



DOI: 10.15593/RZhBiomeh/2017.4.06

УДК 51-76+616.31-085

ИСКУССТВЕННЫЕ МЫШЦЫ НА НАБУХАЮЩИХ ПОЛИМЕРАХ КАК МОДЕЛЬ МЫШЕЧНОГО АППАРАТА БИОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В.П. Иванов¹, И.Ю. Дмитриев², Г.К. Ельяшевич²

¹ Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, Россия, 620028, Санкт-Петербург, ул. 14-я линия, 39, e-mail: vpivanov.spb.su@gmail.com

² Институт высокомолекулярных соединений Российской академии наук, Россия, 620026, Санкт-Петербург, Большой проспект, 31, e-mail: dmitriev@hq.macro.ru

Аннотация. Предложен новый подход к построению искусственных мышц на набухающих полимерных материалах как модели биотехнических систем. Разработаны новые полимерные материалы соответствующего целевого назначения, изготовлен макет устройства. Получены физико-механические и электрофизические характеристики гидрогелевого полимерного материала, содержащего два полимерных компонента – сшитую полиакриловую кислоту и поливиниловый спирт, приведены достигнутые значения их характеристик. Результаты исследований могут найти применение в создании полимерно-биомеханических систем, аналогичных природным, а также могут быть использованы в качестве исполнительных устройств робототехники и автоматики в мини-, микро- и наноисполнении (искусственные мышцы).

Ключевые слова: биотехническая система, бионика, робототехника, управление, исполнительные устройства, электроактивные полимеры, полимерные гидрогели, мышца, искусственная мышца.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие биотехнологий, различных систем автоматики, робототехники, в том числе в мини-, микро- и наноисполнении, требует разработки новых методов исследования биомеханики мышечно-скелетного аппарата. В этой связи вызывает интерес получение искусственных мышц на набухающих полимерах (гидрогелях) как достаточно близкого аналога мышц биологических.

Под термином «искусственная мышца» обычно понимается исполнительное устройство из полимерных материалов, способных изменять свою форму, геометрические размеры, физико-механические характеристики под внешним воздействием. Отметим, что ввиду относительной новизны исследований в данном направлении терминология «искусственных мышц» еще не сложилась, а исполнительные устройства на электроактивных полимерах не стандартизированы [1]. К настоящему времени разработан ряд полимерных материалов и их модификаций, пригодных для создания «искусственных мышц» [9]: диэлектрические эластомеры, полимер-металлические композиты, полисопряженные полимеры и др. К числу новых материалов для исполнительных устройств относятся и электроактивные полимерные

© Иванов В.П., Дмитриев И.Ю., Ельяшевич Г.К., 2017

Иванов Владимир Петрович, к.т.н., доцент, с.н.с. лаборатории прикладной информатики и проблем информатизации общества, Санкт-Петербург

Дмитриев Иван Юрьевич, к.ф.-м.н., н.с. лаборатории физической химии полимеров, Санкт-Петербург

Ельяшевич Галина Казимировна, д.ф.-м.н., профессор, зав. лабораторией физической химии полимеров, Санкт-Петербург

гидрогели. Отметим, что для их активации можно использовать не только электрический ток, но и также изменение pH-среды, ионное, световое и тепловое воздействие, а также комплексное применение вышеперечисленных факторов [2, 4, 6]. Работы по получению полимерных гидрогелей с выраженным электрохемомеханическим откликом являются перспективным бионическим направлением для поисковых исследований в области «мягкой» органической электроники, разработки компактных и миниатюрных устройств захвата и позиционирования, андронидной техники, разного рода интеллектуальных материалов биомедицинского назначения, совмещенных сенсоров-актуаторов и т.д. [3]. Существует возможность получения гидрогелевых материалов, совместимых с биологическими тканями.

По таким параметрам, как энергоэффективность и массогабариты, искусственные мускулы и исполнительные устройства на основе полимерных гидрогелевых материалов приближаются к человеческим мышцам и являются их моделями. Однако в настоящее время известны лишь отдельные варианты устройств, использующие электроуправляемые гидрогели данного типа [5, 8, 10].

Деформация (сжатие, растяжение, изгиб) полиэлектролитного гидрогеля в электрическом поле имеет электрокинетическую и электроосмотическую природу, а именно, выраженное изменение степени набухания при смещении ионного равновесия в объеме гидрогеля, транспорта ионов через гидрогель и электрохимических реакций на электродах [7, 11]. Несмотря на кажущуюся простоту получения полимерных гидрогелей, исследователи сталкиваются с серьезным затруднением, а именно, решением задачи интеграции электроуправляемого элемента на основе гидрогеля в механизм исполнительного устройства.

Основные трудности использования гидрогелей в исполнительных устройствах связаны с: 1) низкими физико-механическими характеристиками гидрогелей, 2) трудностью формообразования изделий из гидрогелей, 3) сложностью подачи электрического тока к гидрогелю (проблема электродов).

Наибольшей степенью набухания и наиболее высокой чувствительностью к внешним воздействиям обладают полиэлектролитные гидрогели, но при этом они имеют неудовлетворительные механические свойства, что является препятствием для практического использования данных материалов. Одним из путей решения проблемы получения изделий из сильно набухающих полиэлектролитных гидрогелей является подход, применяемый для получения двойных взаимопроникающих сеток, в которых сетка полиэлектролитного гидрогеля содержит в объеме вторую сетку неполиэлектролитного гидрогеля, обеспечивающую материалу механическую прочность. Целью настоящего исследования является разработка технико-технологического решения для изготовления исполнительного устройства с электроуправляемым элементом на основе гидрогеля, структура которого включает как полиэлектролитный, так и нейтральный компоненты – сшитую полиакриловую кислоту и поливиниловый спирт.

ОСНОВНОЙ РЕЗУЛЬТАТ

Разработка искусственной мышцы на набухающих полимерных материалах как модели биотехнических систем требует решения двух взаимосвязанных задач: I) получение материала с удовлетворительным уровнем механических свойств и II) конструирование модели искусственной мышцы на этом материале.

I. Гидрогелевый материал был получен методом свободнорадикальной сополимеризации акриловой кислоты (25%-ный водный раствор) с N,N'-метиленабисакриламидом (сшиватель) в 10%-ном водном растворе

поливинилового спирта. В качестве инициатора использовали систему пероксидисульфат аммония/соль Мора/сульфит натрия. Сшиватель в мольном соотношении к мономеру брали в соотношении 1:300. Полученные данным способом системы полиакриловая кислота/поливиниловый спирт (далее обозначение ПАК/ПВС) характеризуются приемлемым уровнем эластичности и могут быть сравнительно легко отформованы в виде волокон, цилиндров, колец или пленок.

Деформационные характеристики гидрогелей измеряли на образцах цилиндрической формы в режиме одноосного сжатия на разрывной машине Р-5 («Точприбор», Иваново). Для измерений использовали образцы, набухшие в воде до равновесного значения степени набухания. Скорость деформации составляла 5 мм/мин. Ниже приведены физико-механические характеристики полученных гидрогелей ПАК/ПВС и стандартных гидрогелей ПАК (табл. 1).

Таблица 1

Степень набухания и механические характеристики гидрогелей при сжатии

Образец	Равновесная степень набухания в воде, г/г	Модуль упругости, кПа	Прочность, кПа	Относительная деформация при разрушении, %
ПАК	13,8	207	158	45
ПАК/ПВС	5	71	222	60

Данные табл. 1 свидетельствуют о том, что комбинированные гидрогели ПАК/ПВС по механическим характеристикам превосходят гели ПАК – они имеют значительно более высокие (примерно в 1,5 раза) и прочность, и эластичность.

Постоянная времени электроактивного элемента из набухающего полимерного гидрогеля прямо пропорциональна его массе. Для уменьшения массы (и, соответственно, снижения постоянной времени) активный элемент был выполнен в виде тонкого волокна. В то же время развиваемое усилие определяется площадью поперечного сечения элемента. Чтобы разрешить указанное противоречие, активный гидрогелевый элемент был изготовлен в виде связки тонких волокон, что позволило одновременно достичь требуемого усилия и снизить постоянную времени. Технология получения тонких волокон из гидрогелей на настоящий момент отсутствует. В данной работе предложен метод заливки полимеризационной смеси в формулирующую полость, который позволил изготовить гидрогелевые волокна диаметром 1–2 мм и длиной 20–100 мм. Для оценки возможности конструирования исполнительного устройства, использующего набухающий полимерный гидрогель, был построен экспериментальный макет. Его схема приведена на рис. 1.

II. Работа по изготовлению макета исполнительного устройства на набухающих полимерах выполнялась в два этапа. На первом этапе создавался предварительный вариант устройства для отработки различных схемных и технических решений, необходимых для рабочего макета. Исследования, проведенные на предварительном макете, где применялась только одна волоконная структура, показали, что от одного волокна ПАК/ПВС диаметром 2 мм можно получить усилие до 98 Н при максимальной относительной деформации 18%. Механическое напряжение в образце достигало значения 31,2 кПа, что намного ниже разрушающего для данного образца (91 кПа). Было установлено, что скорость перемещения зависит от электропроводности гидрогеля, определяемой составом электролита, в котором набухало волокно.

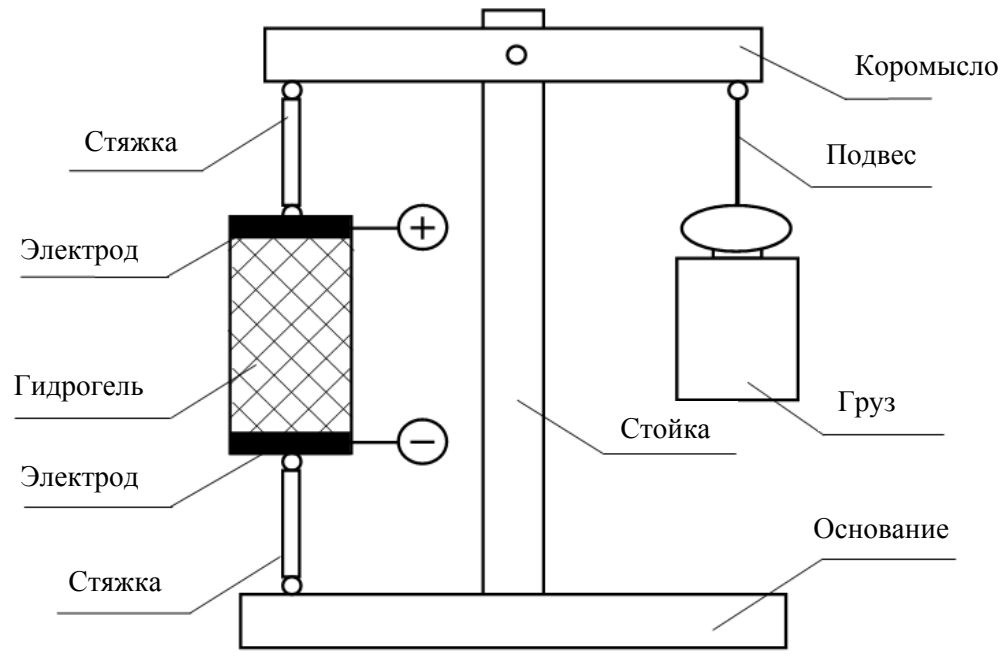


Рис. 1. Схема экспериментального устройства

Как видно из табл. 2, скорость электромеханического отклика составляет около $(1,7...2,5) \cdot 10^{-5}$ м/с для образца, набухшего в водном растворе соли, что на порядок выше, чем при набухании в воде. Подаваемое напряжение было равно 90 В, ток в образце 40 мА.

На предварительном макете исполнительного устройства (см. рис. 1) был решен ряд технических проблем, в том числе была достигнута стабильность материала, разработаны методы крепления электродов и подвода электрического тока. На втором этапе был изготовлен макет устройства, позволяющий реализовать задаваемые механические характеристики. Для увеличения генерируемого усилия отдельные волокна гидрогеля объединяли в рядные структуры, которые затем соединяли последовательно для реализации заданного уровня перемещения. В результате было достигнуто перемещение в 0,02 м при усилии 2000–5000 Н. Таким образом, экспериментальные исследования показали, что существует принципиальная возможность создания искусственной мышцы на основе набухающих полимеров.

Таблица 2

Параметры испытаний электромеханического отклика гидрогелей ПАК/ПВС, набухших в разных средах

Образец	Степень набухания, г/г	Задаваемое напряжение, В	Ток в образце, мА	Скорость деформации, м/с
Вода	5	90	1	$0,25 \cdot 10^{-5}$
5%-ный водный раствор Na_2SO_4	4	90	40	$(1,7...2,5) \cdot 10^{-5}$

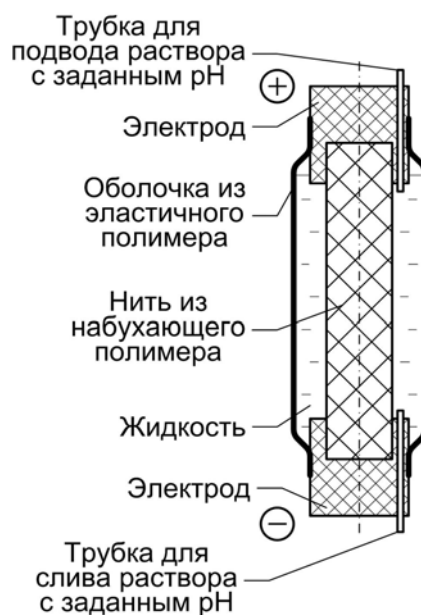


Рис. 2. Схема искусственной мышцы на набухающих полимерах с изменением pH среды

Следует отметить, что набухающие полимеры подвержены высыханию. Поэтому мышцы или волокна мышц необходимо заключать в растяжимую эластичную оболочку, наполненную жидкостью для регенерации сокращения.

Изменение pH среды можно трактовать как своеобразный усилитель («бустер») при сокращении мышцы от электрического сигнала. Впрыскивание или удаление из-под оболочки раствора с соответствующим значением pH представлено на схеме рис. 2.

Представленная схема в большой степени приближает нас к более точной модели мышечных структур биотехнических систем. Но их разработка требует проведения дальнейших исследований. Отметим, что искусственным мышцам последней схемы свойственны и явления метаболизма, когда, ввиду ряда причин, в том числе и времени на завершение реакций нейтрализации, процесс регенерации мышцы не успевает завершиться полностью.

Выводы

В результате проведенных исследований намечены пути к созданию искусственной мышцы на набухающих полимерных материалах (гидрогелях) как модели мышечных структур биотехнических систем. Определены некоторые физико-механические и электрофизические характеристики полученных материалов и синтезированных схем. Дальнейшие исследования в этом направлении позволят сконструировать полимерные и полимерно-биологические системы, аналогичные природным, в том числе и для протезов утраченных тканей, а также использовать искусственные мышцы в качестве исполнительных устройств робототехники и автоматики, в том числе в мини-, микро- и наноисполнении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 14691-69. Устройства исполнительные для систем автоматического регулирования. Термины [Электронный ресурс]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-14691-69> (дата обращения 01.11.2017).

2. Смирнов М.А., Боброва Н.В., Дмитриев И.Ю., Вукоšek V., Ельяшевич Г.К. Электроактивные гидрогели на основе полиакриловой кислоты и полипиррола // Высокомолярные соединения – 2011. – Т. 53А, № 1. – С. 70–77.
3. Bar-Cohen Y. Electroactive polymer (EAP) actuators as artificial muscles: reality, potential, and challenges. – Bellingham: SPIE Press, 2004. – 765 p.
4. 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, iss. 2 – P. 123–136.
5. Ito H., Kezuka K. Polymer actuator: United States Patent Application Publication No. US 20070190150 A1, 16.08.2007, available at: <https://patentimages.storage.googleapis.com/77/e4/32/55442f32c3c7fe/US20070190150A1.pdf> (accessed 1 November 2016).
6. Osada Y., Khokhlov A.R. Polymer gels and networks. – New York: Marcel Dekker, 2002. – 384 p.
7. Otake M., Kagami Y., Kuniyoshi Y., Inaba M., Inoue H. Inverse dynamics of gel robots made of electroactive polymer gel // Proceedings of the 2003 IEEE international conference on robotics and automation. – Taipei, 2003. – P. 2299–2304.
8. Rasmussen L. Electroactive materials and electroactive actuators that act as artificial muscle, tendon, and skin: United States Patent US 8,088,453 B1, 03.01.2012, available at: <http://patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/US8088453.pdf> (accessed 1 November 2016).
9. Saelinger D., Wood R. Anatomy of a robotic fly // IEEE Spectrum. – 2008. – Vol. 45, № 3. – P. 22–25.
10. Shahinpoor M. Spring-loaded polymeric gel actuators: United States Patent US 5,389,222, 14.02.1993, available at: <https://patentimages.storage.googleapis.com/39/0e/5b/07d3eb0901e27c/US5389222.pdf> (accessed 1 November 2016).
11. Shiga T. Deformation and viscoelastic behavior of polymer gels in electric fields // Advances in polymer science. – 1997. – Vol. 134. – P. 131–163.

ARTIFICIAL MUSCLES ON THE EXPECTING POLYMERS AS A MODEL OF THE MUSCULAR DEVICE OF BIOMECHANICAL SYSTEMS

V.P. Ivanov, I.Yu. Dmitriev, G.K. Elyashevich (Saint-Petersburg, Russia)

A new approach to the construction of artificial muscles on swelling polymeric materials as a model of biotechnical systems is proposed. New polymer materials have been developed for a specific purpose, and a model of the device has been manufactured. Physicomechanical and electrophysical characteristics of a hydrogel polymeric material containing two polymer components, cross-linked polyacrylic acid and polyvinyl alcohol, are obtained, and the achieved values of their characteristics are given. The results of the research can find application in the creation of polymer-biomechanical systems similar to natural ones, and can also be used as actuators of robotics and automation in mini, micro and nano-performance (artificial muscles).

Key words: biotechnical system, bionics, robotics, control, actuators, electroactive polymers, polymeric hydrogels, muscle, artificial muscle.

Получено 03 ноября 2016