществами, такими как 4-тетрабутилкатехол (ТБК) и, следовательно, регулирование температуры во время хранения или транспортировки является единственным способом к уменьшению тепла реакции (75 кДж / моль ЦПД) во избежание последующей потери продукта [25].

При температуре выше 100 °C идет образование полимера, в основном, тримера, тетрамера и пентамера в результате последовательных присоединений ЦПД по реакции Дильса-Альдера через его димер [26].

Для поддержания реакционной способности ЦПД и предотвращения нежелательных побочных реакций часто используются тщательные методы обращения и очистки.

Таким образом, ЦПД предлагает универсальную платформу для синтеза мономеров, позволяющую разрабатывать полимеры с индивидуальными свойствами. Его включение в различные реакции полимеризации и стратегии функционализации открывает возможности для создания инновационных материалов для широкого спектра применений.

1.5 Области применения

Мономеры и полимеры на основе сложных эфиров дикарбоновой кислоты и олигомеров молочной кислоты имеют многообещающий потенциал в различных областях применения. Некоторые перспективные приложения включают:

1) Биомедицинские материалы. Биосовместимость и биоразлагаемость полимеров на основе сложных эфиров дикарбоновой кислоты и олигомеров молочной кислоты делают их пригодными для медицинского применения. Они могут быть использованы в тканевой инженерии, системах доставки лекарств, хирургических швах и биорезорбируемых имплантатах [27].

2) Покрытия и пленки. Мономеры и полимеры, полученные из сложных эфиров дикарбоновой кислоты, могут быть использованы в рецептурах покрытий и пленок. Они обладают превосходной адгезией, химической стойкостью и барьерными свойствами, что делает их пригодными для применения в защитных покрытиях, клеях и упаковке пищевых продуктов [28].

3) Применение в текстиле и волокнах. Мономеры и полимеры на основе дикарбоновой кислоты могут быть использованы в текстильной промышленности для получения волокон с улучшенными свойствами, такими как улучшенная окрашиваемость, управление влажностью и механическая прочность. Эти волокна находят применение в швейных изделиях, спортивной одежде и техническом текстиле [29].

4) Клеи и герметики. Полимеры, полученные из сложных эфиров дикарбоновой кислоты, обладают хорошими адгезионными свойствами, что делает их пригодными для приготовления клеев и герметиков. Они могут быть использованы в различных отраслях промышленности, включая автомобилестроение, строительство и электронику [30].

5) Системы контролируемого высвобождения. Мономеры и полимеры на основе сложных эфиров дикарбоновой кислоты и олигомеров молочной кислоты могут быть адаптированы для обеспечения контролируемого

высвобождения инкапсулированных веществ, таких как лекарственные препараты, ароматизаторы и активные ингредиенты. Эти системы находят применение в фармацевтике, средствах личной гигиены и сельскохозяйственных препаратах.

б) 3D-печать. Настраиваемые свойства полимеров на основе сложных эфиров дикарбоновой кислоты и олигомеров молочной кислоты делают их привлекательными для применения в 3D-печати. Они могут быть использованы для изготовления сложных конструкций и биомедицинских имплантатов с высокой точностью [31].

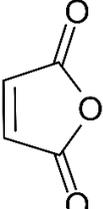
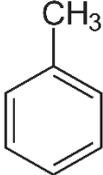
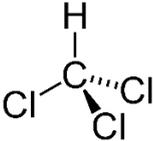
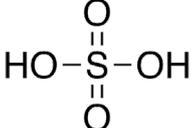
Важно отметить, что конкретные области применения и эксплуатационные характеристики этих материалов могут варьироваться в зависимости от молекулярной структуры, состава и условий обработки. Продолжаются дальнейшие исследования и разработки, направленные на изучение и оптимизацию потенциальных областей применения мономеров и полимеров на основе сложных эфиров дикарбоновой кислоты и олигомеров молочной кислоты.

2 Объект и методы исследования

2.1 Реагенты

В процессе синтеза мономеров на основе эфиров дикарбоновых кислот и полимеров на их основе были использованы следующие реагенты, представленные в таблице 1.

Таблица 1 — Исходные реагенты для синтеза

Название	Формула	CAS	Чистота	Физико-химические свойства
Малеиновый ангидрид $C_4H_2O_3$		108-31-6	ч.	$T_{кип} = 202\text{ }^{\circ}C$ $T_{пл} = 52,8\text{ }^{\circ}C$ $\rho = 0,867\text{ г/см}^3$
Толуол $C_6H_5CH_3$		108-88-3	х.ч.	$T_{кип} = 110,6\text{ }^{\circ}C$ $T_{пл} = -95\text{ }^{\circ}C$ $\rho = 0,867\text{ г/см}^3$
Хлороформ $CHCl_3$		67-66-3	х.ч.	$T_{кип} = 61,2\text{ }^{\circ}C$ $T_{пл} = -63,5\text{ }^{\circ}C$ $\rho = 1,483\text{ г/см}^3$
Циклопентадиен C_5H_6		542-92-7	х.ч.	$T_{кип} = 41\text{ }^{\circ}C$ $T_{пл} = -97\text{ }^{\circ}C$ $\rho = 1,48\text{ г/см}^3$
Серная кислота H_2SO_4		7664-93-9	ч.	$T_{кип} = 337\text{ }^{\circ}C$ $T_{пл} = 10,38\text{ }^{\circ}C$ $\rho = 1,836\text{ г/см}^3$

Молекулярную массу олигомеров молочной кислоты (ОМК) определяли на гель-проникающем хроматографе Agilent Technologies 1260 Infinity с рефрактометрическим детектором (колонка GPC/SEC – стирогель, длина 300 мм, внутренний диаметр 7,5 мм, скорость элюента – 1 мл/с, калибровка по стандартам полистирола известной молекулярной массы).

ИК спектры анализируемых соединений записывали на ИК Фурье-спектрометре «ФТ-801».

Температуру плавления измеряли на приборе BUCHI Melting Point M-560.

2.2 Методика определения молекулярной массы олигомера молочной кислоты

Молекулярную массу олигомера молочной кислоты, используемого в процессе синтеза мономера определяли через кислотное число.

Кислотное число (к. ч.) - число миллиграммов гидроксида калия, необходимое для нейтрализации свободных карбоновых кислот, которые содержатся в 1 г анализируемого вещества. Кислотное число определяют титрованием навески вещества спиртовым раствором гидроксида калия.

Навески олигомера молочной кислоты по 0,005 г, взвешенные с точностью до 0,0002 г в трех конических колбах емкостью 50 мл растворяли в 30 мл ацетона каждую и титровали 0,1 н спиртовым раствором КОН в присутствии фенолфталеина. Параллельно титровали холостую пробу (без навески анализируемого олигомера молочной кислоты). Расчет проводили по формуле:

$$K_{\text{ч}} = \frac{(a_2 - a_1) \cdot K \cdot 0,00561 \cdot 1000}{c},$$

где a_1, a_2 — объем 0,1 н раствора КОН, пошедший на титрование анализируемой и холостой проб, мл;

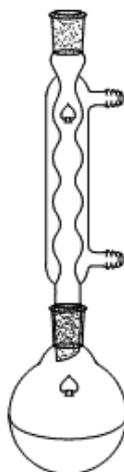
K — поправочный коэффициент 0,1 н раствора КОН;

0,00561 — титр 0,1 н раствора КОН, г/мл;

c — навеска, г.

2.3 Методика очистки малеинового ангидрида

Малеиновый ангидрид для синтеза предварительно очищали методом перекристаллизации. Для проведения перекристаллизации в колбу, снабженную обратным холодильником, помещали небольшое количество малеинового ангидрида (рисунок 9).



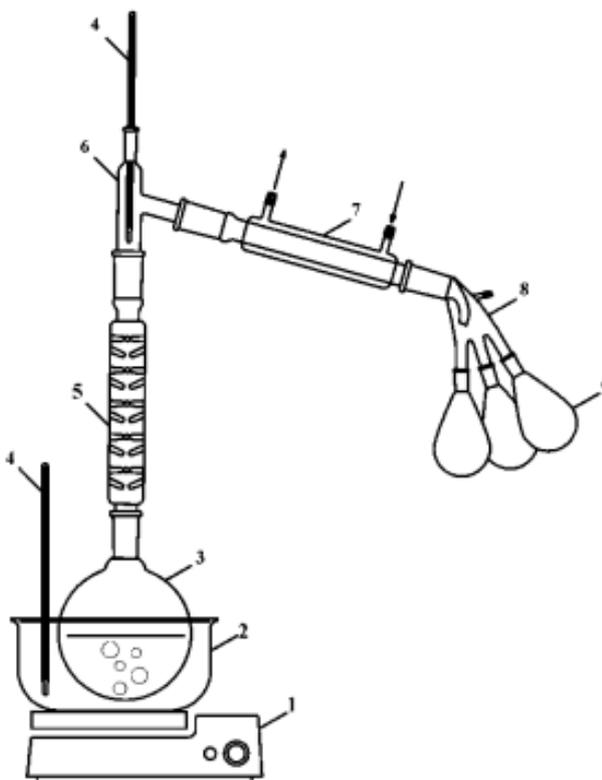
После этого в колбу вливали растворитель (толуол) в несколько меньшем объеме, чем это необходимо для полного растворения вещества, и нагревали смесь до кипения. Нагревание вели на масляной бане. Затем через обратный холодильник осторожно добавляли такое количество растворителя, которое необходимо для полного растворения всего вещества при кипячении. Для обесцвечивания раствора от окрашенных примесей к реакционной смеси добавляли активированный уголь в количестве 1-2 % от количества очищаемого вещества. Раствор кипятили в течение нескольких минут с активированным углем до обесцвечивания, а затем еще горячий раствор фильтровали от угля.

После того как все механические примеси были удалены фильтрованием, колбу с горячим прозрачным раствором поместили в холодную воду, для обеспечения образования мелких кристаллов.

Образовавшиеся в процессе охлаждения кристаллы отделяли от маточного раствора фильтрованием под вакуумом. На воронке Бюхнера полученные кристаллы дважды промывали холодным толуолом. После отсасывания полученные кристаллы сушили на фильтровальной бумаге.

2.4 Методика получения ЦПД

ЦПД получали непосредственно перед проведением эксперимента путем нагревания ДЦПД и отгонкой с дефлегматором. Установка представлена на рисунке 10.



ДЦПД медленно нагревали в колбе до температуры 150 °С. Отбор ЦПД проводили при температуре отходящих паров 41 °С. Полученный ЦПД, при

необходимости, хранили при температуре $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ для предотвращения его димеризации обратно до ДЦПД.

2.5 Методика проведения этерификации малеинового ангидрида с олигомером молочной кислоты

В круглодонную колбу загружали при перемешивании малеиновый ангидрид в количестве 0,98 г (0,01 моль), олигомер молочной кислоты в количестве 9,2 г (0,05 моль) и 150 мл толуола. В 50 мл толуола растворяли 0,93 мл серной кислоты (5 % от общей реакционной массы) и полученный раствор осторожно при перемешивании приливали в колбу. Нагревали до $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ на масляной бане и перемешивали в течение 6 часов. После завершения серную кислоту в реакционной смеси нейтрализовали 10 %-ым раствором K_2CO_3 до pH 7.

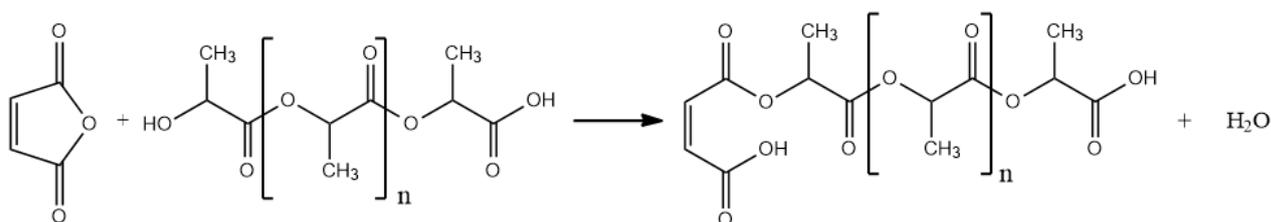


Рисунок 9 — Реакция между малеиновой кислотой и молочной кислотой

После охлаждения фильтровали раствор от осадка с использованием воронки Бюхнера и колбы Бунзена. Далее отделяли органическую фазу, содержащую продукт реакции, от воды. Отмывали органическую часть 3 раза дистиллированной водой по 30 мл. Толуол из органической фазы отгоняли под вакуумом.

2.6 Методика получения мономера на основе ЦПД и эфира малеиновой кислоты

В трехгорлую колбу с мешалкой и термометром загружали суспензию,

состоящую из 35,5 мл толуола и 2,088 г эфира малеиновой кислоты (0,007 моль). При этом температура реакционной массы поддерживалась в пределах 18–20 °С с помощью ледяной бани. Далее, при этой температуре начали постепенно прикапывали 0,37 мл ЦПД (0,007 моль) в течение 1 часа при постоянном перемешивании. Температуру поддерживали на уровне 18–20 °С с помощью ледяной бани. По окончании прикапывания температуру повышали до 65 °С и перемешивали реакционную смесь в течение 1 час.

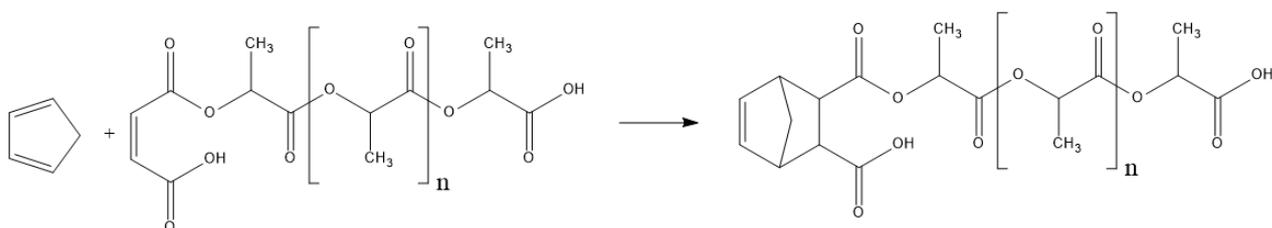


Рисунок 10 — Реакция Дильса-Альдера между циклопентадиеном и сложным эфиром малеиновой кислоты

Раствор охлаждали и отгоняли толуол с помощью вакуумного роторного испарителя. Оставшуюся реакционную массу промывали 30 мл охлажденного толуола и ещё раз отгоняли под вакуумом.

2.7 Методика полимеризации

Полимеризацию проводили на масляной бане при начальной температуре 60 °С инертной атмосфере (азот).

Определенное количество мономера (0,245 г) растворяли в толуоле (2,5 мл). После этого добавляли раствор катализатора в толуоле в такой концентрации (0,5 мл раствора 0,0013 г в 1,3 мл), чтобы конечное отношение катализатора к мономеру по массе составляло 1:500. В качестве инициатора полимеризации использовали катализатор Ховейды-Граббса второго поколения — (1,3-бис-(2,4,6-триметилфенил)-2-имидазолидинилиден)-дихлоро-(орто-N,N-диметил-аминометил-фенилметил)-рутений.

Реакционную смесь нагревали до 60 °С и выдерживали 30 минут. Затем повышали температуру до температуры кипения толуола (110 °С). Общее время полимеризации составило 3 часа.

Полученный продукт, предварительно высушенный в чашке Петри, очищали переосаждением. Растворяли полимер в 5 мл хлороформа, после чего приливали раствор при перемешивании в 10-кратный избыток гексана. Выпавший осадок отфильтровали.

4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

4.1 Предпроектный анализ

4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Для того чтобы провести анализ потребителей и выявить результаты исследования необходимо рассмотреть целевой рынок и провести его сегментирование.

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

Результатом моей научной работы является получение мономеров на основе эфиров дикарбоновых кислот и полимеров на их основе.

Эти мономеры обладают разнообразными структурными возможностями и могут быть адаптированы для достижения желаемых свойств, таких как способность к биологическому разложению, механическая прочность, термостойкость и совместимость с другими материалами. Полученные полимеры находят применение в таких областях, как упаковка, покрытия, клеи и биомедицинские материалы.

4.1.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Анализ конкурирующих разработок следует проводить систематически, поскольку рынки пребывают в постоянном движении. Такой анализ помогает вносить коррективы в научное исследование, чтобы реалистично оценить сильные

Таблица 3 — Оценочная карта для сравнения конкурентных разработок

Критерий оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б _ф	Б _{к1}	Б _{к2}	Б _ф	Б _{к1}	Б _{к2}
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Прочность	0,25	5	4	2	1,25	1,0	0,5
2. Термостойкость	0,25	4	3	3	1,0	0,75	0,75
3. Эластичность	0,20	5	3	4	1,0	0,6	0,8
4. Простота производства	0,15	3	4	5	0,45	0,6	0,75
Экономические критерии оценки ресурсоэффективности							
5. Цена	0,15	3	4	5	0,45	0,6	0,75
Итого	1	20	18	19	4,15	3,55	2,68

Конкурентоспособность данной научной разработки выше, по сравнению как с полилактидом, так и с этиловым эфиром молочной кислоты, так как данная разработка имеет более высокие технические критерии. Для того, чтобы повысить конкурентоспособность разработки необходимо стремиться к продвижению полученного материала на рынок путем рекламы.

4.2 Диаграмма Исикавы

Диаграмма причины – следствия Исикавы (Cause – and – Effect -Diagram) — это графический метод анализа и формирования причинно-следственных связей, инструментальное средство для систематического определения причин проблемы и последующего графического представления.

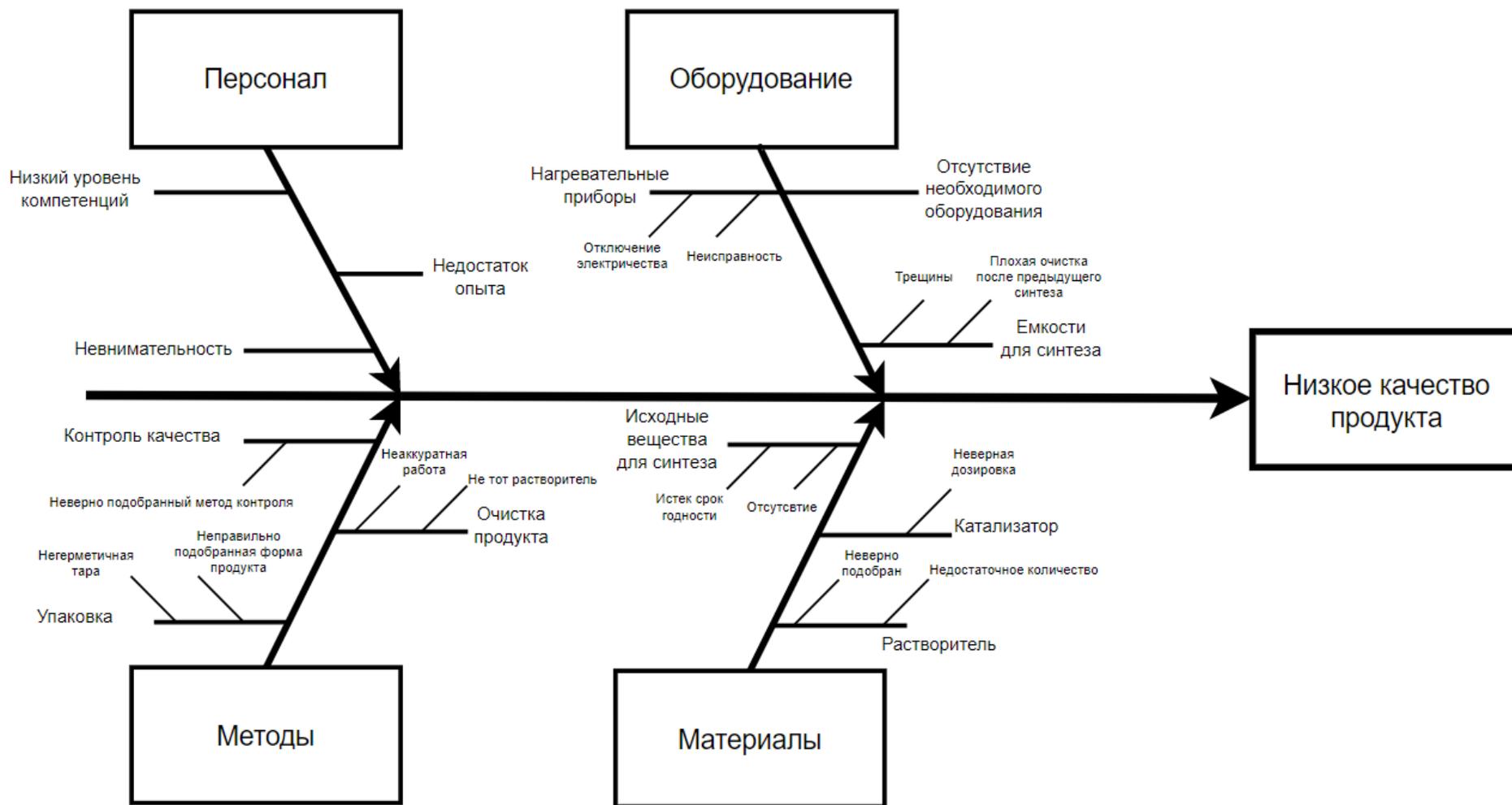


Рисунок 16 — Причинно-следственная диаграмма Исикава

4.3 Оценка готовности проекта к коммерциализации

Оценим степень готовности разработки согласно форме, представленной в таблице 4.

Таблица 4 — 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	3	2
3.	Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке	3	3
4.	Определена товарная форма научно-технического задела	4	4
5.	Определены авторы и осуществлена охрана их прав	2	2
6.	Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	1	2
7.	Проведены маркетинговые исследования рынка сбыта	3	2
8.	Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	2	2
9.	Определены пути продвижения научной разработки на рынок	1	2
10.	Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	1	2
11.	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выход на зарубежный рынок	1	1
12.	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки и льгот	1	1
13.	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	1	1
14.	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	1	2
15.	Проработан механизм реализации научного проекта	3	3
	ИТОГО БАЛЛОВ	30	33

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

$$B_{\text{сум}} = \sum B_i,$$

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

B_i — балл по i -му показателю.

Значение $B_{\text{сум}}$ позволяет говорить о мере готовности научной разработки и ее разработчика к коммерциализации. В нашем случае мы имеем показатели $B_{\text{сум}}$ со значениями 30 и 33, что соответствует среднему уровню перспективности.

4.4 Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования

На данной стадии разработки научного проекта наиболее оптимальным методом коммерциализации является *торговля патентными лицензиям*. Суть данного метода заключается в передаче третьим лицам прав использования объектов интеллектуальной собственности на лицензионной основе. При этом в патентном законодательстве выделяющие виды лицензий: исключительные (простые), исключительные, полные лицензии, сублицензии, опционы.

4.5 Цели и результаты проекта

В таблице 5 приведены лица, которые активно участвуют в проекте и интересы, которых могут быть затронуты как положительно, так и отрицательно.

Таблица 5 — Цели и результаты проекта

Цели проекта:	Получение мономера на основе эфиров дикарбоновых кислот
Ожидаемые результаты проекта:	Получение мономера для получения нового биоразлагаемого полимера, обладающего повышенными прочностными свойствами
Критерии приемки результата проекта:	Адекватность результатов
Требования к результату проекта:	Требование:
	Стандартизация готового продукта

4.6 План проекта

Диаграмма Ганта — это тип столбчатых диаграмм (гистограмм), который используется для иллюстрации календарного плана проекта, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ (таблица 6).

Таблица 6 — Календарный план-график проведения НИОКР по теме: «Синтез мономеров на основе эфиров дикарбоновых кислот и полимеров на их основе»

Код работы (из ИСР)	Вид работ	Исполнители	Т _к , кал., дн.	Продолжительность выполнения работ																																
				Сент.			Окт.			Дек.			Янв.			Фев.			Март			Апр.			Май			Июнь								
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3									
1	Проведение литературного патентного обзора	и Магистрант	45	■	■	■	■	■																												
2	Теоретический анализ	Магистрант	25					■	■	■																										
3	Постановка задачи исследования	Руководитель	7								■																									
		Магистрант										■																								
4	Экспериментальная часть	Магистрант	88										■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■								
5	Результаты обсуждения	Руководитель	10																								■									
		Магистрант																										■								
6	Оформление работы	Магистрант	17																									■	■							
7	Разработка презентации раздаточного материала	Руководитель	5																															■		
		Магистрант																																	■	

Магистрант



Руководитель



4.7 Бюджет научного исследования

При планировании бюджета научного исследования должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов планируемых расходов, необходимых для его выполнения. Расчет стоимости материальных затрат производится по действующим прейскурантам или договорным ценам.

Таблица 7 — Расчет затрат на сырье, материалы, комплектующие изделия и покупные полуфабрикаты

№ п/п	Наименование затрат	Единица измерений	Расход	Цена за единицу, руб	Сумма, руб
1	Молочная кислота	кг	1	300,00	300,00
2	Малеиновый ангидрид	кг	1	315,00	315,00
3	Дициклопентадиен	л	1	260,00	260,00
4	Хлороформ	л	1	390,00	390,00
5	Толуол	л	1	265,00	265,00
6	Бумага А4	упаковка	2	320,00	640,00
7	Ручка	шт	5	35,00	175,00
8	Тетрадь (96 листов)	шт	1	41,00	41,00
Итого					2386,00
Транспортно-заготовительные расходы (4 %)					95,44
Итого по статье					2481,44

Таблица 7 — Расчет затрат по статье «Спецоборудование для научных работ»

№ п/п	Наименование оборудования	Кол-во	Стоимость, руб.
1	Нагреватель	1	1450,00
2	Компьютер	1	35000,00
3	Колбы	3	2100,00
Итого			38550,00

Таблица 8 — Расчет энергетических затрат

Наименование оборудования	Мощность, кВт	Время работы, ч	Энергозатраты за период выполнения проекта, кВт · ч	Затраты на энергию за период выполнения проекта, руб. (2,38 руб./кВт)
Нагреватель	0,295	240	70,8	308,69
Компьютер	0,350	240	84,0	366,24
Итого				674,93

Таблица 9 — Группировка затрат по статьям

Вид работ	Сырье, материалы (за вычетом возвратных отходов), покупные изделия и полуфабрикаты, руб	Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ, руб	Энергозатраты, руб	Основная заработная плата, руб	Отчисления на социальные нужды, руб	Итого плановая себестоимость, руб
	2481,44	38550,00	674,93	138977,36	41971,16	222654,89

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением проекта, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату:

$$C_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп} ,$$

где $Z_{осн}$ – основная заработная плата; $Z_{доп}$ – дополнительная заработная плата.

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

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_{раб} ,$$

где $Z_{осн}$ – основная заработная плата одного работника; $T_{раб}$ – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. Дн.; $Z_{дн}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d}$$

Таблица 10 — Баланс рабочего времени одного исполнителя НИР за 2022-2023 учебный год

Показатели рабочего времени	Исполнитель	Руководитель
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней		
- выходные дни	44	48
- праздничные дни	14	14
Номинальный фонд рабочего времени		
Потери рабочего времени		
- отпуск	28	56
- невыходы по болезни	0	0
Эффективный фонд рабочего времени	279	247

Месячный должностной оклад работника:

$$З_{\text{м}} = З_{\text{б}} \cdot (k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) \cdot k_{\text{р}},$$

где $Z_{\text{б}}$ – базовый оклад, руб.; $k_{\text{пр}}$ – премиальный коэффициент, (определяется Положением об оплате труда); $k_{\text{д}}$ – коэффициент доплат и надбавок (в НИИ и на промышленных предприятиях – за расширение сфер обслуживания, за профессиональное мастерство, за вредные условия: определяется Положением об оплате труда); $k_{\text{р}}$ – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

$$З_{\text{м(н.рук)}} = 39\,300 \cdot 1,12 \cdot 1,3 = 57\,220,8 \text{ руб.}$$

$$З_{\text{м(исп)}} = 26\,200 \cdot 1,12 \cdot 1,3 = 38\,147,2 \text{ руб.}$$

Среднедневная заработная плата:

$$З_{\text{дн(н.рук)}} = \frac{57\,220,8 \cdot 10,4}{247} = 2\,409,3 \text{ руб.}$$

$$З_{\text{дн(исп)}} = \frac{38\,147,2 \cdot 10,4}{279} = 1\,421,9 \text{ руб.}$$

Основная заработная плата руководителя (от ТПУ) рассчитывается на основании отраслевой оплаты труда.

$$З_{\text{осн(н.рук)}} = 2113,73 \cdot 22 = 46501,62 \text{ руб.}$$

$$Z_{\text{осн(исп)}} = 469,42 \cdot 197 = 92475,74 \text{ руб.}$$

Расчёт основной заработной платы приведён в таблице 11.

Таблица 11 — Расчёт основной заработной платы

Исполнители	З _б , руб.	$k_{\text{пр}}$	$k_{\text{р}}$	З _м , руб.	З _{дн} , руб.	Т _р , раб. Дн.	З _{осн} , руб.
Руководитель	39 300	1,12	1,3	57 220,8	2 409,3	50	120 465
Магистрант	26 200	1,12	1,3	38 147,2	1 421,9	124	176 315

Рассчитываем отчисления на социальные нужды (30,2%):

Таблица 12 — Заработанная плата исполнителей НИР

	Руководитель	Магистрант
Заработная плата, руб.	120 465	176 315
Социальные отчисления, руб.	36 380,43	53 247,13
Итого	90 084,57	123 067,87

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

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

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\Phi}^p = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}} = \frac{222654,89}{222663,96} = 0,999$$

$$I_{\Phi}^{a1} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}} = \frac{222645,82}{222663,96} = 0,999$$

$$I_{\Phi}^{a2} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}} = \frac{222663,96}{222663,96} = 1$$

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.

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

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

где I_m – интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов; a_i – весовой коэффициент i -го параметра; $a_i \cdot b_i^p$ – бальная оценка i -го параметра для аналога и разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания; n – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности приведен в таблице 13 (Аналог 1 — полилактид, Аналог 2 — этиловый эфир молочной кислоты).

Таблица 13 — Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерий оценки	Вес критерия	Разработка	Аналог 1	Аналог 2
1. Прочность	0,25	5	4	2
2. Термостойкость	0,25	4	3	3
3. Эластичность	0,20	5	3	4
4. Простота производства	0,15	3	4	5
5. Цена	0,15	3	4	5
Итого	1	20	18	19

$$I_m^p = 5 \cdot 0,25 + 4 \cdot 0,25 + 5 \cdot 0,20 + 3 \cdot 0,15 + 3 \cdot 0,15 = 4,15$$

$$I_m^{a1} = 4 \cdot 0,25 + 3 \cdot 0,25 + 3 \cdot 0,20 + 4 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,15 = 3,55$$

$$I_m^{a2} = 2 \cdot 0,25 + 3 \cdot 0,25 + 4 \cdot 0,20 + 5 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,15 = 3,55$$

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

$$I_{\text{финр}}^p = \frac{I_m^p}{I_{\phi}^p}, \quad I_{\text{финр}}^a = \frac{I_m^a}{I_{\phi}^a},$$

$$I_{\phi}^p = \frac{4,15}{0,999} = 4,154, \quad I_{\phi}^{a1} = \frac{3,55}{0,999} = 3,553, \quad I_{\phi}^{a2} = \frac{3,55}{1} = 3,55$$

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

Сравнительная эффективность проекта:

$$\mathcal{E}_{\text{ср1}} = \frac{I_{\text{финр}}^p}{I_{\phi}^{a1}} = \frac{4,154}{3,553} = 1,169, \quad \mathcal{E}_{\text{ср2}} = \frac{I_{\text{финр}}^p}{I_{\phi}^{a2}} = \frac{4,154}{3,55} = 1,170$$

где $\mathcal{E}_{\text{ср}}$ – сравнительная эффективность проекта; I_m^p – интегральный показатель разработки; I_m^a – интегральный технико-экономический показатель аналога.

Таблица 14 — Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Разработка	Аналог 1	Аналог 2
1	Интегральный финансовый показатель	0,999	0,999	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности	4,15	3,55	3,55
3	Интегральный показатель эффективности	4,154	3,554	3,55
4	Сравнительная эффективность вариантов	—	1,169	1,170

Выводы по разделу

По полученным значения интегральных показателей эффективности можно сделать вывод, что существующий вариант решения поставленной в магистерской диссертации технической задачи с позиции финансовой и ресурсной эффективности является наиболее приемлемым.