

УДК 678.01:537.87:62-44

ЭЛЕКТРОАКТИВНЫЕ ПОЛИМЕРЫ ДЛЯ ИСКУССТВЕННЫХ МЫШЦ**Деминов Александр Альбертович,**

студент факультета «Ракетно-космическая техника»

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

e-mail: deminov06@mail.ru

Деменев Дмитрий Андреевич,

Старший преподаватель кафедры ФН7 «Электротехника и электроника» и ИУ1 «Системы автоматического управления»

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

e-mail: Demenev@bmstu.ru

Аннотация

В данном обзоре рассматриваются современные подходы к созданию искусственных мышц на основе ионных электроактивных полимеров (ЭАП). Основное внимание уделено ионным полимер-металлическим композитам (ИПМК), работающим при низком напряжении за счёт миграции ионов. Проанализированы ключевые направления улучшения характеристик: повышение выходной силы и деформации за счёт модификации мембран на основе Nafion углеродными наноматериалами (МУНТ, сульфированный оксид графена), обеспечение длительной работы на воздухе путём замены воды ионными жидкостями (EMIM-BF₄, [BMIM]Cl), а также использование альтернативных электродных материалов – проводящих полимеров (PEDOT:PSS) и бакки-гелей на основе углеродных нанотрубок. Рассмотрены методы борьбы с нелинейностью поведения (гистерезис, ползучесть) с помощью математических моделей и нейросетевых подходов. Сделан вывод, что гибридные материалы и технологии инкапсуляции позволяют значительно приблизить характеристики ионных ЭАП к требованиям мягкой робототехники и биомедицинских приложений.

Ключевые слова: ионные электроактивные полимеры, ионные полимер-металлические композиты, ИПМК, искусственные мышцы, проводящие полимеры, PEDOT: PSS, ионные жидкости, бакки-гели, углеродные нанотрубки, Nafion, гистерезис.

ELECTROACTIVE POLYMERS FOR ARTIFICIAL MUSCLES**Deminov Aleksandr Albertovich,**

student of the Faculty of «Rocket and Space Engineering»

Bauman Moscow State Technical University

e-mail: deminov06@mail.ru

Demenev Dmitry Andreevich,

Senior Lecturer of the Department of FS7 "Electrical Engineering and Electronics" and IU1
"Automatic Control Systems"
Bauman Moscow State Technical University
e-mail: Demenev@bmstu.ru

ABSTRACT

This review presents current approaches to the development of artificial muscles based on ionic electroactive polymers (EAPs). Particular attention is given to ionic polymer-metal composites (IPMCs), which operate at low voltage through ion migration. Key strategies for performance enhancement are analyzed: increasing force output and deformation by modifying Nafion-based membranes with carbon nanomaterials (MWCNTs, sulfonated graphene oxide); ensuring long-term operation in air by replacing water with ionic liquids (EMIM-BF₄, [BMIM]Cl); and employing alternative electrode materials such as conducting polymers (PEDOT:PSS) and bucky gels based on carbon nanotubes. Methods for mitigating nonlinear behavior (hysteresis, creep) using mathematical models and neural network approaches are also discussed. It is concluded that hybrid materials and encapsulation technologies can significantly bring the performance of ionic EAPs closer to the requirements of soft robotics and biomedical applications.

Keywords: ionic electroactive polymers, ionic polymer-metal composites, IPMC, artificial muscles, conducting polymers, PEDOT: PSS, ionic liquids, bucky gels, carbon nanotubes, Nafion, hysteresis.

Введение

Электроактивные полимеры (ЭАП) представляют собой класс «умных» материалов, способных обратимо изменять форму под действием электрического поля. Благодаря уникальному сочетанию гибкости, малого веса и низкого энергопотребления, они рассматриваются как основа для создания искусственных мышц, мягких роботов и биомедицинских устройств [1, 2].

Среди ЭАП особое место занимают ионные полимер-металлические композиты (ИПМК), работа которых основана на миграции ионов внутри полимерной матрицы под действием низкого напряжения (1–5 В). Это обеспечивает большие (до 360°) и обратимые деформации, что делает ИПМК идеальными кандидатами для замены традиционных жёстких приводов [3, 4].

Однако коммерческое применение сдерживается недостаточной выходной силой, малым временем работы на воздухе и нелинейностью поведения [5, 6]. Данная работа представляет обзор современных материалов и методов, направленных на преодоление этих ограничений, с фокусом на перспективы создания искусственных мышц.

2. Классификация электроактивных полимеров

Электроактивные полимеры (ЭАП) делятся на два основных класса в зависимости от механизма преобразования электрической энергии в механическую: электронные и ионные [1].

2.1. Электронные ЭАП

Электронные ЭАП (диэлектрические эластомеры, сегнетоэлектрики) работают за счёт электростатического давления (Максвелловского напряжения), возникающего между гибкими электродами при подаче высокого напряжения (часто >1 кВ). Они отличаются

очень быстрым откликом (миллисекунды) и высокой плотностью энергии, но требуют высоковольтных источников питания и подвержены риску электрического пробоя [2, 3].

2.2. Ионные ЭАП

Ионные ЭАП, к которым относятся ионные полимер-металлические композиты (ИПМК), проводящие полимеры и ионные гели, работают при низком напряжении (1–5 В) за счёт миграции ионов внутри полимерной матрицы.

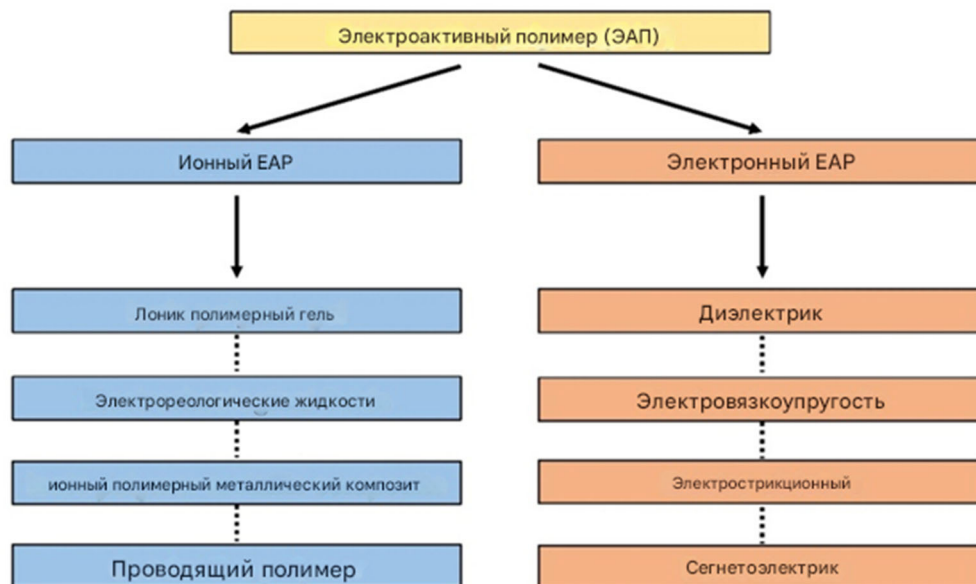


Рисунок 1. Классификация различных электроактивных полимеров [17]

Основное уравнение, описывающее поток ионов, – уравнение Нернста-Планка [4]:

$$J = -D \left(\nabla C + \frac{zF}{RT} C \nabla \phi \right)$$

Где J – поток ионов, D – коэффициент диффузии, C – концентрация ионов, z – заряд иона, F – постоянная Фарадея, R – газовая постоянная, T – температура, ϕ – электрический потенциал.

Ионные ЭАП обеспечивают большие изгибные деформации (до 360) и способны работать в водной среде, что делает их идеальными для биомиметических приложений [5].

Основные различия между классами ЭАП представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Сравнение электронных и ионных ЭАП

Параметр	Электронные ЭАП	Ионные ЭАП
Механизм	Электростатическое давление	Миграция ионов
Напряжение	Высокое (сотни – тысячи В)	Низкое (1–5 В)
Скорость отклика	Очень быстрая (мс)	Умеренная (с)
Деформация	Растяжение/сжатие	Изгиб
Рабочая среда	Воздух, вакуум	Водная или герметизированная

3. IPMC – основа искусственных мышц

3.1. Принцип работы

Ионные полимер-металлические композиты (ИПМК) представляют собой трёхслойную структуру: ионообменная полимерная мембрана (чаще всего Nafion) покрыта с двух сторон тонкими слоями металла (Pt, Au, Ag) [6]. Принцип действия основан на миграции гидратированных катионов под действием электрического поля.

При подаче напряжения положительные ионы вместе с молекулами воды перемещаются к катоду, вызывая набухание катодной стороны. Это создаёт градиент давления, и весь композит изгибается в сторону анода [6]. При изменении полярности напряжения актуатор изгибается в противоположную сторону, обеспечивая обратимое двунаправленное движение.

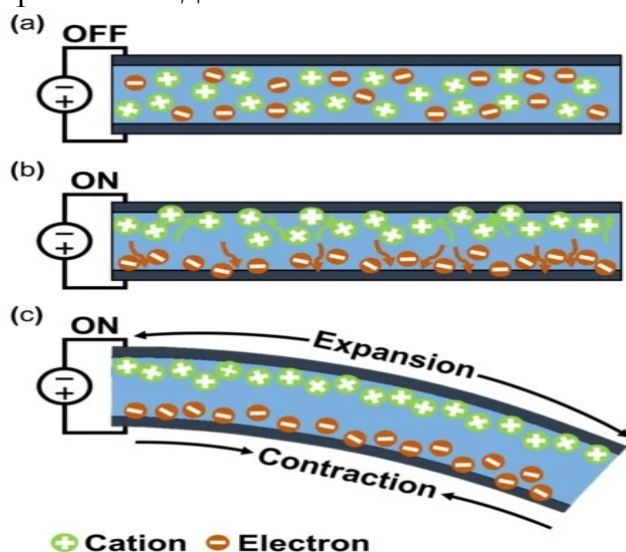


Рисунок 2. Принцип действия IPMC. (a) Начальное состояние. (b) Состояние миграции ионов. (c) Состояние изгиба. Expansion - Расширение. Contraction - Сокращение [17]

3.2. Материалы мембран

Nafion – наиболее распространённый материал для IPMC благодаря высокой химической стойкости и способности к ионному обмену. Его структура включает гидрофобный фторуглеродный скелет и гидрофильные сульфогруппы $-SO_3H$, образующие каналы для миграции ионов [6].

Для улучшения свойств Nafion модифицируют различными наполнителями:

Углеродные нанотрубки (CNT, MWCNT) увеличивают модуль Юнга в 3,3 раза [8] и выходное усилие в 2,2 раза.

Сульфированный оксид графена (SGO) повышает ионообменную ёмкость до 2,1 раза и водопоглощение, увеличивая смещение в 2,5 раза и усилие в 4 раза [9].

Полиэтиленоксид (PEO) увеличивает водопоглощение в 3 раза, повышая размах колебаний в 2 раза и время работы на воздухе на 33% [10].

Наночастицы SiO_2 -SGO обеспечивают максимальное смещение до 47,7 мм при напряжении 6 В [11].

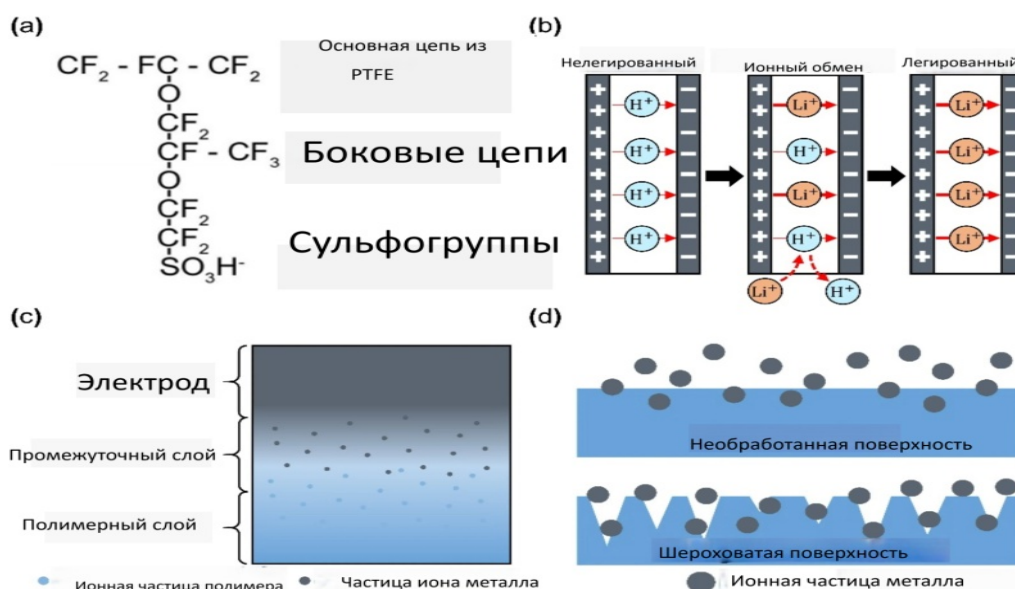


Рисунок 3. (a) - Химическая структура Nafion. (b) - Схема процесса ионного обмена во время легирования полимера. (c) - Поперечный разрез полимерной мембраны, покрытой электродом. (d) - Сравнение проникновения частиц ионов металла между необработанной гладкой поверхностью и механически/химически обработанной шероховатой поверхностью полимерной мембраны [17]

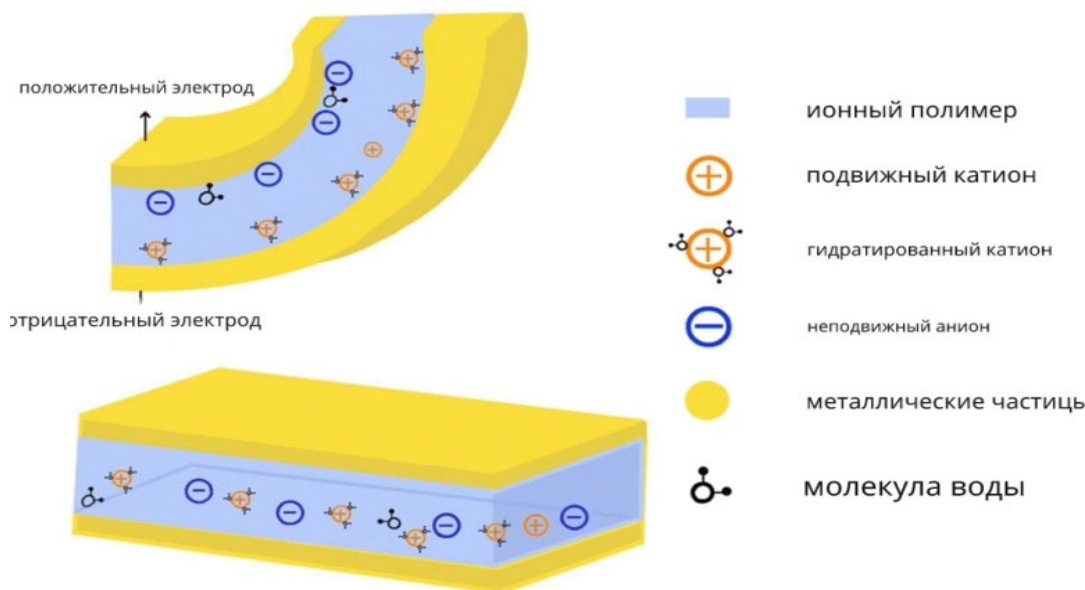


Рисунок 4. Схематические диаграммы, иллюстрирующие эффект миграции катионов при гидратации IPMC [1]

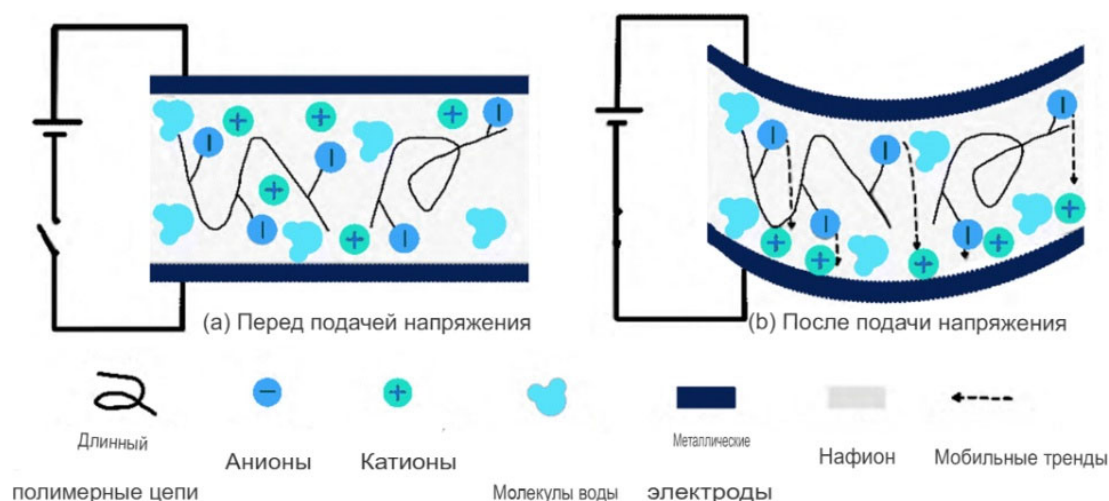


Рисунок 5. Схематические диаграммы электростатических взаимодействий IPMC [1]

3.3. Электроды

Традиционно электроды изготавливают из благородных металлов (Pt, Au, Ag, Pd). Их основная проблема — образование микротрещин при циклическом изгибе, что ведёт к росту сопротивления и утечке рабочей жидкости [12].

Углеродные материалы (УНТ, графен) и проводящие полимеры (PEDOT: PSS, PANI) предлагают альтернативу:

Одностенные углеродные нанотрубки (SWCNT) в композите с ионными жидкостями (бакки-гели) обеспечивают деформацию до 0,9% при напряжении $\pm 2,5$ В и частоту отклика до 100 Гц [13].

PEDOT: PSS позволяет создавать гибкие, прозрачные электроды, стабильно работающие на воздухе [14, 15].

Гибридные электроды (Pt + MWCNT, PEDOT: PSS + графен) сочетают высокую проводимость металлов с гибкостью полимеров [16, 17, 18].

Проводимость материалов описывается законом Ома в дифференциальной форме [19]:

$$J = \sigma E$$

где J — плотность тока, σ — удельная проводимость, E — напряжённость электрического поля.

Ёмкость двойного электрического слоя для углеродных электродов:

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 A}{d}$$

где A — площадь поверхности, d — толщина двойного слоя [20].

4. Ионные жидкости — ключ к работе на воздухе

4.1. Проблема водных электролитов

Традиционные IPMC-актуаторы используют воду в качестве растворителя для ионов. Вода обеспечивает высокую скорость миграции ионов и быстрый отклик, но имеет два фатальных недостатка:

Испарение — при работе на воздухе вода быстро испаряется, и актуатор перестаёт функционировать уже через несколько минут [21].

Электролиз — при напряжении выше 1,23 В вода разлагается на кислород и водород, что снижает эффективность и разрушает электроды [22].

4.2. Преимущества ионных жидкостей

Ионные жидкости (ИЖ) — это соли, находящиеся в жидком состоянии при температурах ниже 100°C. Их уникальные свойства делают их идеальной заменой воды [21]:

Практически нулевая летучесть — не испаряются, обеспечивая работу актуатора на воздухе в течение многих часов и даже дней.

Широкое электрохимическое окно (до 4–5 В) – не разлагаются при рабочих напряжениях [2] IPMC.

Высокая ионная проводимость – сопоставима с органическими электролитами.

Термическая стабильность – многие ИЖ стабильны до 200–300°C.

Замена воды на ионную жидкость EMIM-BF₄ позволила увеличить время непрерывной работы IPMC-актуаторов до более 24 часов [21].

Ионная проводимость описывается классическим выражением:

$$\sigma = \sum_i n_i q_i \mu_i \quad [2]$$

где σ – удельная проводимость, n_i – концентрация носителей i -го типа, q_i – их заряд, μ_i – подвижность

4.3. Влияние структуры ионов на свойства

Производительность IPMC сильно зависит от того, какие именно ионы входят в состав ионной жидкости. Исследования на имидазолиевых ИЖ с катионом [EMIm]⁺ и различными анионами показали результаты представленные в таблице 2 [20]:

Таблица 2 – Влияние аниона на свойства IPMC

Анион	Размер/Подвижность	Термостабильность	Деформация IPMC
Br ⁻ (бромид)	Наименьший, высокая подвижность	>290°C	Наилучшая
NO ₃ ⁻ (нитрат)	Малый, высокая подвижность	>290°C	Хорошая
AcO ⁻ (ацетат)	Большой, низкая подвижность	>290°C	Средняя
ТА ⁻ (трифторацетат)	Большой, низкая подвижность	Наивысшая	Наименьшая

Вывод: Чем меньше размер аниона и выше его подвижность, тем быстрее ионы мигрируют, и тем большую деформацию демонстрирует актуатор [20].

4.4. Оптимизация концентрации

Концентрация ионной жидкости – критический параметр. Систематические исследования на системе Nafion/Pt с ионной жидкостью [BMIM]Cl показали, что существует оптимальная концентрация. При варьировании концентрации от 0,1 до 0,5 моль/л наилучшее сочетание электрохимической стабильности и эффективности было достигнуто при 0,3 моль/л [21].

4.5. Ионные жидкости в других типах ЭАП

Ионные жидкости используются не только в IPMC, но и в других ионных актуаторах:

Проводящие полимеры – в трёхслойных актуаторах PEDOT/NBR/PEDOT ИЖ вводится в эластомерный средний слой, обеспечивая ионную проводимость [2].

Бакки-гели – композиты углеродных нанотрубок с ионными жидкостями, где ИЖ служит одновременно и диспергатором, и электролитом [2].

Полимерные гели – ИЖ выступают в роли пластификатора, придавая полимерной матрице эластичность и ионную проводимость [2].

5. Проводящие полимеры для искусственных мышц

5.1. Общая характеристика

Проводящие полимеры – это органические материалы, сочетающие гибкость полимеров с электропроводностью, сравнимой с полупроводниками. Наиболее изученные представители: полипиррол (PPy), полианилин (PANI) и поли(3,4-этилендиокситиофен) (PEDOT). Их работа основана на электрохимическом окислении-восстановлении: при изменении потенциала в полимер внедряются или выходят ионы из электролита, что приводит к изменению объёма материала [2].

5.2. PEDOT: PSS – лидер среди проводящих полимеров

PEDOT: PSS (поли(3,4-этилендиокситиофен): полистиролсульфонат) – наиболее популярный проводящий полимер благодаря:

высокой проводимости (до 4380 С/см после обработки) [4]

отличной гибкости и прозрачности

стабильности на воздухе

возможности нанесения из водных растворов простыми методами (spin-coating, печать)

Проводимость PEDOT: PSS описывается законом Ома [19]:

$$J = \sigma E$$

где σ – удельная проводимость, достигающая значений, сопоставимых с металлами.

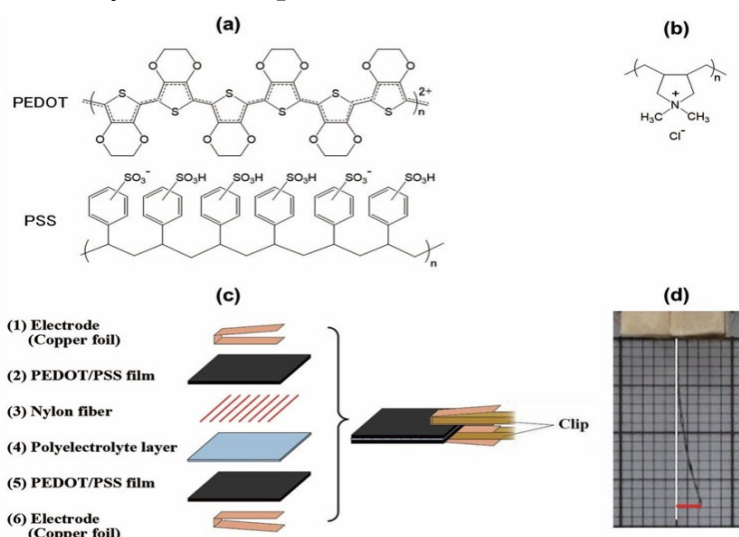


Рисунок 6. (а) - Химическая структура PEDOT/PSS. (b) - Химическая структура поли(диаллилдиметиламмонийхлорида). (с) - Изготовление волокнисто-упрочненного бумажного актуатора: (1) и (6) электроды из медной фольги; (2) и (5) пленки PEDOT/PSS; (3) нейлоновые волокна (0,104 мм); (4) слой полиэлектролита. (d) - Метод измерения смещения при нескрученном актуаторе. Красная полоса указывает смещение, измеренное в данной работе [3]

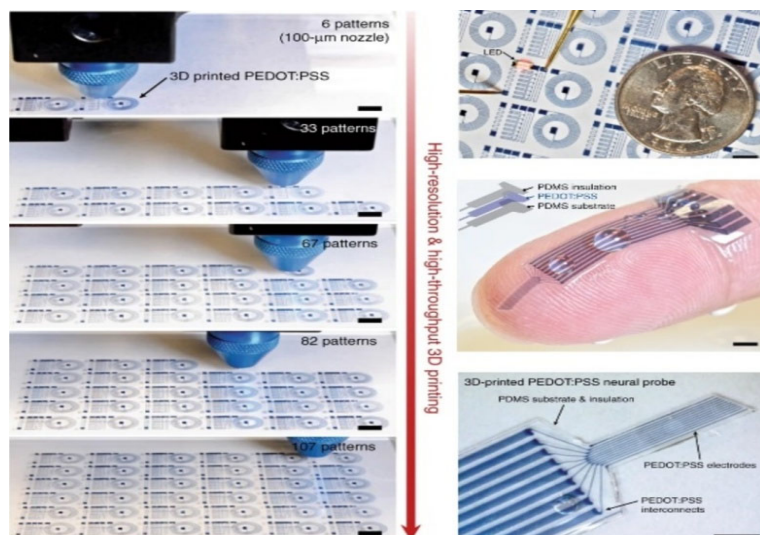


Рисунок 7. Демонстрация схемы, напечатанной на 3D-принтере с использованием PEDOT: PSS [17]

5.3. Механизм работы актуаторов на основе проводящих полимеров

В трёхслойной конфигурации (проводящий полимер / ионный электролит / проводящий полимер) актуатор работает следующим образом: при подаче напряжения на одном электроде происходит окисление (внедрение анионов), на другом – восстановление (выделение анионов). Разница в объёме электродов вызывает изгиб всей структуры.

Этот процесс обратим и позволяет создавать актуаторы, работающие при напряжении всего 1–2 В и развивающие значительные усилия [2].

5.4. Улучшение свойств PEDOT: PSS

Для повышения проводимости и стабильности PEDOT: PSS модифицируют:

Добавки органических растворителей (DMSO, этиленгликоль) повышают проводимость на порядки.

Композиты с углеродными материалами. Добавление графена или УНТ создаёт гибридные электроды с проводимостью 1250 С/см и деформацией до 1,5% при напряжении всего 1 В [11].

Легирование ионными жидкостями улучшает ионную проводимость и стабильность [4].

5.5. Применение в биомиметике

Проводящие полимеры широко используются для создания:

Мягких захватов, способных манипулировать хрупкими объектами [10]

Биосенсоров благодаря биосовместимости [4]

Искусственных мышц для роботов и протезов [2]

6. Бакки-гели и углеродные материалы

6.1. Что такое бакки-гели

Бакки-гели (Bucky gels) – это композитные материалы, состоящие из углеродных нанотрубок (УНТ) и ионных жидкостей. Название происходит от "Bucky" (в честь Бакминстера Фуллера, изобретателя фуллеренов) и "gel" (гель). Ионная жидкость в таких композитах выполняет двойную функцию: она одновременно является диспергатором для нанотрубок и электролитом, обеспечивающим ионную проводимость [2].

6.2. Уникальные свойства

Благодаря синергетическому эффекту, бакки-гели обладают рядом уникальных характеристик:

Высокая электропроводность. Миллиметровые одностенные углеродные нанотрубки (SG-SWCNT) образуют проводящую сетку с проводимостью до 169 С/см [22].

Огромная удельная поверхность — до десятков тысяч квадратных метров на грамм, что обеспечивает высокую ёмкость двойного электрического слоя.

Гибкость и механическая прочность — нанотрубки армируют материал, делая его устойчивым к многократным деформациям.

Стабильность на воздухе — благодаря использованию нелетучих ионных жидкостей.

Ёмкость двойного электрического слоя описывается классическим выражением:

$$C = \frac{\epsilon\epsilon_0 A}{d} \quad [2]$$

где A — площадь поверхности электрода, d — толщина двойного слоя. Огромная удельная поверхность углеродных материалов обеспечивает рекордные значения ёмкости.

6.3. Принцип работы актуаторов на основе баки-гелей

Трёхслойный актуатор состоит из двух внешних слоёв баки-геля (электроды) и внутреннего слоя ионной жидкости/полимерного сепаратора (электролит).

При подаче напряжения на электродах формируется двойной электрический слой. Накопленные заряды вызывают объёмное расширение электродов за счёт:

электростатического отталкивания одноимённых зарядов в нанотрубках
внедрения ионов из электролита в поры электродов

Разница в расширении анода и катода приводит к изгибу всей структуры [2].

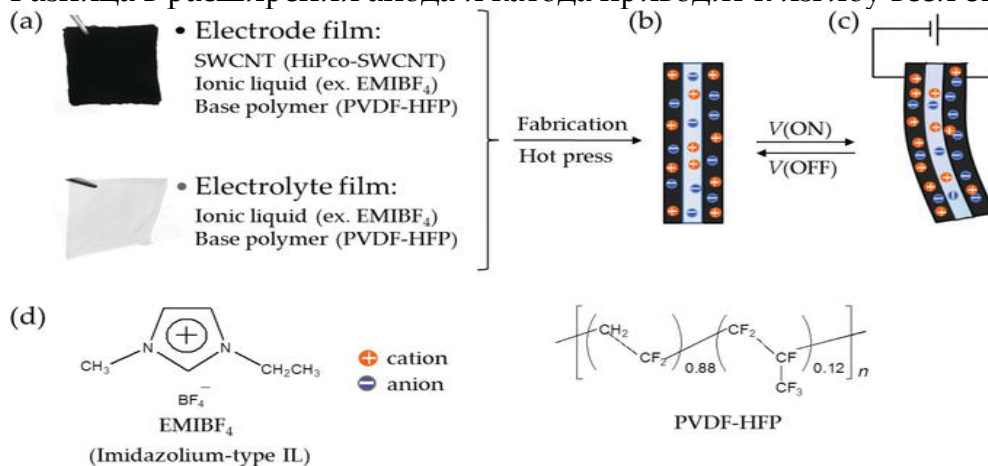


Рисунок 8. (a) - Компоненты электродной пленки и электролитной пленки баки-гелевого актуатора. SWCNT (HiPco-SWCNT — Однослойные углеродные нанотрубки (ОУНТ). Ionic liquid — Ионная жидкость. Base polymer — Базовый полимер. (b) - Схематическое изображение трехслойного актуатора. (c) - Изгибающее движения актуатора в сторону анода. (d) - Химическая структура ионной жидкости имидазолиевого типа (EMIBF₄) и базового полимера (PVDF-HFP) [17]

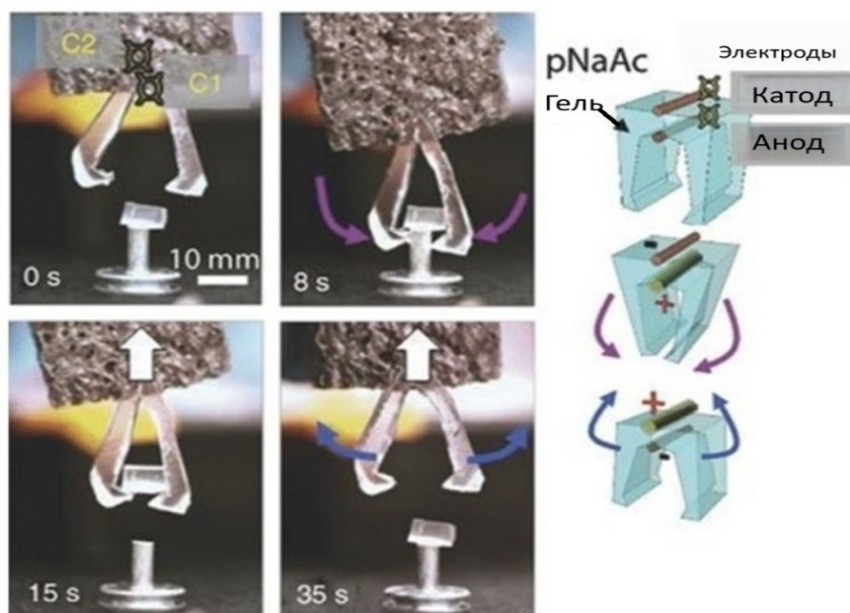


Рисунок 9. Механический пинцет, изготовленный из ионного геля [17]

6.4. Сравнение поколений бакки-гелей

Первое поколение (классические бакки-гели) демонстрировало деформацию до 0,9% при частоте 0,01 Гц [2], но быстро теряло эффективность на высоких частотах.

Второе поколение на основе миллиметровых SG-SWCNT показало:

скорость отклика $2,28\% \cdot \text{с}^{-1}$ при 1 Гц

стабильность более 10 000 циклов

работоспособность до 100 Гц [22]

6.5. Альтернативные углеродные материалы

Помимо однослойных нанотрубок, для создания электродов используются:

Многостенные углеродные нанотрубки (MWCNT) — более дешёвая альтернатива [2]

Графен и его производные (оксид графена, восстановленный оксид графена)

Карбид-производные углероды с контролируемым размером пор [2]

Углеродные нановолокна и целлюлозные нановолокна

6.6. Преимущества для искусственных мышц

Бакки-гели и углеродные материалы открывают путь к созданию:

Высокоскоростных актуаторов, работающих на частотах до 100 Гц [22] (что близко к реальным мышцам)

Устройств с огромным ресурсом ($>10\,000$ циклов) [22]

Полностью твёрдотельных систем, не требующих герметизации

7. Улучшение свойств ионных ЭАП

7.1. Увеличение выходной силы

Выходная сила IPMC-актуатора определяется жёсткостью конструкции и величиной ионного давления.

Увеличение толщины мембран — наиболее прямой путь. Многослойные мембраны, полученные горячим прессованием, демонстрируют выходное усилие в несколько раз выше однослойных [15].

Армирование наполнителями повышает модуль Юнга:

MWCNT увеличивают модуль Юнга в 3,3 раза, усилие — в 2,2 раза [8]

SGO повышает усилие до 4 раз [9]

SiO_2 -SGO увеличивает усилие в 2 раза (до 43,2 мН при 5 В) [11]

7.2. Увеличение времени непрерывной работы

Замена воды на ионные жидкости — ключевое решение. IPMC с EMIM-BF₄ работают на воздухе до 24 часов [21] без значительной деградации. Оптимальная концентрация [BMIM] Cl составляет 0,3 моль/л [21].

Инкапсуляция защищает от внешней среды:

Парилен увеличивает время работы в 10 раз [17]

PDMS обеспечивает биосовместимость [17]

Диэлектрический гель снижает потерю веса до 4% за 75 часов [20]

7.3. Борьба с нелинейностью (гистерезис и ползучесть)

Гистерезис и ползучесть — фундаментальные проблемы, связанные с конечной скоростью диффузии ионов и вязкоупругостью полимера [8].

Математические модели позволяют описывать и компенсировать эти эффекты:

Модель Презаха (Preisach) [8]

Модель Пранадтля-Ишлинского (PI) [8]

Модель Боука-Вена (Bouc-Wen) [8]

Нейросетевые подходы (ANFIS-NARX, RFNN-NARX) способны с высокой точностью аппроксимировать нелинейное поведение, включая его зависимость от скорости [8].

Комбинируемая компенсация гистерезиса и ползучести с использованием обратной модели снижает ошибку позиционирования на порядок [8].

7.4. Перспективные направления

Самовосстанавливающиеся электроды на основе жидких металлов или динамических полимерных сеток [2]

Физически-информированные нейронные сети (PINN) для моделирования без необходимости сложных экспериментов [8]

Интегрированные сенсоры для создания замкнутых систем управления [2, 12, 14]

Заключение

В данной работе представлен обзор современных материалов и методов, перспективных для создания искусственных мышц на основе ионных электроактивных полимеров.

Основные выводы:

1. IPMC-актуаторы на основе Nafion остаются наиболее изученным и технологичным классом ионных ЭАП. Модификация мембран углеродными нанотрубками, графеном и его производными (SGO) позволяет увеличить выходное усилие в 2–4 раза, а деформацию — в 2,5 раза [8, 9, 11].

2. Ионные жидкости являются ключом к созданию актуаторов, способных работать на воздухе в течение длительного времени (до 24 часов) [21, 20]. Выбор аниона с малым размером и высокой подвижностью (например, Br⁻) обеспечивает максимальную деформацию [20].

3. Проводящие полимеры (PEDOT: PSS, PANI) и их композиты с углеродными материалами позволяют создавать гибкие, стабильные и технологичные электроды. Гибридные системы PEDOT: PSS/графен демонстрируют проводимость до 1250 С/см и деформацию 1,5% при напряжении всего 1 В [11].

Бакки-гели на основе углеродных нанотрубок и ионных жидкостей обеспечивают высокоскоростной отклик (до 100 Гц) [22] и ресурс более 10 000 циклов [22], приближаясь к характеристикам естественных мышц.

Улучшение свойств ионных ЭАП возможно по трём направлениям:

увеличение выходной силы (армирование наполнителями, многослойные структуры)

продление времени работы (замена воды на ионные жидкости, инкапсуляция)

компенсация нелинейности (математические модели, нейросетевые подходы [8])

Перспективы развития связаны с:
созданием новых гибридных материалов, сочетающих преимущества разных классов
разработкой методов 3D-печати для изготовления актуаторов сложной формы
интеграцией сенсоров непосредственно в структуру актуатора для создания
замкнутых систем управления

применением методов машинного обучения для точного моделирования и
компенсации нелинейных эффектов

Таким образом, ионные ЭАП, и особенно ИПМС, представляют собой уникальный
класс материалов, способный в ближайшем будущем найти широкое применение в мягкой
робототехнике, биомедицине и при создании искусственных мышц.

Список литературы:

1. Jinguang Lai, et al. "Current research status of ionic polymer-metal composites in applications of low-voltage actuators" 2024, *Materials Advances*, № 11, с. 4601-4617
2. Yuqing Dong, et al. "Development of ionic liquid-based electroactive polymer composites using nanotechnology" 2021, *Nanotechnology Reviews*, № 1, с. 99-116
3. Yujiao Wu, et al. "Effects of Fiber Stiffening to a Soft Actuator with PEDOT/PSS Electrode Films on Actuation Cycling Stability" 2021, *Journal of Oleo Science*, № 6, с. 861-866
4. Boriana Tzaneva, et al. "Electrochemical Investigation of PEDOT: PSS/Graphene Aging in Artificial Sweat" 2024, *Polymers*, № 12, с. 1706
5. Xiaojun Zhang, et al. "Enhanced performance of IPMC actuator based on macroporous multilayer MCNTs/Nafion polymer" 2022, *Sensors and Actuators A: Physical*, с. 113489
6. Jie Ru, et al. "Fabrication and Characterization of a Novel Smart-Polymer Actuator with Nanodispersed CNT/Pd Composite Interfacial Electrodes" 2022, *Polymers*, № 17, с. 3494
7. Minglu Zhang, et al. "Fabrication of a multilayered SGO/macroporous Nafion-based IPMC with enhanced actuation performance" 2022, *Sensors and Actuators B: Chemical*, с. 131319
8. Lin Zhang, et al. "Fabrication, encapsulation, and hysteresis creep mitigation in Ionic Polymer-Metal Composites: A review" 2025, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, с. 102179
9. Fang Wang, et al. "Facile and effective repair of Pt/Nafion IPMC actuator by dip-coating of PVP@AgNPs" 2021, *Nanotechnology*, № 38, с. 385502
10. Yi Li, et al. "High performance PVC/ [AMI]mNTF2 ionic gel sensors for smart wearable applications" 2024, *Sensors and Actuators A: Physical*, с. 115826
11. Hongwei Hu, et al. "High Performance Soft Electrochemical Actuators Based on Hierarchical Conductive Polymer Ionogels" 2023, *Journal of Bionic Engineering*, № 6, с. 2755-2763
12. V. M. Aivazyan, et al. "Ionic Electroactive Actuators and Sensors with Hybrid Polymer-Metal Electrodes" 2024, *Journal of Structural Chemistry*, № 2, с. 267-280
13. Rafael Barbosa, et al. "Novel IP²C sensors with flexible electrodes based on plasma-treated conductive elastomeric nanocomposites" *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2022.
14. Sangwoon Lee, et al. "Multiday operable ionic polymer-metal composites prepared using a stacking method for practical actuator applications" *Smart Materials and Structures*, 2024.
15. Dongxu Zhao, et al. "Performance Enhancement of Ionic Polymer-Metal Composite Actuators with Polyethylene Oxide" *Polymers*, 2021.

16. Zhengxin Zhai, et al. "Performance prediction of IPMC modified with SiO₂-SGO based on backpropagation neural network" *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2024.
17. Si Park, et al. "Recent Progress in Development and Applications of Ionic Polymer–Metal Composite" *Micromachines*, 2022.
18. Jakub Bernat, et al. "Review of Soft Actuators Controlled with Electrical Stimuli: IPMC, DEAP, and MRE" *Applied Sciences*, 2023.
19. Dong, Y., et al. "Towards a consistent methodology for testing strip polymer composite actuators." *Polymer Testing*, 2022.
20. Jang-Woo Lee, Young-Tai Yoo "Anion effects in imidazolium ionic liquids on the performance of IPMCs." *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 137, no. 2, 2009, pp. 539-546.
21. Tozzi, K. A., et al. "Improving electrochemical stability and electromechanical efficiency of IPMCs: tuning ionic liquid concentration." *Journal of Applied Electrochemistry*, vol. 53, no. 2, 2022, pp. 241-255.
22. Ken Mukai, et al. "Highly Conductive Sheets from Millimeter-Long Single-Walled Carbon Nanotubes and Ionic Liquids: Application to Fast-Moving, Low-Voltage Electromechanical Actuators Operable in Air." *Advanced Materials*, vol. 21, 2009, pp. 1582-1585.

References:

1. Jinguang Lai, et al. "Current research status of ionic polymer–metal composites in applications of low-voltage actuators" 2024, *Materials Advances*, № 11, c. 4601-4617
2. Yuqing Dong, et al. "Development of ionic liquid-based electroactive polymer composites using nanotechnology" 2021, *Nanotechnology Reviews*, № 1, c. 99-116
3. Yujiao Wu, et al. "Effects of Fiber Stiffening to a Soft Actuator with PEDOT/PSS Electrode Films on Actuation Cycling Stability" 2021, *Journal of Oleo Science*, № 6, c. 861-866
4. Boriana Tzaneva, et al. "Electrochemical Investigation of PEDOT: PSS/Graphene Aging in Artificial Sweat" 2024, *Polymers*, № 12, c. 1706
5. Xiaojun Zhang, et al. "Enhanced performance of IPMC actuator based on macroporous multilayer MCNTs/Nafion polymer" 2022, *Sensors and Actuators A: Physical*, c. 113489
6. Jie Ru, et al. "Fabrication and Characterization of a Novel Smart-Polymer Actuator with Nanodispersed CNT/Pd Composite Interfacial Electrodes" 2022, *Polymers*, № 17, c. 3494
7. Minglu Zhang, et al. "Fabrication of a multilayered SGO/macroporous Nafion-based IPMC with enhanced actuation performance" 2022, *Sensors and Actuators B: Chemical*, c. 131319
8. Lin Zhang, et al. "Fabrication, encapsulation, and hysteresis creep mitigation in Ionic Polymer-Metal Composites: A review" 2025, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, c. 102179
9. Fang Wang, et al. "Facile and effective repair of Pt/Nafion IPMC actuator by dip-coating of PVP@AgNPs" 2021, *Nanotechnology*, № 38, c. 385502
10. Yi Li, et al. "High performance PVC/ [AMI]mNTF2 ionic gel sensors for smart wearable applications" 2024, *Sensors and Actuators A: Physical*, c. 115826
11. Hongwei Hu, et al. "High Performance Soft Electrochemical Actuators Based on Hierarchical Conductive Polymer Ionogels" 2023, *Journal of Bionic Engineering*, № 6, c. 2755-2763

12. V. M. Aivazyan, et al. "Ionic Electroactive Actuators and Sensors with Hybrid Polymer-Metal Electrodes" 2024, Journal of Structural Chemistry, № 2, с. 267-280
13. Rafael Barbosa, et al. "Novel IP²C sensors with flexible electrodes based on plasma-treated conductive elastomeric nanocomposites" Sensors and Actuators B: Chemical, 2022.
14. Sangwoon Lee, et al. "Multiday operable ionic polymer-metal composites prepared using a stacking method for practical actuator applications" Smart Materials and Structures, 2024.
15. Dongxu Zhao, et al. "Performance Enhancement of Ionic Polymer-Metal Composite Actuators with Polyethylene Oxide" Polymers, 2021.
16. Zhengxin Zhai, et al. "Performance prediction of IPMC modified with SiO₂-SGO based on backpropagation neural network" Nanotechnology and Precision Engineering, 2024.
17. Si Park, et al. "Recent Progress in Development and Applications of Ionic Polymer-Metal Composite" Micromachines, 2022.
18. Jakub Bernat, et al. "Review of Soft Actuators Controlled with Electrical Stimuli: IPMC, DEAP, and MRE" Applied Sciences, 2023.
19. Dong, Y., et al. "Towards a consistent methodology for testing strip polymer composite actuators." Polymer Testing, 2022.
20. Jang-Woo Lee, Young-Tai Yoo "Anion effects in imidazolium ionic liquids on the performance of IPMCs." Sensors and Actuators B: Chemical, vol. 137, no. 2, 2009, pp. 539-546.
21. Tozzi, K. A., et al. "Improving electrochemical stability and electromechanical efficiency of IPMCs: tuning ionic liquid concentration." Journal of Applied Electrochemistry, vol. 53, no. 2, 2022, pp. 241-255.
22. Ken Mukai, et al. "Highly Conductive Sheets from Millimeter-Long Single-Walled Carbon Nanotubes and Ionic Liquids: Application to Fast-Moving, Low-Voltage Electromechanical Actuators Operable in Air." Advanced Materials, vol. 21, 2009, pp. 1582-1585.