

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»



Инженерная школа природных ресурсов
 Направление подготовки Химическая технология
 Отделение химической инженерии

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Использование моно- и многослойных наноразмерных трубок углерода в качестве наполнителей при переработке сополимера пропилен/этилен

УДК 678.742.3-134.22:546.26-31-023.846

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2ДМ6А	Гарновская Оксана Дмитриевна		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ст.преподаватель ОХИ	Троян А.А.	к.х.н		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

Консультант от ООО «НИОСТ»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
и.о. директора Дирекции по химии и переработке полимеров	Бауман Н.А.	к.т.н.		

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Креницына З.В.	к.т.н, доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОКД	Король И.С.	к.х.н, доцент		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель ООП	Бондалетова Л.И.	к.х.н., доцент		

Томск – 2018 г.

Планируемые результаты обучения по ООП

Код результата	Результат обучения
<i>Профессиональные компетенции</i>	
P1	Применять <i>глубокие</i> естественно-научные, математические и инженерные знания для создания <i>новых</i> материалов
P2	Применять <i>глубокие знания</i> в области современных технологий химического производства для решения <i>междисциплинарных</i> инженерных задач
P3	Ставить и решать <i>инновационные задачи инженерного анализа</i> , связанные с созданием материалов и изделий, с использованием системного анализа и моделирования объектов и процессов химической технологии
P4	Разрабатывать химико-технологические процессы, <i>проектировать</i> и использовать <i>новое</i> оборудование для создания материалов, конкурентоспособных на <i>мировом</i> рынке
P5	Проводить теоретические и экспериментальные <i>исследования</i> в области создания <i>новых</i> материалов, современных химических технологий, нанотехнологий
P6	Внедрять, <i>эксплуатировать</i> современные высокотехнологичные линии автоматизированного производства, обеспечивать их <i>высокую эффективность</i> , соблюдать правила охраны здоровья и безопасности труда на химическом производстве, выполнять требования по защите окружающей среды
<i>Универсальные компетенции</i>	
P7	Использовать <i>глубокие знания по проектному менеджменту</i> для ведения <i>инновационной</i> инженерной деятельности с учетом юридических аспектов защиты интеллектуальной собственности
P8	<i>Активно</i> владеть <i>иностраннным языком</i> на уровне, позволяющем работать в иноязычной среде, разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты инновационной инженерной деятельности
P9	Эффективно работать индивидуально, в качестве <i>члена и руководителя группы</i> , состоящей из специалистов различных направлений и квалификаций, демонстрировать ответственность за результаты работы и готовность <i>следовать корпоративной культуре</i> организации
P10	Демонстрировать <i>глубокие знания социальных, этических и культурных аспектов</i> инновационной инженерной деятельности, компетентность в вопросах <i>устойчивого развития</i>
P11	<i>Самостоятельно учиться</i> и непрерывно <i>повышать квалификацию</i> в течение всего периода профессиональной деятельности

Министерство образования и науки Российской Федерации
 Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
 высшего профессионального образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**



Инженерная школа природных ресурсов
 Направление подготовки Химическая технология
 Отделение химической инженерии

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП

 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

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

Студенту:

Группа	ФИО
2ДМ6А	Тарновской Оксане Дмитриевне

Тема работы:

Утверждена приказом проректора-директора (директора) (дата, номер)		№ 9666/с от 08.12.2017
---	--	------------------------

Срок сдачи студентом выполненной работы:	5.06.2018
--	-----------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Объектом исследования является статсополимер пропилена с этиленом и композиты на его основе с углеродными наполнителями (УНТ, технический углерод, смеси «технический углерод/УНТ») различного состава. Исходные данные: результаты литературно-патентного анализа и экспериментальные данные, полученные при прохождении практики в ЛСиПП ООО «НИОСТ».</p>
<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<p>В работе изучен процесс переработки статсополимера пропилена с этиленом с использованием в качестве наполнителей углеродных материалов. Был проведен аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки и техники в производстве полимерных нанокомпозитов. Разработаны разделы: обзор литературы, объект и методы исследования, результаты и их обсуждение, финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение, социальная ответственность. Заключение по работе.</p>

Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	1) Презентация
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i>	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	к.т.н., доцент ОСГН Криницына З.В.
Социальная ответственность	к.х.н., доцент ОКД Король И.С.
Polymer-Nanokomposite und ihre Herstellung	к.ф.н., ст.преподаватель ОИЯ Щеголихина Ю.В.
Названия разделов, которые должны быть написаны на иностранном языке:	
На русском: Полимерные нанокompозиты и их получение	
На немецком: Polymer-Nanokomposite und ihre Herstellung	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	15.09.2016
---	------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ст.преподаватель	Троян А.А.	к.х.н		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2ДМ6А	Гарновская Оксана Дмитриевна		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 130 с., 36 рис., 42 табл., 81 источников, 1 прил.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки, технический углерод, полипропилен, экструзия, электропроводность.

Объектом исследования является: трубная марка сополимера пропилен/этилен (PPR003EX/1) и композиты на её основе с углеродными наполнителями (УНТ, технический углерод, смеси «технический углерод/УНТ») различного состава

Цель работы: изготовление электропроводящих полимерных композиционных материалов путём введения минимально возможных количеств углеродных наполнителей

В процессе исследования проводились: приготовление ряда композитов на основе сополимера пропилен/этилен и углеродных наполнителей; изучение электропроводящих и физико-механических свойств.

В результате исследования были установлены оптимальные количества углеродных наполнителей и получены композиции с высокими электропроводящими и физико-механическими свойствами.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: композиции с оптимальным составом обладают объемным сопротивлением 10^4 Ом*см, модулем упругости при изгибе 970-1070 МПа, прочностью при разрыве 24-26,6 МПа.

Степень внедрения: планируется

Область применения: трубопроводные системы горючих газов и жидкостей

Экономическая эффективность/значимость работы: получение композиций на основе сополимера пропилен/этилен и углеродных наполнителей позволит существенно повысить качество продукции, а также регулировать затраты на процесс путем варьирования состава углеродных наполнителей.

Обозначения и сокращения

ПО – полиолефины

ПП – полипропилен

ПЭ – полиэтилен

ПП/ПЭ – статистический сополимер пропилена с этиленом

ПМ – полимерный материал

КМ – композиционный материал

ПКМ – полимерный композиционный материал

ЭПМ – электропроводящий полимерный материал

ПТР – показатель текучести расплава

СВМПЭ – сверхвысокомолекулярный полиэтилен

НК – нанокompозит

НЧ – наночастица

УНТ – углеродные нанотрубки

о-УНТ – монослойные углеродные нанотрубки

д-УНТ – двухслойные углеродные нанотрубки

м-УНТ – многослойные углеродные нанотрубки

т-УНТ – тонкослойные углеродные нанотрубки

УНВ – углеродные нановолокна

ММТ – монтмориллонит

СЭМ – сканирующая электронная микроскопия

Нормативные ссылки

В настоящей работе использованы следующие стандарты:

1. ГОСТ 20214-74. Пластмассы электропроводящие. Метод определения удельного объемного электрического сопротивления при постоянном напряжении. – М.: Издательство стандартов, 1992. – 12 с.
2. ГОСТ 11645-73. Пластмассы. Метод определения показателя текучести расплава термопластов. – М.: Издательство стандартов, 1994. – 8с.
3. ГОСТ 32656-2014 (ISO 527). Композиты полимерные. Методы испытаний. Испытания на растяжение. – М.: Стандартиформ, 2014. – 38 с.
4. ГОСТ 4648-2014 (ISO 178). Пластмассы. Метод испытания на статический изгиб. – М.: Стандартиформ, 2014. – 20 с.
5. ГОСТ 19109-84 (ISO 180, ASTM D256). Пластмассы. Метод определения ударной вязкости по Изоду. – М.: Издательство стандартов, 1989. – 7 с.
6. ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности. – М.: Стандартиформ, 2014. – 27 с.
7. ГОСТ 12.1.029-80 ССБТ. Средства и методы защиты от шума. Классификация. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2001. – 3 с.
8. ГОСТ 12.1.007-76 ССБТ. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности. – М.: Стандартиформ, 2007. – 4 с.
9. ГОСТ Р 12.1.019-2009 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты. – М.: Стандартиформ, 2010. – 32 с.
10. ГОСТ 12.2.003-91 ССБТ. Оборудование производственное. Общие требования безопасности. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2001. – 20 с.
11. ГОСТ Р 54533-2011. Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Руководящие принципы и методы утилизации полимерных отходов. – М.: Стандартиформ, 2013. – 14 с.

12. ГОСТ 22269-76. Система «человек-машина». Рабочее место оператора. Взаимное расположение элементов рабочего места. – М.: Издательство стандартов, 1988. – 4 с.

13. ГОСТ 12.2.049-80. ССБТ. Оборудование производственное. Общие эргономические требования. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2002. – 32 с.

Оглавление

Введение	18
1 Обзор литературы	20
1.1 Общие представления о нанокompозитах	20
1.2 Полиэтилен и полипропилен: общая характеристика	21
1.3 Наноразмерные наполнители для полимеров	23
1.3.1 Углеродные наполнители	24
1.3.1.1 Технический углерод и наносаж	25
1.3.1.2 Углеродные нанотрубки	26
1.3.1.3 Углеродные нановолокна	30
1.3.1.4 Фуллерены	31
1.3.2 Свойства нанокompозитов на основе углеродных наполнителей	32
1.4 Методы получения полимерных нанокompозитов	34
1.4.1 Смешение в расплаве	35
1.4.2 Смешение в растворе	36
1.4.3 Синтез <i>in situ</i>	37
1.4.4 Золь-гель метод	38
1.4.5 Крейзинг	39
1.5 Выбор направления исследования	40
2 Объект и методы исследования	43
2.1 Характеристика исходных компонентов	43
2.1.1 Статсополимер пропилена с этиленом	43
2.1.2 Углеродные нанотрубки	43
2.1.3 Технический углерод	44
2.1.4 Стабилизатор Irganox B-215	45
2.1.5 Стеарат кальция	46
2.2 Характеристика оборудования	46
2.2.1 Двухшнековый экструдер Scietific LTE-20-44	46

2.2.2	Одношнековый экструдер Brabender	47
2.2.3	Двухроторный смеситель Brabender	48
2.2.4	Лабораторный смеситель Zeppelin Henschel FML 4	49
2.2.5	Вальцы Collin W110	49
2.2.6	Пресс Collin P220	50
2.3	Методика проведения эксперимента	50
2.3.1	Приготовление мастербатча сажи	51
2.3.2	Приготовление мастербатчей углеродных нанотрубок	51
2.3.3	Приготовление композиций на основе технического углерода и углеродных нанотрубок	52
2.4	Методы исследования	53
2.4.1	Определение объемного поверхностного сопротивления	53
2.4.2	Проведение механических испытаний	54
2.4.2.1	Испытания на растяжение	54
2.4.2.2	Испытания на изгиб	54
2.4.2.3	Метод измерения ударной вязкости по Изоду	55
2.4.3	Определение показателя текучести расплава	56
2.4.4	Сканирующая электронная микроскопия	56
3	Результаты и их обсуждение	57
3.1	Исследование влияния количества углеродных нанотрубок на удельное объемное сопротивление и физико-механические свойства композитов	57
3.1.1	Исследование влияния количества углеродных нанотрубок на удельное объемное сопротивление композитов	57
3.1.2	Исследование влияния количества углеродных нанотрубок на физико-механические свойства композитов	57

3.2	Исследование влияния количества технического углерода на удельное объемное сопротивление и физико-механические свойства композитов	59
3.2.1	Исследование влияния количества технического углерода на удельное объемное сопротивление	59
3.2.2	Исследование влияния количества технического углерода на физико-механические свойства композитов	60
3.3	Исследование влияния количества смеси технической углерод/углеродные нанотрубки на удельное объемное сопротивление и физико-механические свойства композитов	63
3.3.1	Исследование влияния количества смеси технической углерод/углеродные нанотрубки на удельное объемное сопротивление композитов	63
3.3.2	Исследование влияния количества смеси технической углерод/углеродные нанотрубки на физико-механические свойства композитов	66
3.4	Исследование морфологии и структуры композиций	70
4	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	73
4.1	Предпроектный анализ	73
4.1.1	Потенциальные потребители результатов исследования	73
4.1.2	Диаграмма Исикавы	74
4.1.3	Оценка готовности проекта к коммерциализации	74
4.1.4	Методы коммерциализации научно-технического исследования	76
4.2	Инициация проекта	76
4.2.1	Цели и результаты проекта	76

4.2.2	Организационная структура проекта	77
4.2.3	Ограничения и допущения проекта	78
4.3	Планирование управления научно-техническим проектом	79
4.3.1	Иерархическая структура работ проекта	79
4.3.2	Контрольные события проекта	79
4.3.3	План проекта	80
4.3.4	Бюджет научного исследования	81
4.3.4.1	Сырье, материалы, покупные изделия и полуфабрикаты (за вычетом отходов)	81
4.3.4.2	Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	82
4.3.4.3	Расчет амортизационных отчислений	83
4.3.4.4	Основная заработная плата	84
4.3.4.5	Дополнительная заработная плата научно-производственного персонала	86
4.3.4.6	Отчисления на социальные нужды	87
4.3.5	Организационная структура проекта	87
4.3.6	Матрица ответственности	88
4.3.7	План управления коммуникациями проекта	89
4.3.8	Реестр рисков проекта	89
4.3.9	План управления контрактами и поставками	90
4.4.1	Оценка сравнительной эффективности исследования	91
5	Социальная ответственность	95
5.1	Производственная безопасность	95
5.1.1	Анализ вредных факторов производства	97
5.1.2	Анализ опасных факторов производства	102
5.2	Экологическая безопасность	103
5.3	Безопасность в чрезвычайных ситуациях	104

5.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	105
Заключение	106
Список публикаций	107
Список использованных источников	108
Приложение А	117

Введение

В настоящее время наиболее крупнотоннажными и востребованными полимерами из всего ассортимента выпускаемых промышленностью являются полиолефины (ПО), причем актуальной задачей также является поиск технических решений направленных на упрощение их переработки и создание новых типов композиционных материалов (КМ) на их основе. Одним из способов улучшения определённых свойств ПО является введение наноразмерных наполнителей, которые характеризуются высокой эффективностью при относительно невысоком содержании в КМ, что, позволяет выделить такой подход, как минимум, с точки зрения экономической целесообразности. Исследования последних лет выделяют углеродные нанотрубки (УНТ) как наиболее перспективные нанообъекты, позволяющие создавать материалы с принципиально новыми свойствами.

Цель: изготовление электропроводящих полимерных композиционных материалов путём введения минимально возможных количеств углеродных наполнителей.

Задачи:

1) Приготовление композитов на основе статистического сополимера пропилена с этиленом (ПП/ПЭ) с добавлением различных количеств углеродных наполнителей (УНТ, технический углерод, смеси «технический углерод/УНТ»);

2) Исследование влияния количества углеродных наполнителей и особенностей их введения на удельное объемное сопротивление (ρ_v) и физико-механические свойства полученных материалов.

3) Определение оптимального состава углеродных наполнителей в композитах с удовлетворительными электропроводящими и физико-механическими свойствами.

Объекты исследования: трубная марка ПП/ПЭ (PPR003EX) и композиты на её основе с углеродным наполнителем (УНТ, технический углерод, смеси «технический углерод/УНТ») различного состава.

Предмет исследования: удельное объемное электрическое сопротивление и механические свойства наполненных композитов на основе ПП/ПЭ.

Научная новизна: определение минимально эффективных количеств углеродного наполнителя, при которых возможно приготовление материала с быстрым поверхностным стеканием накапливающегося статического заряда.

1 Обзор литературы

1.1 Общие представления о нанокompозитах

Нанокompозит (НК) представляет собой многофазный твердый материал, в котором одна из фаз в одном, двух или трех измерениях имеет размеры, не превышающие 100 нм. Также НК определяют, как структуры, состоящие из множества повторяющихся компонентов-слоев (фаз), которые имеют между собой расстояние, измеряемое в десятках нм [1].

В зависимости от типа основной матрицы, которая занимает большую часть объема НК, выделяют три вида НК [2]:

- НК на основе керамической матрицы, способные улучшать оптические и электрические свойства исходного материала (соединение на керамической основе, состоящее из смеси оксидов, нитридов, силицидов и т.д.);

- НК на основе металлической матрицы, в котором нанокompонентами часто служат углеродные нанотрубки (УНТ), способные увеличивать прочность и электрическую проводимость КМ;

- полимерные НК содержат полимерную матрицу с распределенными в ней наночастицами (НЧ) или нанонаполнителями, имеющими различную структуру (сферическую, плоскую или волокнистую).

Именно полимерные НК особенно востребованы, поэтому в последнее время было предложено много различных нанонаполнителей, улучшающих и изменяющих свойства полимеров. В данном типе композитов в качестве матрицы чаще всего применяют полипропилен (ПП) и полиэтилен (ПЭ) [3,4], полистирол [5,6] полиамид [7,8] или нейлон [9,10], а нанокompонентами, как правило, выступают частицы Al_2O_3 или TiO_2 [11,12], углеродные нанотрубки и волокна [13-18], а также слоистые алюмосиликаты [6,9,10].

Обобщенно говоря, полимерные НК в отличие от обычных ПКМ обладают большей ударпрочностью, износостойкостью, а также химической стойкостью и находят широкое применение в производстве электроники и новых материалов, медицине, экологии, аэрокосмической и автомобильной

отраслях. Полная совместимость полимерного материала (ПМ) и добавляемых НЧ, а также их равномерное распределение в полимерной матрице – главные условия при приготовлении полимерного НК с заданными свойствами.

Таким образом, производство НК относится к высокотехнологичной отрасли и требует проведения важных научных исследований в области нанотехнологий.

1.2 Полиэтилен и полипропилен: общая характеристика

ПЭ и ПП вследствие разнообразия своих свойств являются основой для производства многих КМ. Их доля от общего объема мирового производства полимеров составляет 54 % [24].

Полиэтилен в зависимости от способов получения имеет следующие разновидности [25]: ПЭ высокого давления или низкой плотности (ПЭВД или ПЭНП, LDPE); ПЭ низкого давления или высокой плотности (ПЭНД или ПЭВП, HDPE); ПЭ высокой плотности при среднем давлении (ПЭСД). Значительное распространение получили и линейные ПЭ низкой плотности (ЛПЭНП, PELLD), которые получают сополимеризацией этилена и 1-алкена (1-бутена, 1-гексена или 1-октена). Важно отметить главную особенность синтеза ПЭСД и ПЭНД – переход от радикального механизма к ионно-координационному, что предполагает подавление разветвления цепи и повышение плотности, степени кристалличности, жесткости и прочности [26].

По сравнению с ПЭ, ПП, характеризующийся приемлемыми механическими свойствами, можно получить только при проведении ионно-координационной полимеризации в присутствии каталитической системы (катализаторы Циглера – Натта ($TiCl_3$ ($TiCl_4$ или VCl_4) – AlR_3)). [27].

Исходя из пространственного строения макромолекулы полимера различают изотактический ПП, синдиотактический ПП и атактический ПП (рисунок 1) [26].

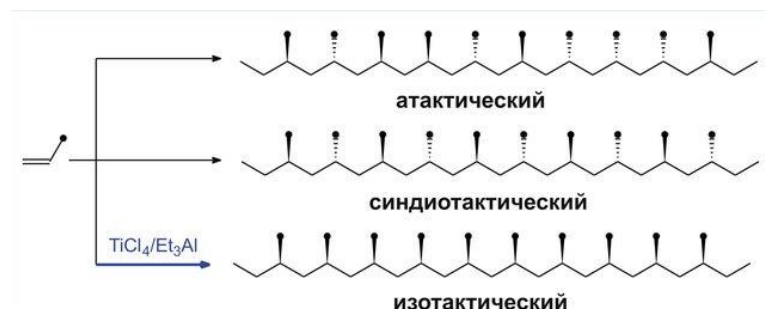


Рисунок 1 – Структура полипропилена

Атактический ПП представляет самую нестабильную разновидность ПП, поскольку метильные группы в данном случае располагаются по обеим сторонам основной цепочки в хаотичном порядке. Физически такой материал напоминает каучук.

Синдиотактический ПП представляет собой чередующийся по обеим сторонам в строго определённой последовательности порядок метильных групп. Недостатками синдиотактического ПП являются его прозрачность и подверженность воздействию ультрафиолетового излучения.

Изотактический ПП значительно прочнее и выносливее представленных выше разновидностей ПП. Это объясняется расположением метильных групп: в данном материале метильные группы расположены только с одной стороны главной цепочки. За счёт этого же достигается высокая плотность, обеспечивающая высокую прочность материала. И поэтому только изотактический ПП можно использовать для производства труб, трубопроводной арматуры и других изделий (например, в электротехнике, автомобилестроении), для которых важные не только химические и биологические, но и хорошие механические свойства материала [25]. Особенностью стереорегулярного ПП и ПЭНД является высокая степень кристалличности, составляющая 50-75 % и 80-90 % соответственно [27].

Российский рынок ПП состоит из двух видовых сегментов: гомополимер и сополимеры пропилена. Соплимеры ПП получают сополимеризацией пропилена и этилена в присутствии металлоорганических катализаторов [28]. В промышленном масштабе широкое распространение имеют два вида сополимеров пропилена: статистический (Random copolymer) и блок-

сополимер пропилена (PP-*impact*) [28].

Основными сегментами потребления ПП являются производство пленок, листов, труб, тары и упаковки, волокон, нитей, нетканых материалов (спанбонд, мельтблаун, спанлейс и другие), а также автокомпонентов, комплектующих для различных сфер машиностроения, строительных материалов, изделий для медицины и мебельной промышленности. ПП перерабатывается всеми известными в мировой практике способами: экструзией, выдувным формованием, литьем под давлением.

Существенным недостатком ПП является пониженная стойкость к ударным нагрузкам, значительно снижающаяся при понижении температуры, и, как следствие, низкая морозостойкость [27]. Повышения морозостойкости ПП добиваются путем пластификации, а также замены на его стат- и блоксополимеры. Статсополимеры пропилена часто проигрывают гомо-ПП и особенно его блоксополимерам в отношении высокой морозостойкости. Вместе с тем, статсополимеры пропилена имеют более высокую прозрачность, что обозначило интерес к производству и всестороннему исследованию этих ПМ.

1.3 Наноразмерные наполнители для полимеров

В последние годы на мировом рынке полимеров все более важную роль играют нанокomпозиционные материалы на основе наполнителей с размером частиц от нескольких нанометров до десятков нанометров. Чаще всего используются следующие типы наноразмерных наполнителей [29-30]:

- Углеродные нанотрубки и нановолокна, включая однослойные, тонкие и многослойные нанотрубки (УНТ); простые и графитизированные нановолокна (УНВ) и вискерсы, а также УНТ с привитыми слоями и функциональными группами;
- Керамические нанонаполнители, в т.ч. слоистые алюмосиликаты;
- Нанооксиды кремния SiO_2 , алюминия Al_2O_3 , титана TiO_2 ;
- Нанометаллические частицы.

Слоистые алюмосиликаты вводят в ПМ, как правило, с целью повышения их механических свойств, а также, в ряде случаев, для увеличения химической стойкости и огнестойкости получаемых материалов [19-20].

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) на основе углеродных нанонаполнителей отличаются высокими тепло- и электропроводящими, а также прочностными свойствами [16-18,21-22].

Полимерные композиты, содержащие нанодисперсный TiO_2 , могут быть использованы для реализации фотохимических процессов при создании мембран, каталитических сенсоров, фоточувствительных материалов, для стимулирования различных биохимических и биофизических процессов [11]. Также одним из распространенных нанонаполнителей для полимеров является наноразмерный оксид алюминия. Авторы работы [23] исследовали влияние нано- Al_2O_3 на механические свойства эпоксидной матрицы, в частности, продемонстрировано двукратное увеличение модуля упругости при растяжении.

В качестве электропроводящего наполнителя для полимерной матрицы наиболее широко применяются технический углерод и его наноразмерные формы: УНТ, УНВ, фуллерены и др., а также нанометаллические порошки и усы. Однако электропроводящие покрытия, содержащие весьма высокое количество металлических порошков, отличаются очень высоким значением насыпной плотности, вследствие чего их трудно нанести на подложку. Авторами работы [31] показано, что применение углеродных материалов в качестве электропроводящего наполнителя, имеет значительное преимущество по сравнению с металлами.

Некоторые из представленных углеродных наноматериалов будут рассмотрены подробнее.

1.3.1 Углеродные наполнители

Уже несколько десятилетий углеродные материалы находят широкое применение в качестве наполнителей при изготовлении КМ на основе

полимеров [24]. И если два десятилетия назад ПО наполняли, как правило, техническим углеродом (сажей), то со временем изучение процесса наполнения ПО углеродными материалами сместилось в сторону его наноразмерных форм, к числу которых относятся монослойные и многослойные УНТ, УНВ и фуллерены.

1.3.1.1 Технический углерод и наносажа

Технический углерод (сажа) является высокодисперсным продуктом термического или термоокислительного разложения углеводородов, получается из природных и промышленных газов, а также из нефтяных и каменноугольных масел.

Сажа представляет собой конгломерат мелких частиц, состоящих в основном из атомов углерода (рисунок 2).

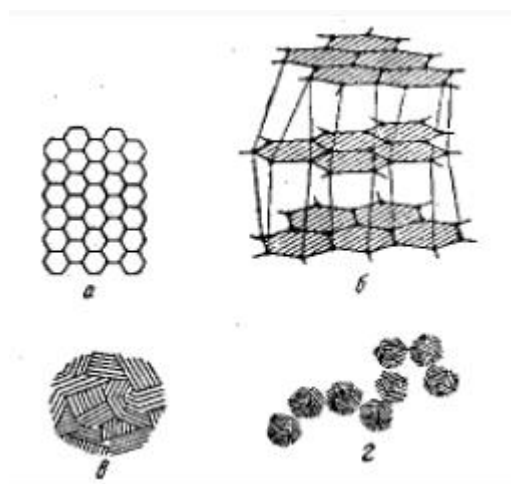


Рисунок 2 – Морфология и структура сажевых частиц: *a* – плоская углеродная решётка кристаллита сажи; *б* – расположение углеродных решёток в кристаллите; *в* – первичная сажевая частица; *г* – цепочечная сажевая структура

Как известно, применение сажи при наполнении ПМ позволяет, в первую очередь, придать им электрическую проводимость, а также значительно снизить себестоимость изделий на их основе. Однако увеличение электропроводящих свойств полимерных диэлектриков, наполненных сажей, наступает при достаточно высоких степенях наполнения (10 – 15 масс. %) и

носит пороговый характер [32,33].

Некоторые исследователи отмечают, что введение инертных наполнителей почти всегда приводит к снижению основных физико-механических характеристик ПМ: повышение жесткости, снижение ударной прочности, уменьшению разрывного удлинения [22,24].

Таким образом, рациональность наполнения ПО и других ПМ техническим углеродом зависит от величин прироста их электропроводящих свойств и снижения физико-механических. Однако, в настоящее время многие ученые уделяют внимание его наноразмерным формам, к числу которых относятся УНТ, УНВ и наносажа.

Аморфная наносажа относится к наноразмерным углеродным материалам, получаемым детонационными способами при взрыве взрывчатых веществ с отрицательным кислородным балансом. Средний размер этих частиц $1 \div 4$ нм [34]. На поверхности этих частиц регистрируются различные функциональные группы: карбоксильные, карбонильные, гидроксильные, хинонные и др. Условия детонационного синтеза углеродных наноструктур, возможность подбора взрывчатых веществ по типу и соотношению между типами, форме заряда позволяют варьировать вид получаемых наноструктур, соотношение наноалмаз-наносажа, типы функциональных групп на поверхности и их количество в очень широких пределах.

В настоящее время, наносажа марки Есогах используется в качестве модификации резин (5 % об), сажа марки Printex ХЕ (5 % НЧ с диаметром 20 нм) – в антистатических и экранирующих электромагнитные излучения материалах [34].

1.3.1.2 Углеродные нанотрубки

Углеродные нанотрубки (УНТ) – материал, представляющий собой протяженные структуры в виде полого цилиндра, состоящие из одного или нескольких свернутых в трубку графитовых слоев с гексагональной организацией углеродных атомов [35] (рисунок 3), который уже сегодня имеет

достаточно разнообразные области применения и широкие перспективы использования в будущем.

Диаметр УНТ составляет от одного до нескольких десятков нанометров, а длина достигает нескольких сантиметров [36].

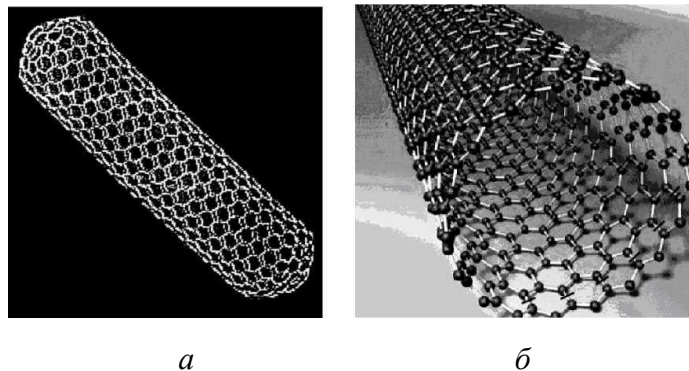


Рисунок 3 – Схематическое изображение углеродной нанотрубки (а) и расположение атомов на ее поверхности (б)

Основная классификация УНТ проводится по количеству составляющих их слоев [37]:

- однослойные (о-УНТ, single-walled nanotubes - SWNTs);
- двухслойные (д-УНТ, double-walled nanotubes - DWNTs)
- многослойные (м-УНТ, multy-walled nanotubes - MWNTs).
- тонкие (т-УНТ, thin carbon nanotubes - t-CNT)

Однослойные о-УНТ – простейший вид УНТ, большинство из которых имеет диаметр около 1 нм при длине, достигающей 4 см [38]. Идеальную структуру о-УНТ можно представить, как свёрнутую в бесшовный цилиндр гексагональную сетку графена вокруг оси Т, основой которой являются шестиугольники с расположенными в вершинах углов атомами углерода (рисунок 4) [35]. Возникновение разных структур УНТ можно объяснить таким способом, несмотря на то, что УНТ в действительности таким путём не образуются.

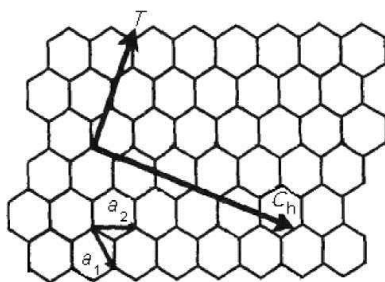


Рисунок 4 – Возможные ориентационные направления сворачивания графенового листа при образовании УНТ различной структуры: a_1 и a_2 – базисные векторы двумерной элементарной ячейки; C_h – направление, перпендикулярное вектору T вдоль окружности трубки

Если вектор T перпендикулярен $C-C$ -связям в углеродных шестиугольниках, образуются УНТ с «кресельной» структурой (рисунок 3, *a*) [35]. Трубки зигзагообразной и хиральной (спиралевидной) структуры (рисунок 5 *б, в*) образуются сворачиванием вокруг других ориентаций вектора T [39].

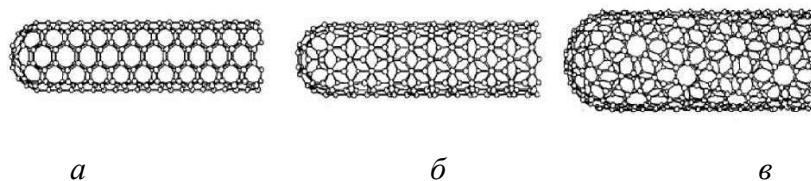


Рисунок 5 – Примеры возможных структур о-УНТ: *a* – кресельная; *б* – зигзагообразная, *в* – хиральная (спиралевидная)

По сравнению с м-УНТ, о-УНТ содержат меньше дефектов, а после обработки высокой температурой в инертной атмосфере можно получить и трубки полностью без дефектов [40].

На рисунке представлены различные модели поперечных структур МУНТ [40].

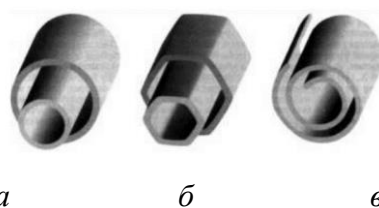


Рисунок 6 – Модели поперечных структур о-УНТ: *a* – «русская матрешка»; *б* – шестигранная призма; *в* – свиток

Структура типа «русская матрешка» (рисунок 6, а) представляет собой совокупность коаксиально вложенных друг в друга о-УНТ. Структура, представленная на рисунке 6, б состоит из совокупности вложенных друг в друга коаксиальных призм. Структура, представленная на рисунке 6, в напоминает свёрнутый свиток. Во всех этих структурах расстояния между соседними графеновыми слоями близко к величине 0,34 нм, т.е. равно расстоянию между соседними плоскостями в кристаллическом графите. Формирование той или иной структуры УНТ в каждом конкретном случае зависит от условий синтеза [40].

Особое место в ряду нитевидных углеродных структур занимают так называемые т-УНТ. К этой категории относят УНТ с числом слоев 2-10, диаметр которых не превышает 5-10 нм [37]. Установлено, что т-УНТ по своим свойствам превосходят о-УНТ и м-УНТ, т.к. больше доступны, сохраняют структуру внутренних слоев, а также меньше склонны к самоагрегации [37].

УНТ, как правило, получают тремя методами: электродуговым синтезом, методом лазерной абляции и химическим осаждением из паровой фазы (метод CVD) [41]. Основные методы синтеза УНТ представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные промышленные методы синтеза УНТ

Описание, характеристика	Электродуговой разряд	Химическое осаждение из газовой фазы (CVD)	Лазерное испарение (абляция)
Источник углерода	Твердые графитные стержни	CO, CH ₄ , C ₂ H ₂	Твердые графитные стержни
Диаметр о-УНТ	0,6 -1,4 нм	0,6 -1,4 нм	1-2 нм
Длина о-УНТ	1-10 мкм	До 20 см	5-20 нм
Диаметр м-УНТ	1-10 нм	10-240 нм	Дорогой синтез

Продолжение таблицы 1

Описание, характеристика	Электродуговой разряд	Химическое осаждение из газовой фазы (CVD)	Лазерное испарение (абляция)
Преимущества	Получение о-УНТ с незначительным браком; м-УНТ можно производить без катализатора; недорогой метод	Простота процесса; Синтез м-УНТ с заданным диаметром; пригоден для промышленного применения	Получение моно-УНТ с небольшим содержанием примесей; контроль дефектов и диаметра
Недостатки	Трубки небольшой длины со случайным диаметром; большое количество примесей; энергозатратен	М-УНТ - основной продукт с большим количеством дефектов	Требуются дорогостоящие лазеры
Производство в сутки	около 10 г	около 1 кг	около 1 г

1.3.1.3 Углеродные нановолокна

Углеродные нановолокна (УНВ) – еще один достаточно распространенный тип нанонаполнителей на основе углерода. УНВ состоят из свернутых графеновых слоев конической формы, которые характеризуется телесным углом (α), и расположены так, что вершины конусов распределены по прямой, перпендикулярной мнимой поверхности основания (рисунок 7) [22].



Рисунок 7 – Схема строения УНВ

Основные типы УНВ представлены на рисунке 8 [42].

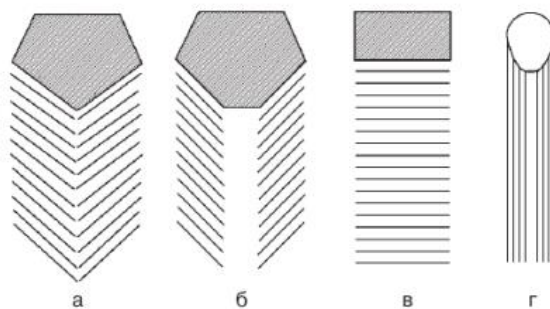


Рисунок 8 – Типы УНВ, образующиеся при высаждении углерода на поверхности металлической частицы: *а* – «елка»; *б* – «рыбий хребет»; *в* – «карточная колода»; *г* – трубка

В зависимости от величины угла α УНВ делятся на несколько типов: «елочка», «бамбук», «карточная колода», «рыбий хребет». УНВ с морфологией «елочка» имеют высокие значения угла α , тогда как для УНВ типа «бамбук» он намного меньше, но не равен нулю. Если $\alpha=0$, УНВ переходит в УНТ [22]. Наиболее распространённым методом синтеза УНВ является метод газофазного осаждения, катализируемое железом [43].

1.3.1.4 Фуллерены

Фуллерены представляют кластеры, полые внутри (пустота 20-26 % объема), в которых замкнутая поверхность (сфера или эллипсоид) образована правильными многогранниками, содержащих в своих вершинах атомы углерода. Наиболее симметричный и изученный лучше других представителей семейства фуллеренов – фуллерен C_{60} (рисунок 9), по своей структуре напоминающий микроскопический футбольный мяч, диаметром 0,7 нм, состоящий из 20 шестиугольников и 12 пятиугольников [44].

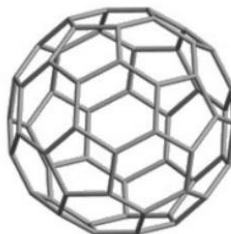


Рисунок 9 – Структура молекулы фуллерена C_{60}

Фуллерены в твердом состоянии образуют молекулярные кристаллы –

фуллериты, в узлах решётки которых находятся молекулы фуллерена (рисунок 10).

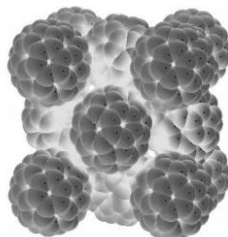


Рисунок 10 – Структура молекулы фуллерита

Фуллерит представляет собой вещество, характеризующееся достаточно высокой твёрдостью (примерно в 2 раза твёрже алмаза). В теории, он мог бы использоваться при изготовлении инструментов для обработки легированных сталей и алмазов, что, конечно, далеко от практической реализации [34].

Наиболее эффективным методом синтеза фуллеренов является термическое разложение графита, путем использования как электролитического нагрева графитового электрода, так и лазерного облучения поверхности графита.

В настоящее время усилия многих исследователей направлены на поиск альтернативных методов получения фуллеренов (более дешевых) [44].

1.3.2 Свойства полимерных нанокомпозитов на основе углеродных наполнителей

Углеродные наноструктуры нашли широкое применение для получения полимерных НК конструкционного назначения, НК с электропроводящими, антистатическими, радиоэкранирующими свойствами, а также для модификации углепластиков, являющихся традиционными ПКМ.

Чаще всего, углеродные наноматериалы используют с целью повышения электропроводящих свойств полимерных диэлектриков. Установлено, что перколяционный порог (перенос электронов) достигается при введении в полимер около 1 % об. НЧ, в сравнении с техническим углеродом, при котором порог перколяции достигается при степени наполнения около 20 % об. [34]. Кроме того, в ряде случаев при наполнении ПП наблюдается значительное

увеличение значений модуля упругости, а также временного сопротивления разрушению по сравнению с ненаполненным полимером.

Электрическая проводимость УНТ изменяется в широком диапазоне: от значений, характерных для полупроводников до величин, свойственных типичным металлам, поэтому ее можно контролировать [22]. В работе [46] авторы представили экспериментальные данные по исследованию положения предела перколяции и значению электрической проводимости для ПКМ на основе УНТ различного типа и геометрии. Результаты исследований подтверждают, что введение УНТ в ПП на уровне 0,01-0,1 % достаточно для увеличения электропроводимости полимерного диэлектрика более чем на 10 порядков, что позволяет перевести его в класс проводников.

Очевидно, что у различных авторов отличаются числовые данные по результатам наполнения одного и того же полимера одним и тем же углеродным нанонаполнителем, однако, качественно результат одинаков – увеличение физико-механических характеристик композита по сравнению с исходной полимерной матрицей. Так, в работе [47] получены данные по увеличению модуля упругости от концентрации УНВ (2-20 масс.%) при наполнении ими ПП. Повышение прочностных характеристик полимеров случае их наполнения УНТ наблюдается уже при содержании УНТ около 1 масс. %. Однако, немаловажно, что УНТ значительно более дороги, чем УНВ [24]. Отмечается, что введение УНТ с концентрацией, превышающей 1 масс. %, не способствует существенному изменению величин, вышеупомянутых характеристик, а иногда приводит к их снижению [48].

Следовательно, излишнее увеличение содержание УНТ в полимерной матрице приводит не только к увеличению себестоимости изготовленных КМ, но и отличается снижением технологичности процесса формования, а в ряде случаев и ухудшением физико-механических свойств КМ. Снижение физико-механических свойств наполненных полимеров, вероятнее всего, обусловлено тем, что наполнитель локализуется в аморфных областях, в которых УНТ агломерируют за счет Ван-дер-Ваальсовых сил [49]. В дальнейшем такая

агломерация УНТ становится областью концентрации напряжений и возникновения дефектов, а также формирования несовершенной структуры НК [50].

Таким образом, использование углеродных наноматериалов (наносажи, УНВ, УНТ и др.) в качестве наполнителей для ПМ привело, прежде всего, к получению нового поколения электропроводящих материалов. Имеет большое значение и тот факт, что использование наноразмерных форм углерода значительно сократило количество наполнителя, необходимого для достижения желаемых электрических свойств, что позволило снизить вес материала.

1.4 Методы получения полимерных нанокомпозитов

В настоящее время известны следующие методы получения полимерных НК [51]:

- синтез НК *in situ* при полимеризации матрицы на катализаторах;
- синтез НК при интенсивном перемешивании модифицированных либо немодифицированных НЧ в расплаве или растворе полимера;
- крейзинг;
- золь-гель технология.

Одним из необходимых условий получения ПКМ с заданными свойствами является максимальная степень диспергирования наполнителя и его оптимальная ориентация в полимерной матрице. Известно, что неравномерное распределение в матрице и агломерация НЧ влекут за собой локальные неравновесные изменения структуры КМ, уменьшение поверхности взаимодействия НЧ и полимера [52]. Исходом этих процессов является то, что агломераты НЧ выступают в качестве структурных дефектов материала, что сопровождается неоднородностью его свойств. Следовательно, одной из важнейших задач изготовления полимерных НК с заданными свойствами является создание методик модифицирования полимеров, а также усовершенствования технологий введения наполнителя в ПМ, что позволит

достичь максимально возможного эффекта.

1.4.1 Смешение в расплаве

Смешение наполнителя с полимерной матрицей в расплаве – традиционный и наиболее простой метод получения ПКМ. Смешение в расплаве используется для различных типов полимеров (ПЭ, ПП, полистирол, натуральный каучук, полиамиды и др.), для его осуществления может быть использовано прессование, инжекционное формование, экструзия, что сокращает время получения и стоимость материалов, процесс отличается экологической безопасностью [53]. Классическим способом получения КМ на основе термопластичных полимеров является диспергирование частиц наполнителя в расплаве полимера методом экструдирования.

Основным преимуществом компаундирования в расплаве экструзионным способом является получение материалов в больших объемах и возможность встраивания во многие технологические процессы переработки ПМ [54]. Так, экструдированием в расплаве с помощью двухшнекового экструдера авторами работы [48] были получены композиции на основе ПП/УНТ, ПП/УНВ, ПП/сажа при температуре 200 °С. Авторы утверждают, что полученные НК характеризуются высокими электропроводящими свойствами.

Перспективной технологией для синтеза электропроводящих НК является использование экструдеров, которые могут обеспечивать высокие сдвиговые напряжения, т.н. экструдеры «High shear extruder (HSE)» и «Solid-State Shear Pulverization (SSSP)». Принципиальное отличие применения данных экструдеров от классической технологии состоит в том, что в процессе смешивания протекают механохимические процессы деструкции-рекомбинации полимерных цепей, вызванные высокими сдвиговыми напряжениями. Происходит стабилизация размеров фаз за счет образования химических связей между ними, что, в свою очередь, приводит к предотвращению дальнейшей коалесценции частиц диспергируемой фазы

[56]. Так, например, при использовании SSSP-экструдера для совмещения УНТ с матрицей полимера, получают НК с повышенными физико-механическими свойствами, что обусловлено высоким уровнем взаимодействия УНТ и полимерной матрицы. При приготовлении подобного НК путем традиционного способа смешения в расплаве аналогичный эффект достигается при использовании функционализированных УНТ [57].

Таким образом, достоинствами экструзионного метода смешения в расплаве являются:

- отсутствуют какие-либо растворители, что позволяет исключить наличие вредных стоков;
- проведение процесса изготовления полимерных НК посредством высоких скоростей;
- простое технологическое оформление производства.

Все это позволяет сделать вывод о том, что, для получения полимерных НК в промышленных масштабах экструзионный метод является наиболее предпочтительным, потому как требует меньших затрат на сырьё и обслуживание технологического производства [54].

1.4.2 Смешение в растворе

Смешение компонентов НК можно осуществлять и в растворе полимеров. Данный метод обеспечивает эффективное разделение наполнителя в полимерной матрице, однако для нерастворимых полимеров этот метод неприменим [30].

Смешивание в растворе – один из наиболее широко распространенных методов по изготовлению ПКМ, наполненных углеродными нанонаполнителями, в частности, УНТ. В этом случае метод включает следующие стадии [58]:

- диспергирование УНТ в подходящем растворителе;
- смешивание с раствором полимера;
- получение ПКМ путем осаждения или литья пленок.

Создание суспензий из необработанных УНТ часто требует использование ультразвуковой обработки, термообработки [59], обработки кислотами [60] и функционализации УНТ [61]. Отметим, что метод смешения в растворе ограничен использованием полимеров, которые могут свободно растворяться в растворителях, соответствующих созданию стабильной суспензии УНТ.

Для придания НК антистатических свойств и повышения трещиностойкости используется метод набухания, основанный на введении УНТ в тонкий поверхностный слой полимера. Таким способом обработаны волокна Kevlar в суспензии м-УНТ в N-метилпирролидоне, а также плёнки ПЭ – набуханием в суспензии м-УНТ в тетрагидрофуране [55]. В обоих случаях процесс интенсифицировался воздействием ультразвука.

Несмотря на то, что смешение в растворе достаточно распространенный метод, тем не менее, он не нашел широкого применения в промышленном масштабе вследствие существенного расхода растворителя [58].

1.4.3 Синтез *in situ*

Во многих процессах смешения НЧ обнаруживают тенденцию к агломерации, несмотря даже на значительные сдвиговые усилия при смешении в расплаве полимера. Эти ограничения удается часто избежать в процессах *in situ* получения полимерных НК. Этот метод позволяет в достаточной степени контролировать межфазные взаимодействия и способствует формированию гомогенных НК [62].

Техника *in situ* полимеризации включает диспергирование неорганической НЧ в мономере или в растворе мономера и последующую полимеризацию стандартными методами.

Так, НК, полученные методом полимеризации ПП *in situ* в присутствии предварительно диспергируемых в реакционной среде УНТ, в разных литературных источниках рассматривается в качестве наиболее эффективного способа получения НК на основе УНТ, т.к. этот метод позволяет преодолеть

проблему агломерации наполнителей при введении их в полимерные матрицы [13-15,18].

Получение полимерных НК непосредственно во время синтеза имеет следующие достоинства [63]:

- наиболее высокая степень однородного распределения НК в полимерной матрице, что обусловлено более высокой подвижностью мономеров по сравнению с макромолекулами (при получении НК путем смешения в расплаве), а также пониженной вязкостью реакционной среды.

- данный метод получения НК технологически более совершенен по сравнению с другими методами, потому как позволяет сократить некоторые технологические стадии в производстве (экструзия, требующая применения стабилизаторов, гранулирование, сушка и др.), а также снизить себестоимость готового материала.

1.4.4 Золь-гель синтез

Немаловажные успехи при получении полимерных НК на основе керамических материалов и металлов (Al, Ti, Sn, Zr) были достигнуты методом золь-гель технологии, при котором в качестве исходных компонентов служат алкоколяты некоторых химических элементов и органические олигомеры. Золь-гель метод представляет собой совокупность стадий, включающих приготовление раствора прекурсора, его перевод в золь, затем в гель за счет процессов гидролиза и конденсации, старение, сушка и термообработка материала [64].

Важно отметить, что использование золь-гель технологии позволяет вводить в полимерную матрицу и УНТ, причем преимуществом данного метода является равномерное распределение УНТ по всему объему полимерной матрицы. В этом случае агломераты УНТ разбиваются в органическом растворителе (золь-этап), а затем полученную суспензию вводят в полимер и продолжают равномерно распределять УНТ по всему объему матрицы с помощью ультразвукового диспергатора (гель-этап) [65]. Важно,

что для использования УНТ в золь-гель технологии НК требуется селективный отбор УНТ по электрофизическим свойствам, для этого используют методы, основанные на "привитии" специальных функциональных химических групп. Также для золь-гель синтеза полимерных НК представляет интерес использования УНВ, усов, наноалмазов и сажи) [66].

Материалы, полученные в золь-гель процессах, отличаются однородностью, высокой чистотой; в отличие от твердофазных реакций требуются невысокие температуры прокаливания для получения конечных продуктов. Однако существенной проблемой в золь-гель процессах является возникновение значительных внутренних напряжений и формирование хрупких материалов в результате удаления растворителя, небольших молекул и воды. Кроме того, необходимо, чтобы полимерные молекулы были растворимы в гидролизующемся конденсате. Немаловажно и то, что исходные реагенты достаточно дорогие и многие из них токсичны, что, безусловно, ограничивает практическое применение таких материалов.

1.4.5 Крейзинг

Перспективным методом для создания полимерных НК представляется принципиально иной подход, предусматривающий предварительное создание нанопористой полимерной матрицы с последующим или одновременным заполнением ее вторым компонентом. Для этого достаточно давно велись эксперименты по использованию одного из фундаментальных свойств полимерных систем – крейзинга [67].

Явление крейзинга возникает при деформировании твердых тел в адсорбционно-активных жидких средах (ААС), хорошо смачивающих полимер, т.е. эффективно понижающих его поверхностную энергию.

Исследованием структуры крейзованных полимеров занимаются многие ученые, и на сегодняшний день известно, что результатом крейзинга является самодиспергирование неупорядоченного аморфного полимера в упорядоченную регулярную структуру – мельчайшие наноразмерные агрегаты

ориентированных макромолекул (фибриллы), разделенные пустотами примерно такого же размера [68].

Использование в качестве ААС соединений, имеющих функциональные группы, открывает широкие возможности для последующей химической модификации пористых ПМ. Наибольший интерес представляют жидкости, которые являются одновременно и крейзующим агентом, и прекурсором для получения соединений с необходимым набором физико-химических свойств. Так, в качестве таких сред в работе [69] были использованы сверхразветвленный полиэтоксисилоксан (ПЭОС) и тетраэтоксисилан (ТЭОС). Образующийся в результате гидролиза прекурсора в порах полимерных матриц (ПП, полиэтилентерефталат) SiO_2 предотвращает усадку полимеров, и после снятия напряжения образцы сохраняют геометрические размеры. Полученный композит представляет собой плотный материал, практически не имеющий сквозных пор.

1.5 Выбор направления исследования

Как было отмечено ранее, цель данной работы – приготовление ПКМ со свойствами электростатического экранирования путём введения минимально возможных количеств углеродных наполнителей.

По величине удельного объемного электрического сопротивления (ρ_v) все твердые тела подразделяются на три группы, Ом·см:

- диэлектрики (изоляторы), $\rho_v > 10^8$;
- полупроводники, $\rho_v = 10^2 - 10^8$;
- проводники: проводящие, $\rho_v = 10^{-2} - 10^2$; высокопроводящие, $\rho_v = 10^{-6} - 10^{-2}$ [70].

ПП относится к классу диэлектриков. Но в ряде случаев, например, при изготовлении резервуаров для взрывоопасных сред, необходимо чтобы материал при образовании электростатического заряда отводил его, поэтому в ПП модифицируют углеродными наполнителями. Отсюда следует, что токопроводящие композиции на основе ПП и углеродных наполнителей

применяют с целью отвода с поверхности изделия, изготовленного из этого материала, накапливающегося статического заряда.

Использование композиций на основе ПП и углеродных наполнителей возможно в трубопроводных системах транспортировки сыпучих материалов, жидкостей и газов, в качестве защиты силовых кабелей и в других конструкциях, для которых обязательным условием эксплуатации является отвод накапливающегося статического заряда [71].

Литературный обзор данной работы позволяет сделать вывод о том, что, чаще всего, ПКМ с УНТ в качестве наполнителей интересны многим исследователям ввиду их электропроводящих свойств, однако не менее важную роль играют физико-механические и эксплуатационные свойства ПКМ. В частности, добавление в полимерную матрицу УНТ придаёт полученному материалу новые свойства, обусловленные уникальными характеристиками УНТ. Модуль Юнга моно-УНТ достигает значений порядка 1 ТПа [72], что является рекордным значением для всех известных материалов.

Нет однозначного мнения о величине порога перколяции композитов с УНТ и техническим углеродом. Порог перколяции, условно определяемый как содержание наполнителя, при котором материал становится проводящим, зависит от таких факторов, как структура частиц наполнителя, тип полимерного материала, а также от аспектного отношения и степени упорядочения частиц наполнителя в композите.

В среднем, удельная электрическая проводимость УНТ достигает значений порядка $10^6 \text{ См}\cdot\text{м}^{-1}$, что на 15-20 порядков превышает значения, типичные для большинства ПМ [72]. При таком огромном различии проводимостей достаточно уже небольшого количества УНТ, для того чтобы полимер стал проводящим.

Многие исследователи считают, положение порога перколяции УНТ может находиться в пределах 0,01-0,1 % [72]. Немаловажным фактором, определяющим проводящие свойства таких материалов, является характер контакта между соседними УНТ, а также между УНТ и полимерной матрицей.

Указанные свойства являются предметом активных экспериментальных и теоретических исследований, проводимых в последние годы.

ПКМ с электропроводящими свойствами, наполненные техническим углеродом, широко используются в промышленности благодаря их низкой стоимости. Однако в разных исследованиях перколяционный порог для таких материалов изменяется от 15 до 40 вес. % [73,74]. Как известно, высокое содержание сажи связано с ухудшением механических и реологических свойств ПКМ. Поэтому уменьшение содержания сажи, необходимого для обеспечения заданного уровня проводимости таких ПКМ также является актуальной практической задачей.

Таким образом, формируется новый подход для развития ПКМ с электропроводящими свойствами, модифицированных небольшим количеством УНТ. Такой метод обеспечивает возможность уменьшения содержания сажи в композитах, и позволяет применить УНТ для крупнотоннажного производства электропроводящих ПКМ.

2 Объект и методы исследования

2.1 Характеристика исходных веществ и материалов

2.1.1 Статсополимер пропилена с этиленом

В качестве полимерной матрицы был использован ПП/ПЭ трубной марки PPR003EX/1 (ООО «Томскнефтехим»), свойства которого приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Свойства ПП/ПЭ марки PPR003EX/1, ООО «Томскнефтехим»

Свойства	Типичные значения
Показатель текучести расплава (230 °С/2,16 кг), г/10 мин	0,30
Плотность, кг/м ³	890-910
Удельное объемное электрическое сопротивление, Ом·м	10 ¹⁴ -10 ¹⁶
Предел текучести при растяжении (50 мм/мин), МПа	23
Относительное удлинение при пределе текучести (50 мм/мин), %	12
Модуль упругости при изгибе (5 мм/мин), МПа	650
Ударная вязкость по Изоду на образцах с надрезом, кДж/м ² (23 °С)	10,0
(-20 °С)	2,5
Температура размягчения по Вика (10 Н), °С	130÷140
Температура изгиба под нагрузкой (1,8 МПа), °С	44÷50

2.1.2 Углеродные нанотрубки

В качестве наполнителей были использованы УНТ разного типа:

- УНТ от производителя «1» (рисунок 11, а);
- УНТ от производителя «2» (рисунок 11, б).

Как видно, УНТ обоих типов склонны к значительной агломерации.

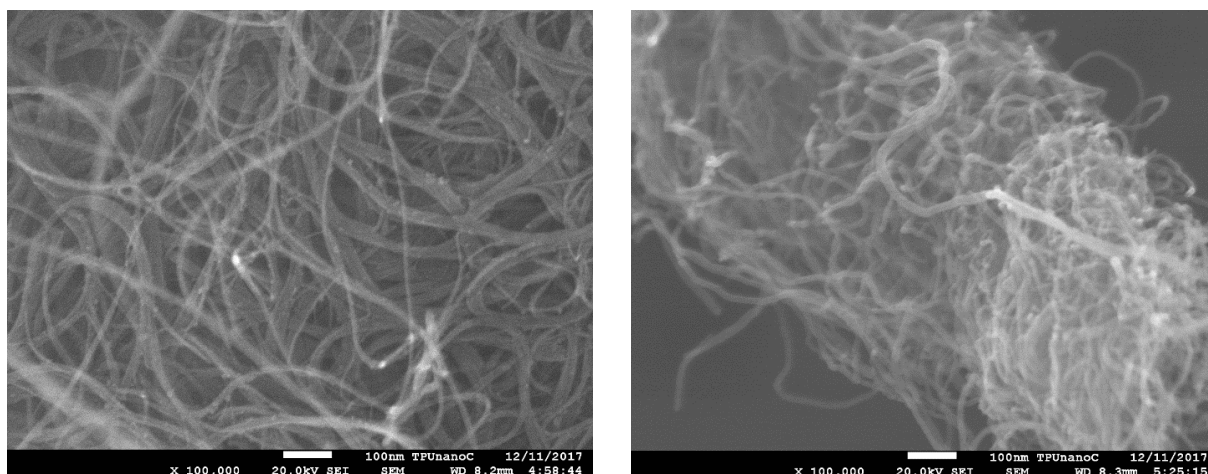


Рисунок 11 – Микрофотографии УНТ разного типа, полученные с помощью СЭМ: *а* – УНТ от производителя «1», *б* – УНТ от производителя «2»

2.1.3 Технический углерод

Также в качестве углеродного наполнителя был использован усиливающий технический углерод с высокой структурностью и развитой удельной поверхностью (рисунок 12). Очевидно, что частицы сажи также склонны к сильному агрегированию между собой.

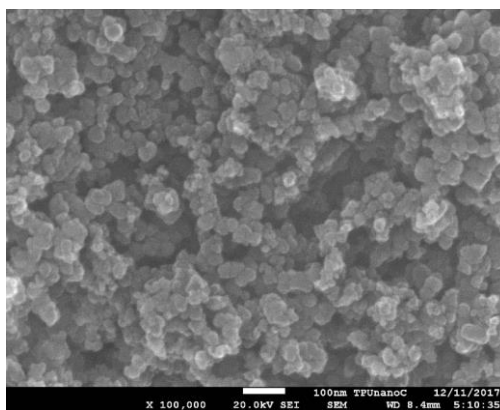


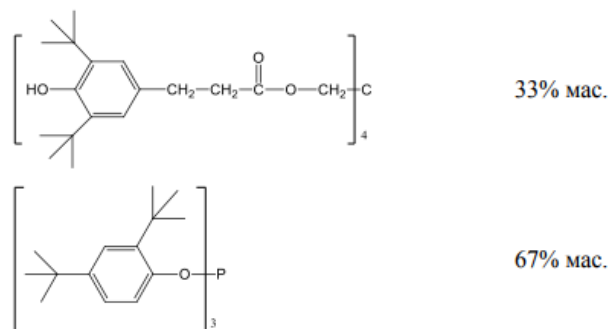
Рисунок 12 – Микрофотографии технического углерода, полученные с помощью СЭМ

2.1.4 Стабилизатор Irganox B-215

Irganox B-215 – синергически действующая смесь фенольного антиоксиданта и фосфитного термостабилизатора (Irganox 1010 – 33,3 %, Irgafos 168 – 66,7 %) по внешнему виду представляет белый порошок.

Структурные формулы составляющих стабилизатора выглядят

следующим образом:



2.1.5 Стеарат кальция

Стеарат кальция – белый порошок, плотностью 1035 кг/м³. Не растворяется в воде. Растворяется в бензоле, толуоле, этаноле и иных органических растворителях. Нетоксичен. Температура плавления в пределах 130-150 °С. Стеарат кальция используют как пластификатор, стабилизатор, и поверхностно-активное вещество. Является эффективным стабилизатором при производстве и переработке ПО.

2.2 Характеристика оборудования

2.2.1 Двухшнековый экструдер Scientific LTE-20-44

Двухшнековые экструдеры Scientific LTE-20-44 (рисунок 13) с диаметром шнеков 20 мм и соотношением L/D=44 предназначены для смешивания термопластичных полимеров с различными органическими или неорганическими наполнителями, волокнами, порошками.



Рисунок 13 – Двухшнековый экструдер Scientific LTE-20-44 фирмы Labtech Engineering

Двухшнековые экструдеры Scientific LTE-20-44 оснащены шнеками диаметром 20-миллиметров, вращающиеся в одном направлении и состоящие

из наборных модулей, где каждый модуль может быть размещен в любой зоне шнека на шестигранном валу, что позволяет гибко менять конфигурацию шнека и создавать собственную в зависимости от потребностей. Каждая зона цилиндра оборудована водяным охлаждением и патроном электрического нагревателя, что позволяет управлять температурой технологического процесса в каждой зоне цилиндра. Водяное охлаждение вместе с нагревателями высокой мощности позволяет быстро изменять температуру каждой зоны, и соответственно изменять режим обработки полимеров того или иного состава.

Характеристика двухшнекового экструдера Scientific LTE-20-44 представлена в таблице 5.

Таблица 5 – Характеристика двухшнекового экструдера Scientific LTE-20-44

Параметр	Значение
Соотношение длина/диаметр (L/D):	44
Температура нагрева цилиндра	до 400 °С
Скорость вращения шнека	от 0 до 1200 об/мин
Мощность электромотора	5,5 кВт
Производительность	до 20 кг/час по LDPE

2.2.2 Одношнековый экструдер Brabender

Экструдеры Brabender (рисунок 14) состоят из цилиндра экструдера с хонингованной и азотированной расточкой, зоны загрузки с водяным охлаждением и различных зон нагрева или нагрева/охлаждения с электрическим нагревом и воздушным охлаждением. Температура отдельной зоны экструдера контролируется и отображается самооптимизирующимися электронными регуляторами температуры.



Рисунок 14 – Модульная система Brabender с приставкой типа «одношнековый экструдер»

Характеристика одношнекового экструдера представлена в таблице 6.

Таблица 6 – Характеристика одношнекового экструдера Brabender

Параметр	Значение
Диаметр цилиндра D, мм	19
Длина шнека (L/D)	25D
Количество зон нагрева (Н) и охлаждения (НК)	1Н 2НК
Максимальная рабочая температура, °С	450
Максимальный крутящий момент, Нм	150
Производительность в зависимости от материала и скорости, кг/ч	0,5-8

2.2.3 Двухроторный смеситель Brabender

Двухроторный смеситель Brabender (рисунок 15) характеризуется большими объемами перемешивания, жидкостным или электрическим нагревом, точной и постоянной температурой, разогревом до температуры 300 °С.



Рисунок 15 – Модульная система Brabender с приставкой типа «двухроторный смеситель»

2.2.4 Лабораторный смеситель Zeppelin Henschel FML 4

Лабораторный смеситель Zeppelin Henschel FML 4 представлен на рисунке 16. Особенности смесителя: нагревательный смеситель с высокой тепловой мощностью; подходит для пластмасс, химикатов, минеральных веществ и красителей. Характеризуется коротким временем нагрева; нагрев и охлаждение происходит с помощью теплоносителя. Имеет превосходную производительность по степени диспергирования; проводит гомогенизацию в кратчайшие сроки.



Рисунок 16 – Лабораторный смеситель Zeppelin Henschel FML 4

2.2.5 Вальцы Collin W110

Вальцы Collin W110 (рисунок 17) представляют собой машину, имеющую 2 горизонтальных валка, которые вращаются навстречу друг другу. Вальцы используют в качестве обработки вязкоупругих или пластичных материалов за счет их многократного пропускания через зазор между валками, где материал подвергается интенсивным деформациям сдвигового характера. Вальцы могут работать как в периодическом, так и в непрерывном режиме.



Рисунок 17 – Вальцы Collin W110

2.2.6 Пресс Collin P220

Пресс Collin P220 (рисунок 18) используется в производстве полимерных листов для оптических и физических испытаний литевых форм. Особенности: высокая точность давления 0,5 бар, высокотемпературная точность через поверхность плиты, высокоточная регулировка температуры и давления, может использоваться в диапазоне температур от 20 до 300 °С, опционально до 450 °С.



Рисунок 18 – Пресс Collin P220

2.3 Методика проведения эксперимента

Экспериментальная часть данной научно-исследовательской работы включает в себя следующие стадии:

- 1) Высушивание наполнителей (сажа, УНТ разного типа);
- 2) Приготовление мастербатчей на основе ПП/ПЭ и углеродных наполнителей всех видов (сажа, УНТ разного типа). Использование мастербатчей обусловлено равномерностью распределения частиц наполнителя в полимерной матрице и последующей лёгкостью использования при приготовлении композиций требуемого состава.

Для приготовления мастербатча технического углерода в ПП/ПЭ смесь гранулята ПП/ПЭ и высушенного порошка технического углерода вносят в двухроторный смеситель системы Brabender. После перемешивания, полученный расплав переносят на вальцы с последующим измельчением на роторной дробилке. Раздробленный материал перерабатывают в стренги на

системе Brabender с приставкой типа «одношнековый экструдер» с последующей грануляцией.

Для приготовления мастербатчей на основе УНТ разного типа и ПП/ПЭ компоненты смешивают в смесителе Zeppelin Henschel FML 4 и впоследствии перерабатывают на двухшнековом экструдере LTE-20-44 и двухроторном смесителе Brabender.

3) Приготовление ПКМ разного состава на основе полученных мастербатчей и выбранной полимерной базы на двухшнековом экструдере LTE-20-44 готовят композиции:

- содержащие различное количество технического углерода;
- содержащие различное количество УНТ разного типа;
- содержащие различное количество технического углерода и заданное количество УНТ разного типа.

Также в качестве перспективных способов по введению наполнителя в полимер были использованы следующие подходы:

– Приготовление ПКМ на основе смешанного мастербатча. Мастербатч готовят путем одновременного смешения сажи и УНТ в двухроторном смесителе Brabender с последующей грануляцией.

– Приготовление композиций, содержащих УНТ, предварительно обработанных ультразвуком. Применение ультразвука рассматривается как наиболее перспективный способ разрушения агломератов УНТ. Обработку УНТ ультразвуком проводят с помощью ультразвуковой ванны в среде органического растворителя в течение определенного времени. Смешение порошка полимера и суспензии УНТ проводят в лабораторном смесителе Henschel. Композиции готовят на двухшнековом экструдере LTE-20-44 и двухроторном смесителе Brabender.

4) Изготовление стандартных тестовых образцов на основе полученных ПКМ для определения электропроводящих и физико-механических свойств.

2.4 Методы исследования

2.4.1 Определение удельного объемного сопротивления

Удельное объемное сопротивление образцов определяли по ГОСТ 20214 -74 с помощью установки, принципиальная схема которой приведена на рисунке 19.

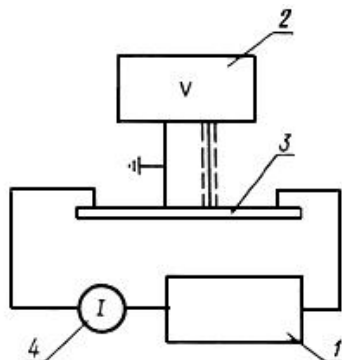


Рисунок 19 – Принципиальная схема установки определения удельного объемного сопротивления: 1 – источник постоянного напряжения; 2 – электрометр; 3 – образец; 4 – прибор для измерения тока.

Метод основан на закреплении образца в электродном устройстве посредством токовых электродов и приложении электродов напряжения (рисунок 19). Суть метода заключается в том, что на образец подают постоянное напряжение (значение напряжения выбирают согласно стандартам, соответствующим конкретным видам электропроводящих пластмас) и фиксируют показания электрометра, а также прибора, измеряющего ток.

2.4.2 Проведение механических испытаний

Механические испытания образцов проводили в соответствии с ISO 527, ISO 178, ASTM D256.

2.4.2.1 Испытания на растяжение

При проведении испытаний на растяжение по определяют:

1. Предел текучести в МПа (кгс/см^2).
2. Относительное удлинение при пределе текучести в %.

3. Относительное удлинение при разрыве в %.

4. Модуль упругости при растяжении в МПа.

Испытанию подвергались стандартные образцы в соответствии с ISO 527 (рисунок 20).

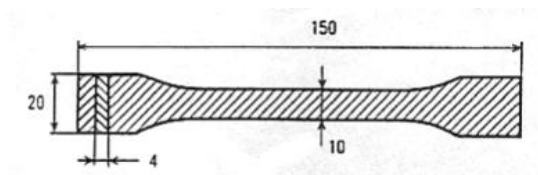


Рисунок 20 – Стандартный образец для испытания на растяжение

Сущность метода заключается в следующем: испытуемый образец с постоянной скоростью подвергается растягивающей нагрузке, вектор которой совпадает с его основной осью, до тех пор, пока не произойдет разрушения образца, или пока напряжение (нагрузка) или деформация (растяжение) не достигнут заданного значения. Проводят измерение нагрузки и удлинения образца.

За результат испытания принимают среднее арифметическое значение всех параллельных определений.

2.4.2.2 Испытания на изгиб

Сущность метода: подвергание изгибу постоянной скоростью в середине между опорами испытуемого образца прямоугольного поперечного сечения, свободно лежащего на опорах, до его разрушения или до достижения образцом заданной величины относительной деформации или прогиба (рисунок 21).

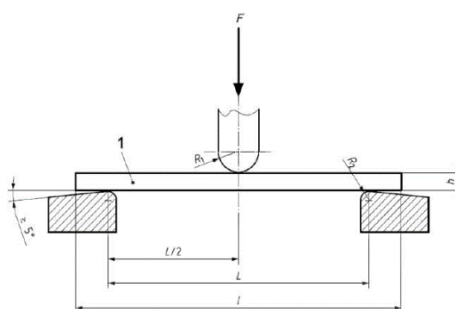


Рисунок 21 – Положение образца в начале испытания:

1 – образец для испытания; F – прилагаемая нагрузка; R_1 – радиус нагружающего наконечника; R_2 – радиус опор; h – толщина образца; l – длина образца; L – расстояние между опорами

Модуль упругости при изгибе – это параметр жесткости материала в начальной стадии процесса деформации. Во время испытания измеряют нагрузку, прилагаемую к образцу, и соответствующие значения прогиба посередине между опорами.

2.4.2.3 Метод измерения ударной вязкости по Изоду

Прочность при ударном изгибе, или *ударная вязкость*, является одним из основных показателей механической прочности пластмасс.

Ударная прочность образцов с надрезом по методу Изода – энергия удара, которую необходимо затратить на разрушение надрезанного образца, деленная на исходную площадь поперечного сечения образца в месте надреза. Суть метода: измерение работы в кДж, необходимой для разрушения (излома) стандартного образца, свободно лежащего на двух опорах либо зажатого в опорах вертикально, при испытании его на изгиб ударной нагрузкой. Показатель прочности – работа в кДж, которая приходится на 1 м² площади поперечного сечения образца. Испытания проводят на маятниковом копре. Результаты испытаний по методу ASTM определяют, как энергию удара в джоулях, деленную на длину надреза (т.е. толщину образца) и выражают в Дж/м.

2.4.3 Показатель текучести расплава (ПТР)

ПТР определяют согласно ГОСТ 11645-83 путем измерения количества полимера, который проходит за 600 с через сопло стандартного капилляра, при температуре и нагрузке, соответствующими данной марке полимера (230 °С, 2,16 кг/с) на приборе типа ИИРТ-М.

ПТР определяют по формуле:

$$\text{ПТР} = 600m/t ,$$

где: m – масса стренги, выраженная в граммах; t – время выдавливания стренги, выраженное в секундах.

За результат испытания принимали среднее арифметическое 3-5 параллельных определений.

2.4.4 Сканирующая электронная микроскопия

Для изучения особенностей морфологии поверхности использовали сканирующий (растровый) электронный микроскоп JEOL JSM-7500FA (рисунок 22), который имеет следующие характеристики: пространственное разрешение 1 нм, максимальное увеличение – 1000000 крат, оснащён детекторами вторичных электронов и электронов обратного рассеяния.



Рисунок 22 – Сканирующий (растровый) электронный микроскоп JEOL JSM-7500FA

4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

4.1 Предпроектный анализ

4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Токопроводящие композиции на основе ПП и углеродных наполнителей применяют с целью отвода с поверхности изделия, изготовленного из этого материала, накапливающегося статического заряда.

Данная научно-исследовательская работа направлена на получение электропроводящего ПКМ, который впоследствии может быть переработан в трубу. Следовательно, в основном, целевым рынком являются строительные компании.

В таблице 18 приведены некоторые свойства полимеров на основе следующих электропроводящих наполнителей: смесь УНТ/технический углерод (данная научно-исследовательская разработка), технический углерод, антистатические добавки.

Таблица 18 – Сравнительная характеристика ПКМ с электропроводящими наполнителями

Тип ПКМ	Характеристика ПКМ			
1. ПКМ на основе смеси УНТ/технический углерод	Высокая электропроводность	Низкое содержание наполнителя	Высокие физико-механические свойства	Средняя стоимость
2. ПКМ на основе технического углерода	Высокая электропроводность	Высокое содержание наполнителя	Низкие физико-механические свойства	Низкая стоимость
3. ПКМ на основе антистатических добавок	Удовлетворительные антистатические свойства	Ограниченное содержание наполнителя по влажности	Низкие физико-механические свойства	Низкая стоимость

Основополагающими характеристиками, на которые ориентируются предприятия, являются электропроводящие и физико-механические свойства материалов. Немаловажным фактором является и стоимость ПКМ. Безусловно, привлекательными для предприятий будут ПКМ не только с хорошими технологическими свойствами, но и с низкой ценой.

4.1.2 Диаграмма Исикавы

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

Область применения диаграммы:

- Выявление причин возникновения проблемы;
- Анализ и структурирование процессов на предприятии;
- Оценка причинно-следственных связей.

Причинно-следственная диаграмма представлена на рисунке 33.

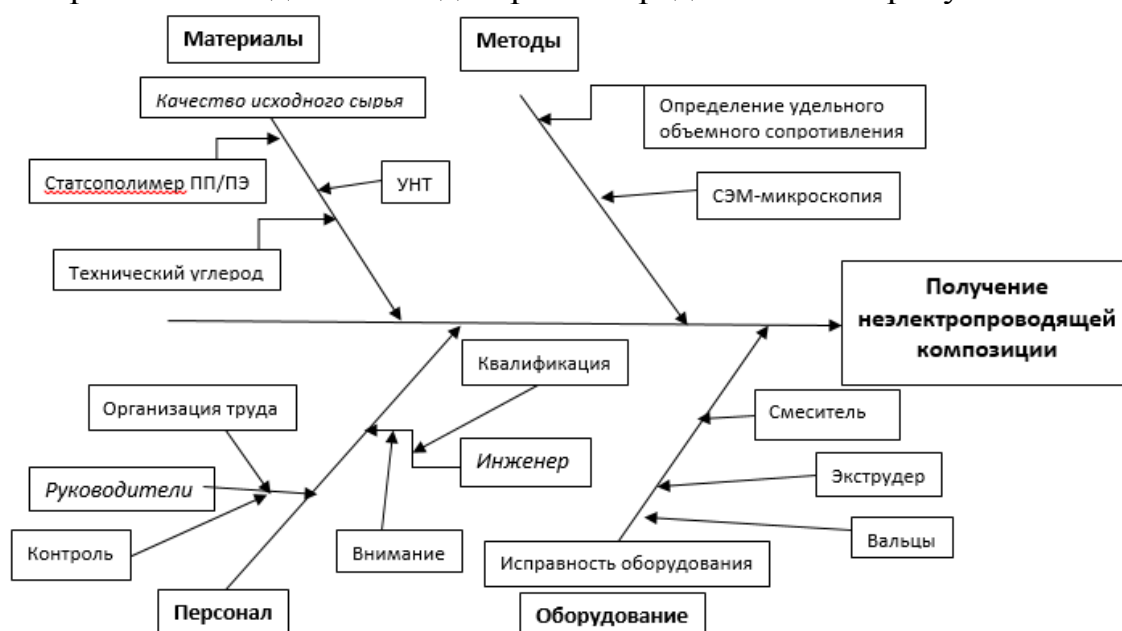


Рисунок 33 – Причинно-следственная диаграмма

4.1.3 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). Показатели степени проработанности проекта с позиции коммерциализации и компетенциям разработчика научного проекта представлены в таблице 19.

Таблица 19 – Бланк оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации

№ п/п	Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
1.	Определен имеющийся научно-технический задел	4	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	3	3
5.	Определены авторы и осуществлена охрана их прав	4	4
6.	Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	3	2
7.	Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	3	2
8.	Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	3	2
9.	Определены пути продвижения научной разработки на рынок	2	2
10.	Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	2	2
11.	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	1	1
12.	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	2	1
13.	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	2	1
14.	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	4	3
15.	Проработан механизм реализации научного проекта	3	2
	ИТОГО БАЛЛОВ	44	37

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

$$B_{\text{сум}} = \sum B_i, \quad (1)$$

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

B_i – балл по i -му показателю.

По степени готовности научного проекта к коммерциализации перспективность выше среднего, а уровень имеющихся знаний у разработчика проект имеет среднюю перспективность. Поэтому с целью повышения эффективности коммерциализации научной разработки необходимо подробнее исследовать рынок сбыта и определить пути продвижения разработки на рынке, увеличить финансирование проекта, а также улучшить уровень знаний разработчика в этой области.

4.1.4 Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования

В качестве метода коммерциализации объекта исследования был выбран *инжиниринг*. Основанием для выбора данного метода послужило то, что потенциальные заказчики могли бы получать услуги, связанные с разработкой технологии по изготовлению полимерных композиций с электростатическими свойствами, а также получить консультации в данной области.

Также возможно использование метода *торговли лицензиями*, т.к. данная научная разработка может быть запатентована. Преимущества такого метода заключаются в следующем:

- лицензиар не вкладывает собственных средств в организацию производства;
- лицензиар не несет расходов по организации сбытовой сети;

4.2 Инициация проекта

4.2.1 Цели и результаты проекта

Целью проекта являлось приготовление электропроводящего ПКМ. В качестве полимерной матрицы была использована трубная марка ПП/ПЭ, а наполнителями выступали углеродные материалы, в т.ч. и наноразмерные.

В таблице 20 представлены заинтересованные стороны проекта.

Таблица 20 – Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
НИ ТПУ	Разработка новых материалов
ООО «НИОСТ»	Получение новых материалов на основе трубной марки статсополимера этилена с пропиленом с электропроводящими свойствами.
Разработчик проекта	Получение новых материалов на основе трубной марки статсополимера этилена с пропиленом с электростатическими свойствами.

В таблице 21 представлена информация о иерархии целей проекта и критериях достижения целей.

Таблица 22 – Цели и результат проекта

Цели проекта:	Приготовление полимерных материалов с электропроводящими свойствами путём введения минимально возможных количеств углеродных наполнителей
Ожидаемые результаты проекта:	Получение полимерных материалов с электростатическими свойствами
Критерии приемки результата проекта:	Определение удельного объемного электрического сопротивления приготовленных материалов, определение физико-механических характеристик
Требования к результату проекта:	Требование:
	Получение ПКМ на основе статсополимера этилена с пропиленом и углеродных наполнителей
	Подбор оптимальных концентраций углеродных наполнителей в ПКМ
	Определение удельного объемного электрического сопротивления ПКМ
	Определение физико-механических характеристик

4.2.2 Организационная структура проекта

На данном этапе работы решаются следующие вопросы: кто будет входить в рабочую группу данного проекта, определяется роль каждого участника в данном проекте, а также прописываются функции, выполняемые каждым из участников и их трудозатраты в проекте. Эта информация представлена в таблице 22.

Таблица 22 – Рабочая группа проекта

№ п/п	ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функции	Трудовые затраты, час.
1	Троян А.А., ТПУ, ОХИ, к.х.н., ст. преподаватель ОХИ ИШПР	Руководитель проекта	Реализация проекта в пределах заданных ограничений по ресурсам, координация деятельности участников проекта.	90
2	Бауман Н.А. Начальник ЛСиПП Дирекции по химии и переработке полимеров ООО «НИОСТ»	Эксперт проекта	Реализация проекта в пределах заданных ограничений по ресурсам, координация деятельности участников проекта.	100
3	Поздняков М.А. Младший научный сотрудник, 2-категория ЛСиПП Дирекции по химии и переработке полимеров ООО «НИОСТ»	Эксперт проекта	Реализация проекта в пределах заданных ограничений по ресурсам, координация деятельности участников проекта.	100
4	Щеголихина Ю.В., ТПУ, ОИЯ, ст. преп., к.ф.н.	Эксперт проекта	Консультирование по выполнению немецкой части	4
5	Криницына З.В., ТПУ, к.т.н., доцент ОСГН	Эксперт проекта	Консультирование по выполнению раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	2
6	Король И.С., ТПУ, к.х.н., доцент ОКид	Эксперт проекта	Консультирование по выполнению раздела «Социальная ответственность»	2
7	Тарновская О.Д., ТПУ, ОХИ, магистрант	Исполнитель по проекту	Получение ПКМ с электростатическими свойствами, изучение электропроводящих и физико-химических свойств полученного материала	900
ИТОГО:				1198

4.2.3. Ограничения и допущения проекта

Ограничения проекта – это все факторы, которые могут послужить ограничением степени свободы участников команды проекта, а так же «границы проекта» - параметры проекта или его продукта, которые не будут реализованных в рамках данного проекта (таблица 23).

Таблица 23 – Ограничения проекта

Фактор	Ограничения/ допущения
3.1. Бюджет проекта	Отсутствует
3.1.1. Источник финансирования	ООО «НИОСТ», НИ ТПУ
3.2. Сроки проекта:	
3.2.1. Дата утверждения плана управления проектом	15.09.2016
3.2.2. Дата завершения проекта	1.06.2018

4.3 Планирование управления научно-техническим проектом

4.3.1. Иерархическая структура работ проекта

Иерархическая структура работ (ИСР) – детализация укрупненной структуры работ.

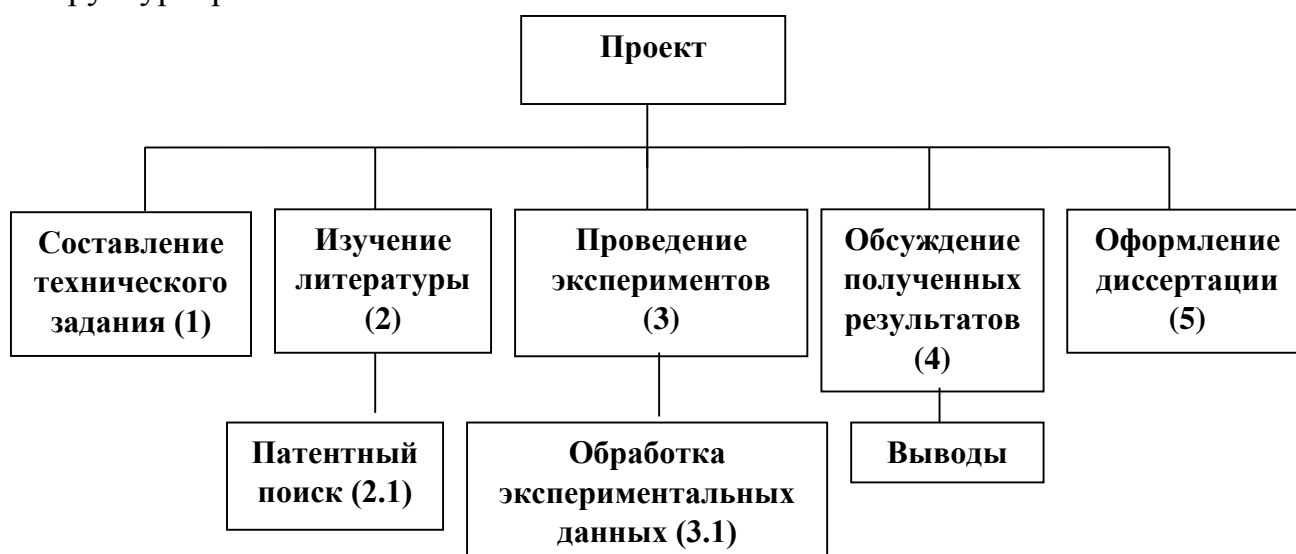


Рисунок 35 – Иерархическая структура работ по проекту

4.3.2 Контрольные события проекта

Контрольные события проекта представлены в таблице 24.

Таблица 24 – Контрольные события проекта

№ п/п	Контрольное событие	Дата	Результат (подтверждающий документ)
1	Составление технического задания	15.09.2016	Бланк задания
2	Изучение литературы	15.10.2016	Статьи, публикации, патенты и т.д
3	Проведение экспериментов	15.05.2017	Графики, таблицы
4	Обработка экспериментальных данных	10.02.2018	Таблицы, графики, рисунки
5	Обсуждение полученных результатов	18.04.2018	Отчет по проделанной работе
6	Оформление диссертации	10.05.2018	Магистерская диссертация

4.3.3 План проекта

В таблице 25 представлен календарный план проекта.

Таблица 25 – Календарный план проекта



Код работы (из ИСР)	Название	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников (ФИО ответственных исполнителей)
1.	Составление технического задания	15	15.09.2016	1.10.2016	Троян А.А., Бауман Н.А.
2.	Изучение литературы	122	15.10.2016	21.02.2017	Тарновская О.Д.
2.1	Патентный поиск	51	05.03.2016	25.04.2017	Тарновская О.Д.
3	Проведение экспериментов	78	15.05.2017	31.07.2017	Тарновская О.Д.
3.1	Обработка экспериментальных данных	112	12.09.2017	26.12.2017	
3.1	Обработка экспериментальных данных	35	05.02.2018	15.03.2018	Тарновская О.Д., Троян А.А., Бауман Н.А.
4.	Обсуждение полученных результатов	12	18.04.2018	30.04.2018	Тарновская О.Д., Троян А.А., Бауман Н.А.
4.1	Выводы	5	05.05.2018	10.05.2018	Тарновская О.Д., Троян А.А., Бауман Н.А.
5	Оформление диссертации	19	12.05.2018	01.06.2018	Тарновская О.Д.
И т о г о: 439					

Для данной НИР выбран линейный график планирования, так как работа выполняется последовательно, она характеризуется сравнительно небольшим количеством этапов и относится к простым.

Диаграмма Ганта – это тип столбчатых диаграмм (гистограмм), который используется для иллюстрации календарного плана проекта, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ (таблица 26).

Таблица 26 – Календарный план-график проведения НИОКР по теме: «Использование моно- и многослойных наноразмерных трубок углерода в качестве наполнителей при переработке сополимера пропилен/этилен»

Наименование этапа	Т, дней	2016 год				2017 год						2018 год										
		Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	
Составление технического задания	15	▨																				
Изучение литературы	122		▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨												
Патентный поиск	51							▨	▨	▨												
Проведение эксперимента	190									▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨						
Обработка экспериментальных данных	35															▨	▨	▨				
Обсуждение результатов	12																	▨	▨			
Выводы	5																			▨	▨	
Оформление диссертации	19																				▨	▨

 – руководитель,
  – студент

4.3.4. Бюджет научного исследования

При планировании бюджета научного исследования должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов планируемых расходов, необходимых для его выполнения.

4.3.4.1 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. Количество потребных материальных ценностей определяется по нормам расхода.

Расчет стоимости материальных затрат производится по действующим прейскурантам или договорным ценам. В стоимость материальных затрат включают транспортно-заготовительные расходы (3 – 5 % от цены). В эту же статью включаются затраты на оформление документации (канцелярские принадлежности, тиражирование материалов). Результаты по данной статье заносятся в таблицу 25.

Таблица 25 – Сырье, материалы, комплектующие изделия и покупные полуфабрикаты

Наименование	Марка, размер	Кол-во	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Статистический сополимер пропилена с этиленом	PPR003EX	42,8 кг	100	4280
Электропроводящий технический углерод	–	2,7 кг	35	94,5
Однослойные УНТ	–	45,356 г	172,02	7802,14
Многослойные УНТ	–	40 г	3435,9	137436
Стеарат кальция	–	3,46 г	0,1	0,346
Стабилизатор Irganox	–	27,68 г	0,25	6,92
Гексан	–	150 мл	0,19	28,5
Всего за материалы				149648,41
Транспортно-заготовительные расходы (3-5%)				7482,42
Итого по статье С _м				157130,83

4.3.4.2 Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ

В данную статью включают все затраты, связанные с приобретением специального оборудования (приборов, контрольно-измерительной аппаратуры, стенов, устройств и механизмов), необходимого для проведения работ по конкретной теме. Определение стоимости спецоборудования производится по действующим прейскурантам, а в ряде случаев по договорной цене.

Таблица 28 – Расчет затрат по статье «Спецоборудование для научных работ»

№ п/п	Наименование оборудования	Кол-во единиц оборудования	Цена единицы оборудования, тыс.руб.	Общая стоимость оборудования, тыс.руб.
1.	Двухшнековый экструдер	1	3640	3640
2.	Одношнековый экструдер	1	2600	2600
3	Лабораторный смеситель	1	1500	1500
4	Двухроторный смеситель	1	2500	2500
5	Вальцы	1	1600	1600
6	Роторная дробилка	1	1000	1000
Всего				12840
Затраты на доставку и монтаж (15 %)				1926
Итого по статье				14766

При приобретении спецоборудования необходимо учесть затраты по его доставке и монтажу в размере 15 % от его цены. Стоимость оборудования, используемого при выполнении конкретного научного проекта и имеющегося в данной научно-технической организации, учитывается в виде амортизационных отчислений.

4.3.4.3 Расчет амортизационных отчислений

Расчет сводится к определению амортизационных отчислений, так как некоторое оборудование было приобретено до начала выполнения данной работы и эксплуатировалось ранее, поэтому при расчете затрат на оборудовании учитываем только рабочие дни по данной теме.

Амортизация рассчитывается по формуле:

$$A=C/n * t$$

где С - первоначальная стоимость оборудования, руб. n - количество дней использования прибора без отказа (гарантийный срок), t - время использования для исследования, дни. Приведем расчет амортизации для электроплиты: $67 A=1\ 890\ 070/(5*365) * 52= 53854$

Амортизационные отчисления по оборудованию представлены в таблице 29.

Таблица 29 – Расчет амортизационных отчислений

№ п/п	Наименование оборудования	Кол-во единиц оборудования, шт.	Цена единицы оборудования, руб.	Срок службы, год	Время использования, дни	Амортизационные отчисления, руб.
1.	Двухшнековый экструдер	1	3640000	7	190	270684,93
2.	Одношнековый экструдер	1	2600000	7	190	193346,38
3	Лабораторный смеситель	1	1500000	5	190	156164,38
4	Двухроторный смеситель	1	2500000	7	190	185909,98
5	Вальцы	1	1600000	5	190	166575,34
6	Роторная дробилка	1	1000000	5	190	104109,59
Всего						1076790,6

4.3.4.4 Основная заработная плата

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

$$C_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп}, (4)$$

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

$Z_{доп}$ – дополнительная заработная плата.

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

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_{раб}, (5)$$

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

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

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

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}}, \quad (6)$$

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. (таблица 30).

Таблица 30 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Магистрант
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней		
- выходные дни	104	104
- праздничные дни	14	14
Потери рабочего времени		
- отпуск	24	40
- невыходы по болезни		
- прочая работа	170	-
Действительный годовой фонд рабочего времени	53	207

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{б}} \cdot (k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) \cdot k_{\text{р}}, \quad (7)$$

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

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

$k_{\text{д}}$ – коэффициент доплат и надбавок (в НИИ и на промышленных предприятиях – за расширение сфер обслуживания, за профессиональное мастерство, за вредные условия: определяется Положением об оплате труда);

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

Основная заработная плата руководителя (от ТПУ) рассчитывается на основании отраслевой оплаты труда. Отраслевая система оплаты труда в ТПУ предполагает следующий состав заработной платы:

1) оклад – определяется предприятием. В ТПУ оклады распределены в соответствии с занимаемыми должностями, например, ассистент, ст. преподаватель, доцент, профессор. Базовый оклад Z_6 определяется исходя из размеров окладов, определенных штатным расписанием предприятия.

2) стимулирующие выплаты – устанавливаются руководителем подразделений за эффективный труд, выполнение дополнительных обязанностей и т.д.

3) иные выплаты; районный коэффициент.

Расчёт основной заработной платы приведён в таблице 31.

Таблица 31 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	Z_6 , руб.	$k_{пр}$	k_d	k_p	Z_m , руб.	$Z_{дн}$, руб.	T_p , раб. дн.	$Z_{осн}$, руб.
Руководитель	23100	1	0,14	1,3	34234,2	1719,39	53	91127,67
Магистрант	6750	1	0	1,3	8775	466,3	207	96524,1
Итого:								187651,77

4.3.4.5 Дополнительная заработная плата научно-производственного персонала

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

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн}, \quad (8)$$

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

$k_{доп}$ – коэффициент дополнительной зарплаты;

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

В таблице 32 приведена форма расчёта основной и дополнительной заработной платы.

Таблица 32 – Заработная плата исполнителей НИИ

Заработная плата	Руководитель	Магистрант
Основная зарплата	91127,67	96524,1
Дополнительная зарплата	9112,767	-
Итого по статье С _{зп}	196764,537	

4.3.4.6 Отчисления на социальные нужды

Статья включает в себя отчисления во внебюджетные фонды.

$$C_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}), \quad (9)$$

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

$$C_{\text{внеб}} = 0,271 \cdot 196764,537 = 53323,19 \text{ руб.}$$

На основании полученных данных по отдельным статьям затрат составлена калькуляция плановой себестоимости НИР, результаты приведены в таблица 33.

Таблица 33 – Группировка затрат по статьям

Сырье, материалы, руб.	Специальное оборудование, руб.	Основная заработная плата, руб.	Дополнительная заработная плата, руб.	Отчисления на социальные нужды, руб.	Итого плановая себестоимость, руб.
157130,83	1076790,6	187651,77	9112,767	53323,19	1484009,2

4.3.5 Организационная структура проекта

В таблице 34 представлен выбор организационной структуры проекта.

Таблица 34 – Выбор организационной структуры научного проекта

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

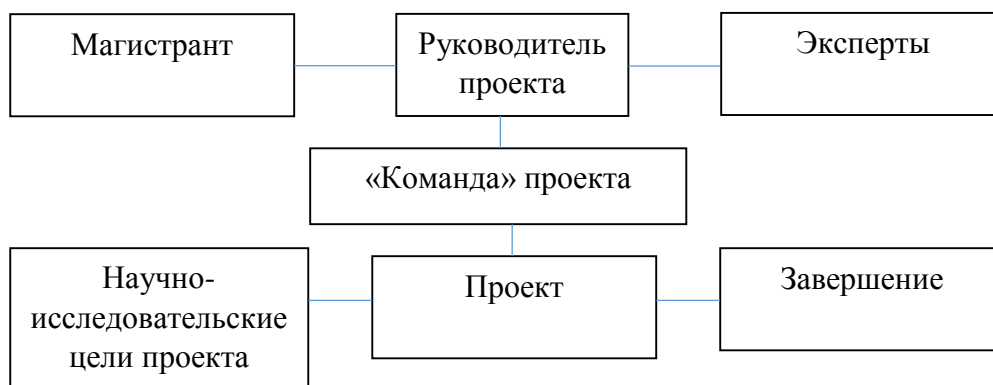


Рисунок 36 – Проектная организационная структура научного проекта

4.3.6 Матрица ответственности

Ответственный (О) – лицо, отвечающее за реализацию этапа проекта и контролирующее его ход.

Исполнитель (И) – лицо (лица), выполняющие работы в рамках этапа проекта.

Утверждающее лицо (У) – лицо, осуществляющее утверждение результатов этапа проекта (если этап предусматривает утверждение).

Согласующее лицо (С) – лицо, осуществляющее анализ результатов проекта и участвующее в принятии решения о соответствии результатов этапа требованиям.

Для распределения ответственности между участниками проекта формируется матрица ответственности (таблица 35).

Таблица 35 – Матрица ответственности

Этапы проекта	Роль/должность	Роль/должность	Роль/должность
1. Составление технического задания	(О) / К.х.н., ст.преподаватель ОХИ ИШПР	(У) и.о. директора Дирекции по химии и переработке полимеров ООО «НИОСТ»	
2. Изучение литературы	(И) /магистрант		

3. Патентный поиск	(И) /магистрант		
4. Проведение эксперимента	(И) /магистрант	(У) (У) и.о. директора Дирекции по химии и переработке полимеров ООО «НИОСТ»	
5. Обработка экспериментальных данных	(О) / К.х.н., ст.преподаватель ОХИ ИШПР	(С) и.о. директора Дирекции по химии и переработке полимеров ООО «НИОСТ»	(И) /магистрант
6.Обсуждение полученных результатов	(О) / К.х.н., ст.преподаватель ОХИ ИШПР	(С) и.о. директора Дирекции по химии и переработке полимеров ООО «НИОСТ»	(И) /магистрант
7. Выводы	(О) / К.х.н., ст.преподаватель ОХИ ИШПР	(С) и.о. директора Дирекции по химии и переработке полимеров ООО «НИОСТ»	(И) /магистрант
8.Оформление диссертации	(И) /магистрант		

4.3.7 План управления коммуникациями проекта

План управления коммуникациями отражает требования к коммуникациям со стороны участников проекта (таблица 36).

Таблица 36 – Плана управления коммуникациями

№ п/п	Какая информация передается	Кто передает информацию	Кому передается информация	Когда передает информацию
1.	Информация о текущем состоянии проекта	Исполнитель проекта	Руководителю магистерской диссертации	Ежемесячно
2.	Документы и информация по проекту	Исполнитель проекта	Руководителю магистерской диссертации	Ежемесячно
3.	Отчет о проделанной работе	Исполнитель проекта	Руководителю магистерской диссертации	Не позже сроков графиков и контрольных точек

4.3.8 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 (таблица 37).

Таблица 37 – Реестр рисков

№	Риск	Вероятность наступления (1-5)	Влияние риска (1-5)	Уровень риска	Способы смягчения риска	Условия наступления
1	Отсутствие финансирования	3	3	Средний	Привлечение внебюджетных средств и инвесторов	Незаинтересованность в данной разработке
2	Проблемы внедрения на рынок	4	4	Высокий	Улучшение качества продукции, маркетинговые исследования	Выпуск некачественной продукции, отсутствие рекламы
3	Невыполнение заданной работы в срок	2	5	Высокий	Найти стороннюю организацию по оказанию аналогичных услуг	Поломка оборудования, нехватка комплектующих, загруженность персонала

Из таблицы 37 видно, что уровень риска проекта высокий, прежде всего, из-за проблем с внедрением на рынок, которые обусловлены текущим состоянием научно-исследовательской разработки, необходимо подробнее исследовать пути продвижения данной разработки на рынке.

4.3.9 План управления контрактами и поставками

Этот план формируется в случае необходимости заключения контрактов для осуществления поставок или работ по проекту (таблица 38).

Таблица 38 – Требования к объектам контрактов

№	Объект контракта (продукт/услуга)	Требования к продукту/услуге	Требования к срокам поставки	Требования к поставщику/подрядчику
1.	Статсополимер пропилен с этиленом электропроводящими свойствами	Удельное объемное сопротивление не выше 10^6 Ом*см	По требованию	Своевременность оплаты

4.4.1 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.

Таблица 39 – Группировка затрат по статьям аналогов разработки

Вариант исполнения аналога №	Сырье, материалы, покупные изделия и полуфабрикаты	Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	Основная заработная плата	Отчисления на социальные нужды	Итого плановая себестоимость
1	90000	1076790,6	196764,54	53323,19	1416878,33
2	300000	1076790,6	196764,54	53323,19	1626878,33

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\phi}^p = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}}, \quad (10)$$

где I_{ϕ}^p - интегральный финансовый показатель разработки;

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

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

Найдем значения интегрального финансового показателя для всех вариантов исполнения научного исследования:

$$\text{для разработки: } I_{\phi}^p = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}} = \frac{1484009,2}{1626878,33} = 0,91$$

$$\text{для первого аналога: } I_{\Phi}^{a1} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}} = \frac{1416878,33}{1626878,33} = 0,87$$

$$\text{для второго аналога: } I_{\Phi}^{a2} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}} = \frac{1626878,33}{1626878,33} = 1$$

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное удешевление стоимости разработки в разы, однако, стоимость первого аналога несколько ниже разработки, что связано с использованием более дорогого сырья.

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

$$I_m^a = \sum_{i=1}^n a_i b_i^a, \quad I_m^p = \sum_{i=1}^n a_i b_i^p \quad (11)$$

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

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

n – число параметров сравнения.

Таблица 40 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии \ ПО	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Аналог 2	Аналог 1
1. Минимальное содержание наполнителя	0,25	5	4	2
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,3	4	3	2
3. Надежность	0,25	4	4	4
4. Безопасность	0,2	4	3	4
ИТОГО	1			

$$I_{\text{тп}}=0,25*5+0,3*4+0,25*4+0,2*4=4,25$$

$$\text{Аналог 2}=0,25*4+0,3*3+0,25*4+0,2*3=3,5$$

$$\text{Аналог 1}=0,25*2+0,3*2+0,25*4+0,25*4=3,1$$

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

$$I_{\text{финр}}^p = \frac{4,25}{0,91} = 4,67;$$

$$I_{\text{финр}}^{a1} = \frac{3,1}{0,87} = 3,56;$$

$$I_{\text{финр}}^{a2} = \frac{3,5}{1} = 3,5.$$

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

$$I_{\text{финр}}^p = \frac{I_{\text{финр}}^p}{I_{\text{финр}}^{a1}} = \frac{4,67}{3,56} = 1,31;$$

$$I_{\text{финр}}^p = \frac{I_{\text{финр}}^p}{I_{\text{финр}}^{a2}} = \frac{4,67}{3,5} = 1,33.$$

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

Таблица 41 – Сравнительная эффективность разработки

№	Показатели	Аналог 1	Аналог 2	Разработка
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,87	1	0,91
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	3,1	3,5	4,25
3	Интегральный показатель эффективности	3,56	3,5	4,67
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,31	1,33	

Вывод: сравнение значений интегральных показателей эффективности позволило определить, что существующий вариант решения поставленной в магистерской диссертации технической задачи с позиции финансовой и ресурсной эффективности является наиболее приемлемым.

Список публикаций

1. **Тарновская О.Д.**, Таракановская А.Н., Поздняков М.А. Влияние технологии введения углеродных нанотрубок разного типа на физико-механические и электропроводящие свойства саженаполненных композиций // Сборник научных трудов XXII Международного научного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых «Проблемы геологии и освоения недр», Томск: Изд-во ТПУ, 2 – 7 апреля 2018.

2. Таракановская А.Н., **Тарновская О.Д.**, Поздняков М.А. Исследование физико-механических свойств композиций полипропилен/оксид алюминия с добавлением нановолокон Al_2O_3 // Сборник научных трудов XXII Международного научного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых «Проблемы геологии и освоения недр», Томск: Изд-во ТПУ, 2 – 7 апреля 2018.

3. **Тарновская О.Д.**, Таракановская А.Н., Поздняков М.А. Исследование электропроводящих свойств саженаполненных композиций от особенностей введения и типа углеродных нанотрубок // Сборник научных трудов XIX Международной научно-практической конференции имени профессора Л.П. Кулева студентов и молодых ученых «Химия и химическая технология в XXI веке», Томск: Изд-во ТПУ, 21 – 24 мая 2018 г.

4. Таракановская А.Н., **Тарновская О.Д.**, Поздняков М.А. Исследование теплопроводящих свойств композиций полипропилен/оксид алюминия с добавлением нановолокон Al_2O_3 // Сборник научных трудов XIX Международной научно-практической конференции имени профессора Л.П. Кулева студентов и молодых ученых «Химия и химическая технология в XXI веке», Томск: Изд-во ТПУ, 21 – 24 мая 2018 г.