

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

УТВЕРЖДАЮ

Председатель СПбНЦ РАН  
академик



Ж. И. Алфёров

ОТЧЕТ

о научно-исследовательской работе

**«Поисковых исследований возможности создания  
исполнительных устройств робототехники и автоматики  
на электроактивных полимерных материалах»**

(промежуточный)

по Государственному заданию СПбНЦ РАН в 2014–2016 гг. п.36.1

Этап 2

Ответственный исполнитель

к.т.н. доцент

В.П. Иванов

Санкт-Петербург

2015

## Список исполнителей

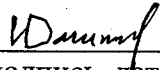
Ответственный исполнитель  
темы, старший научный  
сотрудник, кандидат  
технических наук, доцент

  
\_\_\_\_\_

В.П. Иванов

подпись, дата

Исполнитель темы, старший  
научный сотрудник, кандидат  
физ-мат. наук

  
\_\_\_\_\_

И.Ю. Дмитриев

подпись, дата

Нормоконтроллер

  
\_\_\_\_\_

Г.С. Боброва

подпись, дата

## Содержание

Список исполнителей .....	2
Реферат .....	4
Основная часть	
Введение .....	5
1. Разработка экспериментального образца полимерного материала с заданными свойствами .....	6
1.1 Характеристика гидрогелей и гидрогелевых материалов .....	6
1.2 Обоснование характеристик существующих гидрогелевых полимерных систем с точки зрения пригодности для создания на их основе исполнительных устройств .....	7
2. Разработка и изготовление макета исполнительного устройства на электроактивном полимерном материале .....	8
3. Тестирование макета .....	10
Заключение .....	13
Список использованных источников .....	14

## Реферат

Отчет 14 с., 9 источников

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** автоматика, робототехника, управление, исполнительные устройства, электроактивные полимеры, искусственные мышцы.

Объектом исследования являются исполнительные устройства.

Целью НИР является: повышение эффективности управления сложных устройств робототехники и автоматики, в том числе микро и наноуровня, за счет использования электроактивных полимерных систем в исполнительных устройствах.

Данная цель может быть достигнута на основе разработки соответствующих электроактивных полимерных систем, новых принципов построения исполнительных устройств, использующих электроактивные полимерные системы.

В отчете приведены характеристики гидрогелевых полимерных материалов с точки зрения их использования для исполнительных устройств автоматики и робототехники. Показано, что на данном этапе целесообразно использовать гидрогели, изменяющие объем до 100%. При дальнейшем исследовании проблемы эта цифра может быть уточнена.

Исходя из наличия имеющегося полимерного материала с его физико-механическими характеристиками, разработана, а затем построена схема макета исполнительного устройства, в котором активация полимера проводилась изменением рН среды.

Тестирование подтвердило принципиальную возможность создания исполнительного устройства на набухающих полимерах.

Приведены предварительные характеристики.

# ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

## ВВЕДЕНИЕ

Развитие автоматике, робототехники, в том числе в мини- микро- и наноисполнении, настоятельно требует создания исполнительных устройств соответствующего уровня.

Одним из новых направлений синтеза исполнительного устройства с заданными характеристиками является использование полимерных материалов, изменяющих форму или размеры под внешним воздействием («искусственные мышцы»). К этому классу относятся так называемые электроактивные полимерные материалы и, в частности, гидрогели.

Теория их синтеза пока недостаточно разработана.

К положительным свойствам гелей, важным для построения исполнительных устройств, относится, в частности, существенное изменение объема и геометрических размеров.

Примеры достаточно эффективных устройств на их основе неизвестны.

Таким образом, в научном плане выбранное направление исследования является «белым пятном». Основные проблемные вопросы: синтез полимерного материала с заданными электрофизическими и физико-механическими свойствами, схемные принципы построения исполнительных устройств, системные задачи подвода внешней энергии.

Задачей данного этапа НИР является поиск креативных решений, позволяющих «нащупать» пути решения поставленной проблемы, в том числе и за счет постройки макета устройства. А далее, после его испытания, тестирования определить: 1) существует ли принципиальная возможность построить исполнительное устройство на гидрогелях, 2) какими характеристиками должны обладать гидрогели, 3) как синтезировать гидрогели с заданными свойствами, 4) оценить на макете реальность достижимых характеристик.

# ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

## ВВЕДЕНИЕ

Развитие автоматике, робототехники, в том числе в мини- микро- и наноисполнении, настоятельно требует создания исполнительных устройств соответствующего уровня.

Одним из новых направлений синтеза исполнительного устройства с заданными характеристиками является использование полимерных материалов, изменяющих форму или размеры под внешним воздействием («искусственные мышцы»). К этому классу относятся так называемые электроактивные полимерные материалы и, в частности, гидрогели.

Теория их синтеза пока недостаточно разработана.

К положительным свойствам гелей, важным для построения исполнительных устройств, относится, в частности, существенное изменение объема и геометрических размеров.

Примеры достаточно эффективных устройств на их основе неизвестны.

Таким образом, в научном плане выбранное направление исследования является «белым пятном». Основные проблемные вопросы: синтез полимерного материала с заданными электрофизическими и физико-механическими свойствами, схемные принципы построения исполнительных устройств, системные задачи подвода внешней энергии.

Задачей данного этапа НИР является поиск креативных решений, позволяющих «нащупать» пути решения поставленной проблемы, в том числе и за счет постройки макета устройства. А далее, после его испытания, тестирования определить: 1) существует ли принципиальная возможность построить исполнительное устройство на гидрогелях, 2) какими характеристиками должны обладать гидрогели, 3) как синтезировать гидрогели с заданными свойствами, 4) оценить на макете реальность достижимых характеристик.

## **1. Разработка экспериментального образца полимерного материала с заданными свойствами**

### **1.1 Характеристика гидрогелей и гидрогелевых материалов**

Из достаточно широкого спектра электроактивных полимерных материалов, пригодных для построения исполнительных устройств, можно выделить гидрогелевые материалы. Они обладают способностью изменять свой объем (размеры), форму в зависимости от внешних воздействий (рН, состава растворителя, электрического, магнитного воздействия и др.).

Полимерные гидрогели представляют собой набухающие в воде полимерные сетки с химическими или механическими узлами сшивки. Теоретически существует возможность создать гели, набухающие в иных жидких средах, но для поиска методов их синтеза требуется значительное время и финансирование. К настоящему времени наиболее отработан синтез гидрогелей. К основным механическим свойствам гидрогелей относятся модуль упругости, прочность, эластичность.

Существуют различные классы гелей, которые можно использовать для создания исполнительных устройств.

В физических гелях полимерная сетка сформирована за счет образования водородных или ионных связей между макромолекулами полимера при охлаждении концентрированных растворов, т.е. при физическом воздействии на раствор. Благодаря водородным или ионным связям, гель сжимается в концентрированных растворах электролитов. Пример такого геля – коллагеновые (желатиновые) гели. На основе таких гелей сравнительно давно, в 1966 году, был сделан и описан хемомеханический двигатель, в котором кольцо из геля, проходя через воду и концентрированный раствор бромида лития, набухая и сжимаясь, приводила в действие шкивы, на которые она была надета [1].

В химических гелях образование длинных молекул происходит за счет полимеризации исходных материалов в присутствии активаторов

полимеризации. В качестве исходных мономеров часто используется акриламид. Наличие двойных связей позволяет производить «сшивку» полиакриламидных цепей с образованием пространственных полимерных сеток. Такие гели могут обладать более высокими деформационно-прочностными и реологическими свойствами.

Одним из методов улучшения функциональных свойств гидрогелевых полимерных материалов является использование взаимопроникающих полимерных сеток, т.е. синтез композиционных материалов. Такой подход дает возможность не только повысить механические характеристики полимера, но и придавать ему анизотропные свойства. Методика синтеза подобных гидрогелевых композитов еще недостаточно изучена, как и их характеристики.

## 1.2 Обоснование характеристик существующих гидрогелевых полимерных систем с точки зрения пригодности для создания на их основе исполнительных устройств

Существующие к настоящему времени гидрогелевые полимерные системы способны при набухании изменять свой объем до 1000%. При этом их механические свойства снижаются. Возможности повышения прочностных свойств гидрогелей при предельных изменениях объема пока не исследованы.

Поэтому представляется целесообразным в макете исполнительного устройства применить гидрогель со степенью набухания не более 100%.

Для упрощения создания макета и повышения его к.п.д. необходимо применить анизотропный гидрогель, пространственная структура которого получена за счет использования взаимопроникающих полимерных сеток.

Ввиду предельно ограниченного финансирования исследования, высокой стоимости чистых реагентов и, соответственно, образцов полимерных материалов (стоимость одного грамма лабораторного образца



составляет около 70000 рублей без оценки стоимости предварительных исследований и разработки методики изготовления), в макете использован имеющийся в наличии небольшой образец полимера, т.е. в известной степени случайный, не синтезированный специально для данной задачи, на основе полиакриламидных структур.

## **2. Разработка и изготовление макета исполнительного устройства на электроактивном полимерном материале**

Ввиду того, что образец полимерного материала (гидрогеля) не разрабатывался специально для данной задачи, исполнительное устройство на его основе целесообразно строить работающим на сжатие. Это упрощает изготовление и монтаж устройства. По той же причине в качестве активатора для изменения размеров выбрано изменение рН среды.

По предварительной информации степень изменения геометрических размеров полимера доходит до 80%.

Из образца полимерного материала вырезался активный элемент в виде трубки, внешний диаметр 4 мм, толщина стенки 1 мм, с площадью поперечного сечения 9,42 мм<sup>2</sup> и длиной 5 мм. Элемент помещен в емкость с раствором, чтобы избежать его усыхания.

На основе указанных соображений была разработана конструктивная схема исполнительного устройства, представленная на рисунке 2.

Она состоит из стакана с крышками, полимерного материала, упора, штока, стяжек с гайками, масштабирующего устройства.

Активация полимерного материала осуществлялась 10% раствором соляной кислоты через заливной патрубков.

Сам полимерный материал для предотвращения усыхания помещен в стеклянный стакан, закрепленный между двумя фторопластовыми крышками, стянутыми винтами – стяжками.

Герметизация стакана и крышек осуществляется применением эпоксидных составов, которые после полимеризации практически не вступают в реакции с гидрогелями.

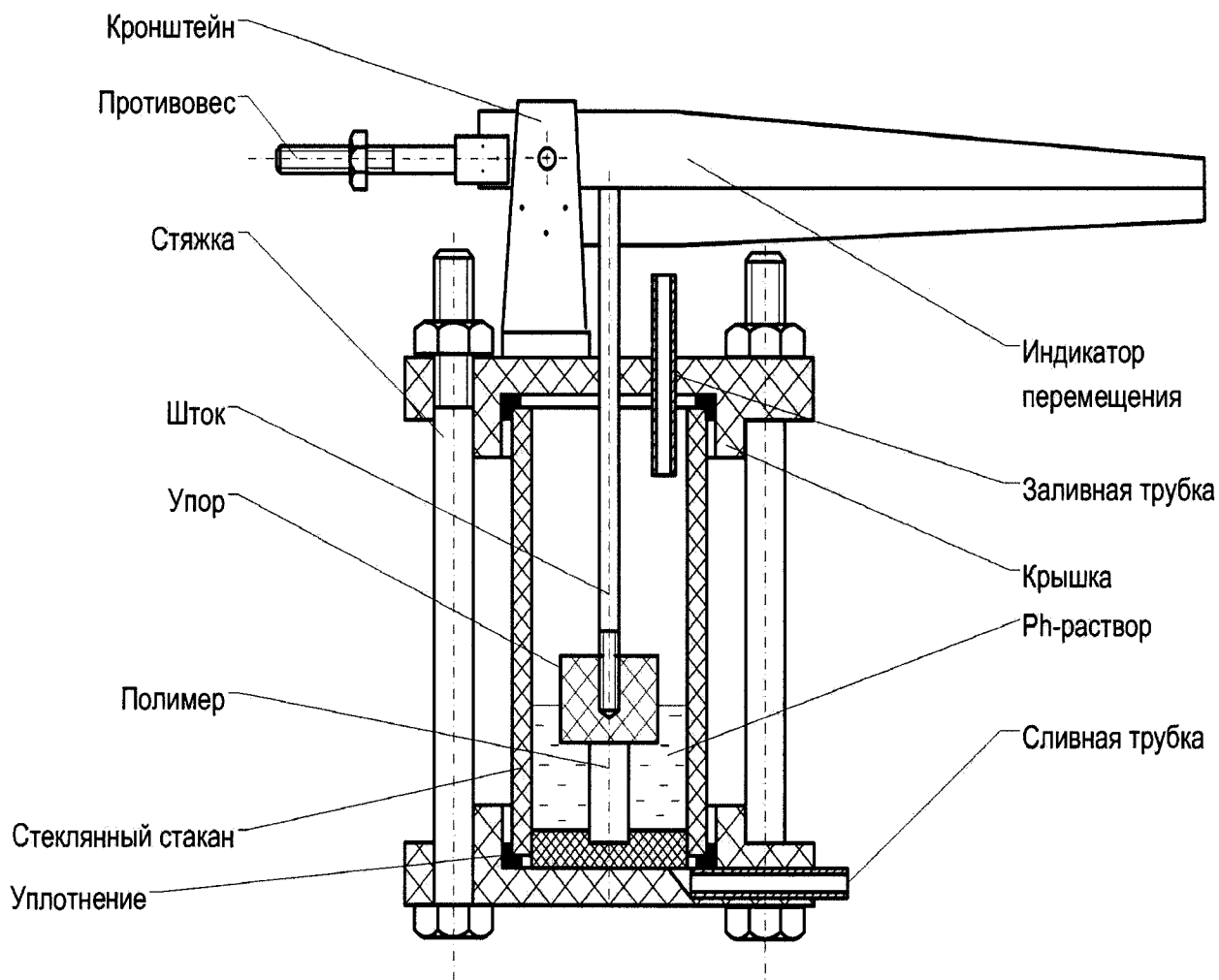


Рисунок 2. Конструктивная схема исполнительного устройства

Герметизация обеспечивается уплотнительными кольцами.

На верхней крышке укреплен кронштейн с индикатором перемещения, выполненный в виде рычага, - масштабирующее устройство. Необходимость его применения обусловлена небольшими размерами образца полимерного

материала и, соответственно, малыми его перемещениями. Соотношение плеч рычага 1:15 делает более заметными перемещения штока.

Противовес служит для регулирования нагрузки полимера.

Упор необходим для лучшей фиксации материала.

Представленная конструкция, несмотря на простоту, позволяет демонстрировать возможность использования гидрогелей для создания исполнительных устройств, а также оценить (в первом приближении) некоторые характеристики, такие, как постоянная времени, тяговое усилие.

### 3. Тестирование макета

Тестирование макета осуществлялось для проверки принципиальных идей, заложенных в конструкцию, и проверки его работоспособности без снятия нагрузочных характеристик (предусмотренных в следующем этапе). Поэтому для упрощения а качестве активатора применено изменение рН среды за счет ввода кислоты.

При тестировании зафиксировано максимальное перемещение около 1 мм. При повторных экспериментах с этим же материалом перемещение уменьшалось, что свидетельствует: 1) об «отравлении» материала недостаточно чистыми веществами, 2) о недостаточной нейтрализации среды после опыта. Все эти причины в дальнейшем потребуют более детальных исследований. Постоянная времени соответствовала диапазону: 60-80 с.

В относительных величинах процесс достаточно хорошо отображается единой кривой в относительных величинах, представленной на рисунке 3. Где  $X$  – текущее перемещение,  $X_V$  – максимальное (1 мм),  $t$  – текущее время,  $T_V$  – максимальное (6 мин).

Полученные результаты показывают, что существует принципиальная возможность построения исполнительного устройства на электроактивных

полимерных материалах, однако и само устройство, и управление им требуют дальнейшего совершенствования на следующем этапе, вместе со снятием более полных электрофизических и физико-механических характеристик. Основной проблемный вопрос: синтез полимерного анизотропного материала с заданными механическими характеристиками (прочность на сжатие и растяжение, упругость и др.).

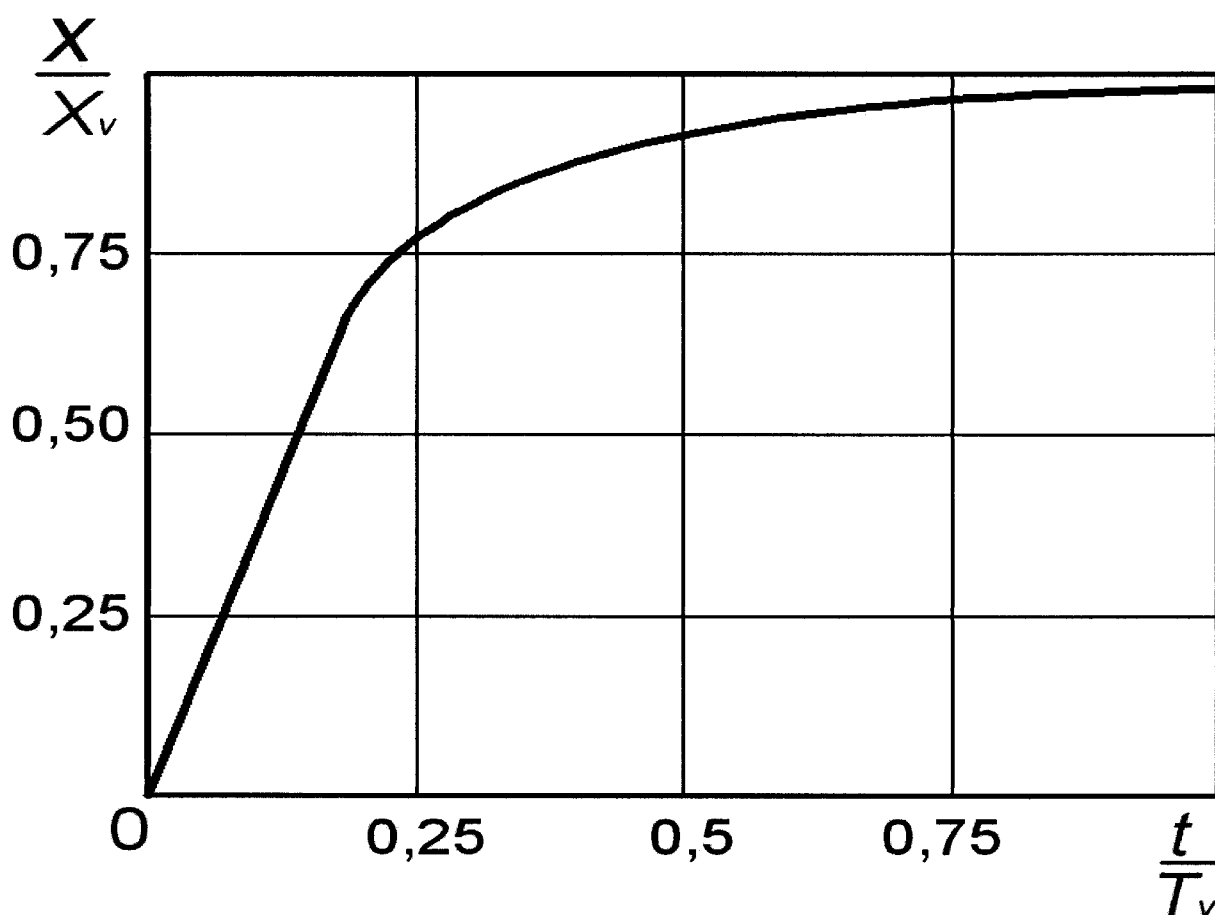


Рисунок 3. Экспериментальная зависимость относительного перемещения от относительного времени

В целом, кривая рис.3 отражает физико-химические процессы в полимере – переход к состоянию насыщения.

Для создания эффективного образца исполнительного устройства, с точки зрения получения максимальной нагрузки исполнительного элемента

необходимо разработать набухающие полимерные материалы с достаточной прочностью на растяжение/сжатие и обладающие ярко выраженной анизотропией.

Если в дальнейшем для активации полимерного материала использовать электрический заряд, то целесообразно разработать специальный композит для обеспечения подвода электрического заряда к набухающему полимеру.

Необходимо провести полное исследование электрофизических и физико-механических характеристик полученных новых анизотропных набухающих и вспомогательных полимерных материалов.

## Заключение

В результате выполнения НИР получены следующие научные результаты:

1. Проведен анализ гидрогелевых полимерных материалов с точки зрения их возможного использования для построения исполнительных устройств.

2. Проведено обоснование характеристик полимеров, прежде всего, степени набухания, для создания исполнительного устройства.

3. Разработан и изготовлен макет исполнительного устройства на набухающих полимерных материалах. В качестве активатора для данного этапа выбрано изменение рН среды.

4. Проведено тестирование изготовленного макета. Показана принципиальная возможность создания исполнительного устройства на набухающих полимерных материалах (гидрогелях).

Показано, что для создания эффективного образца исполнительного устройства необходимо разработать набухающие полимерные материалы с достаточной прочностью на растяжение/сжатие и обладающие ярко выраженной анизотропией.

Необходимо разработать специальный композит для обеспечения подвода электрического заряда к набухающему полимеру.

Необходимо провести полное исследование электрофизических и физико-механических характеристик полученных новых анизотропных набухающих и вспомогательных полимерных материалов.

5. Начатые работы целесообразно продолжить на следующем этапе НИР.

Тема научно-исследовательской работы выполнена в соответствии с техническим заданием.

## Список использованных источников

1. Steinberg I.Z., Oplatka A., Katchalsky A. Mechanochemicals Gells //Nature, 1966. V.210, p.568.
2. ГОСТ 14691-69. Устройства исполнительные для систем автоматического регулирования. Термины.
3. А.М.Тимонов, С.В.Васильева - Электронная проводимость полимерных соединений. //Соросовский образовательный журнал. 2000. Т. 6, № 3, С.33-39.
4. Ф.Гарнье. Проводящие полимеры. //Успехи физических наук, 1989. Т.5. С.513-527.
5. Э.Р.Блайт, Д.Блур. Электрические свойства полимеров. – М.: Физматлит, 2008. – 378 с.
6. В.Р.Беляков. Нестационарные физикохимические процессы в искусственных мышцах эласто-осмотического типа. С.125-127 / Структурные особенности полимеров. – Киев, Наукова думка, 1978. – 125 с.
7. Artificial Muscles from Fishing Line and Sewing Thread // Science, 21
8. A.L.Buyanov, L.G.Revelskaya, E.Yu.Rosova, G.K.Elyashevich. Swelling behavior and pervaporation properties of new composite membrane systems: porous polyethylene film-poly(acrylic acid)hydro gel // J. Appl. Polymer Sci. 2004, V.94, P1461-1465/
9. А.Л.Буянов, Л.Г.Ревельская, Г.А.Петропавловский, М.Ф.Лебедева, С.К.Захаров, Л.А.Нудьга, Л.Г.Кожевникова. Упругое поведение равновеснонабухающих полиэлектролитных гидрогелей на основе акриламида и акрилата натрия //Журнал прикладной химии, 1992. Т.65, №1, С.181-188.

**Статьи, опубликованные за 2015 год по теме № 0240-2014-0003  
«Поисковые исследования возможности создания исполнительных  
устройств робототехники и автоматики на электроактивных  
полимерных материалах».**

1. Иванов В.П. Оценка степени адаптации особого управления для автономных динамических систем. // «Европейский научный журнал», декабрь 2015; <http://www.ortpublishing.de/>