

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

Школа ИШИТР

Направление подготовки 15.04.06. «Мехатроника и робототехника»

Отделение школы (НОЦ) Автоматизации и робототехники

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Искусственные мускулы на основе капиллярной нити
УДК 007.52:611.73-037.45

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ЕМ61	Булатов Артем Павлович		

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель ВКР	Замятин Н.В.	д.т.н.		
Руководитель ООП	Мальшенко А.М.	д.т.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП ТПУ	Петухов О.Н.	к.э.н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОКД ИШНКБ	Бородин Ю.В.	к.т.н., доцент		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель ОАР	Леонов С.В.	к.т.н.		

Министерство образования и науки Российской Федерации

федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Школа ИШИТР

Направление подготовки 15.04.06. «Мехатроника и робототехника»

Отделение школы (НОЦ) Автоматизации и робототехники

УТВЕРЖДАЮ:

Руководитель ООП

_____ Малышенко А.М.

(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

Группа	ФИО
8ЕМ61	Булатов Артем Павлович

Тема работы:

Искусственные мускулы на основе капиллярной нити

Утверждена приказом директора (дата, номер)	28.03.2018 2182с
---	------------------

Срок сдачи студентом выполненной работы:	05.06.2018
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Искусственные мускулы на основе полимерных соединений, способные совершать циклические регулируемые механические сокращения под воздействием внешнего активатора.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	Введение 1 Анализ информационных источников 2 Математическое описание объектов 3 Экспериментальное исследование моделей Заключение

Перечень графического материала	
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент	Петухов О.Н.
Социальная ответственность	Бородин Ю.В.
Иностранный язык	Горбатова Т.А.
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Литературный обзор	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	02.10.17
---	----------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Замятин Н.В.	д.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ЕМ61	Булатов Артем Павлович		

Министерство образования и науки Российской Федерации

федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Школа ИШИТР

Направление подготовки 15.04.06. «Мехатроника и робототехника»

Отделение школы (НОЦ) Автоматизации и робототехники

УТВЕРЖДАЮ:

Руководитель ООП

_____ Малышенко А.М.

(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

Группа	ФИО
8ЕМ61	Булатов Артем Павлович

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН

выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	05.06.2018
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
08.12.17	Литературный обзор	25
01.04.18	Экспериментальная часть	30
06.05.18	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	20
18.05.18	Социальная ответственность	10
25.05.18	Приложение на иностранном языке	15

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Замятин Н.В.	д.т.н.		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Автоматизации и робототехники	Малышенко А.М	д.т.н.		

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ПРОГРАММЕ

Код рез- та	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
<i>Профессиональные</i>		
P1	Применять глубокие естественно-научные, математические знания в области анализа, синтеза и проектирования для решения научных и инженерных задач производства и эксплуатации мехатронных и робототехнических устройств и систем, в том числе их систем управления.	Требования ФГОС (ПК-1, ПК- 3, ОПК-1, ОПК-4, ОК-1, ОК-9), Критерий 5 АИОР (п. 1.1), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P2	Воспринимать, обрабатывать, анализировать и обобщать научно-техническую ин- формацию, передовой отечественный и зарубежный опыт в области теории, проектирования, производства и эксплуатации мехатронных и робототехнических устройств и систем, принимать участие в командах по разработке и эксплуатации таких устройств и систем.	Требования ФГОС (ПК-3, ПК- 4, ПК-7, ОПК-1, ОПК-3, ОК-1, ОК-4, ОК-5, ОК-6, ОК-9), Критерий 5 АИОР (пп. 1.1, 1.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P3	Применять и интегрировать полученные знания для решения инженерных задач при разработке, производстве и эксплуатации современных мехатронных и робототехнических устройств и систем (в том числе интеллектуальных) с использованием технологий мирового уровня, современных инструментальных и программных средств.	Требования ФГОС (ПК-2, ПК- 3, ПК-4, ПК-5, ПК-15, ПК-18, ОПК-3, ОПК-6, ОК-1, ОК-5, ОК-6, ОК-7), Критерий 5 АИОР (пп. 1.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P4	Определять, систематизировать и получать необходимую информацию в области проектирования, производства, исследований и эксплуатации мехатронных и робототехнических модулей, устройств и систем.	Требования ФГОС (ПК-7, ПК- 10, ПК-11, ПК-12, ПК-18, ОПК-4, ОПК-6, ОК-1 ОК-4, ОК-6, ОК-8), Критерий 5 АИОР (п. 1.3), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P5	Планировать и проводить аналитические, имитационные и экспериментальные исследования для целей проектирования, производства и эксплуатации мехатронных и робототехнических средств и систем (в том числе интеллектуальных) с использованием передового отечественного и зарубежного опыта, уметь критически оценивать полученные теоретические и экспериментальные данные и делать выводы.	Требования ФГОС (ПК-1, ПК- 2, ПК-3, ПК-4, ПК-5, ПК-6, ПК-13, ПК-17, ПК-18, ОПК-2, ОПК-3, ОК-1, ОК-3, ОК-4, ОК-6, ОК-7, ОК-8, ОК-9), Критерий 5 АИОР (п. 1.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR- ACE</i> и <i>FEANI</i>
P6	Понимать используемые современные методы, алгоритмы, модели и технические решения в мехатронике и робототехнике и знать области их применения, в том числе в автоматизированных производствах.	Требования ФГОС (ПК-1, ПК- 2 ПК-3, ПК-7, ОПК-1, ОПК-3, ОПК-4, ОК-5, ОК-9, ОК-10), Критерий 5 АИОР (п. 2.1), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>

Универсальные

P7	Эффективно работать в профессиональной деятельности индивидуально и в качестве члена команды	Требования ФГОС (ПК-1, ПК- 2 ПК-7, ПК-8, ПК-16, ПК-17, ОК-1, ОК-2, ОК-4, ОК-6, ОК-9), Критерий 5 АИОР (п. 2.1), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P8	Владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в интернациональной среде с пониманием культурных, языковых и социально-экономических различий	Требования ФГОС (ПК-4, ПК- 8, ПК-9, ПК-16, ОПК-4, ОК-5), Критерий 5 АИОР (п. 2.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P9	Проявлять широкую эрудицию, в том числе знание и понимание современных общественных и политических проблем, демонстрировать понимание вопросов безопасности и охраны здоровья сотрудников, юридических аспектов, ответственности за инженерную деятельность, влияния инженерных решений на социальный контекст и окружающую среду	Требования ФГОС (ПК-5, ПК- 8, ПК-15, ПК-16, ПК-18, ОПК-1, ОПК-4, ОПК-5, ОК-3, ОК-4, ОК-5, ОК-6, ОК-8, ОК-9), Критерий 5 АИОР (пп. 1.6, 2.3.), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEAN</i>
P10	Следовать кодексу профессиональной этики и ответственности и международным нормам инженерной деятельности	Требования ФГОС (ПК-8, ПК- 11, ПК-16, ОПК-3, ОПК-6, ОК-4), Критерий 5 АИОР (пп. 2.4, 2.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P11	Понимать необходимость и уметь самостоятельно учиться и повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (ПК-4, ПК- 8, ОПК-3, ОПК-4, ОК-5, ОК-6, ОК-7, ОК-8), Критерий 5 АИОР (2.6), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> .

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Группа		ФИО	
8ЕМ61		Булатов Артем Павлович	
Школа	ИШИТР	Отделение	Автоматизации и робототехники
Уровень образования	Магистр	Направление/специальность	Мехатроника и робототехника
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:			
<p>Описание рабочего места (рабочей зоны, технологического процесса, механического оборудования) на предмет возникновения:</p>		<p>Рабочим местом является аудитория №210 в межвузовском студенческом бизнес инкубаторе «Дружба». Местом проведения экспериментов является аудитория №243 и №301 в корпусе ФЕТ ТУСУР. В аудитории рабочей зоной является место за персональным компьютером, отведённое студенту для выполнения работы. Технологический процесс представляет собой проведение экспериментальной части и сбор статистических данных, анализ, сравнение с полученными ранее математическими моделями. Основным оборудованием в работе является персональный компьютер с периферийными устройствами. Источник горячего воздуха от термофена. Лабораторный блок питания.</p> <p>Вредными факторами производственной среды, которые могут возникнуть на рабочем месте, являются: недостаточная освещённость рабочей зоны, отсутствие или недостаток естественного света, повышенный уровень шума, повышенный уровень электромагнитных излучений, повышенная или пониженная влажность воздуха, повышенная напряжённость электрического поля, выделение вредных веществ и отходов при 3д-печати.</p> <p>Опасными проявлениями факторов производственной среды, которые могут возникнуть на рабочем месте, являются: электрический ток и горячий воздух.</p> <p>Чрезвычайной ситуацией, которая может возникнуть на рабочем месте, является возникновение пожара.</p>	
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:			
<p>1. Производственная безопасность</p> <p>1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности</p> <p>1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:</p>		<p>Анализ выявленных вредных факторов:</p> <ul style="list-style-type: none"> • отсутствие или недостаток естественного света; • уровень шума; • уровень электромагнитных излучений; • напряжённость электрического поля; • термическое воздействие воздуха; • микроклимат. <p>Анализ выявленных опасных факторов:</p> <ul style="list-style-type: none"> • электрический ток • горячий воздух. 	

2. Охрана окружающей среды:	Воздействие объекта на атмосферу, гидросферу не происходит. В работе проведён анализ воздействия на литосферу (образование отходов при поломке ПК, отходов при печати, при утилизации ламп).
3. Защита в чрезвычайных ситуациях:	В аудиторном помещении возможно ЧС техногенного характера – пожар (возгорание).
4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:	Рабочее место при выполнении работ в положении сидя должно соответствовать требованиям ГОСТ 12.2.032-78. Требования к организации оборудования рабочих мест с ПК регулируются в СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03.

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОКД ИШНКБ	Бородин Ю.В.	к.т.н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ЕМ61	Булатов Артем Павлович		

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

Студенту:

Группа	ФИО
8ЕМ61	Булатов Артем Павлович

Школа	ИШИТР	Отделение	Автоматизации и робототехники
Уровень образования	Магистр	Направление/специальность	Мехатроника и робототехника

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:	
1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Оценка затрат на разработку и создание искусственных мышц на основе полимерных соединений.
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	1. Налоговый кодекс Российской Федерации 2. ФЗ №212 от 24.07.2009 в ред. от 19.12.2016
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	Обоснованно внедрением в сфере робототехнических систем
2. <i>Разработка устава научно-технического проекта</i>	Составление мероприятий для разработки и тестировании искусственных мускулов
3. <i>Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	Расчёт капитальных и текущих затрат на разработку и тестирование искусственных
4. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	Техническо-экономическое обоснование использования актюаторов в мехатронных
Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):	

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП ТПУ	Петухов О.Н.	К.Э.Н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ЕМ61	Булатов Артем Павлович		

Реферат

Дипломная работа 108 страниц, 26 рисунков, 15 таблиц, 42 источника.

Ключевые слова: искусственные мускулы, мягкие актуаторы, полиамидная нить, поливиниловый спирт, разработка движителей.

Объектом исследования является класс искусственных мускул на основе полиамидной нити и на основе поливинилового спирта.

Целью данной выпускной квалификационной работы является разработка модели действующего искусственного мускула, основанного на полимерном соединении, сбор и анализ статистических экспериментальных данных.

В результате работы проанализированы информационные источники, на их основании описаны две математические модели двух различных объектов. Мышцы из полиамидной нити и актуатора из поливинилового спирта. Проведены серии экспериментов, по результатам которых собраны статистические данные и сравнены с моделью.

Данная выпускная квалификационная работа была выполнена на персональном компьютере при использовании пакета Microsoft Office XP, текстовая часть выполнена в Microsoft Word, расчеты и графики в Matlab 16a, презентация в Microsoft Power Point.

Содержание

Введение.....	14
1 Анализ информационных источников.....	16
1.1 Мышцы на основе графена.	16
1.2 Мышцы на основе полимерных соединений.....	19
1.2.1 Искусственные мускулы на основе полиамидной нити.	20
1.2.2 Мягкие актуаторы из силикона	23
1.2.3 Мышцы на основе ЭАП	26
1.3 Гибкие пневматические мускулы.....	30
1.4 Итоги главы	33
2 Математические модели.....	36
2.1. Модель полиамидной нити	36
2.2 Модель ЭАП	40
3 Экспериментальные модели	45
3.1 Эксперименты с полиамидной нитью.....	45
3.1.1 Метод получения нити	46
3.1.2 Описание серии экспериментов	47
3.1.3 Результаты экспериментов.....	49
3.1.4 Выводы по экспериментам	51
3.2 Эксперименты с ЭАП на основе поливинилового спирта.....	53
3.2.1 Описание серии экспериментов	54
3.2.2 Результаты серии экспериментов.....	58
3.2.3 Выводы по экспериментам	62
4 Социальная ответственность	63
4.1 Техногенная безопасность	64
4.1.1 Микроклимат.....	64

4.1.2	Естественная освещенность.....	65
4.1.3	Уровень шума.....	67
4.1.4	Уровень электромагнитных излучений.....	67
4.1.5	Выделение вредных веществ.....	69
4.1.6	Электробезопасность.....	70
4.2	Охрана окружающей среды.....	71
4.3	Защита в чрезвычайных ситуациях.....	73
4.4	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .	75
4.4.1	Эргономические требования к рабочему месту.....	75
4.4.2	Особенности законодательного регулирования проектных решений.....	77
5	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	78
5.1	Организация и планирование работ.....	78
5.1.1	Продолжительность этапов работ.....	80
5.2	Расчет сметы затрат на выполнение проекта.....	83
5.2.1	Расчет затрат на материалы и покупные изделия.....	84
5.2.1	Расчет заработной платы.....	85
5.2.2	Расчет затрат на электроэнергию.....	87
5.2.3	Расчет затрат на социальный налог.....	88
5.2.4	Расчет амортизационных расходов.....	88
5.2.5	Расчет прочих (накладных) расходов.....	89
5.2.6	Расчет общей себестоимости разработки.....	89
	Заключение.....	90
	Список публикаций студента.....	92

Список источников	93
Приложение 1	98
Приложение 2	99
1 Literature review	100
1.1 Muscles based on grapheme	100
1.2 Muscles based on polymeric compounds	103
1.2.1 Artificial muscles based on polyamide yarn.....	104
1.2.2 Soft silicone actuators	106

Введение

Словосочетание «искусственные мускулы» как таковое вызывает на подсознательном уровне аналогии с живой мышечной тканью. Несмотря на то что, строение и принципы работы естественных мышц изучены достаточно глубоко, воспроизведение их инженерными средствами на современном уровне развития науки и технологий представляется, пускай и не такой нереальной задачей, но сложно исполнимой. На разработку технологий для выращивания мышечных структур, которые могут быть внедрены в человеческое тело, уйдут десятилетия. Следовательно, бионический подход неприменим и в данном случае лишь порождает психологическую инерцию, ограничивая возможности исследователей.

Другой подход – функциональный, выросший из практики протезирования и роботостроения, – позволяет более широко подходить к моделированию искусственных мускулов, так как указывает на необходимость воспроизведения функции мышцы на микро- и/или макроуровнях, не внося дополнительных ограничений в средства и материалы реализации функции, реализуя, таким образом, принцип изофункционализма. В случае функционального подхода за основу берется главная функция мышц, которую они выполняют в организме [33]. Очевидно, что эта функция – моторная, которую можно определить, как перемещение в пространстве и относительно друг друга элементов кинематической цепи организма.

Нужно иметь в виду, что мышцы в составе опорно-двигательного аппарата участвуют в пространственных перемещениях организма (локомоциях) и манипуляциях с пространственными объектами – т.е. в предметной деятельности. Это обстоятельство предъявляет дополнительные требования к искусственным мышцам – по параметрам усилия, размеров, массы, точности, управляемости. Таким образом, исследователь в процессе моделирования искусственной мышцы вынужден держать прицел на сферу применения – в составе человекоподобного устройства и в условиях,

приближенных к стандартной жизнедеятельности человека, так как именно эта сфера применения и задает ограничения на возможные реализации системы.

Разработки в данной области невероятно актуальны, так как существующие актуаторы, будь то электрические двигатели или пневматические и гидравлические цилиндры имеют ряд недостатков, которые предположительно отсутствуют у искусственных мышц [26]. А именно: высокие пусковые токи двигателей, большие размеры, невозможность воспроизводить движения достаточно сложной геометрии, без использования дополнительных звеньев, передаточных механизмов. Применение прототипа такой технологии может стать новым витком в развитии робототехнических систем в целом.

Продолжая идею предыдущих работ в качестве объекта исследования выступают мускулы на основе полиамидных нитей, а также будет проведено исследование поливинилового спирта в качестве электроактивного полимера, применяемого в искусственных мускулах. Так же будет произведен широкий анализ существующей современных разработок в области искусственных мышц в целом. Будут произведены серии экспериментов с объектами исследования и проведено заключение по ним.

Целью данной работы является анализ современных исследований в сфере искусственных мускулов, а также сбор экспериментальных и статистических данных при работе с искусственными мускулами на основе полимерных соединений.

Работа будет разделена на три части, первая из которых представляет собой обширный анализ различных искусственных актуаторов. Вторая часть представляет собой математическое описание мускулы на основе полиамидной нити, третья же часть посвящена сбору экспериментальных данных.

1 Анализ информационных источников

Несмотря на относительную новизну данной темы существует достаточно большое количество работ посвященной ей. Если рассматривать всю область в целом, то можно разделить работы на группы как по типу используемых материалов, так и по типу активаторов, которые применяются для преобразования энергии в механическую работу искусственных мышц.

Следуя этому распределению можно выделить в каждой из групп следующие пункты.

По типу материалов:

1. полимерные соединения;
2. углеродные структуры;
3. сложные металлические соединения.

По типу активаторов:

1. электрический ток и электрическое поле;
2. тепловая энергия;
3. магнитное поле;
4. химически активные реагенты;

К особым видам мышц стоит отнести различные замкнутые оболочки, для которых активаторами являются нейтральные жидкости и газы. Иными словами, аналог пневматических или гидравлических актуаторов.

1.1 Мышцы на основе графена.

Графен является одной из аллотропных модификаций углерода, подобно алмазу и графиту. Он представляет собой плоский слой атомов углерода, собранных в графите в слабосвязанные стопки. Графен это удивительный материал, он обладает высокой электропроводностью и весьма прочен. Признан в качестве одного из самых перспективных материалов для электроники будущего, вероятно заменяющий кремний [38]. Искусственные мускулы на базе графена имеет несколько видов вариаций, различающихся по принципу взаимодействия на низких структурных уровнях.

Разработки в этой области ведутся с 1999 года, а именно началом можно считать доклад на 13-ой Международной зимней школе по электронным свойствам новых материалов, международной исследовательской группы сотрудников во главе с Рэем Баухманом (Ray Vaughan), сотрудником компании "Эллайд Сигнел" (Allied Signal). Доклад был посвящен созданию искусственных мускулов.

В группе Баухмана применили следующий принцип. Углеродные нанотрубки можно получать в виде листочков нанобумаги, в которых трубки перепутаны, переплетены друг с другом (см. рис. 1.1). Такую нанобумагу можно брать в руки, разрезать на полосы. Первые эксперименты были на удивление просты.

Исследователи приклеили две полосы нанобумаги к противоположным сторонам липкой ленты, присоединили к концам электроды и опустили в солевой раствор, обеспечивающий электропроводность. При включении электрической батареи, дающей напряжение в несколько вольт, обе полосы нанобумаги слегка удлинились, но связанная с отрицательным полюсом батареи удлинилась больше, и они изогнулись. Таким образом искусственная мышца работала.

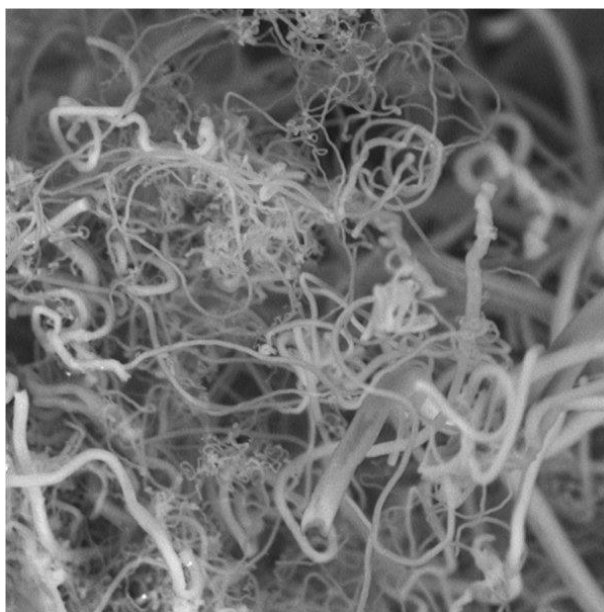


Рисунок 1.1 – углеродное нано волокно.

Следующим в хронологическом порядке концептуально новым применением графена в качестве искусственных мышц стало использование скрученных нанотрубок с добавлением парафина внутрь трубки. Данное открытие можно отнести к 2012 году. Открытие принадлежит международной команде в состав которой входил упомянутый ранее Рэй Баухман (Ray Vaughman).

В своей разработке исследователи использовали эффект теплового расширения парафина. При нагревании внутри нанотрубок парафин расширяется что вызывает их сокращение. В качестве нагревателей могут быть использованы различные внешние источники.

В статье [38] опубликованной в Science утверждается что новая искусственная мышечная ткань способна поднять вес, превосходящий её собственный в сто тысяч раз. В ходе эксперимента мускульное волокно не потеряло своих свойств после двух миллионов непрерывных сжатий.

Сокращение такой мышцы происходит очень быстро, всего лишь за 25 миллисекунд. Генерируемая мощность данной мышцы в 85 раз больше, чем производимая человеческой мышцей такого же размера. То есть гораздо больше чем обычные человеческие волокна могли бы продемонстрировать.

На следующий год после публикации данной статьи в 2013 году вышла была опубликована другая работа, посвященная искусственным мышцам на базе «мятого» графена на полимерной подложке [39].

Биоинженеры в университете Дюка разработали материал, позволяющий путем плавного изменения силы тока плавно растягивать или сокращать данный материал (см. рис. 1.2).



Рисунок 1.2 – графеновая структура на полимерной подложке.

Полимерную эластичную подложку растянули и закрепили на специальном стенде, после чего равномерно осадил на подложку слой графена. После освобождения подложки она вернулась в исходное, не растянутое, состояние, графеновая структура при этом претерпела изменения. Некоторое микроскопические слои графена оказались ближе друг к другу чем иные, тем самым образовав «мятую» структуру на подложке. Очевидно, что при протекании электрического тока определенной силы в некоторых местах подложки будут происходить более сильные взаимодействия нежели чем в тех местах где слой, остался равномерным. Таким образом при пропускании тока вся структура будет расширяться, а при отсутствии сжиматься. Расширение напрямую зависит от силы пропускаемого тока. По данным исследований степень деформации такой мышцы может составлять 100% от исходного размера.

1.2 Мышцы на основе полимерных соединений

Если затрагивать обширный пласт полимерных соединений, то необходимо разделить их. Активные материалы могут преобразовывать электрическую или химическую энергию непосредственно в механическую энергию за счет реакции материала [29]. В зависимости от типа приведения в действие, материалы, можно разделить на:

- неэлектрические полимеры - деформируемые полимеры (приводимые в действие с помощью неэлектрического воздействия, такие как pH, свет, температура и т. д.);
- электроактивные полимеры (ЭАП) (приводимые в действие с помощью электрического сигнала)
- полимеры, которые изменяют форму или размер в ответ на воздействие электрического поля называются электроактивными полимерами ЭАП и, в зависимости от механизма, ответственного за приведения в действие, делятся на две группы: электронные ЭАП, которые приводятся в движение электрическим полем или действием кулоновских сил и ионные ЭАП, которые изменяют форму из-за подвижности или диффузии ионов и сопряженных вещества.

Электронные ЭАП как правило, требуют больших полей активации, которые близки к уровню пробоя материала. Электронный ЭАП также имеют высокую плотность энергии, а также быстрое время отклика в диапазоне миллисекунд. В отличие от этого, ионные ЭАП материалы, такие как гели, ионные полимер-металлические композиты, проводящие полимерные и углеродные нанотрубки требуют низких управляющих напряжений 1-5В.

1.2.1 Искусственные мускулы на основе полиамидной нити.

Не малый интерес представляют работы с полимерными мышцами, в сравнении с дорогостоящим графеном, производство которого технически не просто и не так широко распространено. В свою очередь полимерные соединения технически проще в своем изготовлении и за частую не требуют точности на нано уровне. Так, например, актуатором работающим за счет тепловой энергии является обыкновенная полиамидная нить, она же одножильная рыболовная леска.

На этот материал сравнительно недавно обратили внимание исследователи из MIT. Свою работу они опубликовали в журнале «Nature» в 2014 году, после чего люди, работающие над этой темой во всем мире,

попытались повторить данный опыт. В частности, некоторых результатов добился и наш соотечественник, руководитель лаборатории информационных технологий Благовещенского Государственного педагогического университета, Александр Николаевич Семочкин. Он усовершенствовал и автоматизировал технологию создания таких искусственных мышц. А именно он разработал устройство позволяющие в автоматизированном режиме скручивать леску наматывая на нее при этом тонкую медную проволоку. При пропускании электрического тока медная проволока нагревается тем, самым заставляя мышцу, находящуюся под нагрузкой, сократится – совершить работу. Данную разработку Александр Семочкин представил на конференции в Далласе в 2016 году.

Для создания работающего прототипа искусственной мышцы на основе полиамидной нити необходимо понимать принцип работы таких актуаторов.

Он невероятно прост, при нагревании леска сокращается в длину и увеличивается в ширину, при охлаждении с точностью наоборот. Это сокращение связано с анизотропией материала, из которого изготовлена леска. Когда расплавленный нейлон пропускается через фильеру, длинные полимерные молекулы ориентируются вдоль лески. Нагруженные полимерные волокна при нагреве ведут себя так же, как и нити растянутой резины – сокращаются, увеличивая энтропию системы.

Если не рассматривать методы скручивания лески, а описывать процесс в целом, то на рисунке 1.3 показано каким образом происходит завивка нити.

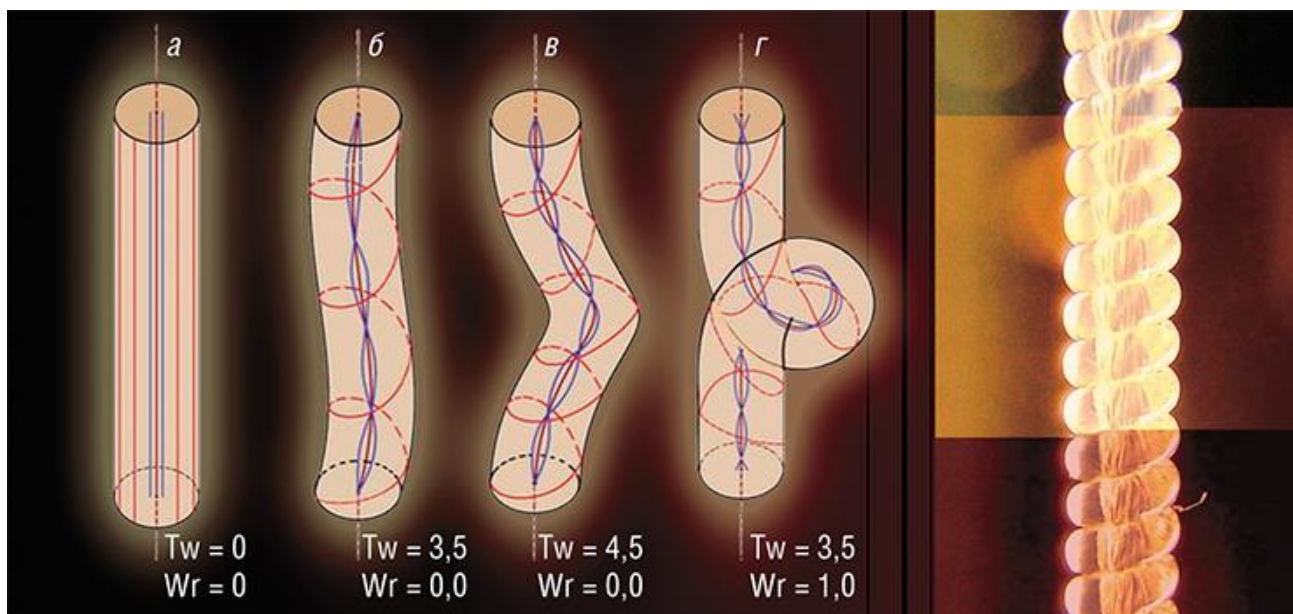


Рисунок 1.3 – Схема образования вторичной закрутки.

Зафиксировав один конец вытянутой лески (а), будем вращать другой конец вокруг продольной оси. При этом волокна у поверхности натягиваются сильнее, чем в сердцевине лески, вызывая механическое напряжение (б), (в). Если уменьшить продольную растягивающую силу, то под этим напряжением волокна будут пытаться раскрутиться. Но так как концы лески фиксированы, эта раскрутка (уменьшение параметра T_w (параметр первичного скручивания)) приводит к образованию петли (г) вторичной закрутки (увеличению параметра W_r (параметр вторичного скручивания)).

Когда продольные волокна на поверхности лески завиваются примерно на 45° по отношению к продольной оси, леска начинает скручиваться в плотную спираль. Исходный отрезок лески длиной 1 м при скручивании превращается в ~ 17 см такой спирали. При этом нейлон претерпевает столь сильную пластическую деформацию, что после снятия вращающего усилия спираль почти не раскручивается обратно. При необходимости это новое состояние волокон можно закрепить, медленно нагрев леску, а затем охладив ее. Нагревание производить до температуры, близкой к температуре плавления нейлона, в зависимости от вида нейлона данная температура колеблется от 178°C Цельсия (Нейлон 12 – РА 12) до 260°C Цельсия (Нейлон 6.6 – РА 6.6).

Рабочая температура такой мышцы существенно ниже температуры плавления и составляет около 58-100 °С градусов в зависимости от использованного типа нейлона. Безусловно более предпочтительным является нейлон с меньшей рабочей температурой.

1.2.2 Мягкие актуаторы из силикона

В сентябре 2017 года опубликована статья в [39] журнале Nature Communications. В данной статье инженеры из Колумбийского университета подробно рассказывают о создании мягкого актуатора на основе двухкомпонентного силикона и этанола способного поднимать грузы на три порядка больше собственной массы, и максимально в 1700 раз больше.

Авторы данной разработки создали мягкий актуатор приводимый электрическим током в движение. Его устройство можно описать следующим образом. В заранее подготовленную форму, такой, например, может служить цилиндрическая трубка или иной другой сосуд, помещается тонкая проволока Ni-Cr, свитая в спираль. Таких проволок может быть несколько. Концы проволоки фиксируются вне сосуда.

Подготавливается смесь силикона и этанола в пропорции 80:20. Авторы работы варьировали степень этанола в эластомере от 0 до 33%, наиболее эффективным решением было выбрано 20%. После чего данная смесь тщательно перемешивается до однородного распределения этанола в пока еще жидком силиконе. Подготовленная смесь заливается в форму и находится в ней до полного застывания силикона. Альтернативным вариантом создания создатели указывают использование 3D принтера.

После застывания в эластомере остаются пузырьки с жидким этанолом, температура кипения которого составляет 78.4 °С, а также с парами этанола и воздуха. Результат данной операции представлен на рисунке 1.4 а.

При подачи электрического тока напряжением 8V и силой 1A через проволоку с достаточно высоким сопротивлением (до 1.4 Ом на мм²/м) происходит ее нагрев, а соответственно и нагрев всего актуатора. Так как

этанол является достаточно летучим веществом с невысокой температурой кипения то при нагревании пузырьков жидкого этанола свыше температуры кипения происходит фазовый переход жидкого вещества в газообразную фазу, что ведет к увеличению объема вещества (см рис. 1.4 b).

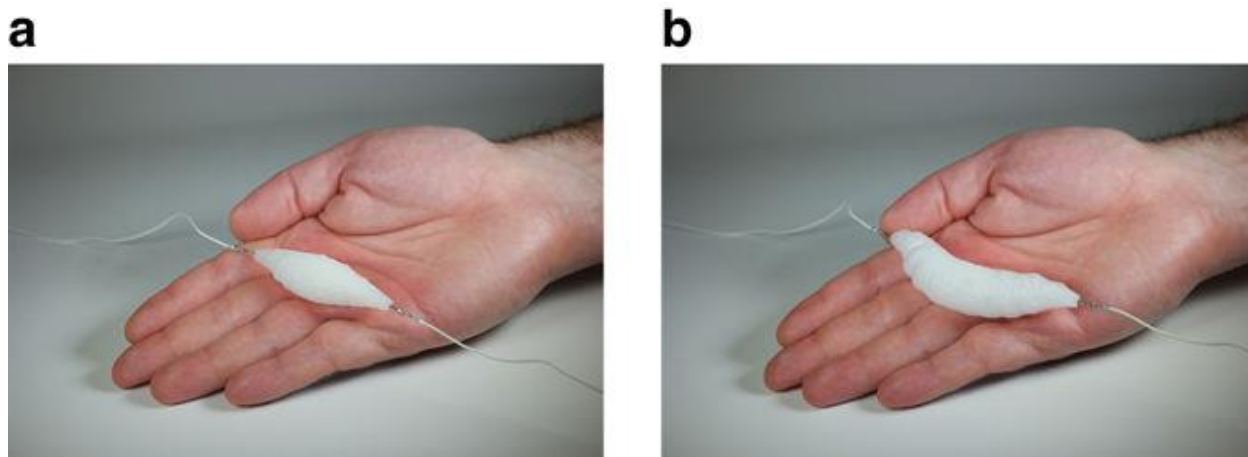


Рисунок 1.4 – работа мягкого актуатора.

Описанный выше принцип распределения жидкого и газообразного этанола, а также схематичный принцип работы самого актуатора представлен на рисунке 1.5.

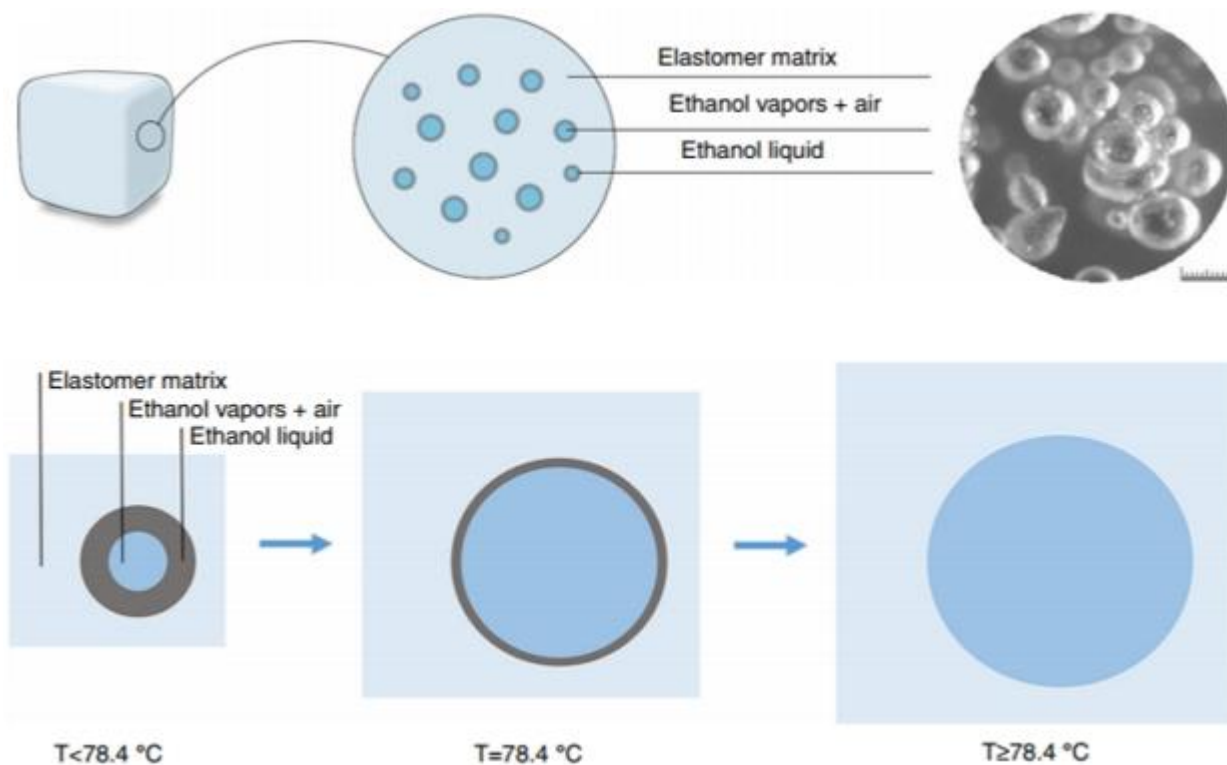


Рисунок 1.5 – принцип работы мягкого актуатора.

После прекращения подачи электрического тока актуатор перестанет нагреваться и будет лишь отдавать полученное тепло во внешнюю среду, при уменьшении температуры будет происходить обратный переход вещества из газообразной фазы в жидкую, иными словами газообразный этанол будет конденсироваться в жидкость внутри упругой силиконовой оболочки.

Для большей равномерности растяжения авторы работы помещают мышцу в гибкую оплетку, которая в свою очередь выступает в роли ограничителя расширения и может приводить к изменению формы эластомера в необходимом направлении. Так, например, на рисунке 1.6 показана работа актуатора в данной оплетке, за счет которой происходит направленное расширение эластомера.



Рисунок 1.6 – работа мягкого актуатора в оплетке с грузом и на месте бицепса.

Производительность данного актуатора авторы работы оценивают в 0,2% с использованием одной нагревающей спирали из нихрома и 0,3% при использовании трех нагревающих спиралей. При напряжении в 15V и силе тока 1A актуатор размером 40мм за 70с развивает усилие в 60 Н сокращаясь при этом на 70% от начальной длины, т.е. на 28мм. Механическая работа при этом составляет $60 \text{ Н} \cdot 0,028 \text{ м} = 1,68 \text{ Дж}$. Выходная мощность составляет

$1,68 \text{ Дж} / 70 \text{ с} = 0,024 \text{ Вт}$. Таким образом, эффективность привод $(0,024 \text{ Вт} / 15 \text{ Вт}) \cdot 100\% \approx 0,2\%$.

1.2.3 Мышцы на основе ЭАП

Прямое преобразование электрической энергии в механическую представляет наибольший интерес, поэтому большое внимание уделяется именно микроактюаторам на основе ЭАП.

Принцип работы такого преобразователя основан на том, что при приложении электрического поля происходит перераспределение ионов в ионообменных мембранах, что приводит к деформации мембраны (рис. 1.7).

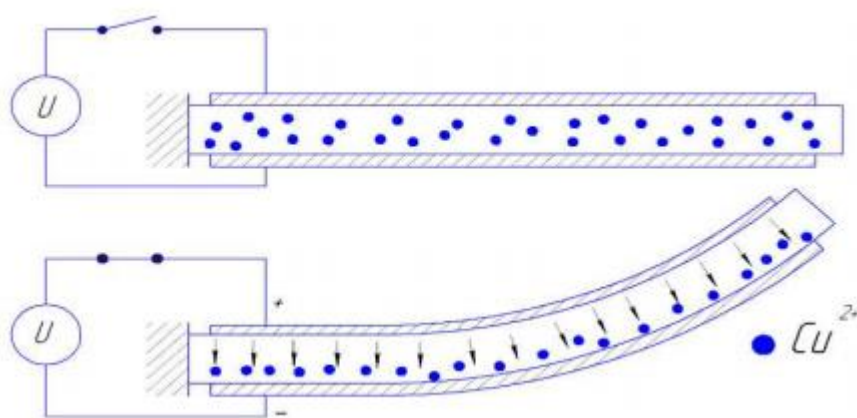


Рисунок 1.7 – Принцип работы микроактюатора на основе электроактивных полимеров.

Ионообменные мембраны — это полимерный пористый материал, построенный на основе гибких полимерных цепей, повторяющиеся звенья которых на основе алифатических циклических, ароматических углеводородных фрагментов или перфторированных звеньев содержат функциональные группы ($-\text{SO}_3\text{H}$, $-\text{PO}_3\text{H}$, $-\text{COOH}$, $-\text{NH}_3\text{OH}$ и т.д.). Протоны или OH-группы последних могут замещаться на ионы, содержащиеся в контактирующих с мембраной растворах. В настоящее время существует большое число мембранных материалов, часть из которых производится на промышленной основе, а часть создается и используется в основном в исследовательских целях.

В этом заключается основная проблема применения и исследования микроактуаторов на основе ЭАП, низкий уровень доступности для широкого круга исследователей. Также во многом возникают проблемы с исследованием ЭАП из-за недостатка информации, которая зачастую является объектом коммерческой тайны. Однако, такие разработки ведутся с 1950х годов поэтому часть работ в хронологическом порядке представлена ниже.

Ранее было произведено множество аналитических выкладок с целью понять механизм активации ионных полимерных гелей, ионных полимер-металлических композитов (ИПМК) (или ионных полимер-проводниковых композитов (ИППК)). В 1950 Kuhn и Katchalsky [10] обратили внимание на то, что некоторые ионы, содержащиеся в сополимерах, могут быть использованы в качестве искусственных мышц так как они могут быть химически растянуты или расширены. Согласно результатам их исследований, трехмерные структуры полиэлектролита, состоящие из ионов и содержащие полиакриловую кислоту и поливиниловый спирт, могут быть получены нагреванием фольги полиакриловой кислоты, содержащей поливалентный спирт такой как глицерин или поливиниловый спирт. Полученные трехмерные структуры чрезвычайно расширяются (более чем на 400%), они нерастворимы в воде, но при этом расширяются в воде с добавлением щелочи и сжимаются при добавлении кислот. Существенным недостатком таких процессов является их скорость, сжатие или расширение могло происходить на протяжении нескольких дней.

Последующие попытки проводились Куном, его студентом Качальским и коллегами и были произведены в 1948 и продолжались до середины 1960 гг. Основной целью их исследование поиск зависимости эффекта расширения и сжатия от степени ионизации структуры. Grodzinsky и его коллеги из MIT были первыми, кто представил последовательную теорию электромеханики деформируемых, заряженных полиэлектролитных биомембран [11]. Их теория была впоследствии развита Grimshaw, Nussbaum, Yarmush, и Eisenberg [12]. Их подход был основан на явлении

электродиффузии, эффекте движения заряженных частиц, внутримембранном потоке жидкости, диссоциации заряженных групп через мембрану, электроосмотическом переносе и механической деформации матрицы мембраны вследствие перераспределения зарядов в полимерной структуре.

В начале 1980гг другой исследователь из MIT, Toshio Tanaka и его коллеги [13] проделали большое количество исследований, посвященных деформации ионных полимерных гелей в электрическом поле. По существу, они рассматривали механизм изгибания как явление фазового перехода.

В середине 1980 такой исследователь как Danilo De Rossi с коллегами [14] представил ряд докладов на тему определения механических параметров, связанных с кинетикой набухания электроактивных полимерных и ионных полимерных гелей. Они были первые, кто предложил аналоги биологической ткани для электромеханической трансдукции: тактильные (сенсорные) датчики и мышце-подобные актуаторы.

Конечно, инженеры в этой области из Японии, Yoshihito Osada и его коллеги [15] уже в середине 1980х гг. также представили возможные теории электрически активируемых механико-химических устройств, использующих полиэлектролитные ионные полимерные гели, а также механизмы и процессы их механико-химического сжатия под действием электрического поля. Их работы продолжаются и сейчас.

К концу 1980-х и в начале 1990-х появляются новые работы в области чувствительности полиэлектролитов и механизмов активации и ионных полимеров. Shahinpoor [16] разрабатывал концептуальный дизайн, исследовал кинематику и динамику плавающих автоматизированных структур, использующих электроактивный полимерный гель. Он представил ряд уравнений сохранения импульса и уравнение сохранения энергии, транспорта ионов, уравнение непрерывности, включающих эффект приложенного поля.

Попытки сформулировать микроэлектромеханическую теорию для ионных полимерных гелей в качестве искусственных мышц были начаты в 1993 и уже в 1995 Shahinpoor и Osada [17] представили теорию электрически

вызванных динамических сокращений полимерных ионных гелей, основанных на электроосмотических силах.

В 2000г De Gennes [18] представил первую феноменологическую теорию для чувствительности и активации в ионных полимер-металлических композитах. Asaka и Oguro (2000) [19] обсуждали изгиб полиэлектролитных мембран платиновых композитов под действием электрического поля, и представили теорию механизма активации ИПМК, подробно рассматривая электроосмотический член в уравнении транспорта. Nemat-Nasser и Li (2000) [25] представили свою работу, посвященную моделированию электромеханического отклика ИПМК, основанного на электростатических силах притяжения/отталкивания в ИПМК. Позже они представили пересмотренную версию их ранней статьи и подчеркнули роль транспорта гидратированных катионов в пределах кластера ИПМК.

Сравнительно недавно они представили новую работу, показывающую эффект, оказываемый различными катионами такими как K^+ , Na^+ , Li^+ , Cs^+ и некоторых металлоорганических катионов, влияющих на эффективность активации и чувствительности ИПМК.

Tadokoro в 2000 [20] представил модель актуатора для применения в робототехнических системах, основанную на физико-химическом взаимодействии. Чтобы понять механизмы чувствительности и активации Shahinpoor и показали зависимость смещения от частоты сигнала. Первое упоминание о преобразовательной способности ионных полимеров описал Sadeghipour [21], который создал акселерометр из а Nafion™ (ионно-обменная мембрана производства DuPont). Они изготовили вафле-подобный элемент, к которому приложили давление через тонкие платиновые электроды и измерили выходное напряжение. Интересная особенность их работы состоит в том, что Nafion не был гидратирован. Перед использованием элемент насыщался водородом под высоким давлением. Однако, нагрузка была приложена через толщину полимера, в то время как большая часть исследований были выполнены с помощью консольных клещей. Shahinpoor и

Mojarad [29] были первыми, кто сообщил об открытии нового эффекта в ионных полимерных гелях, заключающийся в создании выходного напряжения при изгибе ИПМК, позволяющий использовать ИПМК как динамический датчик или преобразователь механической энергии в электрическую.

В результате Shahinpoor and Mojarad занимались исследованием чувствительности смещения, измеряя выходное напряжение в зависимости от изменения отклонения наконечника. Было замечено, что выходное напряжение зависит от ориентации преобразователя относительно электродов.

1.3 Гибкие пневматические мускулы

Если ЭАП полимерные соединения и гели все еще не нашли широкого применения в робототехнике в силу своих особенностей и не очевидным структурам управления такими соединениями, то гидравлические и пневматические приводы давно используются в различных рода мехатронных устройствах. Однако, классические пневматические и гидравлические приводы (см. рис. 1.8), обладающие высокой мощностью и скоростью работы в значительной степени отличаются от мягких актуаторов, а, следовательно, области применения данных приводов различны.

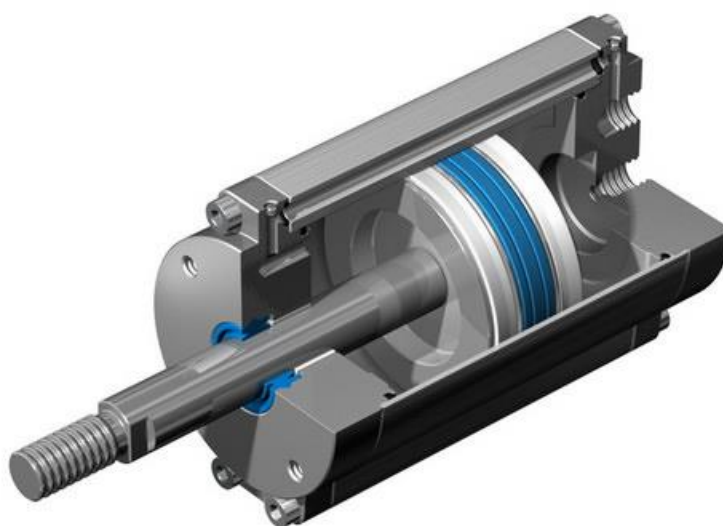


Рисунок 1.8 – пневматический привод в разрезе.

Несмотря на это Dian Yang, Mohit S. Verma, Ju-Hee So и другие исследователи под руководством Джорджа Уайтсайза (George Whitesides) в июле 2016 года опубликовали статью в журнале *Advanced Materials Technologies* [41].

Сотрудники Гарвардского университета создали несколько различных прототипов ячеистого актуатора на базе синтетических структур экофлекса (Ecoflex) и эластосила (Elastosil) (см. рис. 1.9а и b). Полости в таком актуаторе соединены с вакуумным насосом, т.е. мышца является мышцей низкого давления, что выгодно отличает ее от подобных актуаторов работающих за счет увеличения давления. Вакуумный насос откачивая воздух из полостей заставляет равномерно сокращаться всю конструкцию. Форма и расположение ячеек обеспечивают равномерное сокращение по всей длине эластомера.

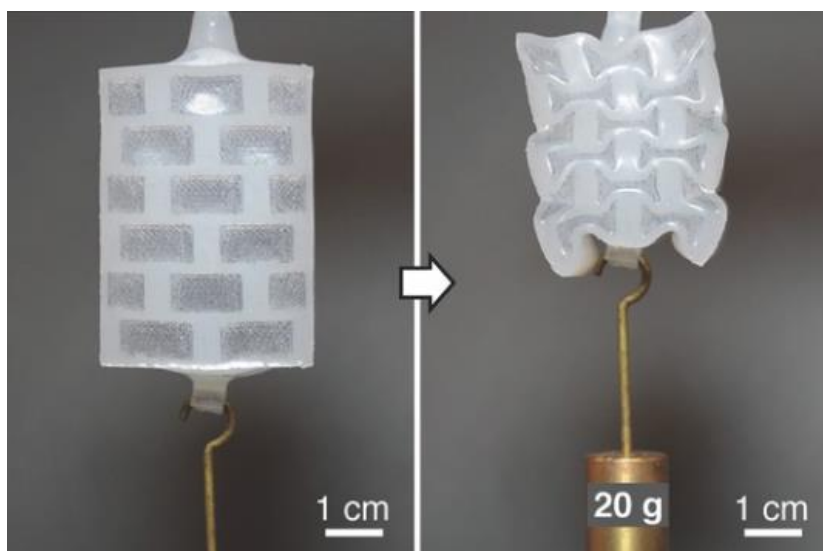


Рисунок 1.9а – работа мягкого пневматического актуатора из экофлекса (максимальное давление 43кПа)

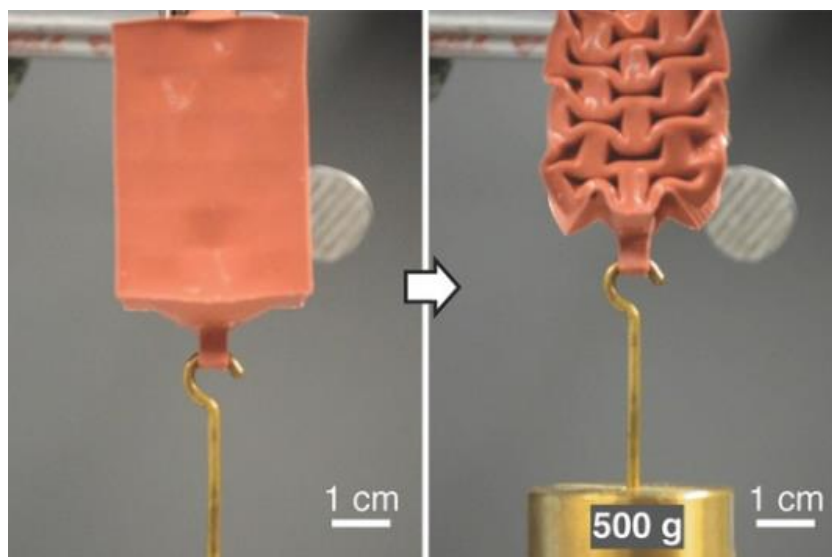


Рисунок 1.9b – работа мягкого пневматического актуатора из эластосила
(максимальное давление 520кПа)

Варьируя конструкцию, изменяя расположение и форму ячеек можно добиться линейного, скручивающего, сгибающего движений или их комбинаций. Это позволяет приводам, названным VAMP (vacuum-actuated muscle-inspired pneumatic structures, приводимые вакуумом и вдохновленные мышцами пневматические структуры) сокращаться подобно настоящей мышце (см. рис. 1.10).

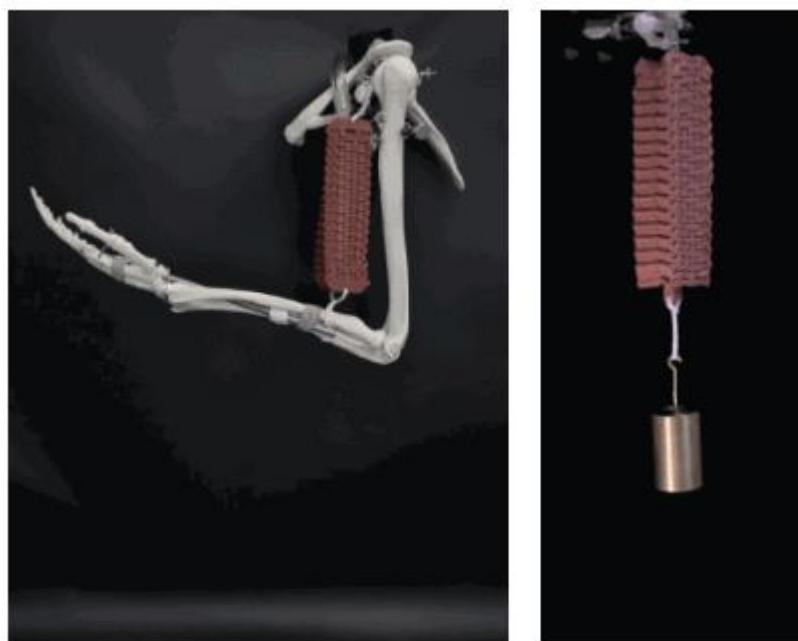


Рисунок 1.10 – VAMP мышца поднимающая груз, слева выполняет роль бицепса, справа поднимает груз массой 100гр.

Как отмечают исследователи, привод планируется использовать при создании роботов, взаимодействующих с людьми. Например, помогающих инвалидам на постоянной основе, людям при реабилитации двигательных функций, роботам, доставляющим заказы, сервирующим столы и подобным.

Исследователи утверждают, что подобного рода мышцы наиболее близки по принципу своего действия к человеческим, а термодинамическая эффективность таких мышц вдвое выше. Однако, максимальная мощность при изотоническом сокращении для естественных скелетных мышц колеблется от 7 до 500 Вт/кг, тогда как у вакуумных достигает лишь 18,5 Вт/кг.

Данные искусственные мышцы обладают достаточным запасом прочности, помимо того, что они поглощают удары и вибрации, они продолжают работать при наличии двухмиллиметрового повреждения, при наличии более серьезных повреждений они перестают действовать.

1.4 Итоги главы

В главе рассмотрены наиболее актуальные существующие работы в области искусственные мышцы или гибких актуаторов. Идея создания таких движителей зародилась уже давно, однако активное распространение она получила лишь в 50х годах прошлого века, а наиболее актуальные работы сделаны во второй половине 2017го года. Это свидетельствует о том, что данная область в последние несколько лет получила активное развитие связи с необходимостью иного вида актуаторов для робототехнических устройств.

В главе рассмотрены такие искусственные актуаторы как:

1. актуаторы на основе углеродных структур,
2. актуаторы на основе полимерных соединений,
3. актуаторы на основе вакуума.

Однако, это далеко не весь спектр существующих технологий преобразования электрической, химической или тепловой в механическую энергию, затрагивающий область искусственных мышц. Так, например, к рассмотрению не были представлены так называемые сплавы «с памятью

формы», такие сплавы, которые под воздействием некоторой температуры возвращаются в исходное заданное им заранее состояние. Распространенным представителем этого класса является никелид титана или нитинол. Помимо него существует более десяти подобных сплавов с различными температурами активации.

Также исследователи из Ратгерского университета в августе 2017 года опубликовали статью в журнале Nature [40] в которой представили полоску дисульфида молибдена толщиной всего несколько нанометров на каптоновой основе способной изгибаться под действием крайне низкого напряжения около 0,3V. Данный актуатор работает в среде электролита – серной кислоты и в зависимости от приложенного к нем потенциала способен изгибаться меня свою форму. Исследователям удалось поднять в жидкости груз массой 265 миллиграмм, актуатором с массой активных веществ всего лишь в 1,6 миллиграмма, таким образом актуатор поднял груз приблизительно в 165 раз больше собственного.

Полимерные соединения активаторами которых являются химические соединения были рассмотрены лишь в качестве исторической справки, так как ранее была доказана их малая применимость из-за крайне низкой скорости работы. Поэтому, в дальнейшая работа будет нацелена на исследования доступных полимерных соединений и использование их в качестве искусственных мускулов.

Причиной данного выбора стало то, что при воздействии внешних механических сил полимеры способны развивать большие, достигающие десятков и сотен процентов, обратимые деформации. Для полимеров характерен релаксационный характер реакции на внешние воздействия, т.е. зависимость деформаций и напряжений от длительности (частоты) воздействия. Физический процесс разрушения полимеров, в отличие от хрупких тел, является процессом, развивающимся во времени, и представляет собой процесс постепенного разрыва химических связей в основной цепи полимера. Роль механического напряжения сводится к снижению

энергетического барьера, препятствующему разрыву химических связей [37] При соответствующих условиях аморфные полимерные материалы могут находиться в высокоэластическом состоянии, когда основным видом деформации являются упругие. Наиболее отчетливо высокоэластическое состояние проявляется у сшитых каучуков (резин).

В качестве конкретных примеров будут далее рассматриваться полимерные мышцы из полиамидной нити, а также будет сформулирована модель для мышц на основе ЭАП.

2 Математические модели

Для того чтобы описать и спрогнозировать работу искусственного актуатора были созданы несколько математических моделей на основе различных математических работ. Данное описание будет производиться на представлении о работе актуатора. В главе 3 будут приведены некоторые практические эксперименты, проверяющие достоверность построенной модели.

2.1. Модель полиамидной нити

Рассмотрим леску, закрученную до состояния, в котором она начинает завиваться в спираль. Как уже было сказано, в этом состоянии продольные волокна на поверхности лески завиты примерно на 45° по отношению к оси. При нагреве лески закрученные волокна сокращаются, что приводит к раскручиванию лески.

Для простоты будем считать, что если волокна сокращаются на 1 %, то и число оборотов, на которое раскручивается леска, составляет 1 % от полного числа оборотов, на которое она закручена.

Определим, как связаны между собой сокращение волокон и сокращение спиральной мышцы. Математическая модель данного процесса может быть описана формулой Калугаряну – Уайта – Фуллера (CWF) [10]:

$$L_k = T_w + W_r, \quad (2.1)$$

которая была доказана в дифференциальной геометрии (Călugăreanu, 1959; White, 1969; Fuller, 1971), а затем нашла применение в молекулярной биологии при описании сверхспирализованных ДНК (Fuller, 1978; Pohl, 1980) [11].

Число зацепления L_k (англ. – *linking number*) в этой формуле показывает, на сколько оборотов нижний конец лески был закручен по отношению к верхнему. Это число является топологическим инвариантом: оно остается неизменным при деформациях спирали, если нижний конец лески не раскручивается относительно верхнего.

Формула CWF говорит о том, что число зацепления можно разложить на два слагаемых – T_w (*twisting*) и W_r (*writhing*), сумма которых остается неизменной для упрощенной модели, которую приняли к рассмотрению. Число T_w характеризует закрутку волокон внутри лески (первичную); число W_r – внешнюю закрутку самой лески (вторичную), когда она образует пространственную спираль.

Из упомянутых математических работ была выведена формула для вычисления W_r в общем случае. Для равномерной спиральной закрутки эта формула сильно упрощается (Fuller, 1978), приобретая вид:

$$W_r = N(1 - \sin(\alpha)), \quad (2.2)$$

где N – это число витков внешней спирали, α – угол подъема винтовой линии спирали. Данное преобразование позволяет измерить количество витков вторичной закрутки, из показателей, которые могут быть непосредственно измерены.

Однако, данная модель не включает в себя рассмотрение изменения температуры во времени. То есть к рассмотрению предлагается некоторая функция $\Delta T(t)$, которая связывает динамическое изменение температуры и переход $W_r \rightarrow T_w$. Ниже представлена формула, которая приблизительно описывает изменение количества витков, в ней изменение температуры зависит от времени:

$$n_{i+1} = n_i \pm \frac{\Delta t_i}{5}, \quad (2.3)$$

где n_i – количество витков на предыдущем шаге, Δt_i – текущее изменение температуры за один временной промежуток.

Знак «+» в уравнении появляется в случае охлаждения мускула, а знак «-» при нагревании мускула и соответственно сокращении числа витков W_r . Физически смысл можно выразить как при нагревании на 5 °C количество витков вторичной закрутки W_r уменьшается на один, а количество витков первичной закрутки T_w на один увеличивается согласно формуле (2.1)

Для того, чтобы описать удлинение лески воспользуемся следующим соотношением, предположив, что леска, скрученная в винтовую спираль может быть аппроксимирована уравнениями применимыми для жестких пружин.

$$\vec{F}_{\text{упр}} = -m \cdot \vec{g}, F_{\text{упр}} = -k \cdot x, \quad (2.4)$$

где m – масса груза, g – ускорение свободного падения, k – жесткость и x – удлинение пружины.

В свою очередь жесткость пружины может быть определена по формуле:

$$k = \frac{G \cdot d_l^4}{8 \cdot d_F^3 \cdot n}, \quad (2.5)$$

где G – модуль сдвига, d_l – диаметр лески, d_F – диаметр витка пружины, n – число витков.

Модуль сдвига для одноосного растяжения связан с модулем Юнга следующей формулой:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}, \quad (2.6)$$

где E – модуль Юнга, ν – коэффициент Пуассона.

Все приведенные данные в формуле 2.6 являются табличными значениями, хотя могут и быть вычислены по соответствующим формулам. В качестве модуля Юнга для полиамида принять значение равное 2,2 ГПа, при температуре 20°C, а коэффициент Пуассона равным 0,49. При отсутствии возможности измерения витка пружины можно воспользоваться следующим упрощенным решением, диаметр витка пружины d_F равен 1,3 – 1,5 диаметра лески.

Однако большую практическую пользу представляет формула 2.4 в силу того, что позволяет определить коэффициент упругости практическим методом.

Приводя к единой системе вышеизложенные формулы модель актуатора изменяющего свою длину во времени может быть представлена следующей системой:

$$\begin{cases} x_i = \frac{16 \cdot m \cdot g \cdot (1 + \nu) \cdot d_F^3 \cdot n_i}{E \cdot d_l^4} \\ L_k = T_w + n_i \cdot (1 - \sin(\alpha)) \\ n_{i+1} = n_i \pm \frac{\Delta t_i}{5} \end{cases} \quad (2.5)$$

Таким образом существует прямая зависимость длины актуатора от количества витков, изменяющихся во времени. При этом внимательно рассматривая центральное уравнение системы, можно отметить что данное уравнение описывает не только баланс витков в конкретной системе, но также позволяет определить и изменения длины. При предположении, что сокращения количество витков прямо пропорциональны процентному изменению длины мышцы.

Ограничения, наложенные на параметр m могут быть сформулированы следующим образом: масса груза, подвешенного к искусственному мускулу может варьироваться от нуля, т.е. отсутствие груза, до некоторого ограниченного значения параметром M_{\max} выражающим максимально допустимую массу груза, которую способна выдержать конкретная мускула. Параметр M_{\max} напрямую связан с параметром нагрузки на разрыв для лески определенного диаметра.

В программе Matlab был построен график (рис. 2.1) с использованием формулы 2.5 для мышцы со следующими характеристиками:

- диаметр лески 1 мм;
- диаметр закрутки 2,5 мм;
- базовая длина лески 200 мм;
- изначальное количество петель 360;
- Начальная температура лески 20°C.

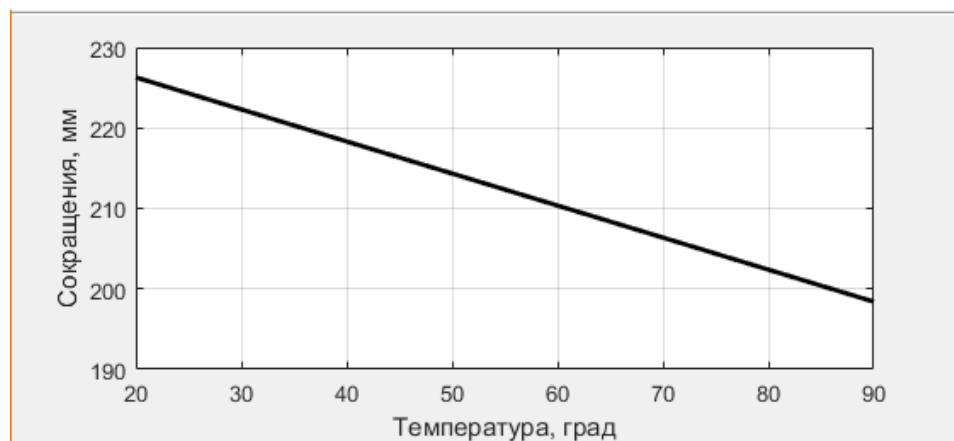


Рисунок 2.1 – динамическое изменение длины лески при возрастании температуры

Код программы представлен в приложении 1. Первое холодное растяжение при этом составляет 26,28 мм.

2.2 Модель ЭАП

Ионный полимер-металлических композит (ИПМК) [30] представляет собой синтетический композитный наноматериал, состоящий из ион обменного полимера, поверхность которого покрыта с обеих сторон проводящим металлом. Приложение электрического поля вызывает механические деформации ИПМК. И, наоборот, механические деформации материала вызывают измеримый электрический сигнал. Таким образом, ион-обменные полимеры могут быть использованы как в качестве сенсоров, так и актуаторов. Принцип работы микроактюатора на основе ИПМК (рис.1.7) заключается в движении свободных катионов в мембране под действием внешнего электрического поля, что приводит к появлению электроосмотического потока жидкости от анода к катоду в следствии чего у одного из электродов возникает избыточное давление жидкости. Таким образом, разность давлений на электродах приводит к деформации микроактюатора.

Транспорт заряженных частиц в ионообменных мембранах может быть описан потоком катионов, который связан с процессами миграции за счет

приложенного внешнего электрического поля и диффузии. Для описания этого потока может быть использовано уравнение Нернста-Планка [31]:

$$J = -[D\nabla C + z\mu FC\nabla\varphi + \mu C\Delta V\nabla P] \quad (2.6)$$

где J-поток ионов, z-валентность ионов, F-константа Фарадея, D- коэффициент диффузии, C- концентрация, μ – подвижность ионов, которая определяется как:

$$\mu = \frac{D}{RT} \quad (2.7)$$

где R- универсальная газовая постоянная, T – температура Уравнение для ионного потока обусловлено использованием двух уравнений Максвелла (закон Ампера и закон Гаусса). Уравнение показывает, что что дивергенция плотности тока равна отрицательной скорости изменения плотности заряда:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla j = 0 \quad (2.8)$$

Общий вид уравнения непрерывности может быть получен путем объединения двух уравнений выше, что дает нам общее дифференциальное уравнение в частных производных для переноса ионов в одном направлении:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \left[-D\nabla C - \frac{z}{R \cdot T} C (F\nabla\varphi + \Delta V\nabla P) \right] = 0 \quad (2.9)$$

Здесь предполагается, что коэффициент диффузии D постоянен вдоль толщины ИПМК. Это уравнение включает в себя две неизвестные переменные, концентрацию катионов C и электрический потенциал φ . Для того, чтобы решить это уравнение, требуется соотношение между этими двумя неизвестными. Уравнение Пуассона (которое получено из уравнения Максвелла) дает связь между плотностью заряда и электрическим потенциалом φ : что концентрация ионов индуцирует электрическое поле в соответствии со следующим соотношением:

$$\nabla^2 \cdot \varphi + \frac{\rho}{\theta} = 0 \quad (2.10)$$

где ρ - плотность заряда, ∇^2 – диэлектрическая проницаемость среды, θ – диэлектрическая проницаемость вакуума.

С другой стороны, плотность заряда связана с концентрацией ионов следующим образом:

$$\rho = F \cdot \sum_{i=1}^n z_i c_i \quad (2.11)$$

Поскольку мы имеем два вида ионов – катионы, и анионы, с валентностями +1 и -1 соответственно, получаем:

$$\rho = F \cdot (C - C_a) \quad (2.12)$$

где C_a – концентрация анионов.

Для описания деформации используется теория упругости. В данной модели рассматриваются малые деформации — обратимые, подчиняющиеся закону Гука. Нормальная и сдвиговая деформация определяется как [31]:

$$\varepsilon_i = \frac{\partial u_i}{\partial x_i}, \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.13)$$

где u_i – i -ая компонента вектора смещения; x_i – координата, индексы i и j принимают значения $\{1,2,3\}$ и обозначают соответственно направления x, y, z в декартовой системе координат. Напряжение с деформацией связаны [26]:

$$\sigma = D \cdot \varepsilon \quad (2.14)$$

где D – тензор упругости, содержащая компоненты модуля Юнга и коэффициента Пуассона; σ – тензор напряжений Система находится в равновесии, если выполняется условие:

$$-\nabla \cdot \sigma = F \quad (2.15)$$

Это уравнение Навье [26], где F – сила, действующая на единичный объем. Для описания изменения деформации во времени можно решить задачу теории упругости в перемещениях: [27]

$$P_p \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \nabla \cdot D \nabla u = F \quad (2.16)$$

где P_p – плотность материала; $\nabla \cdot D \nabla u$ – статическое уравнение Навье, где D – константа Навье; первый член $P_p \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$ описывает динамическую составляющую. Для уменьшения машинных затрат при расчете целесообразно вместо объемной внутренней силы, использовать внешнюю поверхностную силу, заданную в виде граничного условия [31]. Таким образом:

$$P_p \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \nabla \cdot D \nabla u = 0 \quad (2.17)$$

$$D_{yy} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \Big|_{y=h} = F_s \cdot w \quad (2.18)$$

$$D_{yy} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \Big|_{y=0} = -F_s \cdot w \quad (2.19)$$

В случае электромеханического преобразования, сила определяется как функция от плотности заряда

$$F = f(p) \quad (2.20)$$

В большинстве работ [22,23,29] предполагается, что выражение для силы имеет следующую форму:

$$F = \alpha \cdot p \quad (2.21)$$

где α – коэффициент пропорциональности, найденный эмпирически.

Когда к электродам прикладывается напряжение, между электродами возникает градиент потенциала $\nabla\phi$, который заставляет катионы двигаться. В состоянии равновесия потенциал в близи электродов крайне резко изменяется.

В виду ограниченности ресурсов ЭВМ, следует оптимизировать модель. Так аналитическим путем было установлено следующее: разность потенциалов в 1В в такой узкой области в результате дает градиент $\sim 10^4$ В/м; если взять сгибающую деформацию в пределах 1%, модуль Юнга ИПМК $E=249$ МПа, и коэффициент Пуассона $\nu=0,49$, получим давление $P=35$ МПа. Соответственно градиент давления будет примерно $\sim 3,5 \cdot 10^{11}$ Н/м³. Если сравнить члены G и $\Delta \nabla P$ уравнения 2.6 и учесть, что $F=96485,33289(59)$ Кл/моль и $\Delta=6 \cdot 10^{-6}$ м³/моль, то становится ясно, что первый член превалирует над вторым:

$$|F \nabla \phi| \gg |\Delta \nabla P| \quad (2.22)$$

Поэтому третьим членом K в уравнении 2.1 в случае электромеханического преобразования можно пренебречь. Кроме того, как описано в разделе 2.2 объемная сила является функцией от плотности заряда, а, следовательно, от концентрации катионов, т.е.:

$$F = f(p) = g(C) \quad (2.23)$$

Уравнение Нернста-Планка в случае электромеханического преобразования становится:

$$J = -D\nabla C - z\mu FC\nabla\phi \quad (2.24)$$

И уравнение непрерывности соответственно:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla(-D\nabla C - z\mu FC\nabla\phi) = 0 \quad (2.25)$$

Поскольку анионы зафиксированы в полимерной сети, примем концентрацию анионов не изменяемой и равной некоторому начальному значению, т.е.:

$$C_a = C_0 \quad (2.26)$$

Подводя итог вышесказанному, можно сказать, что модель актюатора описывается системой уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial C}{\partial t} + \nabla(-D\nabla C - z\mu FC\nabla\phi) = 0 \\ \nabla^2 \cdot \varphi + \frac{\rho}{\theta} = 0 \\ P_p \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \nabla \cdot D\nabla u = 0 \end{array} \right. \quad (2.27)$$

3 Экспериментальные модели

В ходе данной работы были проведены эксперименты, позволяющие хотя бы частично проверить приведенные математические модели.

3.1 Эксперименты с полиамидной нитью

Эксперимент с полиамидной нитью как таковой не является уникальным, он был проделан рядом исследователей. Целью данного эксперимента является выявление зависимости сокращения и максимальной нагрузки от диаметра лески. В ходе эксперимента будут использоваться полиамидные нити различного диаметра от 0,5 до 1 мм подобно тем, что представлен на рисунке 3.1. Все приведенные таблицы по проведенным экспериментам содержат усредненные данные, каждый эксперимент содержал 2-3 пробных повторения, которые не учитывались при усреднении и 10 тестовых повторений, данные которых учитывались. Пробные повторения необходимы для обеспечения проверки надежности крепежа и стабильности системы в целом. Промежутки между повторениями составляли от 5 до 8 минут. В зависимости от скорости остывания мускула.



Рисунок 3.1 – полиамидные нити различных диаметров.

3.1.1 Метод получения нити

Для скручивания была использована полиамидная леска диаметром 1 мм. В качестве электромеханического компонента выступила электродрель с регулируемым числом оборотов. Чтобы свернуть леску в спираль, электродрель была закреплена в вертикальном положении, один конец лески зажат в патроне, на другой подвешен груз весом примерно 3 Н – такой вес является оптимальными, так как при таком весе леска не порвется, а свернется в однородную спираль. В процессе закрутки груз должен подниматься вверх, не проворачиваясь вокруг вертикальной оси, для чего на него устанавливается фиксатор.

В качестве фиксатора были испробованы несколько вариантов. Фиксирование груза вручную, фиксирования груза при помощи дополнительной лески, закрепленной одним концом на грузе, а другим у статичного объекта, фиксирование по средствам направляющей расположенной вдоль оси движения груза.

Контроль процесса осуществляется, непосредственно человеком. В следствии этого время, затраченное на создание одного актуатора, составляет около двух трех минут. Так как при высоких оборотах возникает погрешность в измерениях.

В процессе скручивания метровой лески в спираль, патрон дрели совершил приблизительно 360 оборотов до образования первичных витков и около 180 оборотов для образования вторичных витков; при этом на каждый оборот возникала одна новая петля. Это означает, что внутренней закрутки лески при образовании барашков уже не происходило, так что готовая мышца, с учетом допущений при подсчете, может характеризоваться числами $T_w = 360$, $W_r = 180$.

К достоинству данной конструкции можно отнести простоту, а именно отсутствие дополнительных конструкций при ручной фиксации груза, сравнительно высокую скорость образования витков относительно методов, не использующих электромеханические устройства.

Образцы актуаторов получаемых при помощи данного метода отличается ровной завивкой витков, так как было обеспечено постоянное натяжение. Также существует достаточно высокий риск порчи заготовки, связанный контролем человеком.

3.1.2 Описание серии экспериментов

Серия экспериментов проводится с использованием одиночной искусственной мышцы (см рис. 3.2). Нагревание будет проводится следующими способами:

- передача тепла от воды $t_{\text{воды}} = 95 \pm 3^\circ\text{C}$ к леске $t_{\text{лески}} = 22 \pm 3^\circ\text{C}$,
- передача тепла при помощи воздушной струи $t = 100^\circ\text{C}$,
- передача тепла от нагреваемой нихромовой проволоки $D \sim 0.5\text{мм}$, нагрев происходит напряжением от 0 до 12V и силой тока от 0 до 2 А.

Нагревание потоком горячего воздуха будет производится при помощи термофена паяльной станции Lukey SMD Rework Satation 702.

Пропускание электрического тока через нихромовую проволоку будет производится при помощи лабораторного блока Shenzhen Mastech DC Power Supply HY3005D-3 питания изображенного на рисунке 3.3



Рисунок 3.2 – блок питания с регулируемым напряжением.

Измерения будут производится при помощи электронного штангенциркуля с погрешностью измерения в $\pm 0,01\text{мм}$ и металлической

линейкой с погрешностью $\pm 0,5$ мм. Измерение температуры проводилось термистором NTC 3950 с сопротивлением 100 кОм при $t = 25^\circ\text{C}$. Измерение времени производилось при помощи приложения таймер на мобильном телефоне.



Рисунок 3.3 – искусственная мышца из полиамидной нити.

Эксперимент первый. Леска закреплена на краю стола, один конец лески жестко зафиксирован струбциной. На другой конец лески подвешивается груз определенной массы (100, 200, 500 гр. с возможностью их соединения) после чего на последний виток подвижного конца наносится маркер, за которым удобно проводить наблюдения. При достижении достаточной массы грузов наблюдается удлинение лески относительно начального положения под действием силы тяжести. Груз фиксируется относительно любых горизонтальных перемещений. Это сделано с целью предотвращения вращательных движений и порче мышцы. Под конструкцией устанавливается емкость для сбора воды. После чего на леску, начиная с верхней части наливается горячая вода, которая стекает в емкость для сбора воды попутно отдавая тепло леске. При повышении температуры свыше 40 градусов должно наблюдаться сокращение лески. Сокращение лески фиксируется визуально изменением положения маркера относительно шкалы.

Второй и третий эксперимент не отличаются расположением лески и фиксацией груза. Во втором эксперименте в качестве нагревателя

используется, струя горячего воздуха, точно так же, как и в первом эксперименте измерение производится по маркеру относительно шкалы.

В третьем эксперименте в качестве нагревателя используется нихромовая леска, которая при нагревании передает тепло нити за счет чего та сокращается. К недостатку третьего эксперимента относится невозможность своевременного контроля температуры лески, так как управление блоком питания осуществляется вручную.

3.1.3 Результаты экспериментов

Описанный эксперимент первый проводился с мышцами, полученными из лесок трех разных диаметров 0,5мм 0,9мм и 1 мм. Длина исходных заготовок составляла 15,6 см, 16,8 см и 16,3см соответственно. Объем горячей воды, подаваемый на леску составлял 250 мл. Время реакции и релаксации, а также растяжение для каждой из мышц приведено в таблице 1

Таблица 1 – результаты эксперимента один

Диаметр лески (мм)	Длина мышцы без нагрузки (мм)	Масса груза (гр.)	Длина растяжения мышцы (мм)	Время сокращения (с)	Время релаксации (с)
0,5	15,6	600	39	12,4	24,8
0,9	16,8	1000	32	18,3	43,3
1	16,3	1200	25	21,1	55,7

Под временем сокращения принимается время, за которое мышца с грузом сокращается до длины мышцы без нагрузки. Под временем релаксации понимается время, через которое мышца с грузом находящаяся в максимальном сокращении вернется в расслабленное состояние, т.е. значение параметра растяжения мышцы сравняется со значением данного параметра, до сокращения. Параметры время сокращения и время релаксации содержит погрешность не более 1с.

В ходе эксперимента один была испорчена мышца из лески диаметром 0,5 мм, так как при воздействии горячей воды процесс перехода петель первичной закрутки во вторичную происходил не равномерно в следствии

чего возникала излишняя раскрутка лески. Поэтому в дальнейших экспериментах было решено отказаться от использования мышц с данным диаметром лески, заменив ее на диаметр лески 0,7 мм.

В ходе следующего эксперимента в качестве нагревателя использовался направленный поток горячего воздуха от термофена. Данные по эксперименту приведены в таблице 2.

Таблица 2 – результаты эксперимента два

Диаметр лески (мм)	Длина мышцы без нагрузки (мм)	Масса груза (гр.)	Длина растяжения мышцы (мм)	Время сокращения (с)	Время релаксации(с)
0,7	17,2	1000	41	20,7	38,7
0,9	16,8	1000	32	28,1	36,4
1	16,3	1200	25	32,2	40,1

По сравнению с предыдущим методом, при одинаковой нагрузке возросло время сокращения лески в связи с тем, что поток воздуха является менее эффективным нагревателем нежели поток воды. Однако, появилась возможность локального нагревания каждого участка мышцы и избегание перегрева верхних участков как в предыдущем эксперименте. В ходе эксперимента в одном из циклов сокращения и релаксации была перегрета мышца с диаметром лески 1 мм (см рис. 3.4), для соблюдения чистоты эксперимента, данную мышцу было решено заменить на аналогичную длиной 18,4 см.

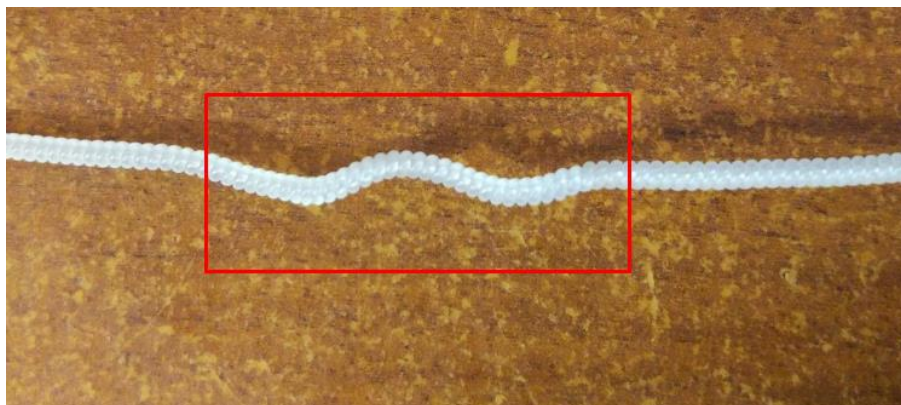


Рисунок 3.4 – результат чрезмерного нагрева участка мышцы. Данные по эксперименту три представлены в таблице 3.1.3.№.

Таблица 3 – результаты эксперимента три

Диаметр лески (мм)	Длина мышцы без нагрузки (мм)	Масса груза (гр.)	Длина растяжения мышцы (мм)	Время сокращения (с)	Время релаксации(с)
0,7	17,2	1000	41	10,5	36,3
0,9	16,8	1000	32	16,8	32,6
1	18,4	1200	36	19,7	39,8

При протекании тока через нихромовую леску $D \sim 0,5\text{мм}$ происходит ее быстрое нагревание свыше 100°C , что негативно сказывается на целостности лески. Поэтому повышение силы тока от 0 до 2А происходило достаточно плавно и медленно, насколько это было возможно. В следствии этого время сокращения и время релаксации остаются достаточно велики. Однако, передача тепла от нихромовой лески полиамидной нити оказалось самым эффективным из испробованных методов.

3.1.4 Выводы по экспериментам

Ниже приведена таблица 4 в которой показаны зависимости полученные в результате экспериментов с полиамидными нитями различных диаметров. Эксперименты проводились на спиральях в диапазоне длин от 15см до 18 см. Результатом в таблице является среднее значение. В качестве сравниваемых параметров были выбраны следующие параметры:

- максимальная нагрузка – это максимально допустимая масса груза, который может быть поднят леской при нагревании ее до предельной температуры активации, т.е. такой температуры при которой происходит переход максимального количества витков T_w в W_r . Допуск по массе груза составляет ± 10 гр.
- Максимальное растяжение ΔL_{max} определяется следующей формулой:

$$\Delta L_{max} = \frac{L_{\text{раст.}} - L_{\text{исх.}}}{L_{\text{исх.}}} * 100\% \quad (3.1)$$

где $L_{\text{раст.}}$ – длина лески под максимальной нагрузкой при $t \sim 20^\circ\text{C}$, $L_{\text{исх.}}$ – длина лески в исходном состоянии при отсутствии нагрузки $t \sim 20^\circ\text{C}$. Допуск максимального растяжения составляет $\pm 1,3\%$.

Таблица 4 – Зависимость параметров от диаметра лески

Диаметр (мм)	0,5	0,7	0,9	1
Максимальная нагрузка (кг)	0,8	1,3	2,0	2,9
Максимальное растяжение (%)	28,17	26,92	26,33	25,65

Важным фактором является уровнем влажности лески. Так, например, полиамидные мышцы, хранившиеся в условиях высокой влажности ($>70\%$), имеют больший показатель максимального растяжения, а также более высокую температуру активации. Это обусловлено тем, что на протяжении длительного времени полиамидная нить впитывает влагу из окружающей среды. Несмотря на крайне низкий показатель впитывания влаги не более $6\% \pm 1\%$. Разница во влажности нити в 1-2% может привести к отличным друг от друга повторяемым результатом. Также при хранении нити в условиях влажности ниже 30% происходит высыхание лески и ее отверждение, это приводит к негативным последствиям использования искусственной мускулы. А именно сокращению циклов работы и уменьшению максимального растяжения.

Нагревание при помощи электрического тока оказалось наиболее эффективным методом передачи тепла, за счет того, что нихромовая нить очень быстро нагревается до требуемой температуры. Однако, малый диаметр нити негативно сказывается целостности самой лески, при перегревании лески свыше 180°C происходит оплавление мышцы в местах контакта мышцы и лески. В связи с этим предпочтительным является использование нихромовой лески большего диаметра, а также автоматизированного контроля температуры нагревателя.

К недостатку данной технологии является значительное время релаксации, так как время, за которое мышца сокращается можно уменьшить вдвое если использовать нихромовую нить $D > 1.5\text{мм}$, однако охлаждать

мышцу быстрее сложно, без использования дополнительных средств. Например, использовать прослойку термопасты между леской и мышцей для равномерного распределения нагрева, а в качестве дополнительного охлаждения использовать вентилятор.

В результате данного эксперимента было установлено, что при увеличении диаметра лески параметр максимальной рабочей массы изменяется не линейно. Это во многом обусловлено тем, что при увеличении диаметра лески возрастает ее жесткость, которая может быть вычислена по следующей формуле (2.5)

В следствии этого зная длину деформации, можно вычислить силу упругости, которая для каждого диаметра лески различна и уменьшается не пропорционально.

Сравнивая результаты с полученной моделью, для лески диаметром 1 мм и внешним диаметром 2,5 мм, условным количеством петель 360 и с грузом 1,2 кг, удлинение согласно модели, составит ~26,28 мм. При реальном сокращении всего в 25 мм. Учитывая погрешность измерительного прибора в 0,5 мм и статистическую погрешность самого измерения в ± 1 мм. Можно заключить, что погрешность составляет $1,28 \pm 1,5$ мм. Стоит отметить, что на реальном образце количество петель так же отличается от 360 в меньшую сторону, это безусловно увеличивает ошибку. Однако, даже с учетом этого отклонение от модели составляет от 0% до 11%, что свидетельствует о ее уровне адекватности.

3.2 Эксперименты с ЭАП на основе поливинилового спирта

Эксперименты, связанные с созданием искусственных мышц с использованием поливинилового спирта описаны в разделе первой главы 1.2.3 Мышцы на основе ЭАП. Однако, в приведенных данных описывалось создание мышц с активатором в виде химически активного элемента. Данный метод не позволяет получить достаточно быстрые и эффективные мускулы, которые могли бы применяться в робототехнических системах[42]. Однако,

совершенно иным подходом является использование в качестве активатора электрического тока или электромагнитного поля. Данная серия экспериментов является уникальной и показывает возможность применения описанных ниже структур в качестве актуаторов активируемых электричеством.

3.2.1 Описание серии экспериментов

В серии экспериментов будет использоваться в качестве основного материала поливиниловый спирт (ПВС) (см. рис 3.5) [42]. Данное вещество представляет из себя — искусственный, водорастворимый, термопластичный полимер. Синтез ПВС осуществляется реакцией щелочного/-кислотного гидролиза или алкоголиза сложных поливиниловых эфиров. Поливинилацетат (ПВА) служит основным сырьем для получения ПВС. Это обусловлено тем что ПВС не может быть получен из мономера – винилового спирта.



Рисунок 3.5 – структурная формула ПВС.

Основным вариантом получения ПВС являются различные способы омыления ПВА в среде спиртов или в воде в присутствии оснований и кислот.

В зависимости от используемой среды и типа катализатора, процессы омыления ПВА можно представить следующей общей схемой (см рис. 3.6):

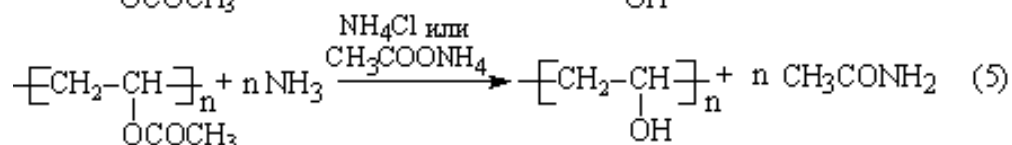
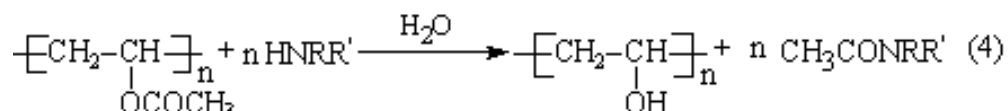
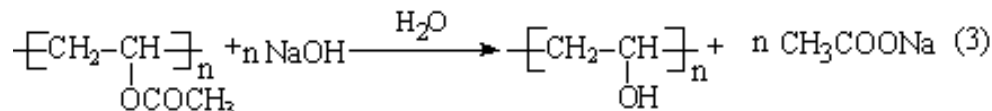
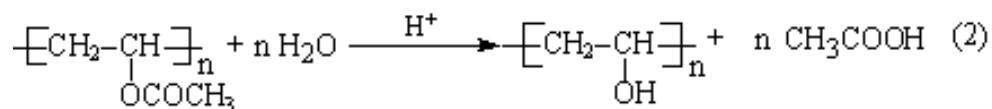
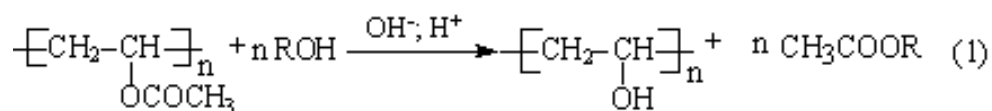


Рисунок 3.6 – общая схема синтеза ПВС.

На представленном рисунке реакции можно разделить на три группы:

1. алкоголиз – реакция 1,
2. кислотный или щелочной гидролиз – реакции 2 и 3,
3. аминолит – реакции 4 и 5.

Алкоголиз сложных поливиниловых эфиров в среде осушенных низших алифатических спиртов (C₁-C₃), в частности метанола, в присутствии гидроксидов щелочных металлов, а также алкоголиз в присутствии кислот. Процесс щелочного и кислотного алкоголиза сопровождается гелеобразованием.

Щелочной и кислотный гидролиз в смеси низших алифатических спиртов с другими растворителями (вода, диоксан, ацетон, бензин или сложные эфиры). При использовании смесей, компонентом которых является вода, практически во всех случаях её концентрация не превышает 10 % и омыление сопровождается образованием геля.

Существенным недостатком получения поливинилового спирта является образование жесткого геля, эту проблему решают различными путями, например, добавления специальных реагентов, увеличивают время синтеза, нагрев. При производстве используются специальные мешалки

разрезающие образующийся гель. Однако, для использования в качестве искусственной мускулы ПВС с гелем может представлять интерес.

Как видно из рисунка 3.7 поливиниловый спирт в конечном счете имеет гидрогруппу которая в сочетании со слабым щелочным раствором или другим электролитом даст ионную проводимость. Следовательно, такой модифицированный, ПВС должен обладать достаточной электропроводимостью и использование описанных ранее мембран могла бы позволить увидеть сокращения под действием электрического тока.

Для этого будут проведены два эксперимента. В первом эксперименте будет использоваться ПВС в стеклянной трубке, в которую добавлен щелочной раствор (см рис. 3.7), полученный путем растворения гидрокарбоната натрия (пищевой соды) в воде. На общий объем колбы было добавлено примерно $13\% \pm 1\%$ такого электролита с концентрацией NaHCO_3 приблизительно 30%. Два конца трубки, по возможности, плотно изолированы не проводящим ток веществом [36]. С каждого из концов будет вставлена нихромовая проволока из первого эксперимента.



Рисунок 3.7 – стеклянные трубки с композитным материалом внутри.

Нижняя трубка содержит композитный материал с щелочным раствором.

Целью данного эксперимента является проверить проводимость ПВС, а также пронаблюдать ионный обмен, происходящий на аноде и катоде. В ходе данного обмена частицы геля ПВС должны приходить в движение, тем самым

совершая механическую работу. После чего такое композитное вещество можно будет использовать в эластичном носителе и наблюдать его сокращение или растяжение под действием электрического тока.

В ходе данного эксперимента будет использоваться лабораторный блок питания из эксперимента один, а также высоковольтный источник постоянного тока с регулируемым напряжением до 1кV.

Измерения будут фиксироваться при помощи встроенных датчиков в сами источники постоянного тока, а ионный обмен будет фиксироваться визуально при помощи маркированного элемента и измерительных приборов из предыдущего эксперимента.

Второй эксперимент во многом аналогичен первому, однако в качестве электролита будет использоваться 50% раствор хлорида натрия, добавленный в количестве приблизительно $15\% \pm 1,5\%$ от общего объема вещества. Нихромовая нить будет проходить трубку с веществом насквозь и фиксироваться в ней по средствам двух изоляторов. Поверх стеклянной трубки с толщиной стенки в 1,3мм размещена алюминиевая фольга с контактом. Контакт на фольге фиксируется изоляцией, точно так же, как и концы фольги (см. рис. 3.8) [35].

С одной стороны фольги оборачивающей трубку сделан ряд небольших окошек для наблюдения. Цель эксперимента аналогична предыдущему, однако реакция должна возникнуть не в результате ионного обмена, а под воздействием электрического поля. Маркерный элемент должен сместиться под действием электрического поля от положительного полюса к отрицательному. Учитывая того что используется стеклянная, трубка должно возникнуть ощущение расширения и сжатия композита внутри.



Рисунок 3.8 – стеклянные трубки с композитным материалом. Правая трубка содержит раствор хлорида натрия. Концы трубки изолированы изолентой.

3.2.2 Результаты серии экспериментов

В ходе первого эксперимента подавалось напряжение от 0 до 64V, при этом протекания тока через сам композит не было зарегистрировано. Это может быть обусловлено недостаточной смешиваемостью электролита с ПВС. Повышение концентрации раствора также не принесло положительных результатов.

После чего был использован источник высокого напряжения. Напряжение регулировалось в пределах от 0,1kV до 1kV. Протекание

электрического тока наблюдалось в пределах от 0,8-1kV с силой не превышающей 0,1мА. Маркерный элемент при этом оставался неподвижным.

При подключении к высоковольтному источнику второго образца с композитом ПВС и хлорида натрия, электрическое поле образовывалось при напряжении близким к 0,8kV. Маркерный элемент находящийся вплотную ко внутренней стороне стекла сдвинулся не более чем на 0,5мм после чего остановился и при смене полярности не вернулся в исходное состояние. В результате воздействия электрического поля на внутренней поверхности трубки были видны осадки геля.

В связи с не подтвердившейся гипотезой в первом и втором экспериментах и ограниченным запасом ПВС было решено провести еще один эксперимент.

Описание дополнительного эксперимента:

Так как растворы электролита не принесли положительных результатов, а пробои наблюдались только при высоких напряжениях и низкой силе тока, то решено было поменять принцип допирования.

Допирование – процесс модификации полимеров с использованием реакций полимера с донорами и акцептоами электронов. Добавление вещества в структуру полимера, приводящую к реакции молекул допанатов с несущими неспаренными электрон участками цепи полимеризуются фрагменты, эквивалентные карбокатионам или карбоанионам [34].

В предыдущих случаях в качестве допанатов выступали растворы электролита щелочные или солевые, однако на ПВС это не оказало реакции, поэтому было решено использовать углеродные нано структуры отличающиеся высокой проводимостью. В качестве таких структур был использован фулерен (C_{60}) добавленный в трубку с ПВС (см. рис. 3.9)



Рисунок 3.9 – трубка с и фуллеренами.

В концы трубки на глубину примерно 6см вставлена медная проволока диаметром 1 мм.

Целью эксперимента подобно первому в данной серии является регистрация электрического тока при прохождении через композитный материал, смещение маркерных частиц относительно шкалы, регистрация ионного обмена.

К концам медной проволоки был подключен лабораторный блок питания и регулировалось напряжения от 0 до 64V. При напряжении в 12V возникла пробой, и сила тока при это составляла 0,1А. Регистрация более малых токов данным прибором не представляется возможной. При этом маркерный элемент пришел в движение и стягивался к катоду, когда второй маркерный элемент находящийся у противоположной стороны, совершал аналогичные действия.

На рисунке 3.10 изображен катод после извлечения его из трубки.



Рисунок 3.10 – катод с притянутыми элементами.

Реакция на аноде происходила аналогичным образом, однако не так явно (см. рис. 3.11)



Рисунок 3.11 – катод после извлечения из трубки.

Смещение маркерного элемента составило 7мм с положения 35мм до положения 42 мм. При смене полярности эксперимент повторился, и положительно заряженные ионы вещества стягивались на катод, а отрицательно заряженные на анод.

Максимальную скорость передвижения можно было наблюдать при напряжении в 64V и силе тока в 0,8А, она составляла приблизительно 2,5 мм/с.

3.2.3 Выводы по экспериментам

В результате серии экспериментов было установлено, что ПВС допированный щелочным и соевым растворами не является электропроводимым при напряжениях не превышающих $0,8\text{kV}$, но даже в случае пробоя в материале не возникает ожидаемых реакций смещения частиц геля и ионного обмена. Стоит отметить, что температурные изменения в среде ПВС ведут лишь к образованию густого геля. Так на рисунке 3.12 представлен гель, образованный со стороны анода после извлечения стержня.



Рисунок 3.12 – образование густого геля со стороны анода.

Добавление проводящих углеродных наночастиц в данную модель позволило получить желаемый эффект, а именно пронаблюдать протекание тока в композитном материале и смещение маркерных частиц относительно шкалы.

Одним из существенных недостатков данной структуры является образование густого мало пластичного геля со стороны анода. Что препятствует дальнейшему ионному обмену. Возможным решением данной проблемы является добавление омылителей препятствующим образованию густого геля [32].

4 Социальная ответственность

С развитием научного прогресса безопасность жизнедеятельности человека играет огромную роль на производстве. В соответствии с требованиями безопасности была создана наука, которая помогает обеспечить безопасность жизнедеятельности человека (БЖД). БЖД – это комплекс мероприятий, направленных на обеспечение безопасности человека в окружающей его среде обитания, сохранение его здоровья, разработку методов и средств защиты путём снижения влияния вредных и опасных факторов до допустимых значений, выработку мер по ограничению ущерба в ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций мирного и военного времени.

Научно-технический прогресс внес серьезные изменения в условия производственной деятельности работников умственного труда. Их труд стал более интенсивным, напряженным, требующим значительных затрат умственной, эмоциональной и физической энергии. Это потребовало комплексного решения проблем эргономики, гигиены и организации труда, регламентации режимов труда и отдыха.

Данная работа посвящена исследованию микроактюаторов на основе электроактивных полимеров. В данной работе была построена математическая модель микроактюатора, которая была реализована в ПО Comsol. С помощью ЭВМ проведено моделирование и расчет основных параметров микроактюатора. После проведения всего комплекса исследований выработываются рекомендации для проектирования ИПМК микроактюаторов. А также появляется возможность смоделировать поведение прибора в различных условиях с разными параметрами (как самого прибора, так и среды). Такого вида работа подразумевает умственную нагрузку, большое время работы с ЭВМ, большое время работы с литературой в электронном и печатном виде.

С каждым годом возрастает интенсивность применения компьютерной

техники в сферах жизнедеятельности человека. При работе с компьютером человек подвергается воздействию ряда опасных и вредных производственных факторов: электромагнитных полей, радиочастотному (высоких, ультравысоких и средних частот), инфракрасному излучению, шуму и вибрации, статическому электричеству. Работа с компьютером характеризуется значительным умственным напряжением, высокой напряженностью зрительной работы и большой нагрузкой на кисти рук при работе с периферийными устройствами ЭВМ.

4.1 Техногенная безопасность

4.1.1 Микроклимат

Благоприятные (комфортные) метеорологические условия на производстве являются важным фактором в обеспечении высокой производительности труда и в профилактике заболеваний. При несоблюдении гигиенических норм микроклимата снижается работоспособность человека, возрастает опасность возникновения травм и ряда заболеваний, в том числе профессиональных.

По степени физической тяжести работа инженера-программиста относится к категории лёгких работ. В соответствии с временем года и категорией тяжести работ определены параметры микроклимата согласно требованиям [1] и приведены в Таблице 5.

Таблица 5 – Оптимальные параметры микроклимата рабочего места

Период года	Категория работ	Температура воздуха, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	Категория 1а	23-25	40-60	0,1
Теплый	Категория 1а	20-22	40-60	0,1

В зимнее время в помещении предусмотрена система отопления. Она обеспечивает достаточное, постоянное и равномерное нагревание воздуха. В

офисе имеется искусственная вентиляция, состоящая из вытяжной и приточной вентиляции, что позволяет производить циркуляцию воздуха в помещении.

4.1.2 Естественная освещенность

Помещение не имеет источников естественного освещения, но оборудовано дополнительными источниками – люминесцентными лампами. Поэтому в работе рассматриваем только естественную освещенность.

Правильное освещение помещений и рабочих зон одно из главных условий создания безопасных и благоприятных условий труда. При недостаточной освещенности развивается утомление зрения, понижается общая работоспособность и производительность труда, возрастает количество брака, повышается опасность производственного травматизма, низкая освещенность способствует развитию близорукости.

Рабочая зона или рабочее место разработчика освещается таким образом, чтобы можно было отчетливо видеть процесс работы, не напрягая зрения, а также исключается прямое попадание лучей источника света в глаза. Кроме того, уровень необходимого освещения определяется степенью точности зрительных работ. Наименьший размер объекта различения составляет 0.5 - 1 мм. В помещении отсутствует естественное освещение. По нормам освещенности [2] и отраслевым нормам, работа за ПК относится к зрительным работам высокой точности для любого типа помещений. Нормирование освещенности при работе за персональным компьютером представлено в Таблице 6.

Таблица 6 – Нормирование освещённости для работы за ПК [2]

	Характеристика зрительных работ	Высокой точности	
		От 0,3	От 0,5
1.	Наименьший или эквивалентный размер объекта различения, мм		
2.	Разряд зрительной работы	Б	
3.	Под разряд зрительной работы	1	2

4.	Относительная продолжительность зрительной работы, %	Более 70	Менее 70
5.	Освещенность на рабочей поверхности от системы общего искусственного освещения, лк	300	200
6.	Цилиндрическая освещенность, лк	100	75
7.	Показатель дискомфорта	40	60
8.	Коэффициент пульсации освещенности, %	15	20
9.	КЕО при верхнем освещении, %	3,0	2,5
10.	КЕО при боковом освещении, %	1,0	0,7

Требования к освещению на рабочих местах, оборудованных ПК, представлены в таблице 7. [3]

Таблица 7 – Требования к освещению на местах, оборудованных ПК [3]

Освещенность на рабочем столе	300-500 лк
Освещенность на экране ПК	не выше 300 лк
Блики на экране	не выше 40 кд/м ²
Прямая блёскость источника света	200 кд/м ²
Показатель ослеплённости	не более 20
Показатель дискомфорта	не более 15
Отношение яркости:	
– между рабочими поверхностями	3:1–5:1
– между поверхностями стен и	10:1
Коэффициент пульсации	не более 5%

Освещаемая площадь помещения составляет 46 м². В помещение используются люминесцентные лампы $i_{ек}$ LL-26-18 в количестве 20 штук, световой поток каждой лампы составляет 1080 люмен. Тогда рассчитаем освещенность на рабочем месте:

$$E = \frac{20 \cdot 1080}{46} \approx 470 \text{ лк}$$

Рассчитанное значение входит в диапазон значений, приведённое в таблице 4, что говорит о выполнении условия освещенности на рабочем месте.

4.1.3 Уровень шума

Одним из важных факторов, влияющих на качество выполняемой работы, является шум. Шум ухудшает условия труда, оказывая вредное действие на организм человека. Работающие в условиях длительного шумового воздействия испытывают раздражительность, головные боли, головокружение, снижение памяти, повышенную утомляемость, понижение аппетита, боли в ушах и т. д. Такие нарушения в работе ряда органов и систем организма человека могут вызвать негативные изменения в эмоциональном состоянии человека вплоть до стрессовых. Под воздействием шума снижается концентрация внимания, нарушаются физиологические функции, появляется усталость в связи с повышенными энергетическими затратами и нервно-психическим напряжением, ухудшается речевая коммутация. Все это снижает работоспособность человека и его производительность, качество и безопасность труда. Нормативным эквивалентным уровнем звука на рабочих местах, является 80 дБА [4].

Основным источником шума в кабинете являются вентиляторы блоков питания ЭВМ; шаговые двигатели 3D-принтера и прибора; компрессор, использующийся в лазерном станке и вытяжная вентиляция. Для снижения уровня шума стены и потолок помещений, где установлены компьютеры, могут быть облицованы звукопоглощающими материалами.

Исходя из таблицы можно сделать вывод, что показания источников шума не превышает допустимого уровня шума для помещения с шумным оборудованием.

4.1.4 Уровень электромагнитных излучений

Энергетическое влияние электромагнитного излучения может быть различной степени и силы. От неощутимого человека до теплового ощущения при излучении высокой мощности, но подобный эффект

проявляет себя только при превышении допустимого уровня. Помимо электромагнитного излучения, при работе компьютера образуется электростатическое поле, оно способно деионизировать окружающий воздух. Компьютер, при долгой работе, нагревается, что делает воздух не только слабо ионизированным, но и сухим. Такой воздух является очень вредным, он тяжелый для дыхания и способствует, при благоприятной среде, развитию многих аллергических заболеваний и, соответственно болезней органов дыхания.

В данной выпускной работе будет рассматриваться такой источник электромагнитного поля как персональный компьютер.

По [5] энергетическая экспозиция за рабочий день не должна превышать значений, указанных в таблице 8.

Таблица 8 – Предельно допустимые значения энергетической экспозиции

Параметр	Предельно допустимая энергетическая экспозиция, МГц				
	$\geq 0,03$ – 3,0	$\geq 3,0$ – 30,0	$\geq 30,0$ – 50,0	$\geq 50,0$ – 300,0	$\geq 300,0$ – 300000,
По электрической составляющей, $(В/м)^2$	20000,0	7000,0	800	800	-
По магнитной составляющей,	200	-	0,72	-	-
По плотности потока энергии $(мкВт/см^2) \times$ ч	-	-	-	-	200

Для обеспечения меньшего электромагнитного излучения использован жидкокристаллический монитор. Необходимо учитывать расстояние до монитора, так как при большем расстоянии от человека оказывается меньшее влияние. В связи с тем, что электромагнитное излучение от стенок монитора намного больше, необходимо ограничивать его стенами, т.е. ставить в углу. Необходимо чтобы компьютер был заземлен, а также необходимо по возможности сокращать время работы за компьютером.

4.1.5 Выделение вредных веществ

В работе присутствует этап прототипирование, который основывается на создание деталей при помощи лазерного станка и 3д-принтера.

При работе 3D-принтера выделяются вредные вещества, которые не значительно влияют на здоровье человека. По ГН 2.2.5.1313–03 для акрилонитрила (C_3H_3N), которые входит в состав ABS пластика:

- Величина предельно допустимая концентрация: 5 мг/м³;
- Преимущественное агрегатное состояние в воздухе в условиях производства: а - аэрозоль;
- Класс опасности: не опасное.

Так как величина предельно допустимой концентрации 5 мг/м³ для уменьшения концентрации можно провести вентиляцию над рабочей зоной или периодически проветривать помещение.

При нагревании и испарении пластиков в процессе лазерной резки возникают вредные вещества в виде мельчайших твердых частиц размером от 0,03мкм и газообразные едкие и токсичные вещества: хлористый водород, диоксины, угарный газ, окись и двуокись азота, уксусный альдегид, метилметакрилат, винилхлорид, смесь углеводородов, стирол.

Смесь вышперечисленных мельчайших частиц с газообразными токсичными веществами представляют максимальную опасность для операторов и персонала. Накапливаясь в организме человека, они могут вызвать тяжелейшие заболевания, в том числе онкологические.

В связи с этим лазерная резка пластика должна производиться в помещении местной вытяжкой с очисткой удаляемого воздуха от вредных твердых и газообразных веществ и с использованием средств индивидуальной защиты.

В офисе имеется искусственная вентиляция, состоящая из вытяжной и приточной вентиляции, что позволяет производить циркуляцию воздуха в помещении при лазерной резке и 3д-печати.

4.1.6 Электробезопасность

Даже самая надежная изоляция теряет свои свойства при длительной эксплуатации в сложных производственных условиях. Опасность поражения электрическим током существенно возрастает, если человек находится в помещении с металлическим полом или контактирует с оборудованием, находящимся вблизи заземленных металлических предметов. Согласно разделу 1.1.13 правил устройства электроустановок производственные цеха, торговые и бытовые помещения принято делить на три отдельных класса, характеризующих степень опасности. Рассмотрим каждый из них в отдельности.

Первый класс - "помещения без повышенной опасности"

В данную категорию входят помещения, характеризующиеся пониженной влажностью воздуха (до 75%), оборудованные при необходимости вентиляционной системой и отоплением.

Кроме того, полы в таких помещениях должны быть не токопроводящими. Под понятием токопроводящие полы подразумевают металлические, железобетонные, земляные и т.д. Для причисления производственного цеха в разряд безопасных, его пол следует покрыть диэлектрическим материалом. К наглядным примерам безопасных объектов можно отнести обычные жилые и офисные помещения, кладовые для хранения инструментов, лаборатории, а также производственные цеха приборостроительных предприятий, проект которых изначально предусматривал наличие изолированного пола, мощные воздушные фильтры для устранения пыли и систему регулирования температуры воздуха.

В зависимости от условий в помещении опасность поражения человека электрическим током увеличивается или уменьшается. По [6] помещение, в котором находится рабочее место, относится к категории помещений без повышенной опасности. Его можно охарактеризовать, как сухое, непыльное, с токонепроводящими полами и нормальной температурой воздуха. Температурный режим, влажность воздуха, химическая среда не

способствуют разрушению изоляции электрооборудования.

Безопасность при работе с электроустановками обеспечивается применением различных технических и организационных мер. Основные технические средства защиты от поражения электрическим током:

- изоляция токопроводящих частей и ее непрерывный контроль;
- установка оградительных устройств;
- предупредительная сигнализация и блокировки;
- защитное заземление;
- зануление;
- защитное отключение по [6].

4.2 Охрана окружающей среды

Правовую основу охраны окружающей среды в стране составляет закон РСФСР “О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения” (1991). Требования охраны окружающей среды зафиксировано в Основах законодательства РФ “Об охране здоровья граждан” (1993) и в законе РФ “О защите прав потребителей” (1992).

Основным видом нормативно-правовых актов по охране окружающей среды является система стандартов “Охрана природы”, имеющая номер 17 и состоящая из 10 комплексов.

При использовании персональных компьютеров, требуют решения такие важные вопросы, как переработка отходов (платы, микросхемы с содержанием цветных металлов). При переработке устаревших компьютеров происходит их разборка на шесть составляющих компонентов: металлы, пластмассы, штекеры, провода, батареи, стекло. Для повторной эксплуатации нельзя использовать ни одну из отработанных деталей, так как нет гарантии ее надежности, но в форме вторичного сырья они используются при изготовлении новых компьютеров или каких-либо других устройств. Так же

компоненты ПК содержат драгоценные металлы, которые извлекаются при вторичной переработке. Переработку компонентов с целью утилизации драг металлов регламентирует «Методика проведения работ по комплексной утилизации вторичных драгоценных металлов из отработанных средств вычислительной техники».

При эксплуатации ПК расходуются такие ресурсы, как электроэнергия (обеспечение питания компьютера), бумага, используемая для принтера при выводе информации, картриджи. Для того, чтобы добиться наиболее рациональных затрат электроэнергии не следует оставлять включенным персональный компьютер и оргтехнику, когда они не эксплуатируются в настоящее время, печать осуществлять с двух сторон, при этом затраты на бумагу вряд ли удастся сократить хотя бы вдвое, но экономия будет ощутимой. Проблему с утилизацией бумаги может решить вторичная переработка отходов.

При 3д-печатаи используется АБС пластик, который является токсичным. При работе с таким пластиком подразумевается его переработка или утилизация в спецприемниках. Эффективной технологической стадией переработки отходов АБС является сушка полимера, позволяющая довести содержание влаги в нем до уровня, не превышающего 0,1 %.

Однако способ прямого прессования оказывается малопроизводительным, а экструзия полимера затрудняется из-за его высокой вязкости.

Перспективной представляется переработка технологических отходов АБС полимера методом литья под давлением. При этом для улучшения текучести полимера необходимо вводить технологические добавки. Добавка к полимеру облегчает процесс переработки АБС полимера, так как приводит к увеличению подвижности макромолекул, гибкости полимера и снижению его вязкости.

Бракованные и изношенные изделия можно утилизировать измельчением с последующим формованием полученной крошки в смеси с первичными материалами или в качестве самостоятельного сырья.

4.3 Защита в чрезвычайных ситуациях

На объект могут возникать чрезвычайные ситуации следующего характера:

- техногенные;
- экологические;
- природные.

Наиболее типичной ЧС для помещения, котором производится выполнение работы, является пожар. Данная ЧС может произойти в случае замыкания электропроводки оборудования, неправильная эксплуатация электроприборов и станков, не соблюдению мер пожаробезопасности и т.д.

Пожарная безопасность может быть обеспечена мерами пожарной профилактики и активной пожарной защиты. Пожарная профилактика включает комплекс мероприятий, направленных на предупреждение пожара или уменьшение его последствий. Активная пожарная защита – меры, обеспечивающие успешную борьбу с пожарами или взрывоопасной ситуацией.

Возникновение пожара в помещении, где установлена вычислительная и оргтехника, приводит к большим материальным потерям и возникновению чрезвычайной ситуации. Чрезвычайные ситуации приводят к полной потере информации и большим трудностям восстановления всей информации в полном объёме.

Согласно нормам технологического проектирования [7], в зависимости от характеристики используемых в производстве веществ и их количества, по пожарной и взрывной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В, Г, Д.

Данное помещение относится к категории В, производства,

связанные с обработкой или применением твердых сгораемых веществ и материалов.

Для исключения возникновения пожара необходимо:

- вовремя выявлять и устранять неисправности;
- не использовать открытые обогревательные приборы, приборы кустарного производства в помещении лаборатории;
- определить порядок и сроки прохождения противопожарного инструктажа и занятий по пожарно-техническому минимуму, а также назначить ответственного за их проведения.

В случае возникновения пожара необходимо отключить электропитание, вызвать по телефону пожарную команду, произвести эвакуацию и приступить к ликвидации пожара огнетушителями. При наличии небольшого очага пламени можно воспользоваться подручными средствами с целью прекращения доступа воздуха к объекту возгорания.

Для тушения пожаров в помещении необходимо установить углекислотный огнетушитель типа ОУ-5 [8].

Покидать помещение необходимо согласно плану эвакуации. На рисунке 4.1 изображен план первого этажа студенческого бизнес-инкубатора.

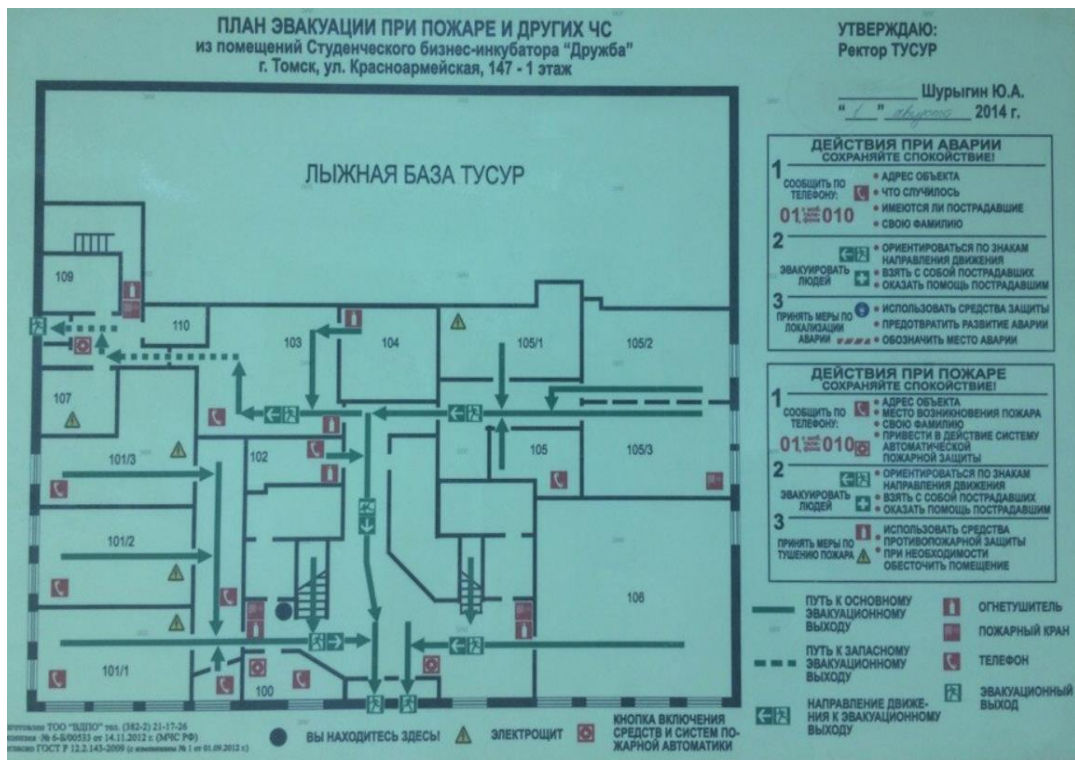


Рисунок 4.1 – План эвакуации при пожаре и других ЧС из помещений учебного корпуса

4.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

4.4.1 Эргономические требования к рабочему месту

Для работника службы документации, как и для рабочего на производстве, применимы понятия нормальной и максимальной рабочих зон. Зона досягаемости представлена на рисунке 4.2.



Рисунок 4.2 – зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости

Оптимальное размещение предметов труда и документации в зонах

достижимости:

- дисплей размещается в зоне, *a* (в центре);
- системный блок размещается в предусмотренной нише стола;
- клавиатура – в зоне *z/d*;
- «мышь» – в зоне *b* справа;
- сканер в зоне, *a/b* (слева);
- принтер находится в зоне, *a* (справа);
- документация, необходимая при работе – в зоне легкой достижимости ладони – *b*, а в выдвижных ящиках стола – литература, неиспользуемая постоянно.

На рисунке 4.3 показан пример размещения основных и периферийных составляющих ПК на рабочем столе программиста:

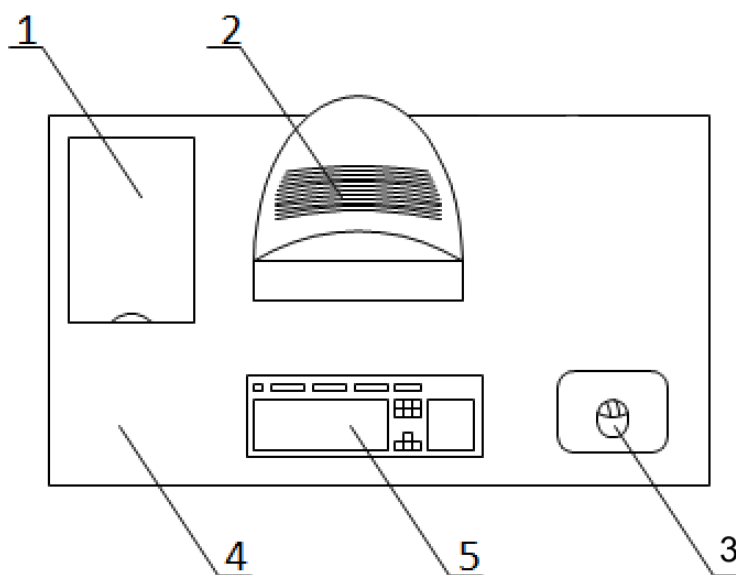


Рисунок 4.3 – Размещение основных и периферийных составляющих ПК.

- 1 – 3D-принтер, 2 – монитор, 3 – манипулятор типа «мышь», 4 – поверхность, рабочего стола, 5 – клавиатура,

В помещениях, где находится компьютер, необходимо обеспечить следующие величины коэффициента отражения для потолка 60-70, для стен 40-50, для пола около 30.

4.4.2 Особенности законодательного регулирования проектных решений

Государственный надзор и контроль в организациях независимо от организационно-правовых форм и форм собственности осуществляют специально уполномоченные на то государственные органы и инспекции в соответствии с федеральными законами.

К таким органам относятся Федеральная инспекция труда, Государственная экспертиза условий труда Федеральная служба по труду и занятости населения (Минтруда России Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору (Госгортехнадзор, Госэнергонадзор, Госатомнадзор России) Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека (Госсанэпиднадзор России) и др.

Так же в стране функционирует Единая государственная система предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций (РСЧС), положение о которой утверждено Постановлением Правительства Российской Федерации [9], в соответствии с которым, система объединяет органы управления, силы и средства.

- Продолжительность рабочего дня не должна превышать 40 часов в неделю.
- не рекомендуется работать за компьютером более 6 часов за смену; рекомендуется делать перерывы в работе за ПК продолжительностью 10 минут через каждые 50 минут работы;
- продолжительность непрерывной работы за компьютером без регламентированного перерыва не должна превышать 2 часов;
- во время регламентированных перерывов целесообразно выполнять комплексы упражнений.
- при нерегламентированной работе повышенной интенсивности возможны головные боли, нервные срывы и др.

5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

В магистерской диссертации рассматривается анализ эффективности методов исследования искусственных мускулов на основе капиллярной нити.

5.1 Организация и планирование работ

Для оценки процесса реализации проекта необходимо составить линейный график, исполнителями являются научный руководитель (НР) и студент (С). Для каждого из выделенных этапов определим его исполнителей и долю участия каждого из исполнителей в его выполнении. Полученные результаты сведем в таблицу 9.

Таблица 9 – Перечень выполняемых работ с указанием доли участия исполнителей

Этапы работы	Исполнители	Загрузка исполнителей
1. Постановка целей и задач исследования	НР, С	НР – 70% С – 30%
2. Анализ готовых технических решений	НР, С	НР – 30% С – 70%
3. Разработка и утверждение технического задания (ТЗ)	НР, С	НР – 30% С – 70%
4. Анализ информационных источников	С	С – 100%
5. Подбор материальной базы исследования	НР, С	НР – 35% С – 65%
6. Разработка календарного плана выполнения работ	НР, С	НР – 20% С – 80%
7. Математическое описание объекта исследования	НР, С	НР – 30% С – 70%
8. Проведение экспериментальной части	НР, С	НР – 10% С – 90%
9. Оформление научно исследовательского отчета	С	С – 100%
10. Подведение итогов	НР	НР – 100%

Результаты с указанием этапов работ и их кратким описанием приведены ниже.

Первым этапом является анализ предметной области, с последующими выводами о том, какие цели и задачи нужно поставить. Так же производится четкое распределение нагрузки и обязанностей между научным руководителем и студентом. По окончании изучения всех предложенных материалов, необходимых для достижения поставленной цели, студент просматривает дополнительные источники и предлагает максимально детальный план работ. Данный план корректируется и подтверждается в последствие научным руководителем. Основными пунктами данного плана являются задачи, прописанные предварительно студентом.

Второй этап подразумевает просмотр уже реализованных проектов, в данной области. Сравнение реализованных решений помогает более взвешенно подобрать методы исследования, программное обеспечение, материально техническое обеспечение.

Результатом третьего этапа станут технические требования к разрабатываемой системе, в частности к её физическим характеристикам. Так же обоснование целесообразности и актуальности разработки.

Результатом выполнения четвертого этапа является глубокое понимание вопроса по изучаемой тематике, подбор нужного материала для исследования, выбор необходимого программного обеспечения и определение направления последующей работы.

Результатом выполнения пятого этапа является подбор необходимого оборудования. В данном случае осуществляется выбор материалов работ по таким параметрам, как доступность и потенциальное соответствие согласно разработанным требованиям.

Результатом выполнения шестого этапа будет календарный план, в котором содержится расписание выполнения всех видов деятельности по достижению цели – созданию прототипа искусственной мышцы на основе полимерного соединения.

На седьмом этапе происходит формирование представлений о разрабатываемой модели. Рассматривается упрощенный, идеализированный математический объект и описываются в удобной форме основные искомые критерии.

Результатом восьмого этапа будет набор статистических данных по спланированным и проведенным экспериментам с объектом исследования.

Девятый этап направлен на оформление всего изученного, смоделированного и изготовленного материала в текстовом формате для защиты и так же для продолжения исследований в данном направлении.

На десятом этапе студент предоставляет свои результаты на оценку руководителю и получает обратную связь о проделанной им работе.

5.1.1 Продолжительность этапов работ

Так как отсутствует нормативная база по проводимым работам, а также достоверная информация о процессе выполнения подобных работ иными исполнителями, воспользуемся экспертным способом оценки продолжительности выполнения запланированных работ.

Для этого, полагаясь на собственный опыт, произведем оценку минимального и максимального времени выполнения каждого из этапов. Рассчитаем ожидаемое время выполнения работ, воспользовавшись формулой

$$t_{ожi} = \frac{2 \cdot t_{max} + 3 \cdot t_{min}}{5}, \quad (5.1)$$

где $t_{ожi}$ – ожидаемое время выполнения i -го этапа работ в чел.-дн., t_{min} – минимальная продолжительность работы, дн.; t_{max} – максимальная продолжительность работы, дн.

Ожидаемое, минимальное и максимальное время исполнения в предложенной выше формуле, оцениваются в рабочих днях на человека. Произведем перевод этих величин в календарные дни, воспользовавшись следующей формулой:

$$T_{\text{кд}} = T_{\text{к}} \cdot T_{\text{рд}}, \quad (5.2)$$

где $T_{\text{кд}}$ – продолжительность выполнения этапа в календарных днях; $T_{\text{к}}$ – коэффициент календарности, позволяющий перейти от длительности работ в рабочих днях к их аналогам в календарных днях, и рассчитываемый по формуле:

$$T_{\text{к}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вд}} - T_{\text{пд}}}, \quad (5.3)$$

где $T_{\text{кал}}$ – календарные дни ($T_{\text{кал}} = 365$); $T_{\text{вд}}$ – выходные дни ($T_{\text{вд}} = 52$); $T_{\text{пд}}$ – праздничные дни ($T_{\text{пд}} = 10$).

$$T_{\text{к}} = \frac{365}{365 - 52 - 10} = 1,48. \quad (5.4)$$

В свою очередь рабочие дни рассчитываются по следующей формуле:

$$T_{\text{рд}} = \frac{t_{\text{ож}}}{K_{\text{вн}}} \cdot K_{\text{д}}, \quad (5.5)$$

$K_{\text{вн}}$ – коэффициент выполнения работ, учитывающий влияние внешних факторов на соблюдение предварительно определенных длительностей, в частности, возможно $K_{\text{вн}} = 1$; $K_{\text{д}}$ – коэффициент, учитывающий дополнительное время на компенсацию непредвиденных задержек и согласование работ ($K_{\text{д}} = 1 - 1,2$; в этих границах конкретное значение принимает сам исполнитель).

Для простоты расчетов примем $K_{\text{д}}$ и $K_{\text{вн}}$, равными единице. Тогда формула для расчета календарных дней преобразуется в следующую:

$$T_{\text{кд}} = T_{\text{к}} \cdot T_{\text{рд}} = t_{\text{ож}} \cdot T_{\text{к}} = \frac{3 \cdot t_{\text{min}} + 2 \cdot t_{\text{max}}}{5} \cdot 1,48. \quad (5.6)$$

Воспользовавшись данными из таблицы 9, приведенными выше формулами, произведем расчет продолжительности выполнения работ научным руководителем и студентом в календарных днях. Результаты расчетов представлены в таблице 10. На основе данной таблице составим линейный график работ, представленный в таблице 11.

Таблица 10 – Расчет трудозатрат на выполнение проекта

Этап	Исполнитель	Продолжительность работ, дни			Трудоемкость работ по исполнителям чел.- дн.			
				$T_{РД}$		$T_{КД}$		
		t_{min}	t_{max}	$t_{ож}$	НР	С	НР	С
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1. Постановка целей и задач исследования	НР, С	2	4	2,8	1,96	0,84	2,9008	1,2432
2. Анализ готовых технических решений (ТЗ)	НР, С	2	4	2,8	0,84	1,96	1,2432	2,9008
3. Разработка и утверждение технического задания (ТЗ)	С	4	7	5,2	1,56	3,64	2,3088	5,3872
4. Анализ информационных источников	НР, С	40	50	44	0	44	0	65,12
5. Подбор материальной базы исследования	НР, С	4	8	2,4	0,84	1,65	2,90	5,387
6. Разработка календарного плана выполнения работ	НР, С	2	4	2,8	0,56	2,24	0,8288	3,3152
7. Математическое описание объекта исследования	НР, С	10	15	12	3,6	8,4	5,328	12,432
8. Проведение экспериментальной части	НР, С	14	20	16,4	0	16,4	0	24,272
9. Оформление расчетно-пояснительной записки	С	12	18	14,4	0	14,4	0	21,312
10. Подведение итогов	НР, С	3	5	3,8	3,8	0	5,624	0
Итого:				106,6	12,32	94,28	21,1336	141,3694

Таблица 11 – Линейный график работ

Этап	НР	С	Январь			Февраль			Март			Апрель			Май		
			10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
1	2,9 1	1,24	■														
2	1,2 4	2,9	■	■													
3	2,3 1	5,39		■	■												
4	0	65,12				■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
5	2,9	5,387								■	■	■	■				
6	0,8 3	3,31														■	
7	5,3 3	12,43										■	■	■			
8	0	24,27										■	■	■	■	■	
9	0	21,31												■	■	■	
10	5,6 2	0														■	

■ НР – ■ С –

5.2 Расчет сметы затрат на выполнение проекта

Расчет затрат для выполнения комплекса работ по проекту производится по следующим статьям:

- материалы и покупные изделия;
- заработная плата;
- социальный налог;
- расходы на электроэнергию;
- амортизационные отчисления;
- командировочные расходы;
- оплата услуг связи;

- арендная плата за пользование имуществом;
- прочие услуги (сторонних организаций);
- прочие (накладные) расходы.

В процессе выполнения работ выполнения работ по проекту исполнителям не требуется производить оплату услуг сторонних организаций, так как они являются подразделениями и/или подрядными организациями ТПУ, а также нет необходимости производить оплату за аренду имущества. Исполнители также не производят оплату командировок, услуг связи. Таким образом, касательно проекта, необходимо произвести расчет материалов и покупных изделий, заработную плату исполнителей, социальный налог, расходы на электроэнергию, амортизацию и накладные расходы.

5.2.1 Расчет затрат на материалы и покупные изделия

Работа над проектом заключается в проведении теоретических исследований в своем начале и практических – в конце. А также в закупке необходимых материалов для проведения экспериментов. Для теоретических исследований необходимо наличие персонального компьютер с постоянным доступом к сети интернет и установленным пакетом MS Office. Все указанные ресурсы распространяются либо бесплатно, либо обеспечиваются за счет университета. Так, например, лицензия на MS Office приобретена ТПУ и доступна в открытом доступе для студентов, следовательно, затраты на использование данных программ не учитываются. Так как затрат на все программное обеспечение удалось избежать, то материальные затраты в данной части состоят только из расходов на канцелярские принадлежности и расходные материалы для принтера.

Что касается материальной базы для проведения экспериментов необходимо закупить полиамидную леску в количестве четырех мотков разных диаметров. Оборудование для завивки лески и другое техническое оснащение для проведения эксперимента предоставлено кафедрой автоматизации обработки информации ТУСУР.

Единственной тратой в данном случае является закупка расходных

материалов для создания мышц из полиамидной нити.

В материальные затраты также входят транспортно-заготовительные расходы (ТЗР), которые обуславливаются затратами на совершение сделок купли-продажи материалов, их доставку к месту использования. Обычно ТЗР составляют от 5% до 20% от общей цены материалов. Положим норму ТЗР равной 5%.

С учетом вышесказанного, составим таблицу 12, в которой учтены затраты на первый и второй этапы работы.

Таблица 12 – Расчет затрат на материалы

Наименование материалов	Цена за ед., руб.	Кол-во	Сумма
Затраты на этапе теоретических исследований			
Бумага для принтера, упак. 500 листов	257	2	514
Тетрадь общая, формат А4	93	3	279
Мультифоры, упак. 100 шт.	100	2	200
Скобы для степлера, упак. 500 шт.	84	1	84
Итого			1077
Итого (с учетом ТЗР)			1184,7
Затраты на этапе практических исследований			
Полиамидная леска разных диаметров	112	4	448
Итого			448
Итого (с учетом ТЗР)			448
Общие затраты			
Итого			1525
Итого (с учетом ТЗР)			1616,7

5.2.1 Расчет заработной платы

Данная статья расходов включает в себя заработную плату студента (исполнитель проекта) и научного руководителя, а также премии, входящие в фонд заработной платы. Расчет заработной платы выполняется на основе трудоемкости выполнения каждого этапа и величины месячного оклада исполнителя. Величина месячных окладов (МО) для сотрудников ТПУ находится в общем доступе и её можно найти на портале, либо же взять из приложения 1. Оклад студента принимается равным окладу соответствующего специалиста низшей квалификации в организации, в которой выполняются подобные виды работ или же там, где студент проходил преддипломную

практику.

Для расчета заработной платы студента примем величину месячного оклада, равную окладу младшего научного сотрудника на полставки, т.е. $MO_C = 7437,225$ руб.; а величина заработной платы руководителя – величина месячного оклада доцента, д.т.н. $MO_{HP} = 27484,86$.

Для дальнейшего расчета зарплаты необходимо вычислить среднедневную ставку с учетом среднего количества рабочих дней в месяце. В 2018 году 247 рабочих дней, следовательно, количество рабочих дней в месяце равно 20,6. Таким образом, среднедневная тарифная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$ЗП_{дн} = MO/20,6, \quad (5.7)$$

Для студента эта величина составит примерно 361 рубль, а для научного руководителя 1334,22 рубля в день. Зная среднедневную оплату труда, на можно произвести расчет основной заработной платы за период выполнения работ. Затем, учитывая премии, дополнительную заработную плату и районный коэффициент, можно рассчитать полную заработную плату по следующей формуле:

$$ЗП_{полн} = ЗП_{дн} * T_{РД} * K_{ПР} * K_{ДОП} * K_P \quad (5.8)$$

где $T_{РД}$ – трудоемкость проекта для сотрудника в рабочих днях; $K_{ПР} = 1,1$ – коэффициент премирования; $K_{доп} = 1,13$ – коэффициент дополнительной заработной платы для пятидневной рабочей недели; $K_p = 1,3$ – районный (северный) коэффициент. Выполнив расчеты по приведенным формулам, результаты приведены в таблице 13.

Таблица 13 – Затраты на заработную плату

Исполнитель	Оклад, руб./мес.	Среднедневная ставка, руб./день	Затраты времени, раб. дни	Коэффициент	Фонд з/платы, руб.
НР	27484,86	1334,22	18	1,62	38905,9
С	7437,225	361	140		81874,8
Итого					120780,6

5.2.2 Расчет затрат на электроэнергию

Данная статья учитывает затраты на электроэнергию, которая потребляется всем оборудованием в течение работы над проектом. Затраты на электроэнергию рассчитываются по формуле:

$$C_{эл.об.} = P_{об} \cdot t_{об} \cdot ЦЭ, \quad (5.9)$$

где $P_{об}$ – мощность, потребляемая оборудованием, кВт; $ЦЭ$ – тариф на 1 кВт·час ($ЦЭ = 5,782$ руб/кВт·ч); $t_{об}$ – время работы оборудования, час. Время работы оборудования определяется по формуле:

$$t_{об} = T_{РД} * K_t, \quad (5.10)$$

где $K_t \leq 1$ – коэффициент использования оборудования по времени, равный отношению времени его работы в процессе выполнения проекта к $T_{РД}$, определяется исполнителем самостоятельно. В ряде случаев возможно определение $t_{об}$ путем прямого учета, особенно при ограниченном использовании соответствующего оборудования.

Для выполнения работ студентом использовался персональный компьютер, принтер, термофен, чайник электрический, лабораторный блок питания(ЛБП). Определим затраты на потребленную оборудованием электроэнергию и сведем результаты расчетов в таблицу 14.

Таблица 14 – Затраты на электроэнергию

Наименование оборудования	Мощность оборудования, кВт	Kt	Время работы оборудования, ч	Затраты на электроэнергию
Персональный компьютер	0,35	0,9	800	1457,07
Принтер	0,25	0,005	120	0,87
Термофен	0,55	0,01	40	1,27
Чайник	1,5	0,01	12	1,05
ЛБП	0,65	0,5	60	112,75
Итого	3,3		1032	1573,01

5.2.3 Расчет затрат на социальный налог

Затраты на единый социальный налог (ЕСН), который включает в себя отчисления в пенсионный фонд, на социальное и медицинское страхование, составляют 30% от полной заработной платы по проекту и рассчитывается по формуле $C_{\text{соц}} = C_{\text{эл}} * 0,3$. Итак, для проведения исследования затраты на социальный налог составляют $C_{\text{соц}} = 155490,6 * 0,3 = \mathbf{36234,21}$ руб.

5.2.4 Расчет амортизационных расходов

Расчет амортизационных расходов производится по следующей формуле:

$$C_{\text{ам}} = \frac{N_A \cdot C_{\text{об}} \cdot t_{\text{рф}} \cdot n}{F_d}, \quad (5.11)$$

где N_A – годовая норма амортизации единицы оборудования; $C_{\text{об}}$ – балансовая стоимость единицы оборудования с учетом $T_{\text{зр}}$, F_d – действительный годовой фонд времени работы соответствующего оборудования, берется из специальных справочников или фактического режима его использования в текущем календарном году, $t_{\text{рф}}$ – фактическое время работы оборудования в ходе выполнения проекта, учитывается исполнителем проекта; n – число задействованных однотипных единиц оборудования.

При работе над проектом использовались по 1 единице оборудования:

персональный компьютер, принтер, чайник, термофен, ЛБП. Это оборудование разного типа, группа – вычислительная техника имеет срок полезного использования 2-3 года, группа электрические приборы имеет срок полезного действия 2-3 года, группа лабораторное оборудование имеет срок полезного действия 3-5 лет. Так как компьютер эксплуатировался более 3 лет уже к началу работ, то срок его полезного использования истек, следовательно, амортизационные расходы на данный вид оборудования равны нулю. Принтер эксплуатировался к началу проведения работ более 5 лет, следовательно, амортизационные расходы на него тоже нулевые. Термофен и чайник использовались к началу работ более 3 лет, следовательно, амортизационные расходы нулевые. Лабораторный блок питания использовался к началу работ более 7 лет, амортизационные расходы нулевые.

5.2.5 Расчет прочих (накладных) расходов

В статье «Прочие расходы» отражены расходы на выполнение проекта, которые не учтены в предыдущих статьях, их следует принять равными 5% от суммы всех предыдущих расходов, т.е.

$$C_{\text{проч.}} = (C_{\text{мат}} + C_{\text{зп}} + C_{\text{соц}} + C_{\text{эл.об.}} + C_{\text{ам}}) \cdot 0,05 =$$

$$(1616,7 + 120780,6 + 36234,21 + 1573,01) \cdot 0,1 = 160204,52 \cdot 0,05 = 8010,23 \text{ руб.}$$

5.2.6 Расчет общей себестоимости разработки

Рассчитав сумму всех расходов на выполнение запланированных работ, произведем расчет общей себестоимости проекта. Результаты расчетов представлены в таблице 15.

Таблица 15 – Расчет общей себестоимости проекта

Статья затрат	Обозначение	Сумма, руб.
Материалы и покупные изделия	<i>С_{мат}</i>	1616,7
Заработная плата	<i>С_{зп}</i>	120780,6
Отчисления в социальные фонды	<i>С_{соц}</i>	36234,21
Расходы на электроэнергию	<i>С_{эл.}</i>	1573,01
Прочие расходы	<i>С_{проч}</i>	8010,23
ИТОГО:		168214,75

Таким образом, затраты на разработку составили $C = 168214,75$ руб.

Заключение

Разработка искусственных мускулов – очень молодая область знаний. Несмотря на родство с такими техническими системами, имеющими долгую историю, как двигатели, нельзя напрямую причислить к ним искусственные мускулы. Наличие значительного количества специфических требований и ограничений заставляет выделять их в качестве отдельной технической системы.

Сравнивая искусственные мускулы, рассмотренные в первой главе и электродвигатель, можно отметить, что энергоэффективность многих искусственных актуаторов значительно ниже чем КПД электродвигателя. Однако, если рассматривать другие стороны вопроса, то многие искусственные мускулы имеют ряд неоспоримых преимуществ перед электродвигателями. Так, например, вакуумные мышцы имеют высокий запас прочности, отсутствие нагревающихся частей при работе, возможность использования в различных, экстремальных условиях. Еще, одним неоспоримым преимуществом всей отрасли в целом является сравнительная дешевизна изготовления актуатора. В производстве силиконовых мышц не используются дорогие редкоземельные металлы, нет необходимости рассчитывать электрические токи и магнитные поля. Но это в свою очередь, вызывает и другой вопрос. Так как данная сфера достаточно молода, не существует универсальной системы управления такого рода объектами, так как мускулы одного типа, например, сжимающиеся под действием температуры, отличаются друг от друга как по температуре активации, так и по принципам за счет которых происходит сокращение. Не существует налаженного производства, обеспечивающего идентичность актуаторов одного вида.

В третьей главе рассматриваются эксперименты, проведенные с различными образцами искусственной мускулы на основе полиамидной нити. Полученные экспериментальные данные показывают нелинейную зависимость удлинения лески при изменении диаметра образцов. Сравнивая,

модель и фактический результат можно заключить, что модель является достаточно грубым приближением, не учитывающим многих факторов, таких как влажность лески и неоднородность в материале. Различие в предсказанном моделью удлинении и фактическом составляет от 0% до 14%, что показывает уровень адекватности модели.

Приведенная модель для ПВС описывает ионные взаимодействия в актуаторе содержащим мембрану. Проверить ее актуальность и точность, увы не представилось возможным. Однако, были получены уникальные экспериментальные данные при допировании ПВС фуллеренами. Таким образом база электроактивных гидрогелей пополнилась этим открытием.

Если рассматривать применимость данных движителей в будущем, то можно согласится с большинством, утверждающим, что различного рода полимерные соединения или углеродные структуры найдут широкое применение в мехатронных устройствах и не только. Спектр применимости в различных сферах может быть ограничен только воображением изобретателя.

Однако, если отойти от возможного применения в будущем и взглянуть на сферу применимости сейчас, то можно отметить, что скорость реакции ряда актуаторов рассмотренных в работе не является достаточно высокой. Так, например, мышцы из полиамидной нити имеют весьма большой период релаксации относительно времени их сокращения. Проблема эффективного нагрева и охлаждения для данного типа мускулов остаётся актуальной. Существующие решения в данной сфере позволяют лишь в незначительной степени компенсировать этот факт. Однако, несомненные плюсы полимерных мускулов, расширяющихся за счет изменения температуры, говорят о том, что они могут применяться уже в ряде систем, не требующих от исполнительного механизма высоких скоростей реакции. Так, например, они могут быть применены в различных поворотных механизмах, клапанах и задвижках автоматизированных теплиц. Такие мышцы могут осуществлять плавное передвижение камер на платформе, в связи с плавностью сокращения мышцы и отсутствию у нее вибрационных моментов.

Список публикаций студента

По теме работы:

Булатов А. П. «Искусственные мышцы в бионике и робототехнике» // Молодежь и современные информационные технологии: сборник трудов XIV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 2 т., Томск, 7-11 Ноября 2016. - Томск: ТПУ, 2017 - Т. 1 - С. 243-244

Иные:

Гасымов З.А., Лобода Ю.О., Булатов А.П., Телегин Н.А., Коротун Н.Н. «ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОИНТЕРФЕЙСА MUSE ДЛЯ СОЗДАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МЕХАТРОННЫМ ПРОТЕЗОМ» // Всероссийская итоговая 77-я студенческая научная конференция им. Н. И. Пирогова г. Томск, 24-26 апреля 2018 г. Т.1 – С. 498 – 499

Список источников

1. СанПиН 2.2.4.548 – 96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. М.: Минздрав России, 1997.
2. СП 52.13330.2016 Свод правил. Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95
3. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278 – 03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещённому освещению жилых и общественных зданий. М.: Минздрав России, 2003.
4. СанПиН 2.2.4.3359-16 - Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах: утв. постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 21.06.2016 № 81
5. ГОСТ Р 50377-92 (МЭК 950-86) Безопасность оборудования информационной технологии, включая электрическое конторское оборудование.
6. СанПиН 2.2.2/2.4.1340 – 03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы». – М.: Госкомсанэпиднадзор, 2003.
7. СП 12.13130.2009 Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности.
8. Постановление Правительства РФ от 25.04.2012 N 390 (ред. От 30.12.2017) "О противопожарном режиме" (вместе с "Правилами противопожарного режима в Российской Федерации")
9. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ.
10. Haines C. S., Lima M. D., Na Li et al. Artificial muscles from fishing line and sewing thread // Science. 2014. V. 343. P. 868–872.
11. Fuller F. B. The writhing number of a space curve // Proc. Nat. Acad. Sci. USA. 1971. V. 68. P. 815–819.

12. Fuller F. B. Decomposition of the linking number of a closed ribbon: A problem from molecular biology // Proc. Nat. Acad. Sci. USA. 1978. V. 75. P. 3557–3561.
13. Pohl W. F. DNA and differential geometry // Math. Intelligencer. 1980. V. 3. P. 20–27.
14. Treloar L. R. G. The physics of rubber elasticity. Oxford university press, 1975.
15. White J. H. Self-linking and the Gauss integral in higher dimensions // Am. J. Math. 1969. V. 91. P. 693–728.
16. Kuhn W., Hargitay B., Katchalsky A. et al., Reversible dilation and contraction by changing the state of ionization of high-polymer acid networks // Nature– 1950. – Vol. 165. – p. 514-516.
17. Grodzinsky A. J. 1974 Electromechanics of deformable polyelectrolyte membranes. Sc. D. Dissertation Department of Electrical Engineering. MIT, Cambridge. – 1974. – p. 296.
18. Grimshaw P. E., Nussbaumet J. H., Grodzinsky A. J. et al. Kinetics of electrically and chemically induced swelling in polyelectrolyte ionic polymeric gels // Journal of Chemical Physics. –1990. – Vol. 93. – p. 4462-4472. 70
19. Tanaka T., Nishio I., Sun S. T. et al. Collapse of ionic polymeric gels in an electric field// Science. – 1982. – Vol. 218. – p. 467-469.
20. De Rossi D, Parrini D, Chiarelli P et al. Electrically induced contractile phenomena in charged polymer networks: preliminary study on the feasibility of muscle-like structures // American Society for Artificial Internal Organs. – 1985. – Vol. 31. – p. 60-65.
21. Osada Y., Hasebe M. Electrically activate mechanochemical devices using polyelectrolyte ionic polymeric gels // Chemistry Letters. – 1985.– Vol.4.–p. 1285–1288.

22. Shahinpoor M. Conceptual design, kinematics and dynamics of swimming robotic structures using active polymer ionic polymeric gels // *Smart materials and structures*. – 1992. – Vol. 1. – p. 91-94.
23. Shahinpoor M., Osada Y. 1995 Electrically-induced dynamic contraction of ionic polymeric ionic polymeric gels. *Proc. SPIE 1995 North American Conf. on Smart Structures and Materials* (San Diego, CA, Feb.–March 1995). – Vol 2441.
24. De Gennes P. G., Okumura K, Shahinpoor M. et al. Mechanoelectric effects in ionic polymeric gel // *Europhysics Letters*. – 2000. – Vol. 50. – p. 513-518.
25. Asaka K., Oguro K. 2000 Bending of polyelectrolyte membrane platinum composites by electric stimuli, part II. Response kinetics // *Journal of Electroanalytical Chemistry*. – 2000. – Vol. 480. – 186-198.
26. Nemat-Nasser S., Li J. Y. 2000 Electromechanical response of ionic polymer–metal composites // *Journal of Applied Physics*. – 2000. – Vol. 87. – p. 3321-3331.
27. Tadokoro S. An actuator model of ICPF for robotic applications on the basis of physico-chemical hypotheses // *Proc. IEEE, ICRA* – 2000. – p. 1340–1346
28. Sadeghipour K., Salomon R., Neogi S. Development of a novel electrochemically active membrane and ‘smart’ material based vibration sensor/damper // *Smart Materials and Structures*. – 1992. – Vol. 1. – p. 172–179
29. Shahinpoor M., Mojarrad M. 1997b Electrically-induced large amplitude vibration and resonance characteristics of ionic polymeric membrane-metal composites // *Proc. SPIE Smart Materials and Structures Conf.* (San Diego, March 1997)
30. Gong J. P., Osada Y. Modeling and simulation of ionic polymer network // *Preprints of the Sapporo Symp. on Intelligent Polymer Ionic Polymeric Gels* (Sapporo, Japan, Oct. 1994)– 1994. – p. 21–22.
31. Shahinpoor M., Kim K. J. 2001 Ionic polymer metal composites: I. Fundamentals // *Smart Materials and Structures*. – 2001. – Vol. 10. – p. 819–833.

32. Kim K. J., Shahinpoor M., Razani A. Preparation of IPMC's for use in fuel cells, electrolysis, and hydrogen sensors // Proc. SPIE 7th Int. Symp. on Smart Structures and Materials. – 2000. – Vol. 3687
33. Newbury K. M. and Leo D. J. Linear electromechanical model of ionic polymer transducers, part I: model development // Journal of Intelligent Materials Systems and Structures. – 2003. – Vol. 14. – p. 333–342
34. Lakshminarayanaiah N. Transport phenomena in artificial membranes // Department of Pharmacology, University of Pennsylvania, Philadelphia 4, Pennsylvania Chemical reviews. – 1965. – Vol. 65. – N. 5. – p 492-565.
35. Основы теории упругости: учебное пособие / В.Н. Барашков, И.Ю. Смолина, Л.Е. Путеева, Д.Н. Песцов. – Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2012. – 184 с.
36. Седов Л.И. Механика сплошной среды, том 1. М.: Наука, 1970
37. Механические свойства // Энциклопедия полимеров / В.А. Кабанов (гл. ред.). М.: Советская энциклопедия, 1974. Т. 2. С. 230–242.
38. Márcio D. Lima, Na Li, Mônica Jung de Andrade и др. «Electrically, Chemically, and Photonically Powered Torsional and Tensile Actuation of Hybrid Carbon Nanotube Yarn Muscles», *Scinse* - научный журнал [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://science.sciencemag.org/content/338/6109/928> (дата обращения: 10.05.18)
39. Aslan Miriyev, Kenneth Stack & Hod Lipson и др. «Soft material for soft actuators» *Nature Communications* [Электронный ресурс]. volume 8, Article number: 596 – Режим доступа : <https://www.nature.com/articles/s41467-017-00685-3> (дата обращения: 28.04.18)
40. Dian Yang, Mohit S. Verma, Ju-Hee So, Bobak Mosadegh «Buckling Pneumatic Linear Actuators Inspired by Muscle» Wiley online library – онлайн библиотека [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

<https://nlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/admt.201600055>

(дата

обращения: 30.04.18)

41. Muharrem Acerce, E. Koray Akdoğan & Manish Chhowalla «Metallic molybdenum disulfide nanosheet-based electrochemical actuators» Nature – научный журнал [Электронный ресурс]. volume 549, pages 370–373 (21 September 2017) – Режим доступа: <https://www.nature.com/articles/nature23668> (дата обращения: 8.05.18)

42. Поливиниловый спирт – Википедия – свободная энциклопедия [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Поливиниловый_спирт (дата обращения 06.05.18)

Приложение 1

(обязательное)

Листинг программы для построения графика в Matlab.

```
clc %отчистка командой строки
clear all %отчистка рабочей области
n(1) = input('введите количество витков N = '); %начальное
количество витков
E = 2.2*10^9; %модуль юнга
m = input('масса груза = ');
nu = 0.49; %коэффициент Пуассона
df = 2.5*10^-3; %внешний диаметр
dl = 1*10^-3; %диаметр лески
t(1) = 20; %начальная температура

for i = 2:71 %изменение температуры до 90 градусов
    t(i) = t(i-1)+1;
    n(i)= n(i-1) - (t(i)-t(i-1))/5;
end

x = (16*m*9.8*(1+nu)*n*df^3)./(E*dl^4);
x1=x*10^3+200; %прибавляем длину лески 200мм
%построение графика
plot(t1,x1,'k','LineWidth',2)
xlabel('Температура, град');
ylabel('Сокращения, мм');
grid on
```

Приложение 2

(справочное)

Artificial muscles based on a capillary filament

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ЕМ61	Булатов Артем Павлович		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Замятин Н.В.	д.т.н.		

Консультант-лингвист отделения иностранных языков ШБИП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ст. преп.	Горбатова Т.Н.			

1 Literature review

Despite the relative novelty of this topic, there is a large number of works devoted to it. Examining the field of study as whole we can divide works according to the type of materials used and the type of activators used to convert energy into the mechanical work of artificial muscles.

According this distribution in each of the groups, the following items can be singled out.

By the type of materials used:

- polymer compounds;
- carbon structures;
- complex metal compounds.

By the type of activators used:

- electric current and electric field;
- thermal energy;
- magnetic field;
- reactive reagents;

Special types of artificial muscles include various closed shells, the activators for which are neutral liquids and gases. In other words, such closed shells represent analogs of pneumatic or hydraulic locomotor.

1.1 Muscles based on grapheme

Graphene is one of the allotropic modifications of carbon, like diamond and graphite. It is a flat layer of carbon atoms assembled in graphite into loosely bound stacks. Graphene is an amazing material; it has a high electrical conductivity and is very durable. It is one of the most promising materials for the electronics of the future, which will replace silicon [38]. Artificial muscles based on graphene have several types of variations, differing in the principle of interaction at low structural levels. Developments in this field have been carried out since 1999.

The report at the 13th International Winter School on the Electronic Properties of New Materials by an international research team headed by Ray Baughman, an employee of Allied Signal, can be considered the beginning of developments in this sphere.

Bauchman group applied the following principle. They obtained carbon nanotubes in the form of nano-paper sheets, where having the tubes and entangled and intertwined with each other (see Figure 1.1). This kind of nano-paper can be picked up and cut into strips. The first experiments were surprisingly simple.

Researchers stuck two strips of nano-paper to the opposite sides of the duct tape, connected the electrodes to the ends and lowered them into electrically conductive saline solution. When they turned on the electric battery which was providing current of several volts, both strips of nanowave became slightly longer. However, the one connected to the negative pole of the battery lengthened more and both strips bent. It made it clear that the artificial muscle worked.

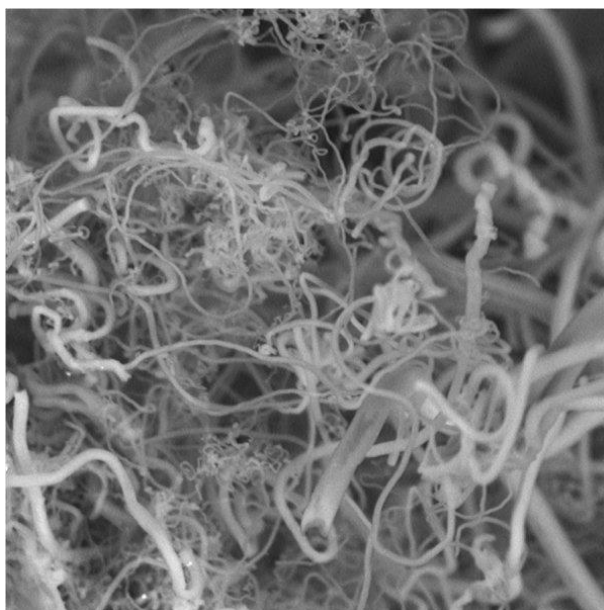


Figure 1.1 – carbon nanofiber.

Twisted nanotubes with paraffin inside have become a conceptually new use of graphene as artificial muscles. This discovery belongs to an international team, which included the previously mentioned Ray Baughman (Ray Baughman).

However, this time researcher used the effect of thermal expansion of paraffin. When heated, paraffin expands inside the nanotubes causing their shorten. Various external sources can be used as heaters.

The article published in Science states that the new artificial muscle tissue can lift a weight that exceeds its own one hundred thousand times [38]. During the experiment, the muscle fiber did not lose its properties after two million continuous contractions.

Contraction of this muscle is very quick; it takes only 25 milliseconds. The generated power of this muscle is 85 times more than that produced by the human muscle of the same size. That is, much more than ordinary human muscle fibers could demonstrate.

The following year, after the publication of this article in 2013, another work was published devoted to artificial muscles based on "crumpled" graphene on a polymer template [39].

Bioengineers at the University of Duke have developed the material that allows to stretch or contract the given material smoothly by changing the current (see Figure 1.2).

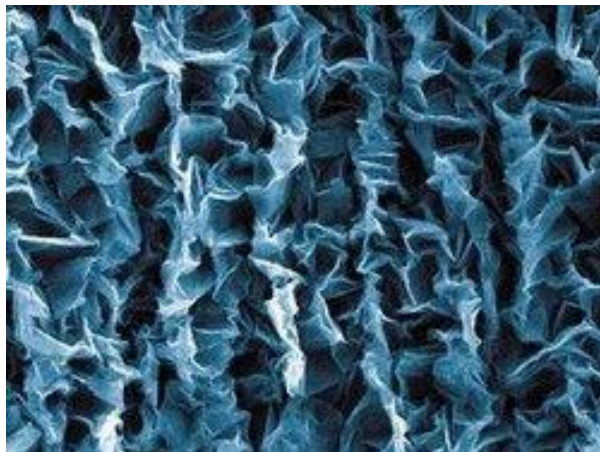


Figure 1.2 – graphene structure on a polymer substrate.

Polymer elastic substrate was stretched and fixed on a special stand, and then the graphene layer was uniformly placed on the substrate. After releasing the substrate, it returned to the original, not stretched state and at the same time the

graphene structure changed. Some microscopic layers of graphene were closer to each other than others, thereby forming a "crumpled" structure on the substrate.

It is obvious that with the electric current flow of a certain force of, in some places of the substrate interactions will be stronger than in those places where the layer remained uniform. Thus, when the current is transmitted, the entire structure will expand, and when there is no current it will shrink. The expansion depends directly on the strength of the transmitted current. According to studies, the degree of deformation of such a muscle can be 100% of the original size.

1.2 Muscles based on polymeric compounds

- If we start to examine a wide variety of polymer compounds we need to divide them into groups. Active materials can convert electrical or chemical energy directly into mechanical energy through the reaction of the material [29]. According to the type of actuation, we can divide the materials into the following groups:
 - non-electric polymers - deformable polymers (driven by non-electrical effects, such as pH, light, temperature, etc.);
 - electroactive polymers (EAP) (powered by an electrical signal)
 - polymers that change shape or size in response to the action of an electric field are called electroactive polymers (EAP). They are divided into two groups depending on the mechanism responsible for driving:
 - electronic EAPs, which are driven by an electric field or the action of Coulomb forces
 - ionic EAPs that change shape due to the mobility or diffusion of ions and conjugate substances

Electronic EAPs generally require large activation fields that are close to the level of breakdown of the material. Electronic EAPs also have a high energy density as well as fast response time in the range of several milliseconds. In contrast to them,

ionic EAP materials such as gels, ionic polymer-metal composites, conducting polymer and carbon nanotubes require low control voltages of 1-5 V.

1.2.1 Artificial muscles based on polyamide yarn.

In contrast to expensive graphene, the production of which is technically not simple and not so widespread, work with polymer muscles draws considerable attention. In turn, polymer compounds are technically simpler in their manufacture and often do not require precision at the nano level. So, for example, an actuator working at the expense of thermal energy is an ordinary polyamide thread, which is also a single-core fishing line.

This material has recently become attractive for researchers from MIT. They published their work in the magazine "Haines" in 2014, then people working on this topic around the world tried to repeat this experiment. In particular, one of them was our compatriot, the head of the information technology laboratory of the Blagoveshchensk State Pedagogical University, Alexander Nikolaevich Semochkin. He improved and automated the technology of creating these artificial muscles. He developed a device that allows to twist the line automatically by winding a thin copper wire. When electric current is passed, the copper wire heats up, thereby making the muscle under load contract - to do the work. Alexander Semochkin presented this development at the conference in Dallas in 2016.

It is necessary to understand the principle of operation of such actuators to create a working prototype of an artificial muscle based on a polyamide thread.

It is incredibly simple: the line shortens and increases in width when heated, and does the opposite when cooled. This contraction is caused by anisotropy of material the line made from. When molten nylon is passed through the spinneret, long polymer molecules orient along the line. Loaded polymer fibers behave in the same way as the strands of stretched rubber when heated; they contract, increasing the entropy of the system.

Describing the process in general without considering the methods of twisting the line we can see on Figure 1.3 how the thread is curled.

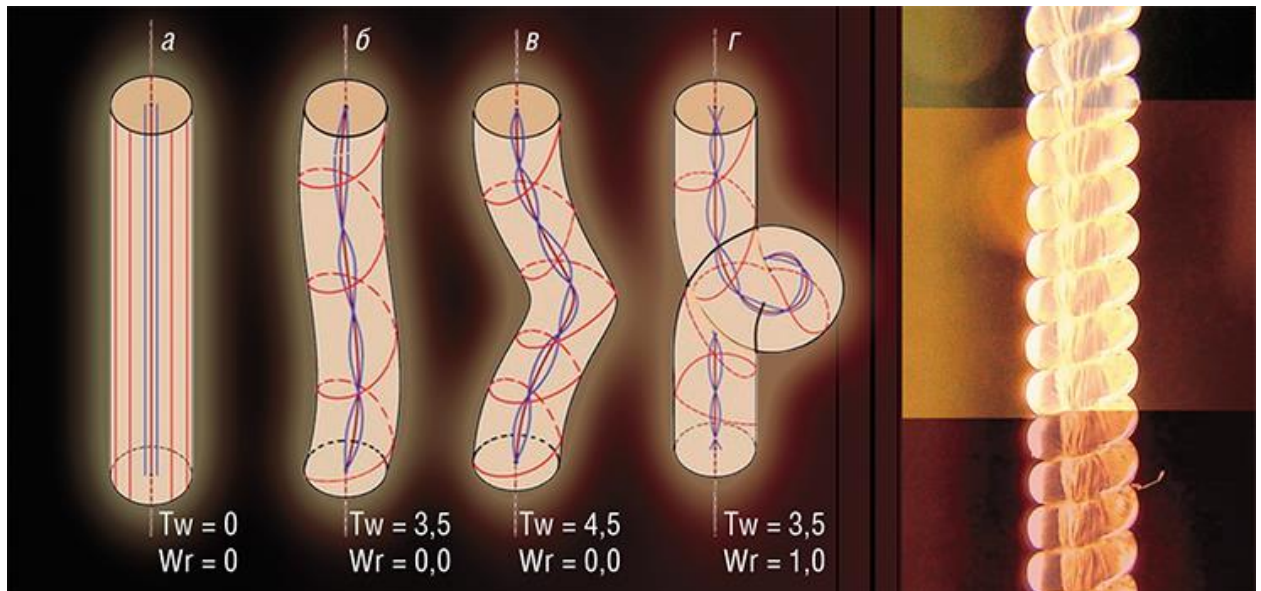


Figure 1.3 - Scheme of secondary spin formation.

With one end of the elongated line (a) fixed we will rotate the other end around the longitudinal axis. At the same moment fibers at the surface are stretched harder than ones that are in the core of the line, causing mechanical tension (b), (c). If we reduce the longitudinal tensile force, then under this tension the fibers will try to untwist. But since the ends of the line are fixed, this untwisting (decreasing the parameter T_w (primary twist parameter)) leads to the formation of a secondary twist loop (d) (increasing the parameter W_r (secondary twist parameter)).

When the longitudinal fibers on the surface of the line twist about 45° relative to the longitudinal axis, the line begins to twist into a dense spiral. The initial length of 1 m of line turns into ~ 17 cm of such spiral when twisted. Also nylon undergoes such a strong plastic deformation that after removing the rotating force the spiral almost does not spin back. This new state of the fibers can be secured if necessary by heating the line slowly, and then cooling it. Heating temperature should be close to the melting point of nylon. Depending on the type of nylon, this temperature ranges from 178°C Celsius (Nylon 12 to PA 12) to 260°C Celsius (Nylon 6.6 to PA 6.6).

The operating temperature of such muscle is significantly lower than the melting point and is about 58-80 ° C depending on the type of nylon used. Of course, more preferred is nylon with a lower operating temperature.

1.2.2 Soft silicone actuators

In they article was published in the journal “Nature Communications “in September 2017 the engineers from Columbia University talk in detail about the creation of a soft actuator based on a two-component silicone and ethanol capable of lifting loads by three orders of magnitude more than its own mass and 1700 times more at maximum [39].

The authors of this development created a soft actuator driven by an electric current. Its structure can be described as follows. A thin wire of Ni-Cr coiled into a spiral is put in a prepared form such as a cylindrical tube or another container. There can be several wires the ends of which are fixed outside of container.

A mixture of silicone and ethanol is prepared in a ratio of 80:20. The authors varied the degree of ethanol in the elastomer from 0 to 33%, the most effective solution was 20%. Then this mixture is poured into the mold and remains inside until the silicon solidifies completely. According to the developers, the use of a 3D printer can be considered as an alternative variant of creation.

After solidification in the elastomer there are bubbles with liquid ethanol, the boiling point of which is 78.4 °C, as well as ethanol vapor and air. The result of this procedure is shown in Figure 1.4 a.

When a wire with a sufficiently high resistance gets heated by applying electric current of 8V and 1A through it the entire actuator gets heated too. Since ethanol is a sufficiently volatile substance with a low boiling point then when bubbles of liquid ethanol are heated above the boiling point, it causes a transition of the liquid substance into a gaseous phase. This leads to increasing of the substance volume.

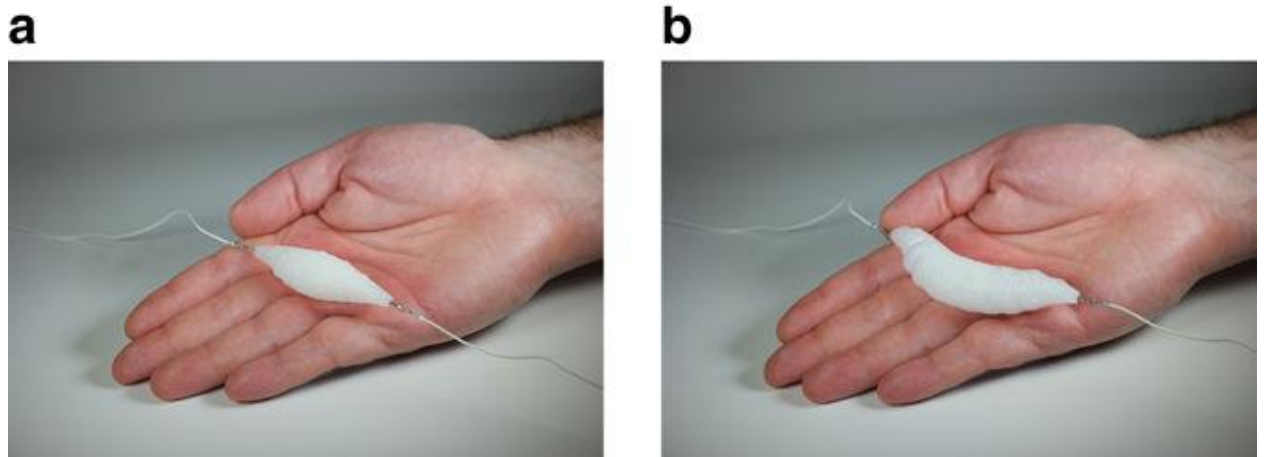


Figure 1.4 - operation of the soft actuator.

The principle of distribution of liquid and gaseous ethanol described above as well as the schematic principle of the actuator are shown in Figure 1.5.

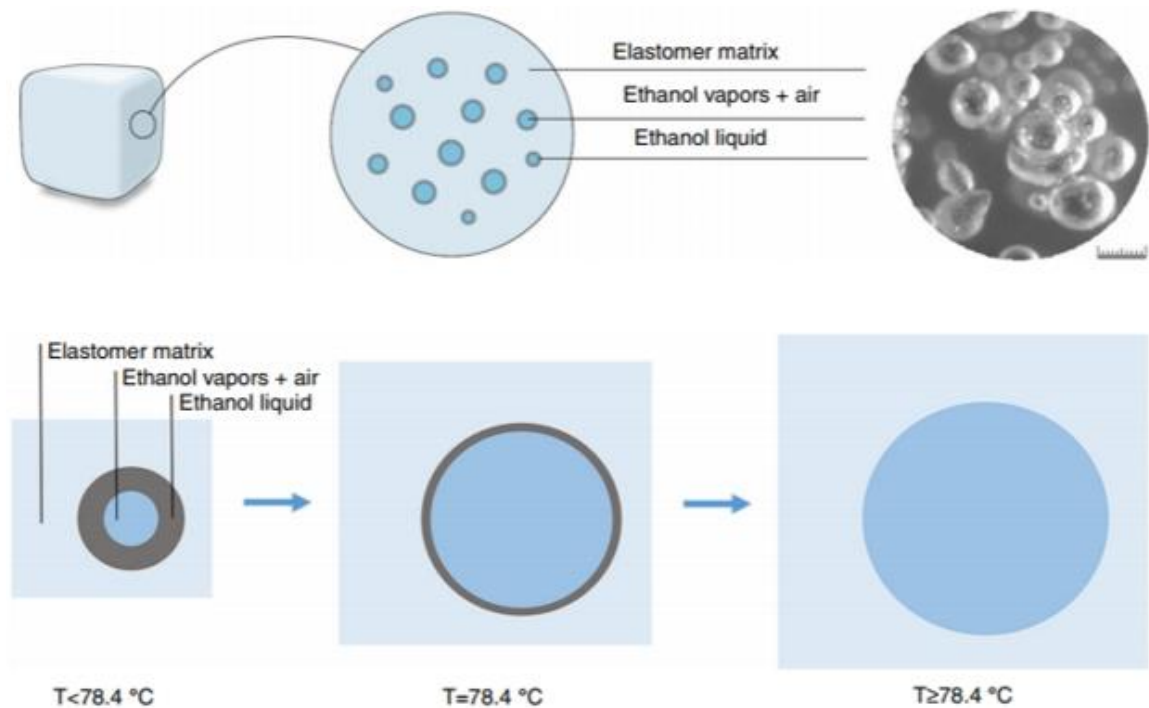


Figure 1.5 - the principle of operation of a soft actuator

When the flow of electric current is stopped, the actuator will stop to heat up and will only give the received heat to the external medium. So as the temperature decreases, the substance will return from the gaseous phase to the liquid. In other words, gaseous ethanol will condense into the liquid inside the elastic silicone shell.

Engineers place the muscle in a flexible braid which increases uniformity of stretching, acts as an expansion restrictor and can change the form of elastomer in the desired direction. For example, Figure 1.6 shows the operation of the actuator in the such braid, which directs the expansion of the elastomer.



Figure 1.6 - the operation of the soft actuator in the braid with the load and in the role of the biceps.

Performance of this actuator is estimated by the developers in 0.2% using one heating spiral from nichrome and in 0.3% using three heating spirals. At a voltage of 15V and a current strength of 1A an actuator with length of 40mm develops a force of 60 H in 70 seconds and it is decreasing by 70% of the initial length, that is, by 28mm. The mechanical work in this case is $60 \text{ N} \cdot 0.028 \text{ m} = 1.68 \text{ J}$. The output power is $1.68 \text{ J} / 70 \text{ s} = 0.024 \text{ W}$. Thus, the drive efficiency is $(0.024 \text{ W} / 15 \text{ W}) \cdot 100\% \approx 0.2\%$.