

УДК 541.64:537.3:681.5

## ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕРНЫХ ГИДРОГЕЛЕЙ ДЛЯ МИКРОРАЗМЕРНЫХ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Г.К. Ельяшевич<sup>а</sup>, И.С. Курындин<sup>а</sup>, И.Ю. Дмитриев<sup>а</sup>, П.В. Власов<sup>а</sup>, В.П. Иванов<sup>б</sup>

<sup>а</sup> Институт высокомолекулярных соединений Российской академии наук, Санкт-Петербург, 199004, Российская Федерация

<sup>б</sup> Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, Санкт-Петербург, 199178, Российская Федерация

Адрес для переписки: [elya@hq.macro.ru](mailto:elya@hq.macro.ru)

### Информация о статье

Поступила в редакцию 02.05.18, принята к печати 30.05.18

doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-4-606-613

Язык статьи – русский

**Ссылка для цитирования:** Ельяшевич Г.К., Курындин И.С., Дмитриев И.Ю., Власов П.В., Иванов В.П. Электромеханические системы на основе полимерных гидрогелей для микроразмерных исполнительных устройств // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 4. С. 606–613. doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-4-606-613

### Аннотация

Предложен новый подход к построению исполнительных устройств для автоматизации и робототехники, основанный на использовании новых электроактивных полимерных материалов – набухающих гидрогелей. Получены гидрогелевые рН-чувствительные системы, содержащие два полимерных компонента – сшитые полиакриловую кислоту и поливинилловый спирт. Описана методика синтеза гибридных гидрогелей и приведены достигнутые значения их характеристик – степеней набухания в воде и водном растворе соли. Разработан способ получения гидрогелевых элементов заданной геометрической конфигурации и изготовлены образцы гидрогелей в форме цилиндров и колец. Проведены измерения механических свойств полученных гидрогелей при сжатии. Показано, что образцы гибридных гидрогелей имеют более высокую прочность и эластичность, чем однокомпонентные гидрогели полиакриловой кислоты, полученной таким же методом. Предложена конструкция исполнительного устройства, включающего гидрогель в качестве управляемого элемента. Построен экспериментальный макет такого исполнительного устройства, на котором отработана стабильность характеристик материала, разработаны методы крепления электродов и подвода электрического тока. Установлено, что образцы гидрогелей, изготовленные в форме эластичных колец, демонстрируют электромеханический отклик – сжатие при пропускании через их сечение электрического тока, что свидетельствует о возможности их использования в качестве линейно работающего генератора механического усилия. Показано, что этот эффект выражен сильнее для образцов, набухших в водном растворе сульфата натрия, чем в дистиллированной воде.

### Ключевые слова

электромеханический отклик, полимерные гидрогели, полиакриловая кислота, поливинилловый спирт, исполнительные устройства, механические свойства

## ELECTROMECHANICAL SYSTEMS BASED ON POLYMER HYDROGELS FOR MICRO-SCALE ACTUATORS

G.K. Elyashevich<sup>a</sup>, I.S. Kuryndin<sup>a</sup>, I.Yu. Dmitriev<sup>a</sup>, P.V. Vlasov<sup>a</sup>, V.P. Ivanov<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Institute of Macromolecular Compounds, Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, 199004, Russian Federation

<sup>b</sup> St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, 199178, Russian Federation

Corresponding author: [elya@hq.macro.ru](mailto:elya@hq.macro.ru)

### Article info

Received 02.05.18, accepted 30.05.18

doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-4-606-613

Article in Russian

**For citation:** Elyashevich G.K., Kuryndin I.S., Dmitriev I.Yu., Vlasov P.V., Ivanov V.P. Electromechanical systems based on polymer hydrogels for micro-scale actuators. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2018, vol. 18, no. 4, pp. 606–613 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-4-606-613

**Abstract**

The paper proposes a novel approach to the construction of actuators for automation and robotics based on the use of new electroactive polymer materials – swelling hydrogels. The hydrogel pH-sensitive materials containing two polymer components, crosslinked polyacrylic acid and polyvinyl alcohol, are obtained. A procedure for the synthesis of hybrid hydrogel is described, and the achieved values of their characteristics, degrees of swelling in water and water solution of salt, are given. A method of hydrogel elements preparation with a specified geometric configuration was developed, and cylindrical and also ring-shaped samples were prepared. Mechanical properties of the prepared hydrogels at compression were measured. It is shown that the hybrid hydrogels exhibit higher strength and elasticity than the one-component polyacrylic acid hydrogels obtained by the same method. An actuator design is proposed with a hydrogel as a controlled element. An experimental layout of such actuator was constructed. The stability of material characteristics was determined, and methods for the electrodes fixation and electric current supply were developed. It was found that ring-shaped samples of hydrogels demonstrate electromechanical response – compression when electric current passes through their cross section. This fact was the evidence that these hydrogels can be used as a linearly operating generator of mechanical force. It is shown that this effect is more pronounced for samples swollen in water solution of sodium sulfate rather than in distilled water.

**Keywords**

electromechanical response, polymer hydrogels, polyacrylic acid, polyvinyl alcohol, actuators, mechanical properties

**Введение**

Современные тенденции в развитии различных систем автоматизации управления и робототехники требуют разработки новых исполнительных устройств (называемых также актуаторами или актюаторами), в том числе в мини-, микро- и нанометровых размерах. Под исполнительным устройством имеется в виду система, передающая воздействие с управляющего устройства на объект управления [1, 2]. Входные и выходные сигналы исполнительных устройств, а также их методы воздействия на объект управления могут иметь различную физическую природу. Фактически они являются преобразователями, превращающими входной сигнал одного вида энергии в выходной сигнал другого вида энергии (электрический, оптический, механический, пневматический и др.).

К настоящему времени созданы многочисленные виды исполнительных устройств, таких как электромеханические системы, осуществляющие как вращательное, так и поступательное движения. Достаточно часто применяются пневматические и гидравлические актуаторы поршневого типа для линейного движения, аксиально-поршневые или радиально-поршневые машины, турбины для вращательного движения, работающие от аккумулятора давления или (через ресивер) от компрессорных агрегатов, приводимых в движение поршневыми, турбинными или электрическими машинами различных типов. Все указанные выше устройства реализуют тяговые усилия (при поступательном движении) в достаточно широком диапазоне от 10 до  $10^6$  Н. Однако при уменьшении геометрических размеров устройства возникает целый ряд проблем как конструктивного, так и производственного характера. В частности, наблюдается значительный рост сил молекулярного сцепления по сравнению с силами трения, понижение коэффициента полезного действия и т.д.

Ввиду общей тенденции миниатюризации автоматических систем и развития микромеханики, включая наномеханику, возрастает интерес к устройствам, способным работать на микро- и наноуровнях [2]. Одно из перспективных и приоритетных направлений развития современной робототехники связано с разработкой исполнительных устройств на основе набухающих полимеров (гидрогелей), в том числе совместимых с биотканями – так называемых искусственных мышц, которые являются достаточно близкими аналогами мышц биологических [3, 4]. Для их активации можно использовать электрический ток, изменение pH-среды, ионное, световое и тепловое воздействие, а также комплексное применение этих факторов [5, 6]. В настоящее время известны лишь отдельные варианты устройств, использующие электроуправляемые полимерные гидрогели данного типа [6–10].

В основе идеи применения полимерных гидрогелей в качестве активных элементов исполнительных устройств лежит их способность реагировать многократным изменением своего объема или формы на незначительные изменения внешних условий (электрическое поле, pH-среды, ионная сила, световое и тепловое воздействие) [11]. Гидрогели представляют собой сетчатые структуры, образованные длинноцепочечными молекулами полимерных соединений, сшитыми системой связей (физических или химических). Они имеют полиэлектролитную природу, т.е. содержат как положительные, так и отрицательные ионы. Гидрогели на основе синтетических и природных полимеров сочетают в себе способность к значительному набуханию и хорошие механические свойства, что позволяет использовать их в качестве матриц объемной конфигурации для конструирования на их основе систем со смешанной электронно-ионной проводимостью, демонстрирующих электромеханический отклик, т.е. выраженную реакцию в виде механической деформации (удлинение, сокращение, изгиб и др.) под действием электрического поля. Электроактивные гидрогели представляют собой функциональные материалы нового поколения, обладающие большой электропроводящей поверхностью, а также высокой сквозной электронной проводимостью и способностью к набуханию в водных средах.

Механизм работы исполнительного устройства на базе полиэлектролитного гидрогеля имеет электрокинетическую и электроосмотическую природу, и его действие определяется выраженным изменением

ем степени набухания при смещении ионного равновесия в объеме гидрогеля, транспортом ионов через гидрогель и электрохимическими реакциями на электродах [12, 13]. Вклад того или иного эффекта в характеристики электрохимического отклика в большой степени зависит от конфигурации измерительной ячейки, т.е. взаимного расположения гидрогеля и электродов, а также от типа электролита. Однако при использовании полимерных гидрогелей возникают затруднения, связанные с интеграцией гидрогелевого электроуправляемого элемента в механизм исполнительного устройства. Для разработки актуатора на набухающих полимерных материалах необходимо решить две задачи:

1. получить гидрогелевый материал с удовлетворительным уровнем механических свойств, а именно:
    - надлежащего электрохимического отклика;
    - достаточной механической прочности;
    - приемлемых технологических характеристик;
  2. сконструировать исполнительное устройство на этом материале, т.е.:
    - обеспечить необходимый электрический контакт электроуправляемого элемента на основе гидрогеля;
    - разработать метод крепления электроуправляемого элемента;
    - разработать схемные решения построения технических устройств на полимерных гелях.
- Решение этих задач было предметом исследования в данной работе.

### Объекты и методы исследования

Для получения гидрогелей с необходимыми для использования в исполнительных устройствах механическими характеристиками была разработана новая технология синтеза гидрогелей гибридной структуры на основе сшитой полиакриловой кислоты (ПАК) и поливинилового спирта (ПВС) [14]. Гидрогели ПАК-ПВС были получены методом свободно радикальной сополимеризации акриловой кислоты в присутствии ПВС. Для их приготовления использовали 25%-ный водный раствор мономера акриловой кислоты с добавлением сшивателя (метилен-бис-акриламид) в соотношении 1:300. Полученный раствор смешивали с 10%-ным водным раствором линейного поливинилового спирта с молекулярной массой  $12,6 \cdot 10^4$ . В смесь водного раствора акриловой кислоты и поливинилового спирта добавляли инициатор – систему пероксидисульфат аммония/соль Мора/сульфит натрия, которые были взяты в мольном отношении к мономеру  $1,8 \cdot 10^{-5}$ ,  $1,7 \cdot 10^{-3}$  и  $1 \cdot 10^{-3}$  соответственно. В результате реакции происходило образование ПАК под действием инициатора и формирование совместной сетки ПАК с ПВС под действием сшивателя (рис. 1). После завершения полимеризации гидрогель выдерживали в дистиллированной воде не менее одной недели для удаления остатков непрореагировавших веществ. Затем образцы тщательно высушивали на воздухе при комнатной температуре. Полученные двухкомпонентные гидрогели имели пространственную структуру сетки, образованной сшивками между цепями ПАК и ПВС.

Для сравнения были синтезированы однокомпонентные гидрогели «чистой» ПАК [15].

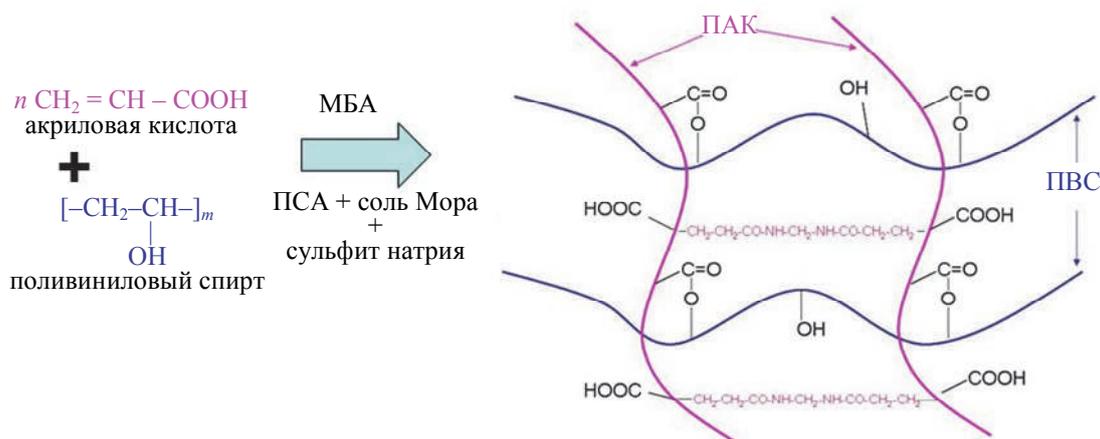


Рис. 1. Метод получения двухкомпонентных гидрогелей ПАК-ПВС (МБА – метилен-бис-акриламид, ПСА – пероксидисульфат аммония)

Равновесную степень набухания  $Q_{eq}$  (г/г) в воде или в 5%-ном водном растворе  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  рассчитывали по формуле

$$Q_{eq} = \frac{m_{es} - m_{dr}}{m_{dr}},$$

где  $m_{dr}$  – масса образца в высушенном состоянии (г);  $m_{es}$  – масса образца в равновесно набухом состоянии (г).

Предлагаемый метод синтеза композита ПАК-ПВС позволил сформировать образцы гидрогеля заданной формы – в виде волокон, цилиндров, колец и т.д.

Деформационные характеристики полученных гидрогелей (модуль упругости, разрушающее напряжение и относительную деформацию) определяли в режиме одноосного сжатия по кривым напряжение–деформация ( $\sigma$ – $\epsilon$ ) на разрывной машине 2166 Р-5 («Точприбор», Иваново). Использовали образцы, набухшие в воде до равновесного значения степени набухания. Скорость деформации составляла 5 мм/мин. При расчете модуля упругости  $E$  использовали область малых деформаций (до значений  $\epsilon = 5\%$ ), в которой зависимость  $\sigma$  от  $\epsilon$  близка к линейной. Погрешность измерений не превышала 10%.

Характеристики механических свойств гидрогелей ПАК-ПВС и ПАК в режиме сжатия были измерены на образцах гидрогелей цилиндрической формы, набухших в воде. Их получали путем заливки полимеризационной смеси в стеклянные пробирки с последующим термостатированием при 30°C в течение 1 часа. После завершения полимеризации полученный гидрогель извлекали из пробирок, нарезали на цилиндры с примерным соотношением высоты к диаметру 1:1 и выдерживали в дистиллированной воде не менее одной недели для удаления остатков непрореагировавших веществ. Затем образцы тщательно высушивали на воздухе при комнатной температуре.

Для изготовления гидрогелей в форме колец полимеризационную смесь заданного состава заливали во фторопластовую форму, в которой формирующая полость представляла собой круглое в сечении углубление с диаметром 2 мм в виде вытянутого кольца, снабженное одним впускным и одним выходным отверстием, предназначенным для выхода воздуха в процессе заполнения формы. Полимеризационную смесь впрыскивали в сомкнутую форму через впускное отверстие посредством шприца. После полного заполнения формы оба отверстия закупоривались с помощью эластичной замазки. Затем форму выдерживали в термостате при 30°C в течение 1 часа, после чего ее разнимали и извлекали кольцо гидрогеля.

### Результаты и обсуждение

Гибридные гидрогели ПАК-ПВС демонстрировали способность к обратимому набуханию в водных средах. Измерения равновесной степени набухания показали, что в воде ее величина для гидрогелей ПАК (14 г/г) значительно превышает значение  $Q$  для образцов ПАК-ПВС (3–5 г/г), которая понижается с увеличением процентного содержания ПВС в реакционной смеси. Это свидетельствует о том, что присутствие ПВС приводит к образованию более плотной сетки в ПАК-ПВС по сравнению с сеткой в гидрогелях ПАК. Равновесная степень набухания образцов ПАК-ПВС в водном растворе  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  примерно на 20% ниже, чем в воде, что связано с происходящим в солевом растворе экранированием карбоксильных групп ПАК ионами  $\text{Na}^+$ , и, как следствие, снижением степени диссоциации ПАК в растворе  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  по сравнению с этой величиной для ПАК в воде.

Механические характеристики полученных гидрогелей ПАК-ПВС и однокомпонентных гелей ПАК приведены в табл. 1. Как видно в таблице, гибридные гели ПАК-ПВС по этим характеристикам превосходят гели ПАК – они имеют значительно более высокие (примерно в 1,5 раза) прочность и эластичность (удлинение при разрыве), чем гели ПАК. Достигнутый уровень деформационных свойств свидетельствует о том, что полученные гибридные гидрогели пригодны для использования в исполнительных устройствах в качестве электроактивного управляемого элемента [14].

Образец	Равновесная степень набухания в воде, г/г	Модуль упругости, кПа	Прочность, кПа	Относительная деформация при разрушении, %
ПАК	14	207	158	45
ПАК-ПВС	5	71	222	69

Таблица 1. Степени набухания и механические характеристики гидрогелей при сжатии

Для реализации свойств гидрогеля в исполнительных устройствах был разработан ряд методов передачи усилий на силовые элементы устройства и способов подачи тока (напряжения) на гидрогель. Анализ различных подходов показал, что задачу можно решить наиболее просто и эффективно, если гидрогелевый элемент выполнить в виде кольца, натянутого на графитовые электроды, через которые осуществляется передача усилий на силовые структуры устройства [14, 16].

Электромеханические характеристики полученных систем на основе гидрогелевых элементов были определены на экспериментальной установке – макете исполнительного устройства, схема которой представлена на рис. 2 [13]. В установке использовался гидрогелевый элемент в виде вытянутого круглого кольца (диаметр материала 2 мм). Минимальный внутренний радиус 3 мм, длина – 67 мм. Испытания показали, что от одного элемента можно получить максимальное перемещение до 7 мм при развиваемом усилии до 10 г.

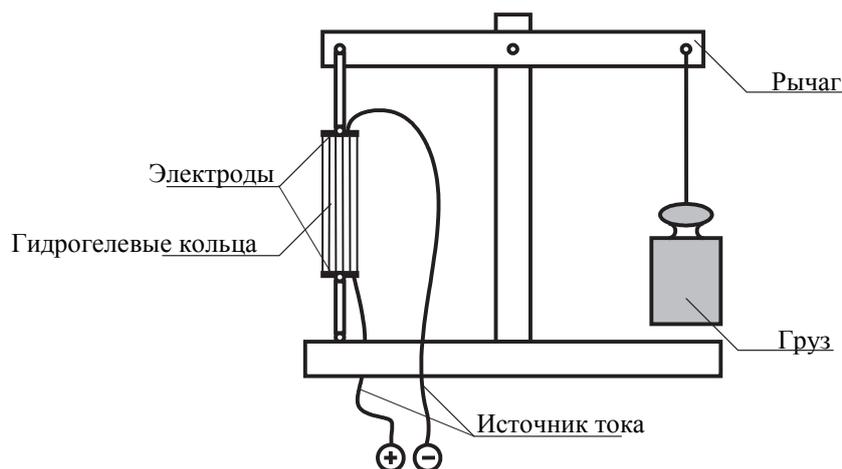


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для определения характеристик гидрогелевых электроактивных элементов

Для повышения этих характеристик было предложено новое схемное решение – использование связки волокон (системы параллельно расположенных гидрогелевых колец для повышения усилий и последовательных групп таких систем для увеличения перемещения). На таком макете было достигнуто перемещение в 20 мм при усилии 200–500 г. Отметим, что приведенные характеристики не являются предельными, они отражают определенный технологический уровень, достигнутый исследовательским коллективом. На макете исполнительного устройства по предложенной схеме была отработана стабильность характеристик материала, разработаны методы крепления электродов и подвода электрического тока.

Электромеханический отклик был исследован на образцах кольцевой формы, достигших равновесного набухания в воде и в 5%-ном водном растворе  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . При подаче электрического тока на электроды, между которыми было расположено кольцо гидрогеля, фиксировали перемещение рычага, происходящее в результате уменьшения линейного размера образца (рис. 2). Сокращение кольца обусловлено интенсивным понижением его степени набухания вследствие потери жидкости. Было установлено, что характеристики электромеханического отклика данного устройства определяются диаметром волокна гидрогеля и качеством электро- и ионообменных процессов в гидрогеле, зависящих от электропроводности гидрогелевого образца, которая, в свою очередь, определяется составом электролита, в котором набухло волокно, а также геометрией элемента. Результаты влияния среды набухания на характеристики электромеханического отклика представлены в табл. 2. Как видно из таблицы, для образца, набухшего в растворе соли, величина электромеханического отклика (относительная деформация образца под действием тока) в 4 раза выше, а скорость деформации на порядок выше, чем при набухании в воде.

Среда	Степень набухания, г/г	Задаваемое напряжение, В	Ток в образце, мА	Относительная деформация, %	Скорость деформации, мм/мин
Вода	5	90	1	4,5	0,15
5%-ный водный раствор $\text{Na}_2\text{SO}_4$	4	90	40	18	1,50

Таблица 2. Электромеханический отклик гидрогелей ПАК-ПВС, набухших в водных средах

Характер наблюдаемых изменений формы и размеров гидрогелевого образца кольцевой формы при пропускании через него электрического тока представлен на рис. 3. Исходный образец при подаче электрического напряжения на катодном электроде-подвесе начинает усаживаться, в то время как на анодном – незначительно расширяться. Эти процессы сопровождаются газообразованием в примыкающем к анодной электродной поверхности объеме гидрогеля, а также выделением небольших капелек жидкости из гидрогеля. Постепенно область сжатия гидрогеля распространяется от катода к аноду, в результате чего подвижный электрод-подвес (на рис. 3 изображен сверху) осуществляет перемещение. Движение прекращается к моменту полного выравнивания поперечного сечения гидрогеля вдоль всей длины кольца.

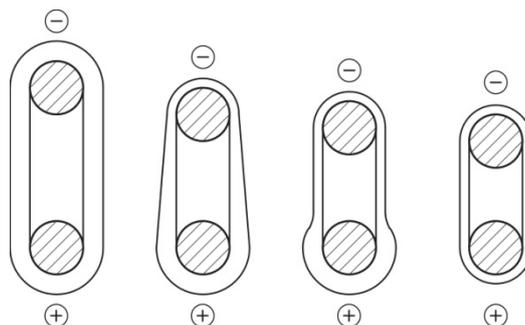


Рис. 3. Изменение размеров кольца гидрогеля под действием электрического тока

Было установлено, что образцы способны многократно подвергаться сжимающему воздействию под влиянием электрического тока с последующим набуханием без существенного изменения показателей электромеханического отклика.

На рис. 4 представлены зависимости относительного перемещения кольцеобразного образца от времени начала пропускания тока (10 мА) через гидрогель. Как видно на рисунке, кривые имеют S-образную форму с выходом размера гидрогеля на постоянное значение. Это указывает на наличие начальной, промежуточной и заключительной стадий сокращения гидрогеля, что согласуется со схематическим представлением процесса на рис. 3 и приведенным выше его описанием. Измерения показали, что общая (суммарная) скорость движения коромысла испытательного стенда зависит от нагрузки, которая задавалась на противовесе. При увеличении нагрузки от 0 до 10 г время достижения конечного значения перемещения увеличивается с 11 до 14 мин для кольца, набухшего в воде (кривые 1, 2), и с 7 до 11 мин для кольца, набухшего в 5%-ном водном растворе сульфата натрия (кривые 3–5).

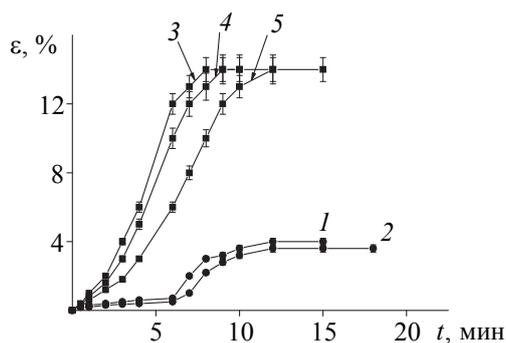


Рис. 4. Зависимости относительного сжатия от времени эксперимента для образцов гидрогеля, набухших в воде (1, 2) и в 5%-ном растворе  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (3, 4, 5) с нагрузкой 0 г (1, 3), 5 г (4) и 10 г (2, 5)

Отметим также, что помимо электрического тока в качестве иницилирующего воздействия для сокращения образцов гидрогеля может выступать изменение pH-среды.

В первом приближении зависимость перемещения (сжатия) образцов гидрогеля от времени достаточно хорошо описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\frac{dy}{dt} = a_1 y + a_2 u,$$

$$\frac{dx}{dt} = b_1 y + b_2 x.$$

где  $u$  – управляющее воздействие;  $x$  – перемещение;  $y$  – сжатие;  $a_1, a_2, b_1, b_2$  – коэффициенты (в общем случае зависящие от времени).

Набор коэффициентов определяет наличие в системе двух постоянных времени, что отражает структуру ПАК-ПВС гидрогеля. Значения постоянных времени, в свою очередь, зависят от структуры гидрогеля и от геометрии управляемого электроактивного гидрогелевого элемента. Для уменьшения значений постоянной времени необходимо использовать более тонкое волокно гидрогеля, что снижает допустимую нагрузку на одно волокно. Однако ограничения на омическое сопротивление влияют и на используемую длину элемента, и на его перемещение. Для получения требуемых значений генерируемых усилий необходимо использовать связку волокон, т.е. отдельные образцы гидрогеля могут быть объединены в рядные (параллельные) структуры, а для реализации заданного уровня перемещения рядные структуры могут быть соединены последовательно. Постоянная времени и скорость перемещения зави-

сят от диаметра волокна и конструкции исполнительного устройства. Таким образом, проведенные исследования демонстрируют принципиальную возможность создания исполнительных устройств нового типа – «искусственных мускулов» на основе электроуправляемого гидрогелевого элемента.

### Заключение

Проведенные исследования образцов полимерных гидрогелей показали, что на их основе может быть изготовлен электроуправляемый элемент, способный развивать тяговое усилие. Полученные композиционные гидрогели полиакриловой кислоты с поливиниловым спиртом по механическим характеристикам превосходят гели полиакриловой кислоты и имеют значительно (примерно в 1,5 раза) более высокие прочность и деформируемость.

Разработанная методика получения гидрогелей позволяет изготавливать образцы заданной конфигурации и конструировать схемы исполнительных устройств на их основе. Предложенным способом были изготовлены управляемые гели в виде вытянутых колец с диаметром сечения около 2 мм. Полученные образцы демонстрировали электромеханический отклик – при пропускании электрического тока они развивали усилие до 10 г при максимальном относительном перемещении до 18%. Исследования показали, что скорость перемещения зависит от электропроводности гидрогелевого образца, которая, в свою очередь, определяется составом электролита, в котором набухал образец.

Таким образом, в работе показано, что существует принципиальная возможность построения управляемых электрическим током и изменением pH-среды исполнительных устройств на основе набухающих полимеров в качестве активных элементов, и предложены схемные решения конструкции устройства.

### Литература

1. Методы классической и современной теории автоматического управления. В пяти томах. Под ред. Егупова Н.Д., Пупкова К.А. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004.
2. Теряев Е.Д., Филимонов Н.Б. Наномехатроника: состояние, проблемы, перспективы // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 1. С. 2–14.
3. Carpi F. *Electromechanically Active Polymers*. Switzerland: Springer, 2016. 798 p.
4. Bar-Cohen Y. *Electroactive Polymer (EAP) Actuators as Artificial Muscles: Reality, Potential, and Challenges*. 2<sup>nd</sup> ed. Bellingham: SPIE Press, 2004. 816 p.
5. Osada Y., Khokhlov A.R. *Polymer Gels and Networks*. NY: Marcel Dekker, 2002. 384 p.
6. Shiga T. Deformation and viscoelastic behavior of polymer gels in electric fields // *Advances in Polymer Science*. 1997. V. 134. P. 131–163. doi: 10.1007/3-540-68449-2\_2
7. Ito H., Kezuka K. *Polymer Actuator*. Patent US 20070190150A1. Publ. 16.08.2007.
8. Shahinpoor M. Spring-loaded polymeric gel actuators. Patent US 5389222. Publ. 14.02.1993.
9. Elyashevich G.K., Smirnov M.A., Bobrova N.V., Dmitriev I.Yu., Bukošek V. Multicomponent electroactive and pH-sensitive smart composites based on polypyrrole, polyacrylic acid hydrogels, and polyethylene porous films // *Smart Nanocomposites*. 2012. V. 3. N 2. P. 123–136.
10. Otake M., Kagami Y., Inaba M., Inoue H. Motion design of a starfish-shaped gel robots made of electroactive polymer gel // *Robotics and Autonomous Systems*. 2002. V. 40. N 2-3. P. 185–191. doi: 10.1016/s0921-8890(02)00243-9
11. Jayaramudu T., Ko H.U., Kim H.C., Kim J.W., Li Y., Kim J. Transparent and semi-interpenetrating network P(vinyl alcohol)-P(Acrylic acid) hydrogels: pH responsive and electroactive application // *International Journal of Smart and Nano Materials*. 2017. V. 8. N 2-3. P. 80–94. doi: 10.1080/19475411.2017.1335247
12. Budtova T., Suleimenov I., Frenkel S. Electrokinetics of the contraction of a polyelectrolyte hydrogel under the influence of constant electric current // *Polymer Gels and Networks*. 1995. V. 3. N 3. P. 387–393. doi: 10.1016/0966-7822(94)00031-2
13. Rasmussen L., Erickson C.J., Meixler L. et al. Considerations for contractile electroactive polymeric materials and actuators // *Polymer International*. 2010. V. 59. N 3. P. 290–299. doi: 10.1002/pi.2763
14. Дмитриев И.Ю., Боброва Н.В., Иванов В.П., Ельашевич Г.К. Электроуправляемый элемент исполнительного

### References

1. *Classical and State-of-the-Art Control Theory Methods*. Eds. Egupov N.D., Pupkov K.A. Moscow, MSTU named by N.E. Bauman Publ., 2004. (in Russian)
2. Teryaev E.D., Filimonov N.B. Nanomechanics: the condition, problems, prospects. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2010, no. 1, pp. 2–14. (in Russian)
3. Carpi F. *Electromechanically Active Polymers*. Switzerland, Springer, 2016, 798 p.
4. Bar-Cohen Y. *Electroactive Polymer (EAP) Actuators as Artificial Muscles: Reality, Potential, and Challenges*. 2<sup>nd</sup> ed. Bellingham, SPIE Press, 2004, 816 p.
5. Osada Y., Khokhlov A.R. *Polymer Gels and Networks*. NY, Marcel Dekker, 2002, 384 p.
6. Shiga T. Deformation and viscoelastic behavior of polymer gels in electric fields. *Advances in Polymer Science*, 1997, vol. 134, pp. 131–163. doi: 10.1007/3-540-68449-2\_2
7. Ito H., Kezuka K. *Polymer Actuator*. Patent US 20070190150A1, 2007.
8. Shahinpoor M. Spring-loaded polymeric gel actuators. Patent US 5389222, 1993.
9. Elyashevich G.K., Smirnov M.A., Bobrova N.V., Dmitriev I.Yu., Bukošek V. Multicomponent electroactive and pH-sensitive smart composites based on polypyrrole, polyacrylic acid hydrogels, and polyethylene porous films. *Smart Nanocomposites*, 2012, vol. 3, no. 2, pp. 123–136.
10. Otake M., Kagami Y., Inaba M., Inoue H. Motion design of a starfish-shaped gel robots made of electroactive polymer gel. *Robotics and Autonomous Systems*, 2002, vol. 40, no. 2-3, pp. 185–191. doi: 10.1016/s0921-8890(02)00243-9
11. Jayaramudu T., Ko H.U., Kim H.C., Kim J.W., Li Y., Kim J. Transparent and semi-interpenetrating network P(vinyl alcohol)-P(Acrylic acid) hydrogels: pH responsive and electroactive application. *International Journal of Smart and Nano Materials*, 2017, vol. 8, no. 2-3, pp. 80–94. doi: 10.1080/19475411.2017.1335247
12. Budtova T., Suleimenov I., Frenkel S. Electrokinetics of the contraction of a polyelectrolyte hydrogel under the influence of constant electric current. *Polymer Gels and Networks*, 1995, vol. 3, no. 3, pp. 387–393. doi: 10.1016/0966-7822(94)00031-2
13. Rasmussen L., Erickson C.J., Meixler L. et al. Considerations for contractile electroactive polymeric materials and actuators. *Polymer International*, 2010, vol. 59, no. 3, pp. 290–299. doi: 10.1002/pi.2763
14. Dmitriev I. Yu., Bobrova N. V., Ivanov V. P., Elyashevich G.

- устройства на основе гидрогеля. Патент RU 175272. 2017.
15. Бельникевич Н.Г., Боброва Н.В., Елоховский В.Ю., Зоолшоев З.Ф., Смирнов М.А., Ельяшевич Г.К. Влияние типа инициатора на структуру гидрогелей сшитой полиакриловой кислоты // Журнал прикладной химии. 2011. Т. 84. № 12. С. 1222–1229.
  16. Иванов В.П., Дмитриев И.Ю., Бизин М.М., Дашевский В.П., Ельяшевич Г.К. Исполнительное устройство. Патент РФ №175482. 2017.
  - K. Electrically controlled element of actuator based on hydrogel. *Patent RU 175272*, 2017.
  15. Bel'nikovich N.G., Bobrova N.V., Elokhoyskii V.Yu., Zoolshoev Z.F., Smirnov M.A., Elyashevich G.K. Effect of initiator on the structure of hydrogels of cross-linked polyacrylic acid. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2011, vol. 84, no. 12, pp. 1222–1229. doi: 10.1134/S1070427211120160
  16. Ivanov V.P., Dmitriev I.Yu., Bizin M.M., Dashevskii V.P., Elyashevich G. K. Actuator. *Patent RU 175482*, 2017.

### Авторы

**Ельяшевич Галина Казимировна** – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт высокомолекулярных соединений Российской академии наук, Санкт-Петербург, 199004, Российская Федерация, Scopus ID: 7004073749, ORCID ID: 0000-0002-9019-1028, elya@hq.macro.ru

**Курындин Иван Сергеевич** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт высокомолекулярных соединений Российской академии наук, Санкт-Петербург, 199004, Российская Федерация, Scopus ID: 6603222233, ORCID ID: 0000-0003-0613-9460, isk76@mail.ru

**Дмитриев Иван Юрьевич** – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Институт высокомолекулярных соединений Российской академии наук, Санкт-Петербург, 199004, Российская Федерация, Scopus ID: 13907742200, ORCID ID: 0000-0003-0605-9006, ivan-dmitriev-email@yandex.ru

**Власов Павел Вячеславович** – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Институт высокомолекулярных соединений Российской академии наук, Санкт-Петербург, 199004, Российская Федерация, Scopus ID: 55484767800, ORCID ID: 0000-0003-0544-3794, mrsteelheart@yandex.ru

**Иванов Владимир Петрович** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, Санкт-Петербург, 199178, Российская Федерация, Scopus ID: 57193411889, ORCID ID: 0000-0003-3755-8254, vpvivanov.spb.su@gmail.com

### Authors

**Galina K. Elyashevich** – D.Sc., Professor, Principle Research Scientist, Institute of Macromolecular Compounds, Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, 199004, Russian Federation, Scopus ID: 7004073749, ORCID ID: 0000-0002-9019-1028, elya@hq.macro.ru

**Ivan S. Kuryndin** – PhD, Senior Research Scientist, Institute of Macromolecular Compounds, Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, 199004, Russian Federation, Scopus ID: 6603222233, ORCID ID: 0000-0003-0613-9460, isk76@mail.ru

**Ivan Yu. Dmitriev** – PhD, Scientific Researcher, Institute of Macromolecular Compounds, Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, 199004, Russian Federation, Scopus ID: 1390774220, ORCID ID: 0000-0003-0605-9006, ivan-dmitriev-email@yandex.ru

**Pavel V. Vlasov** – PhD, Scientific Researcher, Institute of Macromolecular Compounds, Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, 199004, Russian Federation, Scopus ID: 55484767800, ORCID ID: 0000-0003-0544-3794, mrsteelheart@yandex.ru

**Vladimir P. Ivanov** – PhD, Senior Research Scientist, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, 199178, Russian Federation, Scopus ID: 57193411889, ORCID ID: 0000-0003-3755-8254, vpvivanov.spb.su@gmail.com