

Инженерная школа энергетики  
 Направление подготовки 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника  
 Отделение электроэнергетики и электротехники

### МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
<b>Расчет срока службы изоляции гибких кабелей</b>

УДК 621.315.211

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM09	Кукушкин Алексей Сергеевич		07.06.2022

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭЭ, ИШЭ	Леонов А.П.	к.т.н., доцент		07.06.2022

Консультант

Ст. преподаватель ОЭЭ, ИШЭ	Солдатенко Т. М.	-		07.06.2022
-------------------------------	------------------	---	--	------------

### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОСГН ШБИП ТПУ	Рыжакина Т. Г.	к.э.н., доцент		07.06.2022

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
старший преподаватель	Черемискина М. С.	-		07.06.2022

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Электроизоляционные системы, высоковольтная и кабельная техника	Юшков А.Ю.	к.т.н., доцент		07.06.2022

## ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ

по основной образовательной программе подготовки магистров

13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Код компетенции	Наименование компетенции
<b>Универсальные компетенции</b>	
УК(У)-1	Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий
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
<b>Общепрофессиональные компетенции</b>	
ОПК(У)-1	Способен формулировать цели и задачи исследования, выявлять приоритеты решения задач, выбирать критерии оценки
ОПК(У)-2	Способен применять современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы
<b>Профессиональные компетенции</b>	
ПК(У)-1	Способен применять полученные знания о физико-химических свойствах и процессах в диэлектрических материалах при разработке и эксплуатации электротехнических изделий
ПК(У)-2	Способен осуществлять технологическое сопровождение и координацию работ при производстве, контроле, испытаниях и диагностике электротехнических изделий
ПК(У)-3	Способен разрабатывать новые и модифицировать существующие конструкции кабельных изделий, электроизоляционные и высоковольтные системы
ПК(У)-4	Способен осуществлять эксплуатацию и диагностику электротехнического и высоковольтного электрооборудования

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

Инженерная школа энергетики  
 Направление подготовки 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника  
 Отделение электроэнергетики и электротехники

УТВЕРЖДАЮ:  
 Руководитель ООП

\_\_\_\_\_ А.Ю. Юшков  
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

магистерской диссертации
--------------------------

Студенту:

Группа	ФИО
5АМ09	Кукушкин Алексею Сергеевичу

Тема работы:

<b>Расчет срока службы изоляции гибких кабелей</b>	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	06.04.2022 98-44/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	07.06.2022 г.
--	---------------

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<p><b>Исходные данные к работе</b></p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Объект исследования – этиленпропиленовая резина. Обзор отечественной и зарубежной литературы, техническое задание на выполнение работ.</p>
---	---

<p><b>В перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b></p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Обзор литературы</li> <li>2. Методическая часть</li> <li>3. Экспериментальная часть</li> <li>4. Раздел, выполненный на иностранном языке</li> <li>5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</li> <li>6. Социальная ответственность</li> </ol>
<p><b>Перечень графического материала</b></p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	-
<p><b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b></p> <p><i>(с указанием разделов)</i></p>	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	к.э.н., доцент Рыжакина Т. Г.
Социальная ответственность	Старший преподаватель, Черемискина М. С.
<p><b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках: Литературный обзор</b></p>	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	01.02.2022 г.
--	---------------

**Задание выдал руководитель/консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОЭЭ ИШЭ	Леонов А.П.	к.т.н., доцент		01.02.2022 г.
ст. преподаватель ОЭЭ ИШЭ	Солдатенко Т.М.	-		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM09	Кукушкин Алексей Сергеевич		01.02.2022 г.

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

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
5AM09	Кукушкин Алексей Сергеевич

<b>Школа</b>	Инженерная школа энергетики	<b>Отделение</b>	Отделение электроэнергетики и электротехники
<b>Уровень образования</b>	Магистратура	<b>Направление/специальность</b>	13.04.02 Электроэнергетика и электротехника / Электроизоляционные системы, высоковольтная и кабельная техника

<b>Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:</b>	
Расчет срока службы изоляции гибких кабелей	Работа с научной литературой, представленной в российских и иностранных научных публикациях, аналитических материалах
<b>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</b>	
1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив разработки проекта с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Проведение предпроектного анализа. Определение целевого рынка и проведение его сегментирования. Выполнение SWOT-анализа проекта
2. Планирование и формирование бюджета разработки	Определение целей и ожиданий, требований проекта. Определение бюджета научного исследования
3. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности разработки	Проведение оценки экономической эффективности, ресурсоэффективности и сравнительной эффективности различных вариантов исполнения
<b>Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):</b>	
1. Оценка конкурентоспособности технических решений 2. Матрица SWOT 3. График проведения и бюджет проекта 4. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности разработки	

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	01.02.2021
---	------------

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент	Рыжакина Татьяна Гавриловна	Кандидат экономических наук		01.02.2021

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
5AM09	Кукушкин Алексей Сергеевич		01.02.2021

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

<b>Группа</b> 5AM09		<b>ФИО</b> Кукушкин Алексей Сергеевич	
<b>Школа</b>	Инженерная школа энергетики	<b>Отделение (НОЦ)</b>	<b>Отделение электроэнергетики</b>
<b>Уровень образования</b>	магистратура	<b>Направление/специальность</b>	13.04.02 Электроэнергетика и электротехника / Электроизоляционные системы, высоковольтная и кабельная техника

Тема ВКР:

Расчет срока службы изоляции гибких кабелей	
<b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>	
<p><b>Введение</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика) и области его применения.</li> <li>– Описание рабочей зоны (рабочего места) при разработке проектного решения</li> </ul>	<p><i>Объект исследования: <u>электрические провода</u></i>  <i>Область применения: <u>предприятия промышленного назначения</u></i>  <i>Рабочая зона: <u>специальное подготовленное лабораторное помещение, где проводится выявление дефектов в электрическом проводе</u></i>  <i>Размеры помещения <u>12 x 6 x 5м</u></i>  <i>Количество и наименование оборудования рабочей зоны <u>компьютер, камера старения кабинетного типа.</u></i>  <i>Рабочие процессы, связанные с объектом исследования, осуществляющиеся в рабочей зоне <u>нагрев электрического провода для определения энергии активации полимера</u></i></p>
<b>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</b>	
<p><b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности при разработке проектного решения</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ТК РФ от 30.12.2001 N 197 ФЗ (ред. от 16.12.2019). ТК РФ Статья 212. Обязанности работодателя по обеспечению безопасных условий и охраны труда;</li> <li>- СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и безвредности для человека факторов среды обитания»;</li> <li>- ГОСТ 12.2.032-78 Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования;</li> <li>- Федеральный закон от 24.07.1998 г. № 125-ФЗ «Об обязательном социальном страховании от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний»;</li> <li>- ГОСТ 12.4.011-89. Система стандартов безопасности труда. Средства защиты работающих. Общие требования и классификация.</li> <li>- ГОСТ 22269-76. Пункт 3. Требования к размещению средств отображения информации;</li> <li>- ГОСТ 12.2.033-78. Пункт 2. Размерные характеристики рабочего места.</li> <li>- ГОСТ 12.2.003-91 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Оборудование производственное. Общие требования безопасности».</li> </ul>

<p><b>2. Производственная безопасность при разработке проектного решения:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Анализ выявленных вредных и опасных производственных факторов</li> <li>– Расчет уровня опасного или вредного производственного фактора</li> </ul>	<p><i>Опасные производственные факторы:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Поражения электрическим током, короткое замыкание, статическое электричество.</li> </ul> <p><i>Вредные производственные факторы:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- отклонение показателей микроклимата;</li> <li>- повышенный уровень шума на рабочем месте;</li> <li>- повышенный уровень электромагнитного излучения;</li> <li>- недостаточная освещенность рабочей зоны.</li> </ul> <p><i>Специальная одежда, ограничение времени пребывания в зонах с ЭМП, применение знаков безопасности (защита от воздействия электромагнитного поля); соблюдение правил безопасности при работе с электроустановками, заземление электроустановок; ограждение участков с электрооборудованием, имеющих локальный или общий нагрев поверхности (термозащита); применение заземлителей.</i></p> <p>– Расчет искусственного освещения.</p>
<p><b>3. Экологическая безопасность при разработке проектного решения</b></p>	<p><i>Воздействие на селитебную зону: <u>повышенный уровень ЭМП, шумовое загрязнение.</u></i></p> <p><i>Воздействие на литосферу: <u>загрязнение почвы отходами исследуемых образцов;</u></i></p> <p><i>Воздействие на гидросферу: <u>загрязнение грунтовых вод при сбросе отходов материалов исследования;</u></i></p> <p><i>Воздействие на атмосферу: <u>выделение газообразных вредных химических соединений при горении изоляции электрических кабелей.</u></i></p>
<p><b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях при разработке проектного решения</b></p>	<p><i>Возможные ЧС: внезапное обрушение здания, аварии на коммунальных системах жизнеобеспечения населения, химическое отравление воздуха рабочей среды вредными газами, пожар, угроза пандемии;</i></p> <p><i>Наиболее типичная ЧС - пожар.</i></p>
<p>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику   28.02.2022</p>	

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Черемискина Мария Сергеевна	-		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM09	Кукушкин Алексей Сергеевич		28.02.2022

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

Инженерная школа энергетика  
 Направление подготовки 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника  
 Уровень образования магистратура  
 Отделение электроэнергетики и электротехники  
 Период выполнения весенний семестр 2021 /2022 учебного года

Форма представления работы:

магистерская диссертация
--------------------------

### КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	07.06.2022 г.
--	---------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
01.02.2022 г.	Конструкция и область применения гибких кабелей	...
15.02.2022 г.	Полимерные материалы, применяемые в гибких кабелях	
01.03.2022 г.	Определение теплостойкости полимеров	
05.03.2022 г.	Методы испытаний на теплостойкость полимеров	
15.03.2022 г.	Принцип действия и устройство ДСК	
05.04.2022 г.	Определение энергии активации	
15.04.2022 г.	Разработка плана экспериментов	
01.05.2022 г.	Результаты экспериментов и их анализ	
10.05.2022 г.	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.	
24.05.2022 г.	Социальная ответственность, раздел на иностранном языке	
07.06.2022 г.	Сдача выполненной работы	100

#### СОСТАВИЛ:

##### Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭЭ ИШЭ	Леонов А.П.	к.т.н. , доцент		01.02.2022 г.
Ст. преподаватель ОЭЭ ИШЭ	Солдатенко Т.М.	-		01.02.2022 г.

#### СОГЛАСОВАНО:

##### Руководитель ООП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭЭ ИШЭ	Юшков А.Ю.	к.т.н., доцент		01.02.2022 г.

Оглавление	
Реферат .....	11
Введение.....	12
1. Литературный обзор .....	13
1.1. Конструкция, область применения гибких кабелей .....	13
1.2. Полимерные материалы, применяемые в гибких кабелях.....	19
1.3. Основные положения по определению теплостойкости полимеров .....	41
1.3.1. Тепловые свойства полимеров.....	41
1.3.2. Старение полимерных материалов.....	45
1.3.3. Физика-химия процесса теплового старения полимеров.....	47
1.4 Методы испытаний на теплостойкость полимерной изоляции.....	54
1.4.1. Энергия активации .....	54
1.4.2. Тепловое старение.....	54
1.4.3. Дифференциально сканирующая калориметрия (ДСК).....	57
1.4.4. Термогравиметрический анализ (ТГА).....	63
1.4.5. Динамический механический анализ (ДМА) .....	66
2. Методическая часть .....	68
2.1. Сущность метода ДСК.....	68
2.2. Оборудование и материалы .....	69
2.3. Проведение испытаний.....	70
3. Анализ результатов эксперимента .....	72
Заключение .....	77
4. Раздел «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение».....	78
5. Раздел «Социальная ответственность» .....	105

Список используемой литературы .....	117
Приложение А. Разделы, выполненные на английском языке .....	120

## Реферат

Магистерская диссертация содержит: страниц 131, рисунков 33, таблиц 42, 1 приложения.

Ключевые слова: энергия активации, изоляция, резина, полимер, материал, дифференциальная сканирующая калориметрия, испытание.

Объектом исследования является материал – этиленпропиленовая резина.

Целью работы является исследование теплостойкости этиленпропиленовой резины и рекомендации по ее применению в качестве изоляции гибких кабельных изделий.

В процессе исследования была рассчитана энергия активации этиленпропиленовой резины методом дифференциальной сканирующей калориметрии.

В результате исследования была определена энергия активации этиленпропиленовой резины, а также срок службы кабельного изделия из данной изоляции.

Область применения: электроэнергетика и электротехника.

## **Введение**

Актуальность выполняемой работы заключается в том, что с каждым годом к качеству производимой кабельной продукции предъявляются всё более высокие требования. Качественная изоляция кабельных изделий должна отличаться высокой электрической и механической прочностью, долговечностью, устойчивостью к старению и гибкостью, ведь известно, что 90% процентов отказов происходит именно из-за её повреждения. Для обеспечения данных требований необходимо использовать современные электроизоляционные материалы, с более высоким сроком службы и эксплуатационными характеристиками.

Целью работы является исследование теплостойкости этиленпропиленовой резины и рекомендации по её применению в качестве изоляции гибких кабельных изделий при повышенных значения температуры жилы.

Для определения срока службы изоляционного материала будут проведены испытания методом дифференциальной сканирующей калориметрии. По их результатам будет определена энергия активации, знание которой поможет сократить процесс теплового старения аналогичных материалов с целью сокращения времени и материальных затрат на подтверждение различных показателей надёжности. В данной работе будет рассмотрен наиболее точный метод оценки энергии активации – с определением физико-механических характеристик материала (относительного удлинения и прочности), а также определены температурный индекс и срок службы этиленпропиленовой резины при постоянном воздействии разрушающего фактора (температуры).

## 1. Литературный обзор

### 1.1 Конструкция, область применения гибких кабелей

Кабель КГ – гибкий силовой кабель (ГК) с медными токопроводящими проводниками, изоляция и оболочка кабеля изготовлены из резины, либо полимера. Данный кабель устойчив к воздействию солнечных лучей. Повышенная гибкость кабеля достигается за счет многопроволочных медных жил не менее 5 класса гибкости, а также за счет использования резиновой оболочки и изоляции. Кабели с резиновой изоляцией гибкие общего назначения изготавливаются согласно ГОСТ-13497-77.

Одними из основных требований к гибким кабелям являются – гибкость и стойкость к перегибам. При наличии гибкой изоляции, величины этих параметров зависят от конструкции токопроводящих жил и кратности скрутки изолированных жил в кабель. Для увеличения гибкости и стойкости к перегибам токопроводящие жилы гибких кабелей скручиваются в одну сторону (основные жилы – в левую, вспомогательные – в правую).

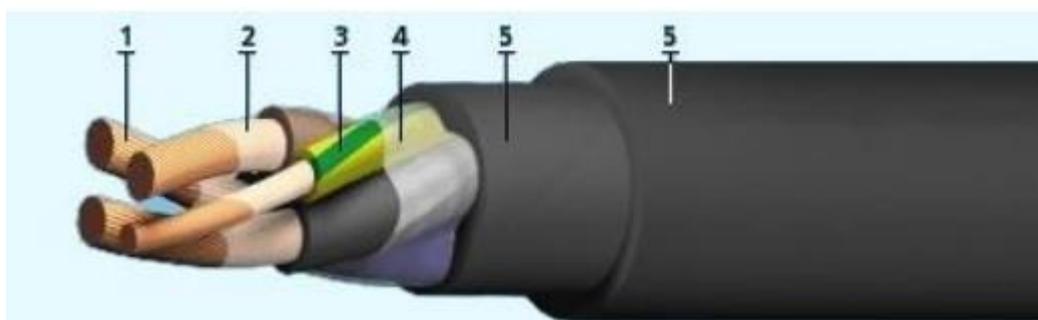


Рисунок 1 – Конструктивные элементы гибкого кабеля

Конструкция силового кабеля ГК состоит из следующих элементов:

1. Токопроводящая жила класс гибкости не менее 5;
2. Обмотка;
3. Изоляция;
4. Обмотка;
5. Наружная оболочка

В изготовлении силовых кабелей первое место среди материалов занимает электротехническая медь, которую получают в процессе электролитического

рафинирования. Данный процесс недешев, однако именно он дает наиболее качественный проводник. Из шести классов токопроводящих жил, на которые согласно ГОСТ 22483-2012 подразделяется данная продукция, лишь медь подходит для применения в изделиях всех классов, в том числе в кабелях повышенной гибкости. Для изготовления гибких кабелей используется также луженая медь. Такая проволока отличается еще большей защищенностью от любых внешних воздействий, чем обычная проволока из меди. В качестве материала для лужения используется чистое олово или оловянно-свинцовый сплав, так как именно олово предохраняет проволоку от различных коррозионных процессов, придавая ей при этом дополнительную прочность на разрыв и исключая возможность слома проволоки при ее перегибе. Производители выпускают две разновидности луженой проволоки: мягкая луженая и твердая луженая. Основное отличие этих типов проволоки друг от друга состоит в их способности к изгибам – мягкая проволока легче перегибается, чем твердый образец аналогичного диаметра [1].

Следующим конструктивным элементом является обмотка из полиэтилентерефталатной пленки (ПЭТ-Э) – позиция 2 и 4. Полиэтилентерефталат является сложным термопластичным полиэфиром терефталевой кислоты и этиленгликоля. По физическим параметрам представляет собой твердое вещество белого цвета, не обладающее запахом. Пленка ПЭТ-Э выпускается в соответствии с требованиями ГОСТ 24234-80 путем моментального охлаждения расплавленного пластика от +2600°С до +730°С и растягивания его до необходимой толщины. Благодаря этому материал становится абсолютно прозрачным. Для производства кабеля, пленка реализуется в рулонах и имеет различные размеры: шириной от 0,6 до 150 см, толщиной от 8 до 250 мкм. Основными характеристиками такой пленки являются: эластичность и высокая степень растяжения, благодаря чему пленка плотно стягивает провода и кабеля, предотвращая их от повреждения при изгибании во время монтажных работ; высокие диэлектрические свойства, что является дополнительной защитой в качестве электроизоляции; термостойкость,

благодаря чему поверх пленки можно наносить другие синтетические материалы путем горячего расплава; высокая прочность и устойчивость к внешним химическим воздействиям и физическим свойствам, что предохраняет кабеля от влаги, окисления и механических повреждений; также обладает легкостью и не утяжеляет обмотки кабелей [1].

Поверх пленки накладывается изоляция. Толщина резиновой, полиэтиленовой, поливинилхлоридной или полимерной изоляции, накладываемой сверху на токопроводящие жилы, определяется соответствующими государственными стандартами (ГОСТ 23286-78). Изолирующий слой может быть представлен следующими материалами:

- Поливинилхлоридный пластикат (ПВХ). Самый распространенный вид изоляции, который при комнатной температуре ( $+20^{\circ}\text{C}$ ) обладает высокими сопротивлением. Недостатками ПВХ пластиката является недостаточно хорошая гибкость, если сравнивать с резиной и тот факт, что при температуре  $+70^{\circ}\text{C}$  и выше значительно снижается сопротивление изоляции провода. Достоинства поливинилхлоридного пластиката: невысокая цена, хорошая устойчивость к множеству химических реагентов, влаги, а также низкий уровень горючести.

- Сшитый полиэтилен (СПЭ). Используется для изготовления высоковольтной кабельной продукции, прокладываемой подземным способом. Конструкция кабелей из сшитого полиэтилена обладает хорошей гибкостью, низкой гигроскопичностью (поглощение влаги) и возможностью нагрева до  $+130^{\circ}\text{C}$ . Недостатки СПЭ-кабелей — сложность изготовления, необходимость использования зарубежного оборудования, из-за чего стоимость изделия значительно выше аналогов.

- Полиэтилен. Может быть низкой плотности (ПЭНП) и высокой (ПЭВП). Достоинства: диэлектрические свойства в 300 раз выше нежели у ПВХ изоляции, низкая гигроскопичность, устойчивость к химическим реагентам. Однако минусами полиэтилена являются снижение диэлектрических свойств провода при повышении температуры, слабая гибкость и в то же время высокая стоимость. Конструкция кабелей с изоляцией из полиэтилена хорошо себя

зарекомендовала для прокладки стационарной проводки на промышленных объектах.

- Электроизоляционная резина. Благодаря своей гибкости чаще всего используется для подключения передвижных механизмов и оборудования. Гибкая, дешевая, обладает высокими диэлектрическими свойствами. Однако теряет свои электроизоляционные характеристики при температуре выше  $+80^{\circ}\text{C}$ , подвержена повреждению от ультрафиолетового излучения и что самое опасное — не устойчива к горению.

- Политетрафторэтилен (ПТФЭ). Фторопласт отличается очень высокой химической, коррозионной стойкостью, а также обладает отличной атмосферостойкостью, теплостойкостью и морозостойкостью ( $-160 \div 260^{\circ}\text{C}$ ). Фторопласт негорюч или самозатухает при возгорании. Такой полимер имеет низкий коэффициент трения, очень низкое водопоглощение и газопроницаемость, хорошие диэлектрические характеристики и высокую электрическую прочность, надежно противостоит ферментам и микробам. Также ПТФЭ плохо растворимы или вообще нерастворимы во многих органических растворителях. Минусы такого типа защиты — высокая стоимость и токсичность [3].

Для изготовления наружной оболочки гибких кабелей используется специальная шланговая резина, поливинилхлоридный пластикат, полимерные композиции, полиуретан или полиэтилен. Изолирующие материалы, используемые при производстве кабеля, подбираются в зависимости от условий его эксплуатации и должны соответствовать требованиям ГОСТ 31565-2012.

Шахтные кабели (гибкие) эксплуатируются в достаточно тяжелых условиях и постоянно подвергаются различным динамическим нагрузкам: ударным и циклическим. ТПЖ таких кабелей выполняется из меди, имеет круглую форму и 5 класс по ГОСТ. Изоляция выполняется из трех типов резин: для нормальной эксплуатации (напряжение рабочее до 3кВ включительно), влагостойкой (подбирается тип каучука, его содержание, тип наполнителя), высоковольтной (свыше 3кВ, предъявляются особые требования к

озоностойкости, влагостойкости, теплостойкости и электрической прочности). Экран из электропроводящих резин (с металлическим порошком, тех. углеродом или графитом), либо металлический (оплетка). Резины для оболочек – шланговые (могут быть двуслойные) [2].

Кабели для питания передвижных механизмов для питания экскаваторов и других специализированных землеройных электрических машин имеют схожую конструкцию с шахтными. Отличие заключается лишь в наличии дополнительного экрана по жиле (т.к. напряжение рабочее таких кабелей 6, 10, а в некоторых странах уже и 35кВ), который служит для выравнивания электрического поля на поверхности жилы. В качестве изоляции наиболее перспективным материалом является резина на основе этиленпропиленового каучука, так как он является одним из самых универсальных и перспективных типов синтетических каучуков в мире на данный момент. Его сопротивление высоким температурам, окислению, действию озона и погодному старению, обеспечивает перспективное использование в кабельной промышленности.

Кабели для нефтегазовой промышленности могут иметь изоляцию из полиэтилена, вулканизированного полиэтилена, термоэластопластов, эмали (только как дополнительную), фторполимеров, полипропилена и др. при использовании резиновой изоляции поверх накладываются бандажи в обязательном порядке. Кабели данного типа работают в специфических условиях эксплуатации и подвергаются перепадам температуры до 130°C, рабочему гидростатическому давлению, газовому фактору и др., поэтому особое внимание уделяется наиболее уязвимым элементам кабеля, таким как изоляция и оболочка, а также методам их защиты от воздействия окружающей среды (использование броневых покровов). Для защиты оболочки, выполненной из того же самого материала, что и изоляция, либо материала, стойкого к действию скважинной жидкости, от повреждений броневыми покровами применяется специальное заполнение – подушка под броню, выполненная, в основном, из лент нетканого или термопластичного полотна, либо выполненной методом экструзии, что встречается редко. Броня, выполненная из стальных

оцинкованных лент, либо из лент коррозионностойкой стали, имеет определенный профиль, например, для плоских кабелей – с противозадирными ребрами (в замок).

К судовым кабелям и проводам предъявляется ряд специфических требований, обусловленных особенностями прокладки и эксплуатации: повышенная гибкость (это важно при прокладке в ограниченных по размеру помещениях), электрическая прочность изолирующих оболочек, негорючесть, стойкость к воздействию воды, масла и др. ТПЖ – медная отоженная многопроволочная, заключена в изолирующую оболочку из резины, поливинилхлоридного пластика и полиэтилена, стекловолокна и др. Наружные защитные оболочки таких кабелей изготавливают из маслобензостойкой, не распространяющей горения резины (широко используется этиленпропиленовая резина), шлангового поливинилхлоридного пластика и др. Поверх изолирующей оболочки кабеля и провода могут иметь металлические оболочки различного назначения [19].

Нагревательные провода и кабели имеют очень широкое разнообразие. Основными типами являются – резистивные, саморегулирующиеся, зональные и скин-кабели. Каждый из данных видов имеет свою структуру и принцип действия, например, нагревательным элементом в саморегулирующихся кабелях является тепловыделяющая саморегулирующаяся пластиковая матрица, а в зональным – спирально наложенная проволока. Высокотемпературные кабели имеют изоляцию из стеклонитей, пропитанный кремнийорганическим композитом или кварцевых нитей, оболочку из стеклонитей или кварцевых нитей.

В качестве подводных кабелей в настоящее время широко используются оптические кабели связи, которые имеют значительно большую пропускную способность и расстояние между встроенными регенераторами, нежели коаксиальные кабели с полиэтиленовой изоляцией.

Кабели и провода для геофизических работ непрерывно эксплуатируются в скважине в течение 30-40 часов. Для кабелей наиболее опасны кислоты,

сероводород, высокие концентрации CO<sub>2</sub>, а также различные механические нагрузки. ТПЖ может быть стальной, сталемедной, медной, или из сплава ХОТ (в состав входят кремний, медь, олово, титан). Материалы изоляции: полиэтилен низкого давления, сополимеры этилена с пропиленом (на температуры до 130°C), а также фторопласты (до 250°C). Броня – только круглые проволоки. Подушка под броню выполняется в виде обмотки лентами нетканого полотна или экструдированной пластмассовой оболочки.

Кабели и провода для космической и авиационной техники имеют очень высокие требования по массе, негорючести, стойкости к вакууму, вибрациям, излучениям и др. Для повышения нагревостойкости изоляции используются такие материалы, как: теплостойкие резины и фторопласты. ТПЖ упрочненные и имеют защитные покровы в виде посеребрения или лужения.

Специальные кабели для использования в различных областях науки имеют специфические конструкции, в которых возможно использование современные электроизоляционных материалов, позволяющих увеличить срок службы кабельных изделий (например, изоляция из теплостойких резин с повышенной гибкостью – ЭПР).

## **1.2 Полимерные материалы, применяемые в гибких кабелях**

Полимеры — это высокомолекулярные соединения, состоящие из длинных молекул, образованных многократным повторением мономерных звеньев. Одна из основных характеристик полимера — молекулярная масса (М). Полимерная макромолекула состоит из мономерных звеньев, насчитывающих тысячи единиц, которые определяются степенью полимеризации. Полимеры, для которых макромолекулы состоят из нескольких типов элементарных звеньев, называются сополимерами. Разновидностью сополимеров являются блок-сополимеры. Строение полимеров определяет их особые свойства. По механическим свойствам это промежуточные структуры между твердыми телами и жидкостям, поскольку они обладают и твердостью, и высокой эластичностью. Это очень большая группа материалов — хлопок, кожа, шерсть, растения, пластмассы и др.

Вся эта группа материалов объединяется под названием полимеры. Для полимеров характерно наличие цепных молекул с резко различными связями вдоль и поперек цепи (химические и межмолекулярные связи). Аномальные свойства полимеров определяются наличием линейных цепных молекул с относительно слабыми межмолекулярными взаимодействиями — в этом определении полимера [6]. Особые свойства полимеров:

- эластичность – обратимая деформация, наряду с высокой прочностью;
- высокая набухаемость в жидкостях, образование промежуточных между твердыми телами и жидкостями систем: гели, золи и т.д.;
- способность образовывать волокна и пленки – проявление высокой анизотропии свойств.

Гибкость макромолекул основная причина особых свойств полимера. Именно она определяет возможность существования различных конформаций. Полимеры состоят из больших линейных и разветвленных молекул, которые в ряде случаев объединяются в одну гигантскую молекулу путем сшивки макромолекул. Утрата цепного строения молекул — образование глобул и сшивок приводит к утрате особых свойств полимеров [8].

### **Понятие надмолекулярной структуры полимеров**

Надмолекулярная структура полимеров — это способы упаковки макромолекул в результате действия межмолекулярных сил. Различают два вида фазового состояния полимеров: аморфное и кристаллическое. Аморфное фазовое состояние характеризуется только ближним порядком, т.е. такой порядок, который соблюдается на соизмеримых с размерами молекул расстояниях, а на расстоянии больше размеров молекул этот порядок отсутствует. Кристаллическое фазовое состояние характеризуется дальним трехмерным порядком - расположение молекул в пространстве на расстояниях, немного превышающих размеры молекул.

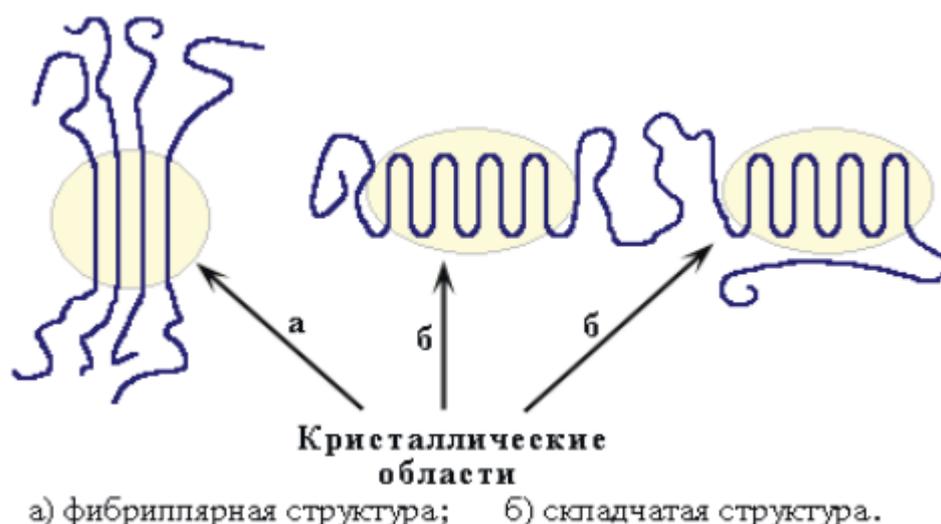


Рисунок 2 – Структура полимеров

Это состояние отличается анизотропией свойств скачками свойств на границе раздела фаз. В кристаллических полимерах практически всегда имеется доля аморфной фазы, часто встречаются дефекты, дислокации. Кроме аморфного и кристаллического, известно промежуточное жидкокристаллическое состояние полимеров. Оно отличается постоянной устойчивой анизотропией некоторых физических свойств [7].

Основными полимерными материалами, применяемыми для изготовления гибких кабелей являются:

- Поливинилхлорид (ПВХ)
- Сшитый полиэтилен
- Политетрафторэтилен
- Термоэластопласты
- Этиленпропиленовая резина

### **Поливинилхлорид (ПВХ)**

Поливинилхлоридный пластикат, применяемый в кабельной промышленности, представляет собой смесь поливинилхлоридной смолы (поливинилхлорида), получаемой полимеризацией хлористого винила ( $CH_2 = CHCl$ ), с пластификаторами, стабилизаторами, наполнителями и другими компонентами. В кабельной технике используют ПВХ, молекулярная масса которого 60000-100000. Отсутствие двойных связей и наличие атомов хлора

делает ПВХ стойким к кислотам и щелочам, озоностойким и негорючим материалом. При добавлении к поливинилхлоридной смоле пластификаторов, стабилизаторов и других компонентов повышаются ее механические и технологические свойства, но снижается диэлектрика.

Поливинилхлоридные пластикаты, применяемые в кабельной промышленности, по своим свойствам и предъявляемым к ним требованиям можно разделить на три основные группы:

- изоляционные, обладающие высокими электрическими характеристиками в диапазоне рабочих температур;
- шланговые, защищающие основные конструктивные элементы кабеля от воздействия внешней среды;
- полупроводящие, занимающие по своим электрическим характеристикам промежуточное место между диэлектриком и проводником.

Физико-механические характеристики ПВХ-пластикатов в основном определяются процентным содержанием в рецептуре пластификаторов. В частности, максимальное относительное удлинение при растяжении получают при содержании 45-70 мас. ч. пластификатора. Количество и рецептура пластификатора также существенно влияют на удельное объемное электрическое сопротивление ( $\rho_v$ ) ПВХ-пластиката. С увеличением процентного содержания пластификатора  $\rho_v$  пластиката уменьшается, т.к. ПВХ имеет  $\rho_v = 10^{15} - 10^{17}$  Ом·см, у пластификатора  $\rho_v = 10^{12} - 10^{14}$  Ом·см. Поэтому в изоляционных рецептурах количество пластификатора не должно быть более 40-45 % [8].

Из-за низкой термостабильности и трудности переработки смолы ПВХ в чистом виде не перерабатывается. ПВХ-пластикат представляет собой смесь ПВХ смолы  $[-CH_2 - CHCl-]_2$ , с низкомолекулярными компонентами, улучшающими технологические и эксплуатационные свойства материала. В кабельных композициях используют ПВХ суспензионной полимеризации: малоразветвленный полимер с узким ММР,  $M = 60000 \dots 10000$ . Добавление низкомолекулярных компонентов улучшает физико-механические и

технологические, но снижают диэлектрические свойства ПВХ-пластиката. Кроме смолы ПВХ основными компонентами рецептур кабельных пластикатов являются: пластификаторы, стабилизаторы и наполнители, к которым часто относят и антипирены.

Таблица 1 – Содержание ингредиентов в ПВХ-пластикате

Суспензионный ПВХ с числом К = 70, вес.ч.	100
Пластификатор (ДОФ), вес.ч.	50
Карбонат кальция, вес.ч.	65
Свинцовый стабилизатор (включая смазку), вес.ч.	3,5
Стабилизатор Ca/Zn (включая смазку), вес.ч.	3,0-3,5

Для нужд кабельной промышленности производятся ПВХ пластикаты для изоляции, полупроводящих экранов и для кабельных оболочек, которые отличаются составом. Первая или первые две буквы в марке кабельного ПВХ пластиката обозначают его тип, две первые цифры указывают на морозостойкость (в °С), а две последующие (для изоляционного пластиката) — порядок величины удельного объемного электрического сопротивления при температуре 20 °С. В условном обозначении пластиката указывают также цвет, рецептуру и сорт.

По своим физическим свойствам ПВХ выглядит как физиологически безвредный материал белого цвета с молекулярной массой  $(40 - 200) \cdot 10^3$  и плотностью 1,35 - 1,46 г/см<sup>3</sup>. Химическая формула поливинилхлорида:

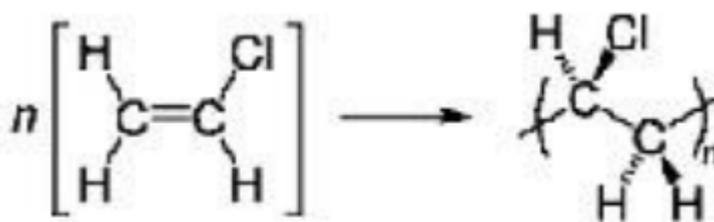


Рисунок 3 – Химическая формула ПВХ

Полимер устойчив к окислению и воздействию влаги, кислот, щелочей, растворов солей, жиров, спиртов и промышленных газов. Однако ПВХ обладает

низкой термостабильностью. Хлористый водород может начать выделяться уже при температуре 70-80°C, а при 150-180°C скорость процесса резко возрастает, происходит быстрое разложение полимера с выделением углекислого газа и хлористого водорода.

Таблица 2 – Основные физико-химические свойства ПВХ

Свойства	Значение
Молекулярная масса	40000 - 145000
Температура самовоспламенения, °С	1100
Температура воспламенения, °С	500
Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,33 – 1,34
Температура разложения, °С	100 – 140
Температура стеклования, °С	70 – 80

Достоинства поливинилхлорида:

- Атмосферостойкость (поливинилхлорид является самым распространенным полимером для изготовления покрытий, потому как устойчив к агрессивным факторам внешней среды).
- Универсальность (ПВХ может быть пластифицированным или непластифицированным).
- Огнезащищенность (поливинилхлорид трудновоспламеняем, за счет присутствия хлора в его молекуле).
- Гигиеничность (поливинилхлорид – популярный полимер для медицинского назначения).
- Энергоэффективность (при утилизации поливинилхлорида выделяется огромное количество тепла, т.е. он обладает хорошей теплотворной способностью).
- Экологичность (ПВХ составляет всего лишь 42% составляющих от нефти, невозобновляемого природного ресурса).
- Возможность утилизации (ПВХ более, чем многие другие полимеры, пригоден для вторичной переработки).

– Экономичность (ПВХ - самый дешевый из крупнотоннажных полимеров, который обеспечивает лучшее соотношение цены-качества).

Поливинилхлорид имеет широчайшее применение. Помимо кабельной промышленности его используют в медицине, строительстве, транспортной промышленности, бытовых потребительских товарах. Стойкость ПВХ к щелочам и кислотам, объясняется отсутствием двойных связей и наличием атомов хлора.

Недостатками поливинилхлорида являются:

- Малая ударная прочность.
- Небольшая морозостойкость и низкий, температурный порог применения (не выше 80°C).

Переработать поливинилхлорид невозможно в чистом виде.

Физико-механические свойства в основном определяются содержанием пластификаторов, которые при комнатной температуре представляют собой вязкие маслянистые жидкости. Пластификаторы повышают эластичность и пластичность полимерной композиции при переработке и эксплуатации. Они классифицируются по химической природе и степени совместимости с полимером.

Наиболее распространенные пластификаторы – сложные эфиры фталевой кислоты (фталаты), дикарбоновых кислот, фосфорной кислоты (фосфаты) и низкомолекулярные полиэфиры. Общие требования к пластификаторам: термодинамическая совместимость с полимером, низкая летучесть, отсутствие запаха, химическая инертность, устойчивость к экстракции из полимера жидкими средами.

Пластифицирующее действие основано на том, что молекулы пластификатора, которые по размеру на несколько порядков меньше макромолекул полимера, при введении в полимер образуют межмолекулярные связи с сегментами макромолекул и, тем самым, ослабляют межмолекулярные взаимодействия полимерных молекул друг с другом. В результате понижается температура стеклования, и полимер приобретает большую пластичность.

Например, для кабельных ПВХ-пластиков. максимальное относительное удлинение  $\varepsilon$  получают при введении 45—75 мас.ч. пластификатора. Так как наличие пластификатора снижает удельное объемное электрическое сопротивление  $\rho_v$  ПВХ-пластиката, то в изоляционных рецептурах его количество не должно превышать 40 – 45 мас.ч. При нормальных условиях характерные значения относительного удлинения и прочности при разрыве для кабельных ПВХ-пластиков порядка 400 – 600% и 15 – 25 Н/м<sup>2</sup> соответственно [7].

Таблица 3 – Электроизоляционные свойства ПВХ

Материал	Уд. объемное электрическое сопротивление, Ом·см	Электрическая прочность, кВ/мм	Тангенс угла диэлектрических потерь при 1КГц	Диэлектрическая проницаемость
ПВХ	$10^{11} - 10^{14}$	14 – 20	$(50 - 90) \cdot 10^{-3}$	3 – 10

### **Сшитый полиэтилен**

Сшитый полиэтилен – это полимер углеводорода этилена, модифицированный на молекулярном уровне до выстраивания абсолютно новой структуры. Полученная в процессе «сшивки» система межмолекулярных связей СПЭ выглядит, как трехмерная ячеистая сетка, похожая на кристаллическую решетку твердых веществ. Такое изменение дает особую прочность на разрыв и повышение всех остальных характеристик полиэтилена. В сравнении как с маслonaполненной, так и ПВХ-изоляцией сшитый полиэтилен дает гораздо более высокие прочностные и диэлектрические характеристики.

При сшивке в молекулярных цепочках, содержащих атомы углерода и водорода, под воздействием определенных факторов у звеньев молекул полиэтилена отрываются отдельные атомы водорода. Процесс сшивки дает дополнительные боковые связи, создающие межмолекулярную сетку – особенно прочную структуру, напоминающую кристаллическую решетку твердых веществ. Сшитый полиэтилен по техническим характеристикам не уступает многим твердым веществам, а некоторые из них даже превосходят по стойкости

к различным разрушителям и длительности срока эксплуатации [7].

При пероксидным методом сшивки образование поперечных связей происходит за счет возникновения активных радикалов под воздействием перекиси. Пероксиды относятся к особо опасным веществам.

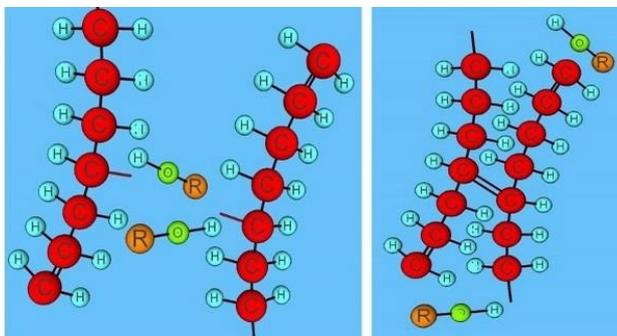


Рисунок 4 – Сшитый полиэтилен пероксидным методом

Самое главное в этом процессе – обеспечить нужный тепловой профиль, чтобы предотвратить чрезмерно раннюю сшивку в стволе экструдера, дабы, в свою очередь, предотвратить большие потери давления. В таких случаях рекомендуется применять специальные шнеки. Благодаря этому гарантируется случайное распределение «стежков» сшивки по объему расплава. Следствием является также низкая плотность отвердевшего материала. Здесь принципиально важен температурный контроль.

Достоинствами пероксидного метода сшивки являются:

- более надежные достижения равномерности сшивки;
- значительно более высокая гибкость, по сравнению с другими методами;
- наиболее дешевое и просто технологическое оборудование;
- не имеет токсических выделений

Недостатки:

- низкая производительность и как следует – высокая цена;
- сложный ручной процесс обработки формирующего инструмента;
- низкая скорость производства.

Силановый метод сшивки является химическим способом сшивки полиэтилена при помощи органосиланидов. Последние в свою очередь,

представляют соединения кремния с органическими радикалами. Силаниды являются ядовитыми веществами.

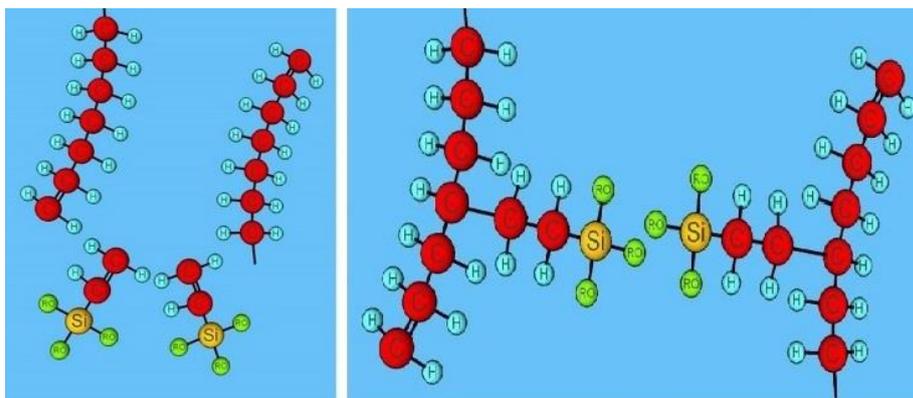


Рисунок 5 – Сшитый полиэтилен силановым методом

Изделия, полученные по данному методу, выдерживают до 110°C. Максимальная доля сшивки определяется количеством органосиланидов и временем выдержки в паровой бане.

Достоинствами силанового метода сшивки являются:

- высокая скорость изготовления труб на этапе экструзии;
- достаточно высокая степень сшивки – не менее 65%;
- стандартные технологические трубные линии, используемые на производстве.

Недостатки:

- более высокая стоимость сырья, чем у пероксидного метода;
- необходимость дополнительного производственного этапа – сшивания труб под воздействием повышенных температур и влаги;
- самая низкая гибкость трубы (высокая плотность) – обратная сторона высоких физико-механических характеристик.

При радиационном методе сшивки под воздействием ускоренных электронов и вторичного гамма-излучения происходит разрыв химических связей, образование свободных радикалов, которые рекомбинируют, создавая поперечные связи между макромолекулами. Облучение электронами полиэтилена при умеренной температуре, не требует добавки каких-либо веществ. На практике труба много раз проходит через линейный ускоритель. Чем

больше доза, тем больше доля сшивки. Получающиеся структуры сшитого полиэтилена и термомеханические свойства отличаются друг от друга при разных методах.

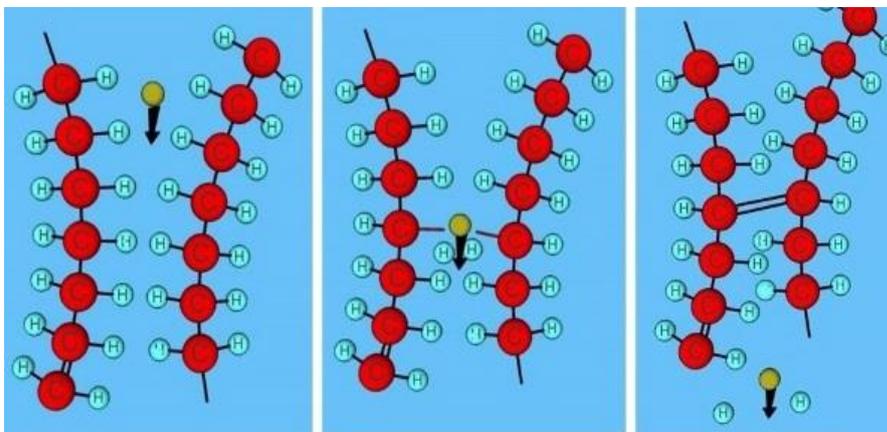


Рисунок 6 – Сшитый полиэтилен радиационным методом

Достоинствами радиационного метода сшивки являются:

- высокая производительность первого этапа производства;
- стандартные технологические трубные линии, используемые на производстве;
- невысокая стоимость сырья при процессе без использования сенсibiliзирующих добавок.

Недостатки:

- низкая степень сшивки около 55-60%;
- необходимость дополнительного капиталоемкого и ответственного производственного этапа.

Таблица 4 – Электроизоляционные свойства сшитого полиэтилена

Материал	Уд. объемное электрическое сопротивление, Ом·см	Электрическая прочность, кВ/мм	Тангенс угла диэлектрических потерь при 1КГц	Диэлектрическая проницаемость
Сшитый полиэтилен	более $10^{15}$	25 – 98	$0,3 \cdot 10^{-3}$	2,3 – 2,4

Использование СПЭ для изоляции силовых кабелей дало возможность как расширения эксплуатационных свойств электропроводки, так и более удобного ее монтажа.

Изоляция из сшитых образцов полиэтилена используется в производстве одножильного и трехжильного кабелей, применяемых как в однолинейной, так и в групповой прокладке на открытых местах, в кабельных конструкциях, под землей. Толщина изоляции варьируется от 3,4 до 35 мм при сечении кабеля от 35 до 3000 мм<sup>2</sup> и протекании тока напряжением до 550 кВ. В зависимости от качества дополнительных оболочек медный и алюминиевожильный кабель в СПЭ-изоляции может использоваться:

- В полиэтиленовой (П) оболочке – для прокладки в помещениях и в воздухе;
- В усиленной оболочке из полиэтилена (Пу) – для прокладки на сложных участках на поверхности земли;
- В оболочке из ПВХ (В, ВГ) – для прокладки одиночной линии в местах, где исключены его механические повреждения (помещение и сухой грунт);
- С защитой из ПВХ пониженной горючести (Внг, ВГнг) – для групповой прокладки;
- С дополнительной герметизацией (г, 2г) – для прокладки в сырых местах, в земле с наличием грунтовых вод;
- Бронированные металлической проволокой или лентой (Б) – в местах с вероятностью механических повреждений.

### **Политетрафторэтилен**

Политетрафторэтилен - базовый полимер класса фторполимеров обладает рядом удивительных свойств: высокой химической стойкостью, нерастворимостью в большинстве известных растворителей, прекрасными электроизоляционными качествами, рекордно низким коэффициентом трения, высокой климатической стойкостью, не подвержен старению, не токсичен, обладает биосовместимостью с живыми тканями.

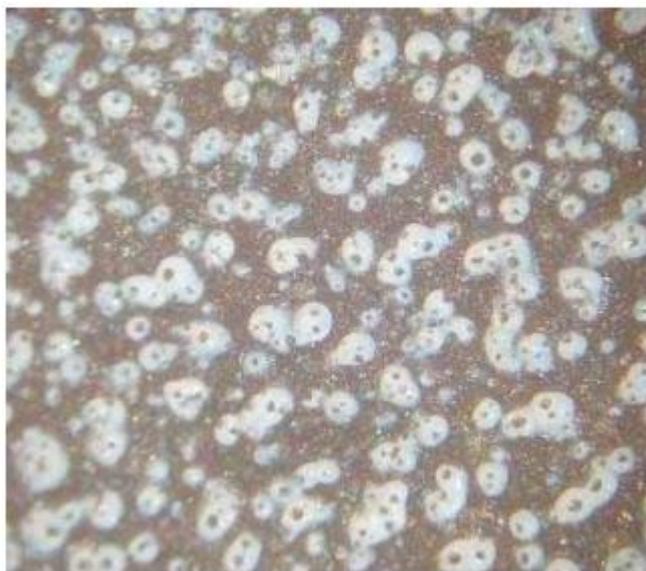


Рисунок 7 – Кристаллы политетрафторэтилена выращены на пористом покрытии, специально полученном на алюминии

Дополнительное достоинство полимера - сохранение эксплуатационных характеристик в широком температурном интервале, от  $-269$  до  $+260$  °С, что является большой редкостью для полимеров. Материал легко подвергается механической обработке, что позволяет достаточно просто изготавливать из него самые различные изделия.

Наряду с достоинствами политетрафторэтилен имеет ряд недостатков, ограничивающих его более широкое применение. Сдерживающие факторы можно разделить на три группы: технические, экологические и экономические. Технические факторы проявляются в хладотекучести материала (развитие пластической деформации под давлением при температуре значительно ниже температуры размягчения), в низкой теплопроводности, в малой износостойкости полимера при механическом воздействии, в слабой адгезии к поверхностям материалов и изделий, низкой радиационной стойкостью. Экологические проблемы вызваны большим количеством отходов в производстве изделий из политетрафторэтилена и сложностями вторичной переработки отходов и их уничтожения. Экономический фактор выражается в высокой стоимости материала по сравнению с углеводородными полимерами, и это основное ограничение более активного практического использования

политетрафторэтилена. По этой причине политетрафторэтилен стараются заменить во всех возможных случаях, и материал используется лишь там, где невозможна его замена по функциональным соображениям.

В результате полимеризации Фторопласт-4, в отличие от других полимеров, получается в виде белого порошка. Особенности структуры, о которых будет сказано ниже, обеспечивают фторопласту низкую текучестью при высоких температурах, поэтому к нему применяются нетипичные для полимеров, методы обработки, характерные для порошковой металлургии, а именно, порошок прессуется и спекается при температуре 375 °С. Можно проводить закалку [7].

Любой полимер состоит из макромолекул, которые представляют собой непрерывную цепочку из повторяющихся мономерных звеньев. Самой простой линейный полимер с насыщенными связями - это полиэтилен  $[-CH_2 - CH_2-]_n$ . Если атомы водорода заменить на фтор, то получатся фторполимеры (фторопласты): поливинилфторид  $[-CH_2 - CHF-]_n$ , поливинилиденфторид (ПВДФ)  $[-CHF = CHF-]_n$ , политрифторхлорэтилен  $[-CF_2 - COF-]_n$  и политетрафторэтилен  $[-CF_2 - CF_2-]_n$ . Полная замена всех атомов водорода на фтор ведет к кардинальным изменениям свойств.

PTFE политетрафторэтилен,  $[-CF_2 - CF_2-]_n$ , патент принадлежит DuPont под названием Teflon



Рисунок 8 – Химическая формула политетрафторэтилена

Политетрафторэтилен (PTFE), фторированный этилен-пропилен (FEP), перфторалкоксидные полимеры (PFA) и другие фторполимеры обладают следующими уникальными свойствами:

Тепловые свойства

Фторопласты - одни из самых термостойких пластиков. При очень низких и очень высоких рабочих температурах, от -200°С до + 260°С, фторполимеры не

плавятся и должны обрабатываться с использованием специальных инструментов и методов. Такая термостойкость делает PTFE, FEP и PFA идеальными для использования в процессах нагрева на производстве и в лабораторных условиях.

#### Химические свойства

Другой ключевой особенностью фторполимеров является то, что они полностью устойчивы к химическим веществам и растворителям; PTFE, FEP и PFA - одни из самых инертных материалов, известных человеку. Это химическое свойство делает их идеальными для транспортировки химикатов и растворителей, а также для использования в прокладках, футеровках резервуаров, внутренних частях насосов, уплотнениях и компонентах сверления.

#### Механические свойства

Фторопласты обладают множеством механических свойств, от низкого трения до антипригарных свойств и прочности на разрыв; Они не трутся, не слипаются и не ломаются от напряжения.

#### Электрические свойства

Другой ключевой особенностью PTFE, FEP и PFA является их электрическое сопротивление и электрическая прочность. Фторопласты - отличные изоляторы как от электричества, так и от тепла. Это электрическое свойство делает их идеальными для электрических и электронных устройств, таких как изоляция проводов, кабелей и компонентов.

Таблица 5 – Электроизоляционные свойства политетрафторэтилена

Материал	Уд. объемное электрическое сопротивление, Ом·см	Электрическая прочность, кВ/мм	Тангенс угла диэлектрических потерь при 1КГц	Диэлектрическая проницаемость
ПТФЭ (Ф-4)	более $10^{16}$	20 – 30	$(0,2 – 0,3) \cdot 10^{-3}$	2,0

#### Экологические свойства

Устойчивые к погодным условиям, УФ-излучению и коррозии фторопласты также обладают экологическими свойствами. Эти материалы

устойчивы к суровым и агрессивным средам, что, вместе с их устойчивостью к температуре и химическим веществам, делает их идеальными для нефтегазовой и химической промышленности [8].

Фторполимеры не разлагаются под действием тепла или ультрафиолетовых лучей, испускаемых лампами. В результате PTFE, FEP и PFA также идеально подходят для использования в стерилизации, фармацевтике и медицине. Кроме того, этот замечательный пластик можно перерабатывать на специализированных предприятиях.

### Термоэластопласты

Термоэластопласты (ТЭП) — полимерные материалы, обладающие в условиях эксплуатации высокоэластичными свойствами, как эластомеры (например, резины), а при повышенных температурах обратимо переходят в вязкотекучее состояние и перерабатываются подобно термопластам. Представляют собой линейные или разветвленные блоксополимеры.

Свойства ТЭП обусловлены наличием двухфазной системы. Вследствие термодинамической несовместимости гомополимеров, в макромолекуле ТЭП образуются жесткие блоки термопласта (полистирола, полиэтилена, полибутилентерефталата и т. п.) и эластичные блоки (полибутадиена, полиизопрена, полиоксиалкиленгликоля, сополимеров этилена с пропиленом и т. п.) [8]. Способные к кристаллизации жесткие блоки за счет физического взаимодействия образуют домены, распределенные в матрице гибких блоков, и выполняют роль полифункциональных узлов (аналогично поперечным связям в вулканизированном каучуке). Электроизоляционные свойства термоэластопластов указаны в таблице 6.

Таблица 6 – Электроизоляционные свойства термоэластопластов

ТЭП \ Материал	Уд. объемное электрическое сопротивление, Ом·см	Электрическая прочность, кВ/мм	Тангенс угла диэлектрических потерь при 1КГц	Диэлектрическая проницаемость
Олефиновые	$10^{13} - 10^{15}$	25 – 40	$(0,2 - 0,3) \cdot 10^{-3}$	2,3 – 2,4
Уретановые	более $10^{12}$	15 – 25	$(40 - 90) \cdot 10^{-3}$	3 – 6

Виниловые	$10^9 - 10^{11}$	15 – 20	$(40 - 100) \cdot 10^{-3}$	3 – 5
Сополиэфирные	$10^{11} - 10^{14}$	15 – 20	$(40 - 80) \cdot 10^{-3}$	3 – 5

Отсутствие химических связей между цепями полимера обуславливает текучесть при повышенных температурах, что позволяет перерабатывать ТЭП литьем под давлением, экструзией, вакуум- и пневмоформованием.

Получают ТЭП полимеризацией (радикальной, катионной, анионной), поликонденсацией, механохимической обработкой смесей полимеров или сочетанием различных методов.

Термоэластопласты — это эластичный материал, но имеющий неоспоримые преимущества по сравнению с резиной:

- отсутствие вулканизатора и других вулканизирующих компонентов;
- нет необходимости вводить наполнитель;
- термопластичный материал с высокой степенью технологичности.

Важнейшие промышленные типы термоэластопластов образуют следующий квартет материалов: диенвинилароматические, полиолефиновые, полиуретановые, полиэфирные.

#### **Диенвинилароматические термоэластопласты**

Диенвинилароматические (ДВА) термоэластопласты исторически были разработаны первыми и являются сополимерами стирола с бутадиеном или изопреном, поэтому делятся на две группы:

- бутадиен-стирольные;
- изопрен-стирольные.

Структура диенвинилароматических ТЭП. Эти материалы представляют собой блок-сополимеры диенов (бутадиен или изопрен) с винил ароматическими углеводородами (стирол). Молекулы стирола образуют два концевых жестких блока (А), а центральным эластичным блоком является диен (В). Таким образом, структура ДВА-ТЭП имеет вид типа А-В-А [7].

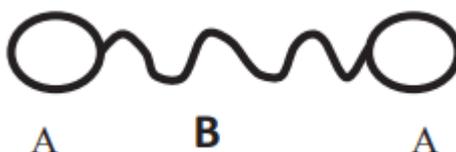


Рисунок 9 – Структура А-В-А молекул

Диенвинилароматические ТЭП – блоксополимеры, полученные анионной сополимеризацией винилароматических (стирол, метилстирол) и диеновых (1,3-бутадиен, изопрен, метилметакрилат и др.) углеводородов в углеводородных растворителях в присутствии литийорганических катализаторов. При содержании блока А в количестве более 30%, они объединяются в домены, которые распределены в эластичной диеновой матрице. Связь доменов между блоками А осуществляется силами Ван дер Ваальса. Домены выполняют роль наполнителя, связанного химическими связями с молекулами матрицы.

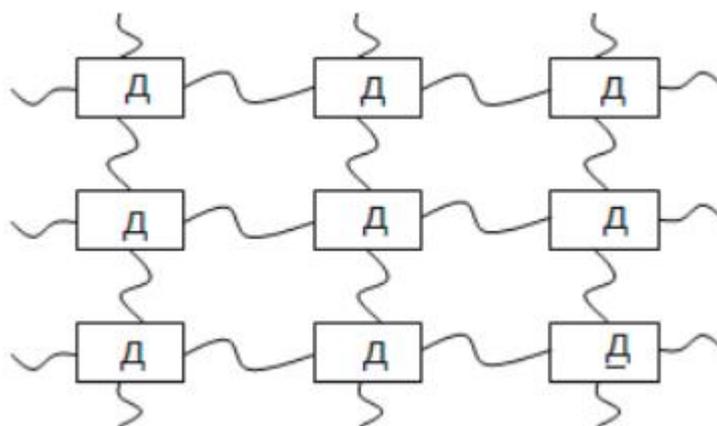


Рисунок 10 – Структура диен-стирольного ТЭП

Главное свойство ТЭП – высокие прочность и эластичность.

### **Полиолефиновые термоэластопласты**

Полиолефиновые ТЭП включают две разновидности:

1. Блоксополимеры этилена и пропилена, получаемые полимеризацией мономеров в присутствии катализатора Циглера-Натта; макромолекула этого типа материала имеет вид А-В-А, А — гомополимер (этилен, пропилен), жесткая фаза; В — сополимер (этилен-пропилен), эластичная фаза.

2. Композиции этиленпропиленового каучука с полиолефинами: изотактическим полипропиленом, полиэтиленом, их смесями и блоксополимерами. Являются двухфазными системами (эластомерная фаза каучука диспергирована в непрерывной термопластичной матрице) с развитым межфазным слоем. Такие ТЭП называются термопластичными резинами (ТПР), получают путем совмещения эластомера и термопласта по технологии, близкой

к производству резиновых смесей. Выпускают ТПП с несшитой, частично или полностью вулканизированной эластомерной фазой. Для вулканизации используют способ «динамической вулканизации», когда сшивание эластомера осуществляется в процессе смешения компонентов. В качестве вулканизирующих агентов применяют бромфенольные смолы, серу в смеси с ускорителями вулканизации [9].

Полиолефиновые ТЭП характеризуются низкой плотностью (0,85 ... 0,93 г/см<sup>3</sup>), работоспособностью в интервале температур (от -50 до +125°C). По физико-механическим свойствам близки к резинам из этиленпропиленовых каучуков: обладают высокой атмосферо- и износостойкостью, высоким сопротивлением изгибу, истиранию и раздиру, стойкостью к воздействию воды, кислот, спиртов, низкомолекулярных полярных соединений, хорошими электроизоляционными свойствами [8].

### **Полиуретановые термоэластопласты**

Структура уретановых ТЭП представляет собой блоксополимеры чередующимися блоками типа (A – B)<sub>n</sub>: A — жесткий блок — диизоцианаты; B - эластичный блок — диены (бутадиен). Жесткие блоки собираются в агрегаты посредством водородных связей. Водородные связи более энергичные, чем силы Ван дер Ваальса, действующие между агрегатами в жестких блоках других термоэластопластов. Это обеспечивает более высокие термические и прочностные свойства уретановых ТЭП.

Получают полиуретановые ТЭП ступенчатой сополимеризацией из алифатических сложных или простых (полиоксиалкиленгликоли) полиэфиров с концевыми гидроксильными группами, диизоцианатов (4,4' - дифенилметандиизоцианат) и низкомолекулярных диолов (1,2 - бутандиол, этиленгликоль). Посредством реакции полиприсоединения полиолы и короткоцепные диолы реагируют с диизоцианатами, образуя линейный полиуретан [7].

Основные характеристики уретановых ТЭП - работоспособность при температурах от -40 до +80 °С, некоторые марки выдерживают кратковременное

повышение температуры до 120°C, высокая износостойкость, стойкость к набуханию в маслах и неполярных растворителях, атмосферостойкость, высокая радиационная стойкость. Уретановые ТЭП отличаются большой упругостью при низких температурах, высоким сопротивлением разрыву и раздиру, хорошими эластичными свойствами. Кроме того, полиуретановые ТЭП характеризуются высокой эластичностью и упругостью, температура переработки - 200 °С, эти материалы устойчивы к окислению [9].

Однако, для полиуретанов характерны увеличение хрупкости вследствие высокого теплообразования при многократных быстро повторяющихся деформациях, выцветание под действием УФ облучения, плохая стойкость к полярным растворителям и гидролизу при повышенных температурах [8].

### **Полиэфирные термоэластопласты**

Полиэфирные ТЭП представляют собой блок-сополимер типа  $(A - B)_n$ . Получают методом поликонденсации в расплаве диметилтерефталата тетраметилгликоля при 240—260 °С. В присутствии катализаторов диметилтерефталат формирует жесткий блок (А), тетраметилгликоль образует эластичный блок (В). Свойства полиэфирных ТЭП зависят от количества жестких блоков и изменяются в широких пределах. ТЭП работоспособны при температуре от -50 до +150 °С, характеризуются высокими сопротивлением истиранию и многократному изгибу, влаго- и газонепроницаемостью, теплостойкостью к гидролизу, действию топливных смесей и спиртов, но разрушаются под действием горячих концентрированных минеральных кислот и оснований. Очень высокие механические свойства.  $\sigma_{\text{раз}} > 40\text{МПа}$ ;  $\Delta l_{\text{раз}} = (500 - 800)\%$  [8].

Таблица 7 – Свойства ТЭП

Показатель	Термоэластопласты			
	Диенвинил-ароматические	Уретано-вые	Поли-эфирные	Полиоле-финовые
$\sigma_p$ , МПа при 20 °С при 70 °С при 100 °С	24–35 2–3 –	25–55 8–10 1–4	16–45 10–23 8–15	9–27 7–17 4–12
Относительное удлинение при разрыве $\epsilon_p$ , %	750–1000	3580–550	500–800	300–600
Сопротивление раздиру, кН/м	25–50	75–130	50–120	60–100
Твердость по Шору А по Шору Д	65–90 –	75–95 40–60	80–95 40–70	65–90 50–60
Рабочая температура, °С	СИС–(40–50) °С, СБС–(70–80) °С	–40 до +80 °С	–50 до +150 °С	–50 до +125 °С

Из анализа таблицы 7 можно заключить, что по механическим свойствам и термоустойчивости наилучшими показателями характеризуются полиэфирные термоэластопласты. Эти материалы обладают наибольшим значением рабочем температуры +150°С.

### Этиленпропиленовая резина

Этиленпропиленовый каучук имеет линейную структуру, причем двойные связи в нем полностью отсутствуют. В резиновой смеси на основе этиленпропиленового каучука можно ввести большое количество наполнителей (свыше 100 мас. ч.) без ухудшения их характеристик, что положительно сказывается на себестоимости. Кроме того, высоконаполненные подобные смеси обладают хорошими технологическими свойствами. Этиленпропиленовый каучук обладает высоким электрическим сопротивлением, стойкостью к термомеханической деструкции, влагостойкостью, морозостойкостью [10].

Таблица 8 – Электроизоляционные свойства ЭПР

Материал	Уд. объемное электрическое сопротивление, Ом·см	Электрическая прочность, кВ/мм	Тангенс угла диэлектрических потерь при 1КГц	Диэлектрическая проницаемость
ЭПР	$10^{15} - 10^{17}$	35 – 42	$(0,5 - 0,9) \cdot 10^{-3}$	3,0 – 3,5

Этиленпропиленовая резина как материал хорошо пригодна для использования в качестве изоляции жил кабеля с рабочим напряжением вплоть до 35 кВ. Обращение к ней обеспечивает кабельному изделию хорошую гибкость. Химическая стабильность материала, в т.ч. по отношению к озону и УФ-излучению, позволяет гарантировать по меньшей мере 5-летний срок эксплуатации даже в тяжелых условиях промышленного предприятия, туннелях метрополитена, строительной площадки и объектов горнодобывающей промышленности.

Важным преимуществом кабелей с изоляцией из этиленпропиленовой резины считается расширенный рабочий температурный диапазон с нижней допустимой температурой  $-60^{\circ}\text{C}$ . Кабель с ЭПР-изоляцией полностью сохраняет свои первоначальные свойства при нагреве до  $+90^{\circ}\text{C}$ , т.е. построенная на его основе линия электроснабжения обладает хорошей устойчивостью к коротким замыканиям.

Одновременно обеспечивается нулевое влагопоглощение и химическая инертность даже в агрессивной атмосфере окружающей среды. Более того, этиленпропиленовая изоляция кабеля не накладывает ограничений для его применения во взрывоопасных зонах [11].

Немаловажное значение имеет относительно невысокая плотность, что при прочих равных условиях снижает погонную массу продукта. Нанесение изоляции не требует изменения отлаженных технологических процессов.

Максимальная рабочая температура жилы  $90-105^{\circ}\text{C}$ . Максимально допустимая температура нагрева жилы при КЗ,  $250^{\circ}\text{C}$ . Длительно допустимая температура нагрева жилы в режиме перегрузки,  $130^{\circ}\text{C}$  (8 час/сутки, 1000 час/срок службы). Значения энергии активации для этиленпропиленовых резин составляет 85-115 кДж/моль, в зависимости от насыщенности каучука и др. Использование в резинах на основе этиленпропиленового каучука в качестве наполнителя коллоидной кремнекислоты позволяет получить композиции с более высокой энергией активации термоокислительного старения, так же установлено, что энергия активации термоокислительного старения

эластомерных композиций не является параметром, однозначно определяющим устойчивость резин к высокотемпературному воздействию. Это связано с тем, что деформационно-прочностные показатели эластомерных композиций и их изменение в ходе высокотемпературного термоокислительного старения зависят не только от химической природы полимерной матрицы и наполнителя, но и от наличия в материале микро- и макродефектов [10].

### **1.3 Основные положения по определению теплостойкости полимеров**

#### **1.3.1 Тепловые свойства полимеров**

К основным тепловым свойствам электроизоляционных полимерных материалов можно отнести жаростойкость, теплостойкость и нагревостойкость.

Жаростойкость – это способность полимерного материала выдерживать без возгорания и обугливания воздействие высокой температуры источника тепла.

Термостойкость – это способность полимерного материала сохранять неизменным свое химическое строение при повышении температуры.

Нагревостойкость – это способность электроизоляционного материала, или конструкции выдерживать действие высокой температуры определенного уровня в течение времени, соизмеримого со сроком эксплуатации, без её недопустимого ухудшения.

Поскольку, как для систем изоляции, так и для электроизоляционных материалов доминирующим фактором старения является температура, для оценки стойкости электрической изоляции электротехнических изделий к воздействию температуры приняты классы нагревостойкости.

Понятие класс нагревостойкости применим для конструкций электрической изоляции. Для материалов используется понятие температурный индекс (ТИ). Температурный индекс – это температура, при которой ресурс (срок службы) материала равен заданному.

В таблице 9 указаны все их обозначения согласно ГОСТ 8865-93 (МЭК 85-84).

Таблица 9 – Классы нагревостойкости электроизоляционных материалов

Класс нагревостойкости	Y	A	E	B	F	H	200	220	250
Максимальная рабочая температура °С	90	105	120	130	155	180	200	220	250

К классу «Y» относят материалы в основе которых присутствует шелк, целлюлозы, поливинилхлорид и непропитанные и не погруженные в жидкий диэлектрик.

К классу «A» относят органические волокнистые материалы, а также материалы, пропитанные компаундами, лаками или погруженные в жидкий диэлектрик.

К классу «E» относят пластмассы с термореактивным связующим и органическим наполнителем. К ним относятся эпоксидные, фенолоформальдегидные, полиуретановые и полиэфирные компаунды и смолы, полиэтилентерефталатные пленки, текстолит и др. Таким образом, первые три класса – преимущественно органические ЭИМ.

К классу «B» относят аналогичные материалы, что и материалы «E» класса, но в материалах класса «B» содержатся компоненты неорганического происхождения. К ним относятся стеклотекстолиты на термореактивных смолах, эпоксидные компаунды с неорганическими наполнителями, большинство миканитов, стеклоткани и. т.д.

К классу «F» относят материалы «B» класса, в которых присутствуют органические связующие и пропитывающие материалы, имеющие повышенную нагревостойкость: эпоксидные, кремнийорганические и другие.

К классу «H» относят материалы, в которых использованы кремнийорганические смолы повышенной нагревостойкости.

При длительном воздействии на электроизоляционный материал повышенной, но еще не приводящей к разрушению к его разрушению температуры (в течение короткого времени) могут наблюдаться негативные

изменения за счет медленно протекающих химических и других процессов – тепловое старение изоляции. Скорость протекания теплового старения изоляции определяется термической и термоокислительной деструкцией молекул, из которых состоит электроизоляционный материал. Деструкция – это реакция, в ходе которой, происходит разрыв химической связи в главной цепи макромолекулы.

Зависимость величин, которая описывает процессы кинетики и термодинамики старения полимеров и композитов на основе полимеров носит название уравнение Аррениуса и выглядит следующим образом

$$\ln(k) = \ln(A) - \frac{E_a}{R \cdot T}$$

где  $k$  – константа скорости процесса,  $E_a$  – энергия активации процесса,  $T$  – абсолютная температура,  $R$  – универсальная газовая постоянная.

После логарифмирования данного выражения получаем:

$$k = A \cdot e^{-\frac{E_a}{R \cdot T}}$$

Даже при небольшом превышении рабочей температуры наблюдается ускоренный процесс теплового старения изоляции, следовательно, и износ.

Эмпирическим путем установлено, что при повышении рабочей температуры электроизоляционного материала на  $10^\circ\text{C}$ , срок его службы уменьшается приблизительно вдвое. Под действием повышенной температуры электроизоляционные материалы могут разрушаться, менять свои химические свойства, возможны их пластические деформации и другие негативные эффекты.

Скорость старения зависит от чувствительности полимера к механическому напряжению, развивающемуся в полимерах при их переработке и в условиях эксплуатации изделий и атмосферных факторах – кислород, свет, озон, влага.

Для полимеров характерна зависимость прочности от температуры и времени. При одновременном воздействии механических нагрузок и

температуры разрушение полимеров нужно рассматривать с точки зрения термофлуктуационной теории.

Время от приложения нагрузки до разрушения определяются по формуле:

$$t = t_0 \cdot e^{\left(\frac{E_a - \gamma\sigma}{RT}\right)}$$

где  $t_0$  – постоянная,  $E_a$  – энергия активации элементарного акта процесса разрушения в отсутствии механического разрушения,  $\sigma$  – механическое напряжение,  $\gamma$  – структурно-чувствительный коэффициент, зависящий от структуры полимера.

Физический смысл вышеприведённого уравнения: в результате накопления разрывов межатомных связей полимера, наблюдается разрушение материала. Энергия активации разрывов межатомных связей уменьшается на величину  $\gamma\sigma$  под влиянием механических воздействующих напряжений. Значение  $E_a$  равно энергии диссоциации межатомных связей. Энергия активации может быть рассчитана из независимых друг от друга измерений. Таким образом, для вычисления долговечности материала при заданных нагрузке и температуре необходимо определить только величину структурно-чувствительного коэффициента.

Обычно для нормальных резин допустимую максимальную температуру принимают равной 55°C, для резин с повышенной нагревостойкостью температуры достигают значения в 65°C. Для хороших тиурамовых резин рабочая температура может составлять до 75°C, а для резин на основе этиленпропиленового бутилкаучука – 90°C. Для резин на основе кремнийорганического каучука – выше 90°C. В таблице 10 указаны сравнительные характеристики кабелей с ПВХ, СПЭ и ЭПР изоляцией [13].

Таблица 10 – Сравнительные характеристики кабелей с ПВХ, СПЭ и ЭПР изоляцией

Свойство	ЭПР	СПЭ	ПВХ
Длительно допустимая температура нагрева жилы при эксплуатации, °C	90	90	70

Длительно допустимая температура нагрева жилы в режиме перегрузки, °С	130	130	90
Максимально допустимая температура нагрева жилы при КЗ, °С	250	250	160
Гибкость	Хорошая	Средняя	Средняя
Электрическая прочность, кВ/мм	До 60	До 80	До 35
Тангенс угла диэлектрических потерь	0,002	0,0004	0,01
Влагостойкость	Хорошая	Средняя	Плохая

### 1.3.2 Старение полимерных материалов

При хранении и переработке полимерных материалов, а также при эксплуатации они подвергаются воздействию различных факторов – света, тепла, радиации, влаги, кислорода, агрессивных химических агентов, различных механических нагрузок. Эти факторы, действуя отдельно или в совокупности, вызывают в полимерах развитие необратимых химических реакций двух типов. Деструкции, когда происходит разрыв связей в основной цепи макромолекул, и структурирования, когда происходит сшивание цепей. Изменение молекулярной структуры приводит к изменениям в свойствах полимерного материала; теряется эластичность, повышается жесткость и хрупкость, снижается механическая прочность, ухудшаются диэлектрические показатели, изменяется цвет, гладкая поверхность становится шероховатой, и т.д. Изменения свойств полимеров и изделий подобного рода называют старением. Главная причина старения полимеров — окисление их молекулярным кислородом, которое особенно быстро протекает при повышенных температурах, например, при переработке полимерных материалов. Окисление часто ускоряется и облегчается светом, примесями металлов переменной валентности, которые могут присутствовать в полимере из-за коррозии аппаратуры или неполного удаления катализатора из него после окончания синтеза. По типу активатора и основного агента, вызывающих разрушение полимеров, различают следующие виды старения: тепловое, термоокислительное, световое, атмосферное (озонное), радиационное и старение под влиянием механических нагрузок (утомление). Термическая деструкция — это процесс разрушения макромолекул под влиянием

повышенных температур. При термической деструкции одни полимеры разрушаются с образованием коротких цепей различного строения (полиэтилен, полипропилен), другие с образованием мономера [8].

Реакции деполимеризации подвержены полимеры, в цепях которых содержится третичный или четвертичный атом углерода. Деполимеризация, являясь видом старения полимеров, может намеренно применяться для утилизации отходов термопластов с целью получения мономеров и возвращения их в стадию синтеза полимера.

Термоокислительная деструкция — это процесс разрушения макромолекул при совместном действии на полимеры повышенных температур и кислорода. Присутствие кислорода существенно снижает стойкость полимеров к действию тепла.

Первичными продуктами термоокисления являются полимерные гидроперекиси, которые при распаде образуют свободные радикалы, вследствие чего процесс развивается по цепному механизму и является автокаталитическим. Полимеры, макромолекулы которых не содержат С-С - связей, более устойчивы к термоокислительной деструкции. Это объясняется легкостью прямого присоединения кислорода к С=C - связям и образованием очень неустойчивых напряженных циклических перекисей. Радиационная деструкция происходит при воздействии на полимеры гамма-лучей, альфа-частиц, нейтронов. Энергия проникающей радиации значительно превосходит энергию химических связей в макромолекулах. Возникающие при этом свободные радикалы «захватываются» полимером и существуют в нем очень долго, разрушая его во времени.

Деструктировать полимер может и под действием механических напряжений. Химическая деструкция представляет собой разрушение макромолекул при действии химических агентов. Она характерна для многих гетероцепных полимеров, содержащих в основной цепи группы, способные к химическим превращениям. Глубина деструкции зависит от природы и количества низкомолекулярного реагента, условий его воздействия [10].

Скорость старения зависит от чувствительности полимера к механическому напряжению, развивающемуся в полимерах при их переработке и в условиях эксплуатации изделий и атмосферных факторах – кислород, свет, озон влага.

Для полимеров характерна зависимость прочности от температуры и времени. При одновременном воздействии механических нагрузок и температуры разрушение полимеров нужно рассматривать с точки зрения термофлуктуационной теории.

Время от приложения нагрузки до разрушения определяются по формуле:

$$t = t_0 \cdot e^{\left(\frac{E_a - \gamma\sigma}{RT}\right)}$$

где  $t_0$  – постоянная,  $E_a$  – энергия активации элементарного акта процесса разрушения в отсутствие механического разрушения,  $\sigma$  – механическое напряжение,  $\gamma$  – структурно-чувствительный коэффициент, зависящий от структуры полимера.

Физический смысл вышеприведённого уравнения: в результате накопления разрывов межатомных связей полимера, наблюдается разрушение материала. Энергия активации разрывов межатомных связей уменьшается на величину  $\gamma\sigma$  под влиянием механических воздействующих напряжений. Значение  $E_a$  равно энергии диссоциации межатомных связей. Энергия активации может быть рассчитана из независимых друг от друга измерений. Таким образом, для вычисления долговечности материала при заданных нагрузке и температуре необходимо определить только величину структурно-чувствительного коэффициента.

### **1.3.3 Физика-химия процесса теплового старения полимеров**

Деструкция полимеров — разрушение молекул полимеров под действием тепла, кислорода, света, механических напряжений, биологических факторов. В процессе деструкции происходит разрыв химических связей в макромолекулах, уменьшается степень полимеризации и молекулярная масса полимера. Изменение строения полимера приводит к изменению его физических и химических свойств, то есть к старению полимеров. Воздействующий на

полимер фактор определяет вид деструкции: термическая, термоокислительная, фотохимическая, гидролитическая, радиационная. Обычно в полимере одновременно протекают несколько видов деструкционных процессов.

Термической деструкцией называют процесс разрушения макромолекул полимера под воздействием высоких температур в отсутствие кислорода, протекающий по радикально-цепному механизму. При разрушении полимеров при термической деструкции в некоторых случаях образуются короткие цепи различного строения (например, при термической деструкции полиэтилена, полипропилена), в других случаях происходит образование мономера. Процесс деструкции может также включать в себя радикальные, ионные и молекулярные реакции (термодеструкция поливинилхлорида).

Термоокислительная деструкция наблюдается при одновременном воздействии на полимеры повышенных температур и кислорода, который заметно снижает стойкость полимеров к действию тепла. В результате термоокислительной деструкции образуются различные низкомолекулярные кислородсодержащие вещества: вода, кетоны, альдегиды, спирты, кислоты. При фотохимической деструкции макромолекулы полимера разрушаются под воздействием света. Фотохимическая деструкция является радикально-цепным процессом, в полимере, помимо разрыва химических связей, происходят сшивание, образование двойных связей и свободных радикалов [6].

В общем случае процесс старения включает три основные стадии (см. рисунок 11)

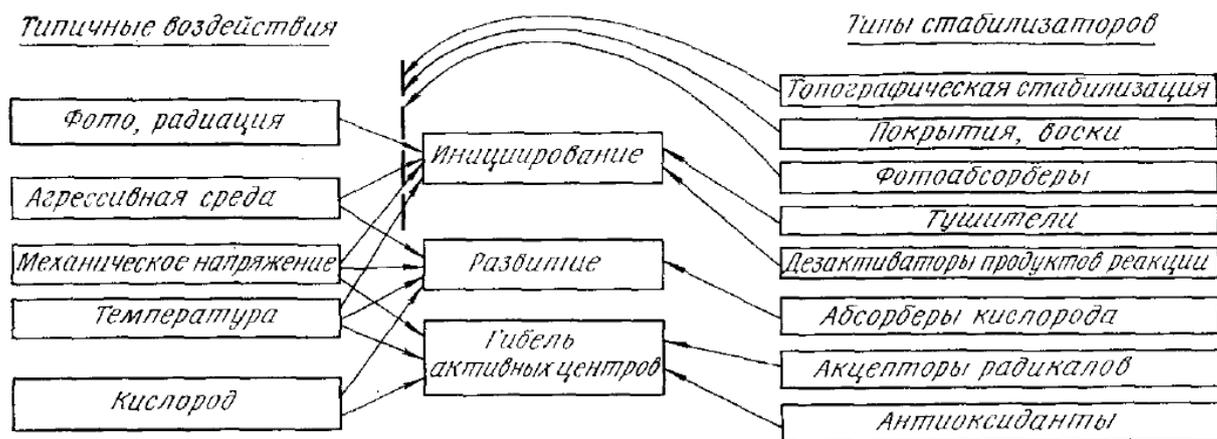


Рисунок 11 – Основные стадии процесса старения и стабилизации полимерного материала

- 1) инициирование – стадия образования активных центров;
- 2) развитие старения – главная стадия, определяющая изменение свойств полимерного материала;
- 3) стадия гибели активных центров старения.

Физико-химическая природа стадии инициирования может быть различной: при фотостарении – это элементарный процесс, с участием квантов света и молекул в возбужденном состоянии, при радиационном воздействии – реакции с участием ионов. При механодеструкции стадия инициирования заключается в разрыве молекул под действием механических сил с образованием свободных радикалов [6].

Развитие процесса старения происходит практически независимо от того, какой была природа инициирования. Например, фото- и радиационное старение протекают через те же самые элементарные реакции, что и термическое старение.

Сложный механизм старения полимеров приводит к тому, что относительно простые закономерности химического процесса, лимитируемого одним элементарным актом, не пригодны для описания процесса старения в широком интервале изменения условий.

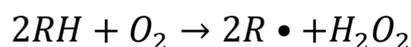
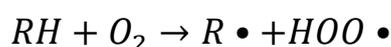
Рассмотрим процесс термической деструкции на примере каучука.

При температурах выше 70°C в большинстве резин в закрытой атмосфере наблюдается деструкция полимерных молекул, в результате чего существенно снижаются такие свойства, как прочность и эластичность. С увеличением температуры и времени старения резина становится хрупкой и твердой и, в конечном итоге, происходит ее разрушение. Основной причиной старения является окисление каучука, т. е. присоединение кислорода по месту двойных связей в каучуке, в результате чего его молекулы разрываются на части и укорачиваются [4].

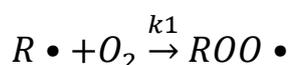
Химические реакции окисления эластомеров во многом схожи с соответствующими реакциями окисления низкомолекулярных углеводородов. В настоящее время установлено, что окисление полимеров, и в частности, эластомеров, протекает по механизму цепных свободно-радикальных реакций с вырожденным разветвлением. Наряду с присоединением кислорода происходит отщепление летучих продуктов окисления: диоксида углерода, формальдегида, воды и пероксида водорода. В нелетучих продуктах окисления каучука (рассматривается в данном случае натуральный) содержатся карбонильные, эфирные, эпоксидные и пероксидные группы. Аналогичные по своему составу летучие и нелетучие соединения были найдены при окислении других эластомеров.

Согласно теории Семенова Н.Н. процессы, протекающие при окислении эластомеров, в общем виде можно представить в виде следующей схемы.

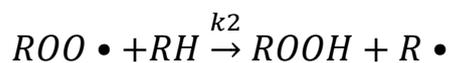
Инициирование, состоящее в образовании радикалов:



Образовавшийся свободный радикал присоединяет кислород с большой скоростью, так как энергия активации этой реакции близка к нулю: развитие реакционной цепи:

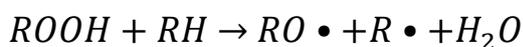


Радикал  $ROO \cdot$  участвует в реакции передачи цепи, отрывая водород от молекулы каучука, как показано ниже:

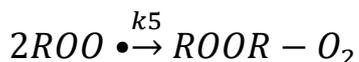
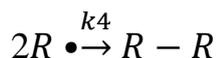


Образование трехмерной пространственной сетки в процессе вулканизации каучуков оказывает значительное влияние на кинетику окисления и характер структурных изменений вулканизатов в процессе термического старения. Отмечено влияние вторичных реакций полисульфидных связей на модификацию макромолекул каучука. Поперечные связи также оказывают влияние на окисление макромолекул.

Этап вырожденного разветвления цепи:



Обрыв цепи:



Обрыв реакционной цепи приводит взаимодействию радикалов друг с другом (в результате рекомбинации или диспропорционирования) и образованию неактивных веществ [6].

Большинство ингредиентов, из которых состоит полимерная изоляция, в той или иной степени влияют на процесс старения. Технический углерод и другие наполнители адсорбируют противостарители на своей поверхности, уменьшают их концентрацию в каучуке и, следовательно, ускоряют старение. Сильно окисленные сажи могут быть катализаторами окисления. Малоокисленные (печные, термические) сажи, как правило, замедляют окисление всех типов каучуков. Сера и ускорители вулканизации, являясь химически активными веществами, вовлекаются в окислительный процесс и оказывают влияние на скорость окисления и характер структурных изменений каучуков.

При тепловом старении резин, которое протекает при повышенных температурах, необратимо изменяются практически все основные физико-механические свойства. Изменение этих свойств зависит от соотношения процессов структурирования и деструкции.

Для различных типов каучука в зависимости от времени старения изменение механических характеристик достаточно разнообразно. На рисунке 12 изображено влияние продолжительности теплового старения на временное сопротивление (а) и относительное удлинение (б) резин на основе натурального (1), бутадиенстирольного (2) и хлоропренового (3) каучуков.

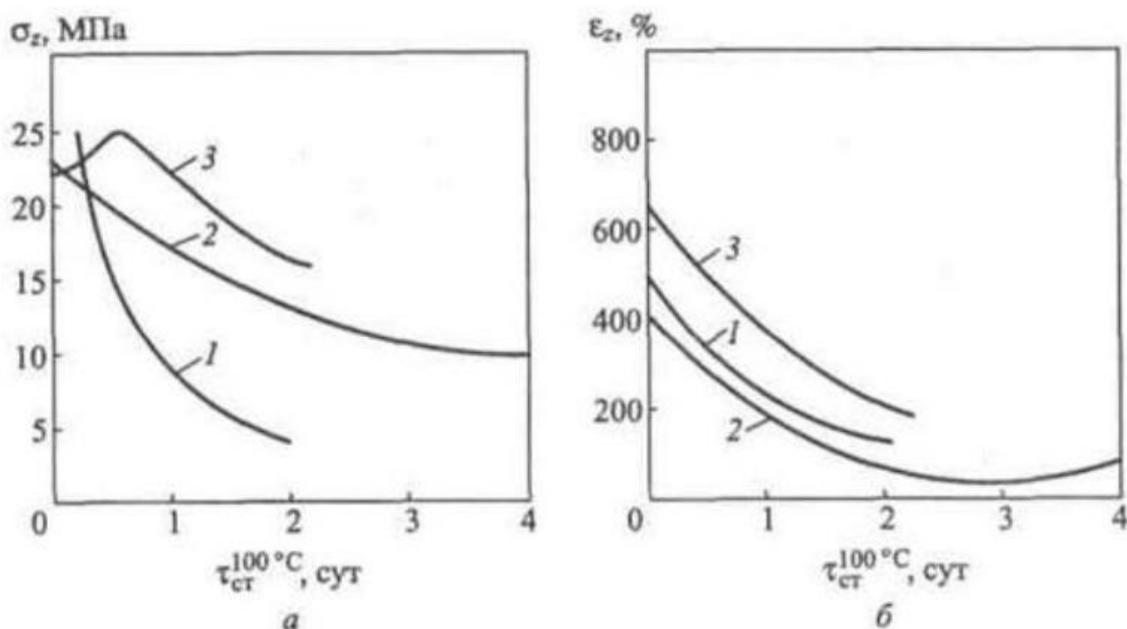


Рисунок 12 – Влияние продолжительности теплового старения на временное сопротивление (а) и относительное удлинение (б) резин на основе натурального (1), бутадиенстирольного (2) и хлоропренового (3) каучуков

При тепловом старении большинства резин на основе синтетических каучуков преимущественно происходит структурирование, что сопровождается снижением эластичности и повышением жесткости.

Для повышения термической устойчивости эластомеров в них вводятся антиоксиданты [12].

Замедление процесса окисления, исходя из механизма реакции, может идти по двум направлениям: ингибирование инициирования и ингибирование развития и разветвления цепи. В соответствии с этим противостарители (стабилизаторы, ингибиторы, антиоксиданты) могут быть подразделены на две большие группы: противостарители, ингибирующие инициирование (превентивные противостарители) за счет разложения гидропероксидов, поглощения светового излучения, дезактивации ионов металлов переменной валентности, и противостарители, обрывающие цепи.

Активность ингибиторов зависит от их строения. Многие соединения (меркаптаны, сульфиды, дитиокарбаматы, дитиофосфаты, эфиры фосфористой кислоты и др.) могут ингибировать окисление за счет взаимодействия с гидропероксидами с образованием неактивных продуктов и являются превентивными противостарителями.

Наиболее распространенными противостарителями, которые обрывают цепи, связывая пероксидные радикалы, являются фенолы и амины, способные легко отдавать водород.

Наилучшим противостарителем по защите резин от теплового и озонного старения, а также от утомления является диафен ФП, однако он отличается сравнительно высокой летучестью и легко экстрагируется из резин водой (особенно подкисленной). С увеличением величины алкильной группы заместителя  $R_2$  до 6 атомов углерода увеличивается растворимость вторичных ароматических диаминов в полимерах, повышается устойчивость к вымыванию водой, уменьшается летучесть и токсичность.

Вторичные ароматические диамины значительно активируют ускорители серной вулканизации и могут вызвать подвулканизацию резиновых смесей. Наиболее активны в этом отношении производные с алкильными заместителями у атомов азота. К числу эффективных противостарителей относят замещенные фенолы.

Так же, как и для аминов, эффективность действия замещенных фенолов определяется способностью взаимодействовать с полимерными радикалами и

определяется легкостью отрыва атома водорода фенольной группы и стабильностью образовавшегося радикала.

Применение фенолов как противостарителей было основано на наблюдениях за поведением НК, высушенного в дыму костра. Такой каучук обладает высоким сопротивлением старению. Известно, что при «копчении» в каучуки попадает большое количество фенолов и крезолов. Фенолы, как правило, менее эффективные стабилизаторы, чем вторичные моно- и диамины, но они не изменяют окраски вулканизаторов при старении и поэтому широко применяются как неокрашивающие противостарители в цветных резинах [6].

## **1.4 Методы испытаний на теплостойкость полимерной изоляции**

### **1.4.1 Энергия активации**

Энергия активации – это энергия, превышающая энергию основного состояния, которая должна быть добавлена к атомной или молекулярной системе, чтобы мог произойти конкретный процесс.

К методам термического анализа относятся методы, по которым можно оценивать свойства полимеров в ходе изменения температуры (охлаждение или нагревание). Самыми распространенными являются:

- тепловое старение;
- дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК);
- термогравиметрический анализ (ТГА);
- динамический механический анализ (ДМА);

### **1.4.2 Тепловое старение**

При длительной эксплуатации электроизоляционных устройств происходит старение твердой изоляции, которое выражается в уменьшении кратковременной электрической прочности, увеличении проводимости и диэлектрических потерь и, как следствие, в ограничении срока службы изоляционных конструкций. В связи с этим при разработке и изготовлении оборудования высокого напряжения, а также при организации его эксплуатации должны предусматриваться меры, снижающие темпы старения изоляции. Отказ (выход из строя) кабеля происходит вследствие накопления старения в процессе

эксплуатации или ускоренных испытаний. Изменения свойств изоляции при эксплуатации происходят за счет энергии от источников внешних нагрузок: электрические и тепловые поля, поле механических напряжений, химические взаимодействия с окружающей средой.

Причины старения изоляции представлены ниже:

1. развитие частичных разрядов при перенапряжении и рабочем напряжении;
2. тепловая деструкция материала;
3. увлажнение изоляции и водный триинг (рост древесных насыщенных водой фигур);
4. повреждения за счет электродинамических усилий, вибраций и т.п.

Старение полимерного материала - совокупность физических и химических процессов, происходящих в полимерном материале и приводящих к необратимым изменениям свойств.

Факторы, способствующие старению полимерных материалов, можно разделить на внутренние и внешние. К внутренним факторам относят состав и структуру полимеров, молекулярно-массовое распределение (ММР), наличие внутренних дефектов, обусловленных неравномерным распределением вводимых наполнителей и различных добавок, внутренние напряжения. Воздействие внутренних факторов можно свести к минимуму путем соблюдения соответствующих требований на стадии переработки полимерного материала. Более существенное влияние оказывают внешние факторы, к которым относят температуру и влажность воздуха, световую и проникающую радиацию, кислород, агрессивные среды, механические нагрузки.

По типу активатора и основного агента, вызывающих разрушение полимеров, различают следующие виды старения:

- термическая деструкция;
- атмосферное (озонное) старение;
- световое;
- радиационное;

- гидролитическая деструкция;
- старение под влиянием механических нагрузок (утомление);
- биологическая деструкция полимерных материалов.

Среди физических факторов, способных инициировать химические реакции в полимерах, тепловое воздействие занимает важное место, так как является причиной одной из важнейших характеристик полимеров - их термостабильности, которая определяет верхнюю температурную границу пределов эксплуатации изделий из полимеров. Распад молекулярной структуры полимеров при тепловых воздействиях на них является одной из причин старения полимеров, которая приводит к снижению механических свойств и невозможности эксплуатировать дальше то или иное полимерное изделие в конкретных условиях его работы. Это тоже приводит к снижению сроков службы полимерных изделий.

Вопрос о влиянии температуры усложняется, если при нагревании материал разлагается. Наиболее важными реакциями, протекающими при разложении, являются деструкция и структурирование эти реакции оказывают прямо противоположное влияние на свойства полимера. При длительной выдержке полимера при постоянной температуре или при постепенном повышении температуры его прочность может сначала уменьшиться вследствие деструкции цепей, а затем вновь увеличиться благодаря структурированию. В конце концов, прочность вновь понижается в результате полного разложения полимера [13].

Защитить от старения полимер можно также путем изменения его физической структуры, подвергая для этого полимер специальной механической или термической обработке или с помощью введения в него добавки.

При всех разрешенных режимах работы изоляционной конструкции наибольшие температуры ее элементов не должны превышать допустимые значения. Необходимо, чтобы выделяющееся в ней тепло надежно отводилось в окружающую среду. Иначе происходит ускоренное тепловое старение и

сокращение ресурса изоляционной конструкции или нарушение ее тепловой устойчивости.

Ресурс электрической изоляции определяет фактическую наработку кабеля, а срок службы характеризует календарное время с момента ввода кабеля в эксплуатацию независимо от наработки и коэффициента нагрузки. Ресурс электрической изоляции существенно зависит от температуры и от напряженности электрического поля, но методика, основанная на этих параметрах, является разрушающей и подходит только для вновь разрабатываемых кабелей, проходящих ресурсные испытания в лабораториях или на полигонах. Кроме того, необходимо учитывать, что каждый действующий кабель работает в индивидуальных условиях, а расчётные параметры изменяются в широких пределах.

#### **1.4.3 Дифференциально сканирующая калориметрия (ДСК)**

Дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК): Метод, в котором разность тепловых потоков, подведенных к тиглю с испытуемым образцом и эталонному тиглю, измеряется как функция температуры и/или времени в процессе воздействия на испытуемый и эталонный образцы управляемой температурной программы в установленной атмосфере и при использовании симметричной измерительной системы.

Метод дифференциальной сканирующей калориметрии (далее ДСК) является одним из высокоинформативных методов, позволяющих получить количественную информацию как о термодинамических характеристиках исследуемого материала, так и об особенностях фазовых переходов [14].

Метод ДСК является одним из трех методов термического анализа. С помощью этих методов определяются энергетические изменения в веществе. Метод термического анализа основан на снятии зависимости теплового потока (производная теплоты по времени), либо удельной теплоемкости от температуры. Метод ДСК имеет ряд преимуществ, в отличие от других методов термического анализа, как конструктивных, так и информативных. Он основан

на нагревании образца и эталона с заданной скоростью, при поддержании их температур одинаковыми и измерении компенсирующего теплового потока.

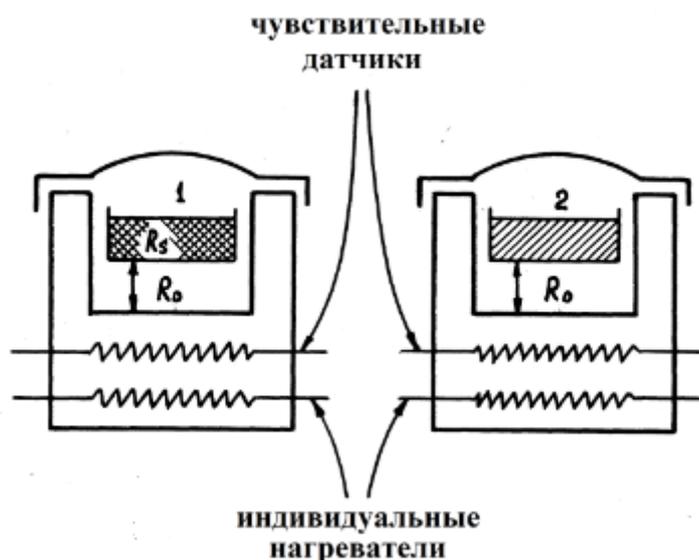


Рисунок 13 – Схема калориметрических ячеек прибора ДСК

На рисунке 13 изображена схема прибора ДСК. Образец и эталон нагреваются индивидуальными нагревателями, с заданной программным устройством постоянной скоростью, а чувствительные датчики, при возникновении экзо- или эндо-термических эффектов в образце, автоматической регулировкой силы тока нагревателя устраняют различие температур образца и эталона [14].

Измеряемой величиной является количество теплоты в единицу времени  $dq/dt$  (необходимый для этого тепловой поток). Величина  $dq/dt$  пропорциональна теплоемкости, изменению энтальпии и общему термическому сопротивлению тепловому потоку  $R$ . Величина  $R$  складывается из  $R_0$  (термосопротивление прибора) и  $R_{об}$  (термосопротивление образца).

Чем меньше масса образца и больше контакт с капсулой, тем меньше термосопротивление образца. Для металлических образцов, массой несколько мг и предварительно расплавленных в капсуле:  $R_{об} \approx 0$ .

### Техника подготовки образца

Для обеспечения наилучшего контакта образец-нагреватель и уменьшения эффекта окисления образцов, при нагревании за счет кислорода в воздухе,

наиболее широко применяется метод герметизации образцов, который основан на использовании алюминиевой кюветы с выпуклой крышкой. Исследуемое вещество измельчается до состояния мелкодисперсного порошка и упаковывается в специальный предварительно взвешенный алюминиевый контейнер  $V \approx 0.12 \text{ см}^3$ , который накрывается крышкой и запечатывается на ручном прессе. Данная техника закрывания крышки позволяет получить плотно, но не герметично закрытую кювету. Для летучих, жидких, чувствительных к окислению и т.п. образцов используют специальные кюветы, учитывающие индивидуальные особенности вещества [17].

### **Калибровка прибора ДСК**

С помощью зависимости теплоемкости от температуры можно откалибровать прибор ДСК. Чтобы определить ноль теплоемкости, необходимо провести эксперимент с пустой капсулой (или эталоном, с известной зависимостью теплоемкости). Таким образом мы получим «базовую линию», которая будет соответствовать нулю теплоемкости, для последующих исследуемых образцов. Чтобы откалибровать значения температуры, нам необходимо взять эталон, с известными температурами фазовых переходов и по их значениям проградуировать шкалу температур [14].

### **Анализ данных, получаемых методом ДСК**

Для примера рассмотрим, что будет происходить с полимером при его нагревании, при помощи метода ДСК.

Мы имеем два тигля: в одном есть полимер, а в другом - нет. Наличие в одном из тиглей полимерного образца означает, что в этом тигле, во всем остальном похожем на другой, есть немного больше вещества. А наличие дополнительного вещества означает, что потребуется больше тепла для того, чтобы температура тигля с образцом увеличивалась точно с той же скоростью, что и в эталонном тигле.

Строим график зависимости выделяемого тепла с повышением температуры. По оси  $x$  откладываем температуру, а по оси  $y$  откладываем разницу в количестве теплоты, выделяемой двумя нагревателями при данной

температуре.

### Теплоемкость:

Строим график зависимости тепла, поглощенного полимером, от температуры.

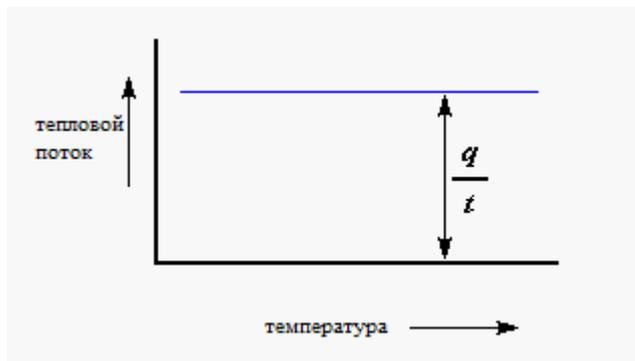


Рисунок 14 – Зависимость теплового потока от температуры

Поток тепла будет показан в единицах тепла,  $q$ , переданных в единицу времени,  $t$ . Скорость нагревания - это приращение температуры  $T$  в единицу времени,  $t$ .

Разделим поток тепла  $\frac{q}{t}$  на скорость нагревания  $\frac{T}{t}$ . В результате мы получим переданное тепло деленное на прирост температуры – теплоемкость.

$$\frac{q/t}{T/t} = \frac{q}{\Delta T} = C_p$$

Таким образом мы определили теплоемкость по графику ДСК.

### Температура стеклования:

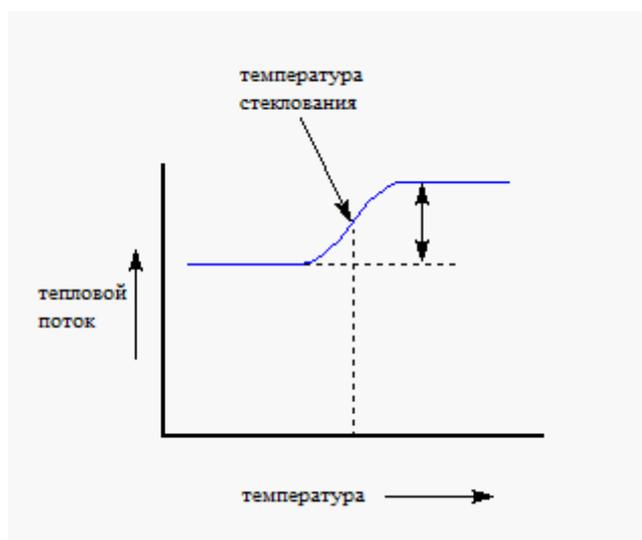


Рисунок 15 – Определение стеклования полимера методом ДСК

Это значит, что теперь мы получаем больший поток тепла. А это значит, что мы также получаем увеличение теплоемкости полимера. Это происходит потому, что в полимере только что произошел процесс стеклования. Полимеры обладают более высокой теплопроводностью при температуре выше температуры стеклования, чем при более низких температурах. Вследствие этого изменения теплопроводности, которое происходит при температуре стеклования полимера, мы можем использовать метод ДСК для измерения температуры стеклования полимера. Вы можете заметить, что перемена происходит не сразу, а растянута на некотором промежутке температур. Это делает выбор одного конкретного значения  $T_g$  несколько затруднительным, но обычно считается, что середина изгиба и является  $T_g$ .

### **Кристаллизация:**

При температурах выше температуры стеклования полимеры становятся весьма подвижными. Они извиваются и складываются, и никогда не остаются долго на одном месте. Когда же достигается нужная температура, полимеры набирают достаточно энергии, чтобы переместиться в весьма упорядоченные структуры, которые и называются кристаллами. Когда полимеры попадают в такие кристаллические структуры, они отдают тепло. Данный спад можно увидеть в потоке теплоты как большой провал на графике зависимости потока теплоты от температуры:

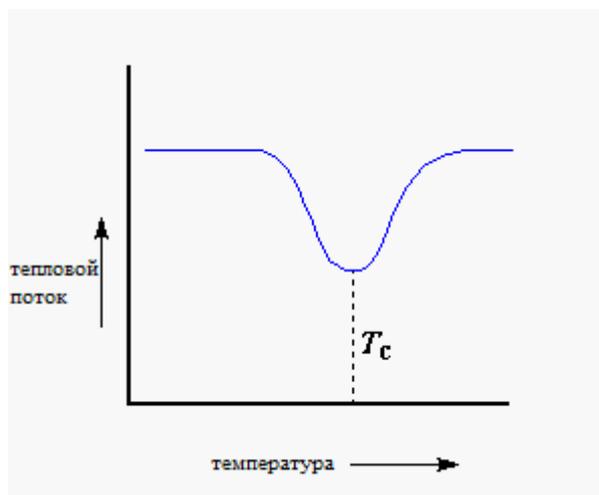


Рисунок 16 – Определение кристаллизации полимера методом ДСК

Температура в самой нижней точке провала обычно считается температурой кристаллизации полимера, или  $T_c$ . Важнее всего то, что этот провал говорит нам о том, что полимер может действительно кристаллизоваться.

Данный переход, когда полимер отдает тепло при кристаллизации называется – экзотермическим переходом.

### **Плавление:**

Если мы нагреем полимер выше его  $T_c$ , мы достигнем еще одного фазового перехода, называемого плавлением. Когда мы достигнем температуры плавления, или  $T_m$ , эти полимерные кристаллы начнут разваливаться, то есть плавится. Макромолекулы покидают свои места в упорядоченной структуре и начинают свободно двигаться. Существует скрытая теплота плавления, также как существует и скрытая теплота кристаллизации. Когда полимерные кристаллы плавятся, они для этого поглощают тепло. Когда достигается температуры плавления, температура полимера не будет подниматься, пока весь кристалл не расплавится. Это значит, что маленький нагреватель под тиглем с образцом должен будет передать полимеру большое количество теплоты, чтобы расплавить кристаллы, и поддерживать такую же скорость роста температуры, что и в пробном тигле. Этот дополнительный поток теплоты при плавлении выглядит как большой пик на кривой графика ДСК:

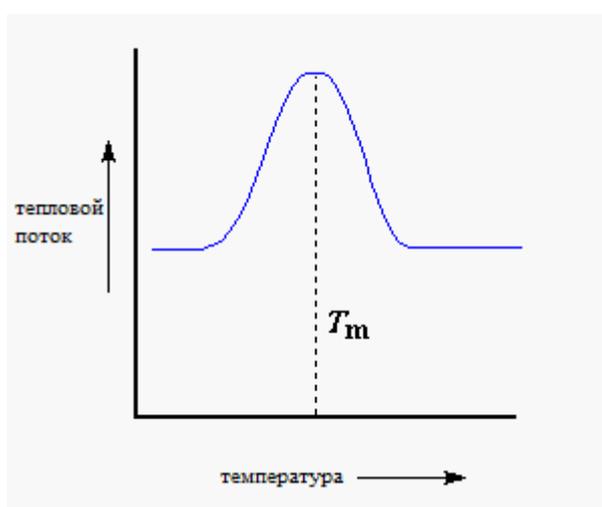


Рисунок 17 – Определение плавления полимера методом ДСК

Поскольку мы должны передать энергию полимеру, чтобы расплавить его,

то плавление является эндотермическим переходом [15].

Сложив все графики, мы получим общую кривую изменения теплового потока от температуры полимера при его фазовых переходах (Рисунок 18). Не всегда все те элементы, которые видно на графике, будут присутствовать на каждом графике метода ДСК. Провал, соответствующий температуре кристаллизации и максимум, соответствующий температуре плавления, будут проявляться только для полимеров, которые могут кристаллизоваться. Для чисто аморфных полимеров на графике не будет видно ни кристаллизации, ни плавления. Но полимеры, в которых присутствуют и кристаллические, и аморфные области, будут характеризоваться всеми теми особенностями, которые мы описали выше.

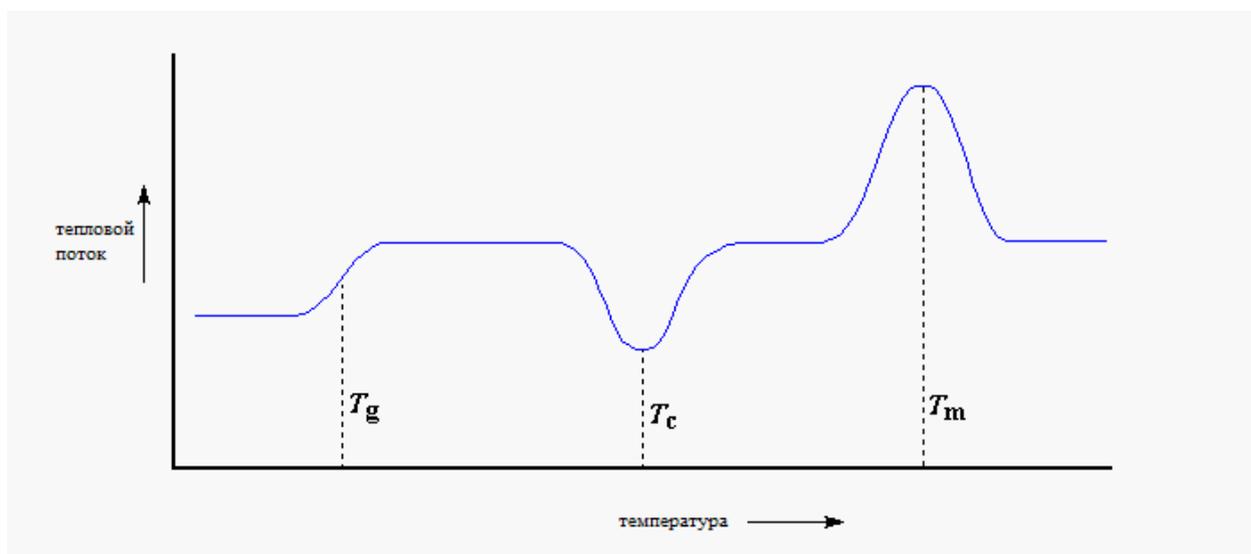


Рисунок 18 – Кривая зависимости теплового потока от температуры полимера

#### 1.4.4 Термогравиметрический анализ (ТГА)

Основа метода – постоянное взвешивание образца в зависимости от температуры при постоянной скорости нагревания в зависимости от времени. При исследовании данным методом, необходимо небольшое количества материала. Однако этого достаточно для получения информации о кинетике и механизме деструкции полимера, твердофазных реакциях материала и его термостойкости. Метод также применяется для определения влаги, содержания остаточных материалов в полимере (наполнитель, растворитель), позволяет

изучать состав композиционных полимерных материалов и процессы сорбции.

В методе ТГА испытания проводят при нескольких скоростях нагрева (3 или более). Для исследования необходимы образцы, отличающиеся по массе не более чем на  $\pm 1\%$ . Наибольшая и наименьшая скорости нагрева должны отличаться друг от друга не менее чем в 5 раз. Чтобы увеличить точность определения записывают массу пустого тигля, который будет использован для испытания материала, предварительно нагретого в тех же условиях атмосферы, при тех же скоростях нагрева и потока газа. Если в процессе испытания происходит изменение массы пустого тигля (что как правило связывают с выталкивающей силой), вычитают кривую, полученную для пустого тигля из кривой, полученной для испытуемого образца, и получают скорректированную термогравиметрическую кривую материала. Для нескольких скоростей нагрева испытания повторяются. Полученные кривые используют для оценки результатов испытаний [16].

На рисунке 19 представлена типичная характерная зависимость потери массы полимера.

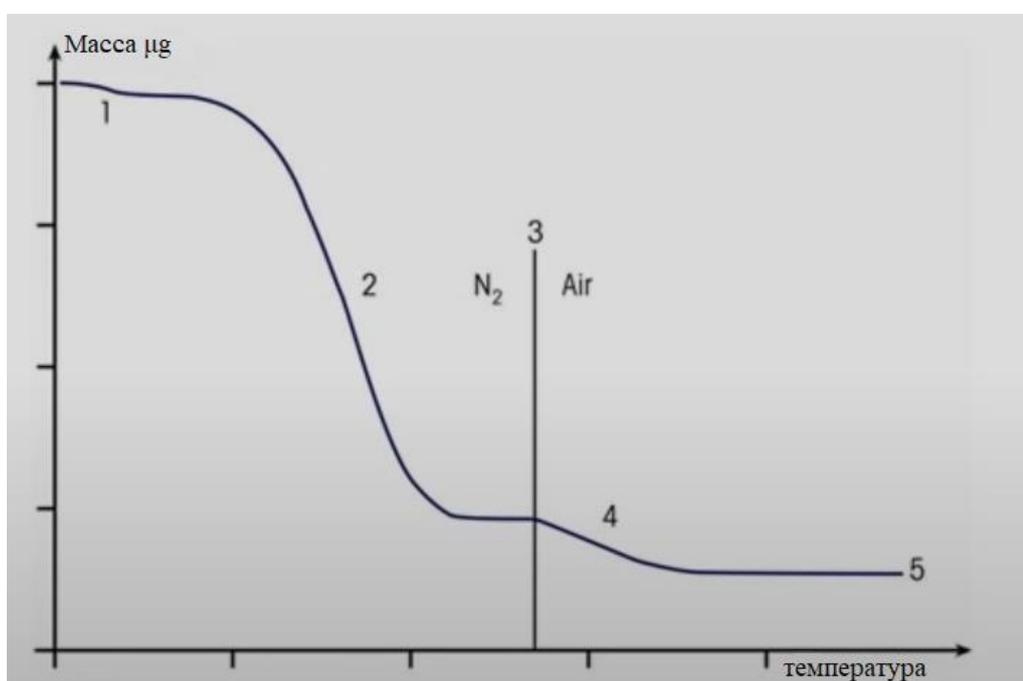


Рисунок 19 – Термогравиметрическая кривая потери массы полимера

1 ступень, показанная на рисунке 19 – это испарение летучих веществ,

таких как влага, растворители и мономеры. 2 – разложение. 3 – атмосфера меняется с азотной на кислородную. 4 – сжигание углерода. 5 – инертный неорганический остаток, содержащий зольные наполнители или стекловолокно.

Прибором ТГА можно проводить динамически с линейным изменением температуры или изотермически. Анализы с изменением температуры позволяют изучать процессы, зависящие от температуры, например потерю влаги, а также исследовать химический состав и реакции. Изотермические измерения в основном используются для определения периода индукции окисления материалов, для изучения высвобождения или поглощения влаги. Изменение атмосферы с инертной на окислительную позволяет сжигать сажу и определять содержание золы или наполнителя. Измерения при пониженном давлении или в вакууме проводят для разделения перекрывающихся эффектов испарения и разложения. Одновременная запись результатов позволяет увидеть экзотермические и эндотермические процессы, такие как стеклование, плавление, кристаллизация, химические реакции и фазовые переходы [16].

На рисунке 20 представлена типичная кривая каучука, полученная методом ТГА.

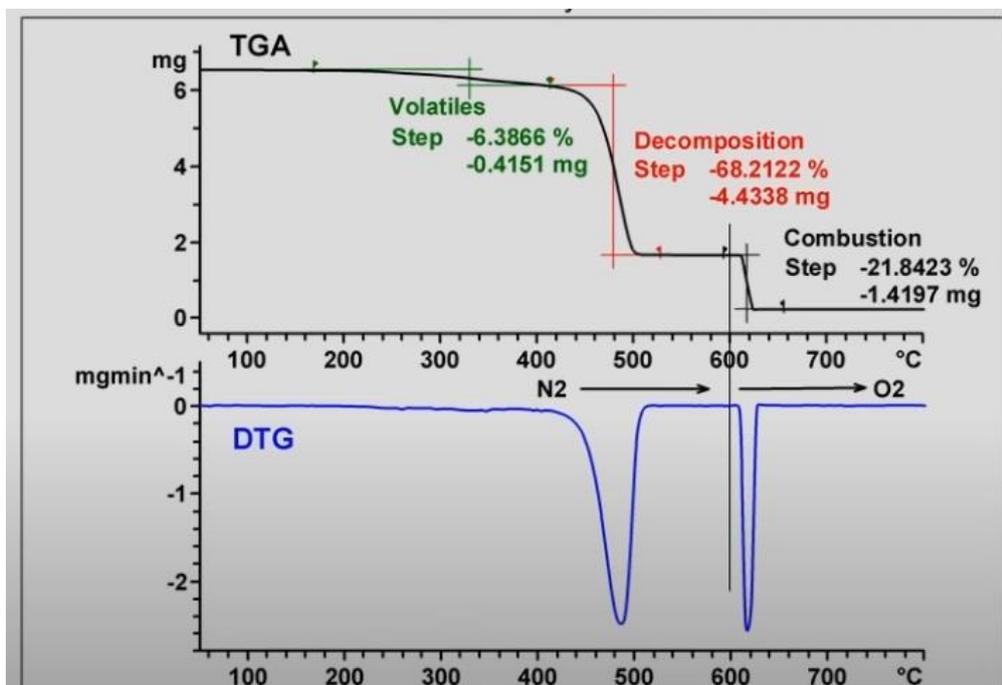


Рисунок 20 – Термогравиметрический анализ каучука

Образец сначала нагрели до 600°C в инертных условиях. В этом

температурной диапозоне испаряются летучие жидкие компоненты, такие как пластификаторы. Сразу после этого следует пиролиз полимера при температуре около 400°C. При 600°C атмосфера изменилась с азота на кислород, что привело к сжиганию сажи. При температуре 800°C неорганические компоненты остаются в виде осадка.

На основании кривой ТГА мы получаем следующий состав образца: 6,4% - пластификатора, 68,2% полимера и 21,8% сажи, а остаток, главным образом оксид цинка, составляет 3,6%. Внизу изображена кривая ДТГ. В этом случае кривая помогает определить границы перекрывающихся эффектов – испарения и разложения.

#### **1.4.5 Динамический механический анализ (ДМА)**

Динамический механический анализ (ДМА) применяется для исследований зависимости вязкоупругих и механических свойств (сжатие, сдвиг, изгиб, растяжение) полимерных материалов от времени, температуры и частоты при воздействии на материал периодических нагрузок.

Во время испытаний синусоидальная нагрузка (усилие  $\sigma$ ) прикладывается к образцу. Это приводит к синусоидальной деформации (деформация  $\varepsilon$ ). Некоторые материалы, например, полимеры, проявляют вязкоупругое поведение, т.е. они обладают как упругими характеристиками (такими, как идеальная пружина), так и вязкими. Это вязкоупругое поведение вызывает смещение кривой деформации относительно кривой приложенного к образцу усилия со сдвигом фазы  $\delta$ . Ответный сигнал (деформация,  $\varepsilon$ ) делится на части «в фазе» и «не в фазе» с помощью преобразования Фурье. Тангенс угла механических потерь (или фактор потерь)  $tg\delta$  представляет собой соотношение между модулем потерь и модулем упругости. Как правило, модуль упругости относится к жесткости материала, в то время как модуль потерь представляет собой меру энергии колебаний, преобразованной в тепловую энергию,  $tg\delta$  характеризует механическое демпфирование или внутреннее трение вязкоупругой системы [12].

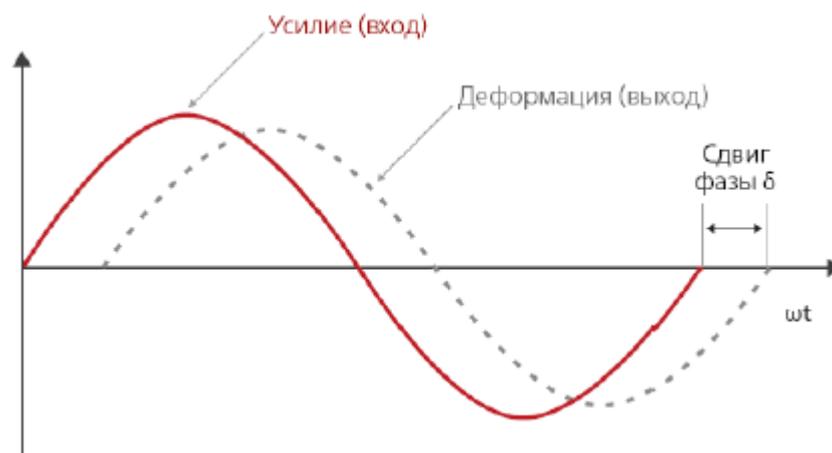


Рисунок 21 – Принцип измерения ДМА

На сегодняшний момент изменение методов термического анализа привело к появлению модульных систем, объединяющие методы ДМА, ДСК и ТГА, с уникальными техническими характеристиками. Данная разработка позволяет одновременно определять различные характеристики исследуемого материала в широком диапазоне частот и температур. Это позволяет получать информацию о механических свойствах полимера, а также о молекулярных перегруппировках и возникающих структурах материала. Появились новые возможности для рационального выбора полимерного материала и процесса контроля качества, переработки, изучения реакций сшивания полимеров, анализа разрушения полимера, и т.д. Все методики подходят для определения энергии активации.

Значение энергии активации может быть определено с помощью зависимостей измерения физико-механических характеристик материала (прочности и/или относительного удлинения) от продолжительности старения для различных температур.

Оценка  $E_a$  процесса теплового старения материала производится по изменению наиболее чувствительной характеристики к изменению температуры. На рисунке 22 изображен графический пример обработки результатов при тепловом старении по изменению характеристики полимера при разных температурах и продолжительности старения.

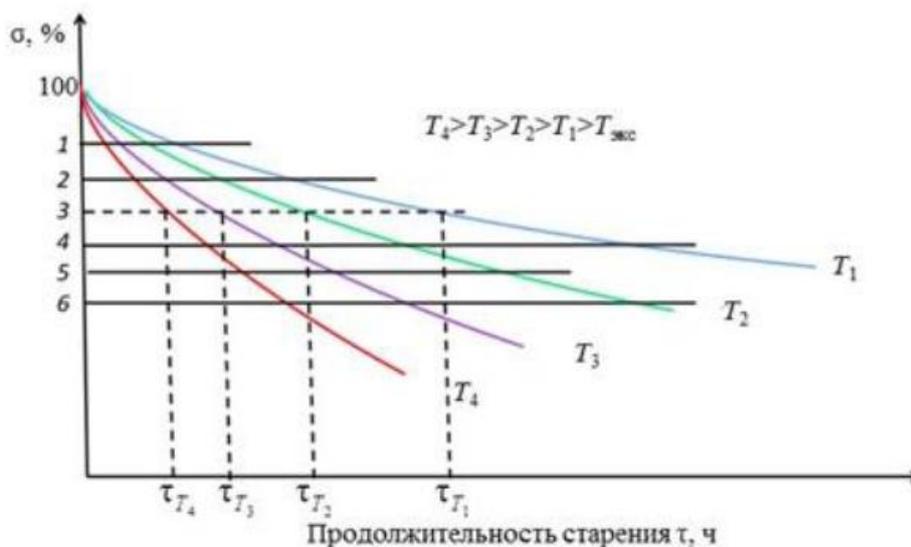


Рисунок 22 – Схема графической обработки результатов при тепловом старении материала

### Заключение

В ходе выполнения магистерской диссертации были изучены методы определения срока службы кабельных изделий, а также методы определения энергии активации материалов. Рассмотрены физико-механическое и тепловые свойства электроизоляционных материалов. Методом дифференциальной сканирующей калориметрией определена энергия активации образца из этиленпропиленовой резины. Проведен анализ результатов, полученных методом ДСК и рассчитан срок службы изоляции кабеля с учетом тепловых нагрузок. Также была определена погрешность полученных результатов. Из таблицы 13 видно, что даже при незначительном увеличении температуры эксплуатации срок службы кабельного изделия уменьшается в разы. Метод дифференциальной сканирующей калориметрии может быть применен для оценки времени работоспособности полимерных электроизоляционных материалов в условиях пренебрежимо малого влияния электрического поля и внешних факторов на интенсивность процессов старения.

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

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

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

Для достижения обозначенной цели необходимо решить следующие задачи:

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

Исследования проводились в Томском политехническом университете. Исследование проводилось с целью определения энергии активации этиленпропиленовой резины методом дифференциально сканирующей калориметрии для расчета срока службы гибкого кабеля. В качестве объекта исследования был выбран гибкий кабель с изоляцией из этиленпропиленовой резины.

## 4.1 Предпроектный анализ

### 4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

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

Потенциальными потребителями являются исключительно юридические лица. Так как испытания являются достаточно дорогостоящими, поэтому услуга будет интересна крупным и средним производственным компаниям, которые применяют полимерные материалы в своей деятельности.

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

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

Целесообразно проводить данный анализ с помощью оценочной карты. Оценочная карта сравнения трех перспективных методов определения энергии активации эластомеров представлена в таблице 14, где К1 – конкурентоспособность для физико-механического метода (ФММ), К2 – конкурентоспособность для метода теплового старения, К3 – конкурентоспособность для метода дифференциально сканирующей калориметрии.

Таблица 14 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б <sub>к1</sub>	Б <sub>к2</sub>	Б <sub>к3</sub>	К <sub>к1</sub>	К <sub>к2</sub>	К <sub>к3</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Технические критерии оценки ресурсоэффективности</b>							
1. Надежность	0,2	4	4	5	0,8	0,8	1,0
2. Удобство в эксплуатации (соответствие требованиям потребителя)	0,18	3	4	4	0,54	0,72	0,72
3. Скорость	0,14	4	3	5	0,56	0,42	0,7
4. Технологичность	0,16	3	4	4	0,48	0,64	0,64

Экономические критерии оценки эффективности							
1. Конкурентоспособность продукта	0,12	3	4	4	0,36	0,48	0,48
2. Цена	0,1	4	4	3	0,4	0,4	0,3
3. Предполагаемый срок эксплуатации	0,1	4	3	4	0,4	0,3	0,4
<b>Итого</b>	<b>1</b>	<b>25</b>	<b>26</b>	<b>29</b>	<b>3,54</b>	<b>3,76</b>	<b>4,24</b>

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

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

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot \text{Б}_i$$

где: К – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

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

$\text{Б}_i$  – балл  $i$ -го показателя.

Основываясь на проведенном анализе конкурентов, можно сказать что проект превосходит конкурентные исследования, что связано с производительностью, а также скоростью разрабатываемого проекта. Однако уязвимость разрабатываемого проекта в том, что требуется больше экономических затрат на его выполнение.

#### 4.1.3 SWOT-анализ

SWOT – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта (таблица 15). Применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта. Анализ проводится в 3 этапа.

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

Таблица 15 – Матрица SWOT-анализа

<b>Сильные стороны</b> С1. Удовлетворение потребительских нужд (исследование необходимых параметров)	<b>Слабые стороны</b> Сл1. Не всегда точны результаты измерений Сл2. Химически вредная среда при работе на
---	--

С2. Возможность быстрых испытаний С3. Большой срок службы установки С4. Отсутствие шумовых признаков при работе на установке	установке Сл3. Необходимость квалифицированного персонала при работе на установке Сл4. Большие затраты на покупку установки
<b>Возможности</b> В1. Увеличение производительности установки В2. Появление дополнительной автоматизированной системы управления В3. Снижение таможенных пошлин на сырье и материалы, используемых при работе на установке В4. Улучшение технологии производства	<b>Угрозы</b> У1. Развитие конкуренции У2. Импорт отдельных частей для ремонта установки У3. Введения дополнительных государственных требований к стандартизации и сертификации продукции У4. Угроза выхода из строя сложных частей установки

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

Интерактивная матрица проекта представлена в таблице 16. Каждый фактор помечается либо знаком «+» (означает сильное соответствие сильных сторон возможностям), либо знаком «-» (что означает слабое соответствие); «0» – если есть сомнения в том, что поставить «+» или «-».

Таблица 16 – Интерактивная матрица проекта

		Сильные стороны проекта			
		С1.	С2.	С3.	С4.
Возможности проекта	В1.	+	+	+	+
	В2.	+	+	-	-
	В3.	-	-	-	-
	В4.	+	+	+	0

		Слабые стороны проекта			
		Сл1.	Сл2.	Сл3.	Сл4.
Возможности проекта	В1.	+	-	+	-
	В2.	-	-	+	-
	В3.	-	-	-	+
	В4.	+	+	+	-

		Сильные стороны проекта			
		С1.	С2.	С3.	С4.
Угрозы	У1.	+	-	-	-
	У2.	+	+	+	-
	У3.	+	-	-	-
	У4.	+	+	+	-

		Слабые стороны проекта			
		Сл1.	Сл2.	Сл3.	Сл4.
Угрозы	У1.	+	+	+	+
	У2.	-	-	-	+
	У3.	-	+	-	0
	У4.	-	-	-	+

В рамках *третьего этапа* должна быть составлена итоговая матрица SWOT-анализа (таблица 17).

Таблица 17 – SWOT-анализ

	<b>Сильные стороны</b>	<b>Слабые стороны</b>
	<p>С1. Удовлетворение потребительских нужд (исследование необходимых параметров)</p> <p>С2. Возможность быстрых испытаний</p> <p>С3. Большой срок службы установки</p> <p>С4. Отсутствие шумовых признаков при работе на установке</p>	<p>Сл1. Не всегда точны результаты измерений</p> <p>Сл2. Химически вредная среда при работе на установке</p> <p>Сл3. Необходимость квалифицированного персонала при работе на установке</p> <p>Сл4. Большие затраты на покупку установки</p>
<p><b>Возможности</b></p> <p>В1. Увеличение производительности установки</p> <p>В2. Появление дополнительной автоматизированной системы управления</p> <p>В3. Снижение таможенных пошлин на сырье и материалы, используемых при работе на установке</p> <p>В4. Улучшение технологии производства</p>	<p>Технический проект имеет высокую производительность и экономичность процесса за счет быстроты исследования и возможности автоматизации проведения испытаний.</p>	<p>Проверка и корректировка полученных результатов. Вероятен недостаток узконаправленного квалифицированного персонала.</p>
<p><b>Угрозы</b></p> <p>У1. Развитие конкуренции</p> <p>У2. Импорт отдельных частей для ремонта установки</p> <p>У3. Введения дополнительных государственных требований к стандартизации и сертификации продукции</p> <p>У4. Угроза выхода из строя сложных частей установки</p>	<p>Создание конкурентоспособного проекта. Необходима своевременная поставка материалов и обнаружение повреждений установки на начальных стадиях, когда замена частей или ремонт установки не составляет значительных затрат.</p>	<p>Некоторые детали установки не подлежат ремонту и требует полной замены, что приведет к затратам. Импорт новых деталей требует дополнительных затрат. Все вышеперечисленные угрозы могут поставить под сомнение рентабельность проекта.</p>

#### 4.1.4 Оценка готовности проекта к коммерциализации

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

проекта (таблица 18).

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

Таблица 18 – Оценка степени готовности проекта к коммерциализации

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

	международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок		
12.	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	5	5
13.	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	5	4
14.	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	5	5
15.	Проработан механизм реализации научного проекта	5	5
	<b>ИТОГО БАЛЛОВ</b>	60	57

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  $B_{\text{сум}}$  равной 60 позволяет говорить о мере готовности научной разработки и ее разработчика к коммерциализации. В итоге получилось, что разработка является перспективной, а уровень имеющихся знаний у разработчика выше среднего.

По результатам оценки выделяются слабые стороны исследования, дальнейшего улучшения необходимо провести маркетинговые исследования рынков сбыта, разработать бизнес-план коммерциализации научной разработки, проработать вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок.

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

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

Инжиниринг будет предполагать предоставление на основе договора

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

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

Данные методы коммерциализации будут наиболее продуктивными в отношении данного проекта.

#### 4.2 Инициация проекта

Группа процессов инициации состоит из процессов, которые выполняются для определения нового проекта или новой фазы существующего. В рамках процессов инициации определяются изначальные цели и содержание и фиксируются изначальные финансовые ресурсы. Определяются внутренние и внешние заинтересованные стороны проекта, которые будут взаимодействовать и влиять на общий результат научного проекта. Данная информация закрепляется в Уставе проекта (таблица 19).

Таблица 19 – Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
Производители кабельной продукции и электрических машин	Создание материала стойкого к действию повышенной температуры эксплуатации

В таблице 20 представлена иерархия целей проекта и критерии достижения целей.

Таблица 20 – Цели и результат проекта

<b>Цели проекта:</b>	Создание материала стойкого к действию повышенной температуры эксплуатации
<b>Ожидаемые результаты проекта:</b>	Результатом проекта являются показатели теплостойкости, относительного удлинения и предела прочности образцов исследуемого материала
<b>Критерии приемки результата проекта:</b>	Исследование физико-механических характеристик проведено в соответствии с ГОСТ 56756-2015

<b>Требования к результату проекта:</b>	Уменьшение предела прочности и увеличение относительного удлинения не должны превышать допустимых норм
---	--

В таблице 21 представлена организационная структура проекта (роль каждого участника, их функции, трудозатраты).

Таблица 21 – Рабочая группа проекта

№ п/п	ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функции	Трудозатраты, час.
1.	Солдатенко Т.М., НИ ТПУ, ст. преподаватель ОЭЭ, ИШЭ	Руководитель проекта	Консультирование, координация деятельности, определение задач, контроль выполнения.	200
2.	Кукушкин А.С., магистрант ИШЭ	Исполнитель по проекту	Анализ литературных источников, отбор проб, подготовка образцов, анализ лабораторных данных, написание работы	350
<b>ИТОГО:</b>				<b>550</b>

Ограничения проекта – это все факторы, которые могут послужить ограничением степени свободы участников команды проекта, а также «границы проекта» – параметры проекта или его продукта, которые не будут реализованными в рамках данного проекта (таблица 22).

Таблица 22 – Ограничения проекта

Фактор	Ограничения/ допущения
3.1. Бюджет проекта, руб.	1511240,14
3.1.1. Источник финансирования	НИ ТПУ
3.2. Сроки проекта:	01.09.2020-31.05.2022
3.2.1. Дата утверждения плана управления проектом	15.09.2020
3.2.2. Дата завершения проекта	31.05.2022

### 4.3 Планирование управления научно-техническим проектом

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

План управления научным проектом должен включать в себя следующие элементы:

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

### 4.3.1 Иерархическая структура работ проекта

Иерархическая структура работ (ИСР) – детализация укрупненной структуры работ. В процессе создания ИСР структурируется и определяется содержание всего проекта (рисунок 28).



Рисунок 28 – Иерархическая структура работ

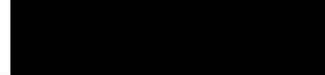
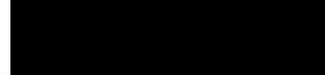
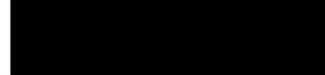
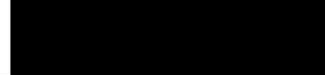
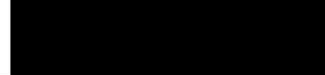
### 4.3.2 План проект

В рамках планирования научного проекта построены календарный график проекта (таблица 23, 24).

Таблица 23 – Календарный план проекта

Название	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников
Утверждение темы магистерской диссертации	7	01.09.20	07.09.20	Кукушкин А.С., Солдатенко Т.М.
Согласование плана работ	7	08.09.20	15.09.20	Кукушкин А.С., Солдатенко Т.М.
Литературный обзор	138	16.09.20	31.01.21	Кукушкин А.С.
Обработка полученных данных и обсуждение результатов	292	01.02.21	20.12.21	Кукушкин А.С., Солдатенко Т.М.
Написание отчета	137	15.01.22	31.05.22	Кукушкин А.С.
<b>Итого:</b>	<b>581</b>			

Таблица 24 – Календарный план график проведения НИОКР по теме

Наименование этапа	Т, дней	2020				2021												2022					
		Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	
Утверждение темы магистерской диссертации	7																						
Согласование плана работ	7																						
Литературный обзор	138																						
Обработка полученных данных и обсуждение результатов	292																						
Написание отчета	137																						



- Кукушкин А.С.



- Кукушкин А.С., Солдатенко Т.М.

#### 4.4 Бюджет научного исследования

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

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

*Сырье, материалы, покупные изделия и полуфабрикаты (за вычетом отходов).* В эту статью включаются затраты на приобретение всех видов материалов, комплектующих изделий и полуфабрикатов, необходимых для выполнения работ по данной теме (таблица 25).

Таблица 25 – Расчет затрат по статье «Сырье и материалы»

Наименование	Количество, шт.	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Тетрадь	2	35,0	70,0
Ручка шариковая	5	30,0	150,0
Карандаш	3	20,0	60,0
Ластик	1	40,0	40,0
Печать	150	2,0	300,0
Образец этиленпропиленовой резины	10	10,0	100,0
Жидкий азот (охлаждение установки)	40	46,25	1850
Термостойкие рукавицы	1	1300,0	1300,0
Энергия	15 кВт·ч	3,0	45,0
Всего за материалы		3915 руб.	
Транспортно-заготовительные расходы (3-5%)			195,75
<b>Итого по статье</b>			<b>4110,75</b>

*Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ. В*

данную статью включены все затраты, связанные с приобретением специального оборудования, необходимого для проведения работ по теме НИР (таблица 26).

Таблица 26 – Расчет затрат по статье «Спецоборудование для научных работ»

№ п/п	Наименование оборудования	Кол-во единиц оборудования	Цена единицы оборудования, руб.	Общая стоимость оборудования, руб.
1	Компьютер (HP)	1	23000,0	23000,0
2	Программное обеспечение MicrosoftOffice	1	5649,0	5649,0
3	Дифференциальный Сканирующий Калориметр Dta TGA Dsc	1	785000,0	785000,0
<b>Итого, руб.:</b>				813649,0

*Расчет основной заработной платы.* В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, рабочих макетных мастерских и опытных производств, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы оплаты труда. Расчет основной заработной платы сводится в таблице 25.

$$C_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп}$$

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

$Z_{доп}$  – дополнительная заработная плата

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

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_{раб}$$

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

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

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

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

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

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

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

при отпуске в 24 раб. дня  $M = 11,2$  месяца, 5-дневная неделя;

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

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

Расчет заработной платы научно – производственного и прочего персонала проекта проводили с учетом работы 2-х человек – научного руководителя и исполнителя. Баланс рабочего времени исполнителей представлен в таблице 27.

Таблица 27 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Магистрант
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней	99	99
- выходные дни	14	14
- праздничные дни		
Потери рабочего времени	24	24
- отпуск	14	14
- невыходы по болезни		
Действительный годовой фонд рабочего времени	214	214

Месячный должностной оклад работника:

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

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

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

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

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

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

$$Z_m = Z_b * K_p, \text{ где}$$

$Z_b$  – базовый оклад, руб.;

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

Основная заработная плата руководителя и магистранта рассчитывается на основании отраслевой оплаты труда. Расчет основной заработной платы приведен в таблице 28.

Таблица 28 – Расчет основной заработной платы

Исполнители	$Z_b$ , руб.	$k_{пр}$	$k_d$	$k_p$	$Z_m$ , руб.	$Z_{дн}$ , руб.	$T_p$ , раб. дн.	$Z_{осн}$ , руб.
Руководитель	17530	1	0,02	1,3	23244,78	1216,55	214	260341,5
Магистрант	1990	-	-	1,3	2587	135,4	214	28974,4

*Дополнительная заработная плата научно-производственного персонала.*

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

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

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

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

$k_{доп}$  – коэффициент дополнительной зарплаты;

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

В таблице 29 приведена форма расчёта основной и дополнительной заработной платы.

Таблица 29 – Заработная плата исполнителей НИИ

Заработная плата	Руководитель	Магистрант
Основная зарплата, руб.	260341,5	28974,4
Дополнительная зарплата, руб.	26034,15	2897,44
Итого по статье $C_{зп}$ , руб.	286 375,65	31 871,84

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

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

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

На 2021 г. в соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%.

Отчисления на социальные нужды составляют:  
 $C_{\text{внеб}} = 0,3 \cdot (260341,5 + 26034,15) = 85912,7$  рублей

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

Затраты на научные и производственные командировки составляют 34722,2 руб.

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

$$C_{\text{накл}} = k_{\text{накл}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}) = 0,8 \cdot (286\,375,65 + 31\,871,84) = 254598$$

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

Таким образом, затраты проекта составляет 1511240,14 , которые приведены в таблице 30.

Таблица 30 – Затраты научно-исследовательской работы

Вид исследования	Затраты по статьям									
	Сырье, материалы (за вычетом возвратных отходов), покупные изделия и полуфабрикаты, руб.	Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ, руб.	Основная заработная плата, руб.	Доп-ая заработная плата, руб.	Отчисления на соц. нужды, руб.	Научные и производственные командировки, руб.	Оплата работ, выполняемых сторонними организациями и предприятиями, руб.	Прочие прямые расходы, руб.	Накладные расходы, руб.	Итого плановая себестоимость, руб.
Данное исследование	4110,75	813649,0	289315,9	28931,59	85912,7	34722,2	-	-	254598,0	<b><u>1511240,1</u></b>
Аналог	5000	535000	674451,2	67445,12	222568,9	74189,63	-	-	593517,06	2172171,9

Операционные затраты, руб.=сырье+амортизация+ЗП (осн+доп)+соц.отч.+науч.ком+контр.расх+накл.расх= 778 956,04 руб.

Амортизация рассчитывается по формуле:

$A_g = C_{перв.} * N_a / 100 = C_{перв.} * 0,1 = 813649 * 0,1 = 81364,9 \text{ руб.}$

#### 4.4.1 Организационная структура проекта

Данный проект представлен в виде проектной организационной структуры. Проектная организационная структура проекта представлена на рисунке 29.



Рисунок 29 – Проектная структура проекта

#### 4.4.2 План управления коммуникациями проекта

План управления коммуникациями отражает требования к коммуникациям со стороны участников проекта (таблица 31).

Таблица 31 – План управления коммуникациями

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

#### 4.4.3 Реестр рисков проекта

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

Информация по возможным рискам сведена в таблицу 32.

Таблица 32 – Реестр рисков

№	Риск	Вероятность наступления	Влияние риска	Уровень риска	Способы смягчения риска	Условия наступления
1	Неточность метода анализа	2	5	Низкий	Внешний и внутренние анализы	Низкая точность метода анализа
2	Погрешность расчетов	3	5	Средний	Пересчет, проверка	Невнимательность
3	Отсутствие интереса к результатам исследования	2	5	Низкий	Привлечение предприятий, публикация результатов	Отсутствие результатов исследования

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

##### **4.5.1 Оценка абсолютной эффективности исследования**

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

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

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

Расчёт NPV осуществляется по следующей формуле:

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

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

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

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

$n$  – горизонт расчета;

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

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

Расчет чистой текущей стоимости представлен в таблице 33. При расчете рентабельность проекта составляла 20-25 %, норма амортизации -10 %.

$Аг = Сперв * На / 100$ , себ = 1511240,14 р., **Выручка = себестоимость \* 1,25 = 1889050,2 руб.**

Таблица 33 – Расчет чистой текущей стоимости по проекту в целом

№	Наименование показателей	Шаг расчета				
		0	1	2	3	4
1	Выручка от реализации, руб.	0	<b>1889050,2</b>	<b>1889050,2</b>	<b>1889050,2</b>	<b>1889050,2</b>
2	Итого приток, руб.	0	1889050,2	1889050,2	1889050,2	1889050,2
3	Инвестиционные издержки, руб.	<b>-1511240,1</b>	0	0	0	0
4	Операционные затраты, руб. (35%от бюджета)	0	778956,04	778956,04	778956,04	778956,04
5	Налогооблагаемая прибыль, руб. (1-4)	0	1110094,1	1110094,1	1110094,1	1110094,1
6	Налоги 20 %, руб.(5*20%)	0	222018,8	222018,8	222018,8	222018,8
8	Чистая прибыль, руб.(5-6)	0	888075,2	888075,2	888075,2	888075,2
9	Чистый денежный поток (ЧДП), руб.(чистая прибыль+амортизация)	-1511240,1	969440,1	969440,1	969440,1	969440,1
10	Коэффициент дисконтирования при $i=20\%$ (КД)	1	<u>0,833</u>	<u>0,694</u>	<u>0,578</u>	<u>0,482</u>
11	Чистый дисконтированный денежный поток (ЧДД), руб.(9*10)	-1511240,1	<b>807543,6</b>	<b>672791,4</b>	<b>560336,3</b>	<b>467270,1</b>

12	$\Sigma$ ЧДД	2507941,4 руб.
12	Итого NPV	996701,3 руб.

$$NPV = 2507941,4 \text{ руб.} - 1511240,1 = 996701,3 \text{ руб.} > 0$$

*Коэффициент дисконтирования* рассчитан по формуле:

$$КД = \frac{1}{(1 + i)^t}$$

где:  $i$  – ставка дисконтирования, 20 %; (10%)

$t$  – шаг расчета.

Таким образом, чистая текущая стоимость по проекту в целом составляет 1514147,2 рублей, что позволяет судить об его эффективности.

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

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

где: ЧДД - чистый денежный поток, руб.;

$I_0$  – начальный инвестиционный капитал, руб.

Таким образом PI для данного проекта составляет:

$$PI = \frac{2507941,4}{1511240,1} = 1,66$$

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

**Внутренняя ставка доходности (IRR).** Значение ставки, при которой обращается в нуль, носит название «внутренней ставки доходности» или IRR. Формальное определение «внутренней ставки доходности» заключается в том, что это та ставка дисконтирования, при которой суммы дисконтированных притоков денежных средств равны сумме дисконтированных оттоков или =0. По разности между IRR и ставкой дисконтирования  $i$  можно судить о запасе

экономической прочности инвестиционного проекта. Чем ближе IRR к ставке дисконтирования  $i$ , тем больше риск от инвестирования в данный проект.

Между чистой текущей стоимостью (NPV) и ставкой дисконтирования ( $i$ ) существует обратная зависимость, которая представлена в таблице 34 и на рисунке 30.

Таблица 34 – Зависимость NPV от ставки дисконтирования

№	Наименование показателя	0	1	2	3	4	
1	Чистые денежные потоки, руб.	-1511240,1	969440,1	969440,1	969440,1	969440,1	NPV, руб.
2	Коэффициент дисконтирования						
	0,1	1	0,909	0,826	0,751	0,683	
	0,2	1	0,833	0,694	0,578	0,482	
	0,3	1	0,769	0,592	0,455	0,350	
	0,4	1	0,714	0,510	0,364	0,260	
	0,5	1	0,667	0,444	0,295	0,198	
	0,6	1	0,625	0,390	0,244	0,153	
	0,7	1	0,588	0,335	0,203	0,112	
	0,8	1	0,556	0,309	0,171	0,095	
	0,9	1	0,526	0,277	0,146	0,077	
	1	1	0,500	0,250	0,125	0,062	
3	Дисконтированный денежный поток, руб.						
	0,1	-1511240,1	881221,0	800757,5	728049,5	662127,6	1560915,5
	0,2	-1511240,1	807543,6	672791,4	560336,3	467270,1	996701,4
	0,3	-1511240,1	745499,4	573908,5	441095,2	339304	588567,1
	0,4	-1511240,1	692180,2	494414,5	352876,1	252054,4	280285,2
	0,5	-1511240,1	646616,5	430431,4	285984,8	191949,1	43741,8
	0,6	-1511240,1	605900,0	378081,6	236543,3	148324,3	-142390,6
	0,7	-1511240,1	570030,7	324762,4	196796,3	108577,3	-311073,2
	0,8	-1511240,1	539008,6	299557	165774,2	92096,8	-414803,3
	0,9	-1511240,1	509925,4	268534,9	141538,2	74646,8	-516594,5
	1,0	-1511240,1	484720,0	242360	121180,0	60105,2	-602874,7

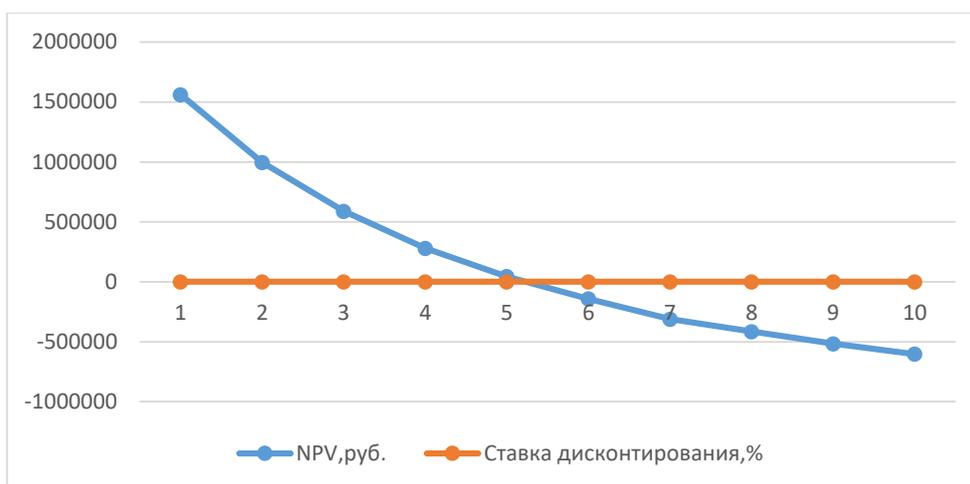


Рисунок 30 – Зависимость NPV от ставки дисконтирования

Из таблицы и графика следует, что по мере роста ставки дисконтирования чистая текущая стоимость уменьшается, становясь отрицательной. Значение ставки, при которой NPV обращается в нуль, носит название «внутренней ставки доходности» или «внутренней нормы прибыли». Из графика получаем, что IRR составляет 0,51.

$IRR > i$ , проект эффективен.

Запас экономической прочности проекта:  $51\% - 20\% = 31\%$

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

Наиболее приемлемым методом установления дисконтированного срока окупаемости является расчет кумулятивного (нарастающим итогом) денежного потока (таблица 35).

Таблица 35 – Дисконтированный срок окупаемости

№	Наименование показателя	Шаг расчета				
		0	1	2	3	4
1	Дисконтированный чистый денежный поток ( $i = 0,20$ ), руб.	-1511240,1	807543,6	672791,4	560336,3	467270,1
2	То же нарастающим итогом, руб.	-1511240,1	-23696,5	227082,1	529431,2	578102,3
3	Дисконтированный срок окупаемости	$DRR_{дск} = 1 + (23696,5 / 672791,4) = 1,03$ года				

**Социальная эффективность научного проекта** учитывает социально-экономические последствия осуществления научного проекта для общества в

целом или отдельных категорий населений или групп лиц, в том числе как непосредственные результаты проекта, так и «внешние» результаты в смежных секторах экономики: социальные, экологические и иные внеэкономические эффекты (таблица 36).

Таблица 36 – Критерии социальной эффективности

ДО	ПОСЛЕ
Отсутствие более оптимального теплостойкого материала, предназначенного для изоляции кабельного изделия.	Получена изоляция кабельного изделия из материала более стойкого к температуре, по сравнению к аналогам при одинаковой эксплуатации.
Нехватка быстрых и относительно точных методов определения срока службы кабельного изделия.	Получена более быстрая методика определения важного критерия – энергии активации, необходимая для расчета срока службы кабельного изделия, которая в свою очередь может быть применима и в других методах.

#### 4.5.2 Оценка сравнительной эффективности исследования

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

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

Интегральный финансовый показатель разработки определяется по следующей формуле:

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

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

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

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

исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

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

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

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

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

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

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

$n$  – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности приведен в форме таблицы (таблице 37).

Таблица 37 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии \ ПО	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Аналог 1	Аналог 2
1. Выход продукта	0,20	5	5	4
2. Удобство в эксплуатации	0,15	4	3	4
3. Надежность	0,20	5	4	3
4. Безопасность	0,15	4	3	4
5. Простота эксплуатации	0,12	4	4	5
6. Возможность автоматизации данных	0,18	5	3	4
Итого	1	27	22	24

$$I_m^p = 5 \cdot 0,20 + 4 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,12 + 5 \cdot 0,18 = 4,58$$

$$I_1^A = 5 \cdot 0,20 + 3 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,2 + 3 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,12 + 3 \cdot 0,18 = 3,72$$

$$I_2^A = 4 \cdot 0,20 + 4 \cdot 0,15 + 3 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,12 + 4 \cdot 0,18 = 3,92$$

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

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

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

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

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

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

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

Сравнительная эффективность разработки по сравнению с аналогами представлена в таблице 38.

Таблица 38 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Разработка	Аналог 1	Аналог 2
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,2	0,2	0,18
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,58	3,72	3,92
3	Интегральный показатель эффективности	20,8	23,25	19,6
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,02	1,01	1,0

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

ресурсной эффективности.

В ходе выполнения раздела финансового менеджмента определена чистая текущая стоимость, (NPV), равная 996701,3 руб.; индекс доходности  $PI=1,66$ , внутренняя ставка доходности  $IRR=51\%$ , срок окупаемости  $PP_{дск}=1,03$  года.

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

## Список использованной литературы

1. Основы кабельной техники: учебник для студ. высш. учеб. заведений / [В. М. Леонов, И. Б. Пешков, И. Б. Рязанов, С. Д. Холодный]; под ред. И. Б. Пешкова. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 432 с.;
2. Ковригин Л. А. Основы кабельной техники. Конспект лекций. Пермь, ПГТУ, 2002 г.;
3. Специальные кабельные изделия: учебное пособие / В.М. Аникеенко, И.В. Флеминг; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 127 с.;
4. Глупушкин П.М. Кабельные резины. – М.: Энергия, 1986. – 352 с.
5. Григорьян А.Г., Дикерман Д.Н. Технология производства кабелей и проводов с применением пластмасс и резин. – М.: Машиностроение, 2011. – 367 с.;
6. Физика и химия полимеров. – Зуев В.В., Успенская М.В., Олехнович А.О.. Учеб. пособие. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2010 – 45 с.;
7. Книга о полимерах: свойства и применение, история и сегодняшний день материалов на основе высокомолекулярных соединений / Е.Б. Свиридов, В.К. Дубовый; Сев. федеральный университет. – 2-е изд., испр. и доп. – Архангельск: САФУ, 2016. – 392 с.: ил.;
8. Основные свойства полимеров: учебное пособие / В. М. Сутягин, О. С. Кукурина, В. Г. Бондалетов; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 96 с.;
9. И.А. Новаков, В.Ф. Каблов, И.П. Петрюк, Микро- и наноструктура и свойства эластомерных материалов. ВолгГТУ, Волгоград, 2012. 112 с.;
10. А.Н. Гайдадин, И.П. Петрюк, В.Ф. Каблов, Каучук и резина, 1, 7-10, 2008;
11. Жданов Ю.С., Попов О.А. Применение этиленпропиленовой резины в кабельной технике // Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2014. – № 10. – С. 70–78;

12. N. Fuse, M. Kanegami, H. Misaka, H. Homma, and T. Okamoto, “Mechanical aging trend in ethylene propylene rubber-insulated safety cables sampled from BWR nuclear power containment,” IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 21, pp. 571–581 2014;

13. А. Н. Гайдадин, И. П. Петрюк, Д. В. Костерин – Оценка кинетических параметров высокотемпературного старения резин на основе этиленпропиленового каучука;

14. Харитонов Е.П., Задача. Основы дифференциальной сканирующей калориметрии, *метод.пособ.* МГУ, 2010.

15. ГОСТ 56756-2015 (ИСО 11357-6:2008) ПЛАСТМАССЫ. Дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК). Часть 6. Определение времени окислительной индукции (изотермическое ВОИ) и температуры окислительной индукции (динамическое ТОИ). М.: Стандартформ. 2016. С. 12;

16. ГОСТ 56722-2015 (ИСО 11358-2:2014) ПЛАСТМАССЫ. Термогравиметрия полимеров. Часть 2. Определение энергии активации. М.: Стандарт-форм. 2016;

17. ГОСТ Р 57996-2017. Композиты полимерные. Дифференциальная сканирующая калориметрия. Определение энергии активации, предэкспоненциального множителя и порядка реакции;

18. ГОСТ 27.602–89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения;

19. Власов А. Б. К вопросу о сроке службы кабелей с резиновой изоляцией // Судостроение. 2003, № 1. С. 45–47.

20. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие / Н.А. Гаврикова, Л.Р. Тухватулина, И.Г. Видяев, Г.Н. Серикова, Н.В. Шаповалова; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 73 с.

21. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30 декабря 2001 г. N 197-

### ФЗ (ТК РФ)

22. ГОСТ 12.2.033-78 Рабочее место при выполнении работ стоя.
23. ГОСТ 12.2.032-78 Рабочее место при выполнении работ сидя.
24. ГОСТ 12.0.003-2015 «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация»
25. СанПиН 2.2.4.1191-03. Электромагнитные поля в производственных условиях
26. СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95\*
27. СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение
28. Безопасность жизнедеятельности: практикум / Ю.В.Бородин, М.В.Василевский, А.Г.Дашковский, О.Б.Назаренко, Ю.Ф.Свиридов, Н.А.Чулков, Ю.М.Федорчук. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 101 с.
29. СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания»;
30. ГОСТ 12.1.006-84 ССБТ. Электромагнитные поля радиочастот. Общие требования безопасности;
31. ГОСТ Р 59789-2021 «Защита зданий и сооружений от повреждений и защита людей и животных от электротравматизма»;
32. ГОСТ Р 12.1.009-2017 ССБТ. Электробезопасность;