

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2023-2-33-42>

УДК 544.6.018.464

## ПРИМЕНЕНИЕ ГЕЛЬ-ПОЛИМЕР ЭЛЕКТРОЛИТОВ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ УСТРОЙСТВ ХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ – МИНИ ОБЗОР

А. А. Машенцева<sup>1,2\*</sup>, А. А. Алманов<sup>1,2</sup>, А. Н. Айманова<sup>1</sup>, А. М. Жумабаев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> РГП «Институт ядерной физики» МЭ РК, Алматы, Казахстан

<sup>2</sup> НАО «Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева», Астана, Казахстан

\* E-mail для контактов: a.mashentseva@inp.kz

В настоящее время одной из наиболее актуальных проблем, с которыми сталкивается общество, является замена существующей энергетической системы, использующей ограниченные ископаемые виды топлива активно загрязняющих окружающую среду, на принципиально новую концепцию, основанную на чистых и безграничных устойчивых источниках. Масштабное использование возобновляемых источников энергии и переход от двигателей внутреннего сгорания к электромобилям является одной из многообещающих стратегий развития науки и техники в обозримом будущем. Одним из наиболее перспективных подходов в разработке суперконденсаторов нового поколения является использование твердых полимерных электролитов, обладающих решающими преимуществами по сравнению с жидкими и твердыми неорганическими электролитами, в числе которых негорючесть, отсутствие утечек электролита, превосходная гибкость и дешевизна производственного процесса. В данном мини-обзоре рассматриваются основные типы суперконденсаторов, материалы, используемые для разработки гель-полимер электролитов и последние достижения в области разработки гель-полимер электролитов на основе различных типов углеродных материалов.

**Ключевые слова:** суперконденсаторы, гель-полимер-электролиты, углеродные наноматериалы, полимеры, емкость конденсаторов, устройства хранения энергии, графен, оксид графена.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Значительный рост исследований в области систем накопления энергии за последнее десятилетие обусловлен спросом на электронные устройства, электромобили и продукты из возобновляемых источников энергии [1–3]. Материалы, используемые для хранения энергии, такие как суперконденсаторы (СК) или литий-ионные батареи, широко применяются в бытовой и портативной электронике, а их разработка является одним из приоритетных направлений современного материаловедения. Однако остается открытым вопрос безопасности их использования, особенно для применения в электромобилях. Актуальная проблема безопасности литий-ионных аккумуляторов и коммерческих электрохимических суперконденсаторов в основном вызвана использованием в электролите жидких органических растворителей [4–6]. Существующие аналоги в виде твердых полимерных электролитов, казалось бы, с одной стороны обеспечивают идеальный способ решения этой проблемы безопасности, но с другой стороны, их низкая ионная проводимость не может соответствовать требуемым эксплуатационным требованиям [7, 8]. Гель-полимерные электролиты (ГПЭ), использующие полимеры в качестве матрицы для фиксации растворителей, обладают значительно более высокой ионной проводимостью, чем твердые полимерные электролиты, и более высокой стабильностью, чем жидкие электролиты и являются альтернативным и эффективным решением проблемы безопасности литий-ионных аккумуляторов [6, 8]. Электролиты на основе ГПЭ также обеспечивают значительное удоб-

ство с точки зрения гибкости, универсальности конфигурации конструкции и упаковки, кроме того, они предлагают широкие возможности для приложений в гибкой, растягиваемой или носимой электронике. Гибкие и эластичные ГПЭ также способны выдерживать изменение объема электродных материалов во время процессов заряда и разряда [9]. Как следствие, ГПЭ стали одной из наиболее востребованных альтернатив среди различных электролитов для электрохимических устройств накопления энергии, и значительный прогресс был достигнут в литий-ионных и литий-кислородных батареях, суперконденсаторах, а также в других видах электрохимических накопителей энергии, таких как натрий-ионные батареи, литий-серные батареи, топливные элементы и воздушные-цинковые батареи [6].

В данной обзорной работе представлены последние достижения в области получения различных типов СК на основе ГПЭ и различных типов углеродных наноматериалов и их применения для разработки высокоэффективных устройств хранения энергии.

### 2. КЛАССИФИКАЦИЯ И ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СК

СК представляют собой устройства для хранения энергии, которые занимают промежуточную позицию между батареями и обычными конденсаторами [10]. СК имеют примерно в десять раз более высокую плотность мощности, но более низкую плотность энергии, чем литий-ионные батареи, и могут быть объединены с батареями для удовлетворения пиковых потребностей в мощности или с системами сбора энергии для хранения периодически генерируемой

электроэнергии из возобновляемых источников в течение коротких периодов времени. Основными характеристиками конденсаторов как систем накопления энергии, которые позволяют отличить одну систему от других, являются плотность энергии, удельная мощность, емкость/емкость, напряжение на ячейке, кинетический механизм накопления энергии, соотношение  $I-V$ , рабочая температура, срок службы, самопроизвольная разрядка, а также используемые материалы в качестве электрода, электролита и т. д.

В зависимости от типа накопления заряда различают три группы СК. Первый тип представляет собой двухслойный электрический конденсатор (ДЭК), который накапливает электрическую энергию за счет интеркалирования зарядов на границе раздела электрод-электролит, образуя двойной слой зарядов (рисунок 1, а). Заряды физически осаждаются за счет электростатического притяжения, что приводит к быстрой кинетике заряда-разряда, высокой плотности мощности и длительному жизненному циклу (поскольку не происходит химической реакции) [11]. Углеродосодержащие материалы (графен, углеродные нанотрубки, активированный уголь, графит и др.) чаще всего используются в качестве электродного материала для накопления зарядов.

Второй тип СК известен как псевдоконденсатор, поскольку он использует фарадеевские реакции для накопления электрической энергии (рисунок 1, б). Процесс накопления энергии в данном типе конденсаторов возникает в результате быстрых обратимых окислительно-восстановительных реакций, подобных процессам, протекавшим в батареях [12, 13]. Осаждение при пониженном потенциале, окислительно-восстановительная псевдоемкость и интеркаляционная псевдоемкость являются основными тремя различными типами окислительно-восстановительных реакций, характерных для псевдоконденсаторов [14]. Осаждение при пониженном потенциале представляет собой своего рода обратимую адсорбцию ионов металлов на различных металлических поверхностях, которая аналогична адсорбции между ионами золота и свинца, описанных в работе [15]. Окислительно-восстановительная псевдоемкость обычно возникает на поверхности халькогенидов/нитридов переходных металлов с фарадеевским переносом заряда. Интеркаляционная псевдоемкость возникает, когда ионы (например,  $Li^+$ ) интеркалируют в туннели материалов с окислительно-восстановительными свойствами. Наиболее известные псевдоемкостные материалы с удельной емкостью, близкой к их теоретическому пределу –  $RuO_2$  и  $MnO_2$  [16, 17]. Поскольку электрохимическая природа псевдоконденсатора подобна ДЭК, он называется псевдоконденсатором. Плотность энергии этого типа СК выше по сравнению с ДЭК, но наличие химических реакций снижает его плотность тока, а также срок службы.

В современных электрохимических накопителях энергии оба типа конденсаторных материалов, описанных выше, объединены в одном устройстве, чтобы использовать преимущества обоих емкостных материалов, это так называемые гибридные конденсаторы (рисунок 1, в), которые относятся к типу асимметричных конденсаторов и обычно состоят из электрода с двойным электрическим слоем (ДЭС) и псевдоемкостного или аккумуляторного электрода. Гибридные конденсаторы могут обеспечить как высокую плотность энергии, так и плотность тока [18]. При эксплуатации одновременно происходят процессы поверхностной адсорбции и десорбции электрода ДЭК и процессы интеркаляции и деинтеркаляции электрода аккумуляторного типа, что приводит к высокой плотности энергии при высокой плотности тока без ухудшения срока службы. Комбинация двух различных типов электродов, безусловно, обеспечивает возможность накопления большего количества энергии благодаря широкому диапазону рабочего напряжения, создаваемому асимметричными электродами, и большой удельной емкости, индуцируемой электродом аккумуляторного типа. Также благодаря электроду типа ДЭК, гибридные конденсаторы имеют высокую скорость зарядки и разрядки [19, 20]. В целом, суперконденсаторы способны обеспечить более высокую удельную мощность по сравнению с батареями, но их удельная энергия все еще сильно отстает от батарей.

По сравнению с ДЭК и псевдоконденсаторами гибридные СК демонстрируют значительные преимущества, такие как более высокая плотность энергии [21] и длительный срок службы ( $> 100\,000$ ) [22], что было продемонстрировано в работе [23] при более высоком напряжении ячейки (максимум 0,5). Более низкий саморазряд (рассеяние энергии) является еще одним преимуществом гибридного типа конденсаторов по сравнению с ДЭК и псевдоконденсаторами [24]. Как правило, механизмы саморазряда, которые связаны с различными химическими и физическими механизмами, в основном подразделяются на три класса: (а) паразитные фарадеевские реакции, (б) перераспределение заряда и (в) омическая утечка тока между электродами [25]. Соответственно, саморазряд происходит, если имеется один или комбинация этих процессов. Выбор стандартного срока службы в качестве одного из основных параметров перезаряжаемых накопителей энергии полностью зависит от характера устройства и тесно связан с условиями эксплуатации, такими как температура, напряжение, ток заряда-разряда, глубина заряда, разряд, а на некоторых этапах и влажность [18, 26]. Важно выбрать подходящие материалы высокой чистоты как для электролита, так и для электродов, так как это влияет на срок службы при циклировании и утечку тока.

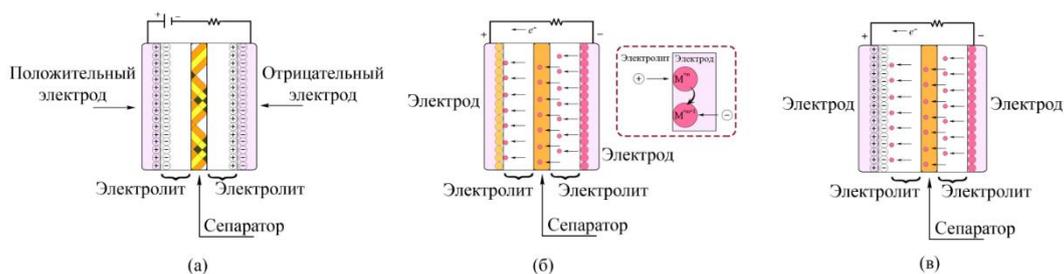


Рисунок 1. Основные типы конденсаторов, согласно [21]

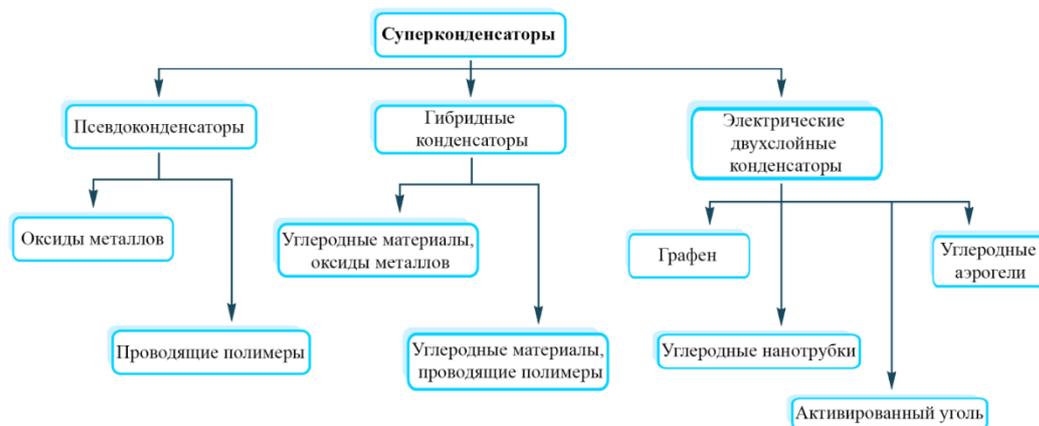


Рисунок 2. Классификация материалов, используемых для изготовления электродов СК согласно [21]

## 2.1 Материалы, используемые для разработки электродов современных типов СК

Как показывает анализ литературных данных, расширение спектра материалов, используемых для изготовления новых и усовершенствования уже имеющих типов электродов, является одной из наиболее популярных и востребованных задач мирового научного сообщества. На рисунке 2 приводятся основные классы материалов, используемых при разработке электродов для каждого из трех типов конденсаторов, описанных в разделе 2.1. Имеется ряд обзорных работ, подробно описывающих функциональные характеристики различных классов электродов [17, 22–25]. В большинстве коммерческих суперконденсаторов используются жидкие органические электролиты, такие как тетраэтиламмоний-тетрафторборат в ацетонитриле [27]. Хотя эти электролиты обеспечивают относительно высокую ионную подвижность и быструю кинетику заряда/разряда, потенциальная утечка электролита создает проблемы безопасности и защиты окружающей среды, что требует конструкций элементов с жесткой и прочной упаковкой для содержания жидких электролитов. Твердотельные суперконденсаторы, которые заменяют жидкие электролиты гелем с ионной проводимостью или полимерной мембраной, не требуют жесткой упаковки и, следовательно, могут быть тоньше, легче и обеспечивают большую свободу проектирования.

Таким образом, они потенциально привлекательны для таких приложений, как сверхмобильная электроника будущего и конформные системы хранения энергии [28].

Использование жидкого электролита имеет два основных недостатка:

1) Для жидкого электролита требуются высококачественные безопасные герметизирующие материалы, что на практике приводит к тому, что СК имеют неуклюжую объемную форму (кнопка или цилиндр со спиральной намоткой) и низкую плотность энергии упаковки (герметизирующие материалы снижают весовой процент материала электрода во всем устройстве).

2) При утечке электролита вредные материалы вызывают коррозию растворителя и отрицательно влияют на окружающую среду. Кроме того, жидкие электролиты не очень подходят для таких устройств, как носимые, растяжимые или гибкие электронные устройства.

Эти два аспекта значительно ограничивают соответствие обычных СК строгим требованиям будущих практических приложений в области передовой тонкой и легкой электроники.

Благодаря широкому электрохимическому диапазону, хорошей термической стабильности и минимальным рискам утечки раствора электролита, полимерные электролиты являются одним из самых перспективных классов функциональных материалов

для разработки электродов нового поколения [29]. Полимерные электролиты можно разделить на два класса по их составу: твердые полимерные электролиты (ТПЭ) и гель-полимер электролиты (ГПЭ). Считается, что в электродах на основе ТПЭ соли лития растворяются и сольватируются высокомолекулярными полимерными цепями. Полимер играет роль промотора для передачи ионов лития сквозь цепочки сегментов полимера [30]. Кроме того, ТПЭ способны компенсировать изменения объема электродов за счет упругой и пластической деформации. Следует отметить, что ТПЭ являются наиболее перспективным типом электролитов, поскольку они применяются в полностью твердотельных литий-ионных и литий-металлических батареях. Тем не менее, практическое широкое использование ТПЭ значительно ограничивается низкой ионной проводимостью при комнатной температуре ( $10^{-8}$ – $10^{-5}$  См см<sup>-1</sup>) ниже требуемой в реальных условиях ( $10^{-3}$  См см<sup>-1</sup>). В ГПЭ эта проблема полностью решена. В ГПЭ жидкий электролит иммобилизован в полимерной матрице, что значительно снижает риск утечки электролита по сравнению с коммерческим сепаратором. Как и другие полимерные электролиты, ГПЭ сочетают в себе преимущества как жидкого, так и твердого компонентов и привлекают все большее внимание исследователей, благодаря комбинации функций электролита и сепаратора в одном материале, что обеспечивает высокую ионную проводимость и хороших межфазных свойствах жидкой фазы, а также в хороших механических свойствах твердого компонента [31]. Различают ГПЭ с гетерогенным (фазовым разделением) и гомогенным (однородным) гелем (рисунок 3). Наиболее распространены гетерогенные ГПЭ, представляющие собой полимерный каркас с системой связанных между собой пор, заполненных электролитом, в которых транспорт ионов Li происходит в набухшей гелеобразной или жидкой фазе. Большинство из известных типов ГПЭ демонстрируют выдающуюся ионную проводимость порядка  $10^{-3}$  См см<sup>-1</sup> при температуре окружающей среды, что значительно улучшает электрохимические характеристики суперконденсаторов на их основе [30].

Процесс получения ГПЭ обычно состоит из двух последовательных стадий: первоначально осуществляется формирование каркаса пористой полимерной мембраны, после чего ее активируют жидким органическим электролитом. Как отмечают многие исследователи, эффективность конечной формы ГПЭ напрямую зависит от функциональных свойств ее полимерной основы [30]. Наиболее часто для создания ГПЭ используют следующие типы полимерных матриц: полиакрилонитрил (ПАН), поли(метилметакри-

лат) (ПММА), полиакрилонитрил (ПАН), поли(метилметакрилат) (ПММА), полиэтиленоксид (ПЭО), поли(винилиденфторид) (ПВДФ) и поли(винилиденфторид-гексафторпропилен) (ПВДФ-ГФП). Одним из перспективных направлений считается разработка экологичных типов ГПЭ с использованием биоразлагаемых полимерных матриц на основе целлюлозы [32], ламеллярной агарозы [33], лигнина [34], целлюлозы [35], композитов на основе картофельного крахмала и лигноцеллюлозы [36] и т.д.

Следует отметить, что во многих статьях по разработке полностью твердотельных суперконденсаторов использовался такой водно-ионный гель-электролит [19, 37], как поливиниловый спирт (ПВС–H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, ПВС–H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) [38, 39]. Однако узкое электрохимическое окно водно-гелевого электролита (0–1,0 В) приводит к низкому напряжению на ячейке и, следовательно, к низкой плотности энергии и мощности. Кроме того, при использовании водно-гелевых электролитов в широком диапазоне температур остро возникает проблема испарения воды, что резко влияет на производительность и долговременную стабильность устройств [40–42]. Ионные гели (ионные жидкости, координируемые полимерами) имеют широкое электрохимическое окно (0–3,5 В), превосходную термическую стабильность, нелетучесть, негорючесть и нетоксичность, но обладают низкой ионной проводимостью [43].

Фторполимеры, такие как ПВДФ или ВДФ-ГФП весьма перспективны в области разработки СК благодаря химической и механической стабильности, легкому весу, гибкости, высокой диэлектрической проницаемости, высокой ударопрочности и электрохимической стабильности [44]. Фторированные полимеры с регулируемыми свойствами играют весьма важную роль в повышении эффективности и коммерциализации энергетических систем, конструкции, состава и технологии изготовления суперконденсаторов [45, 46]. По сравнению с ПЭО, СК на основе ПВДФ и ПВДФ-ГФП обеспечивают более высокую ионизацию солей лития и концентрацию носителей заряда вследствие высокой диэлектрической проницаемости указанных типов полимеров. Как ПВДФ, так и ПВДФ-ГФП имеют плохую совместимость с жидкими электролитами, поэтому в ряде работ для улучшения электрохимических характеристик проводилась модификация остовных полимеров. Так, в работе [47] авторы для повышения электрохимических характеристик ПВДФ добавили к раствору полимера биоразлагаемый полипропилен-карбонат, при этом модифицированный электрод продемонстрировал более чем в 2 раза высокую ионную проводимость, по сравнению с монокомпонентным образцом.

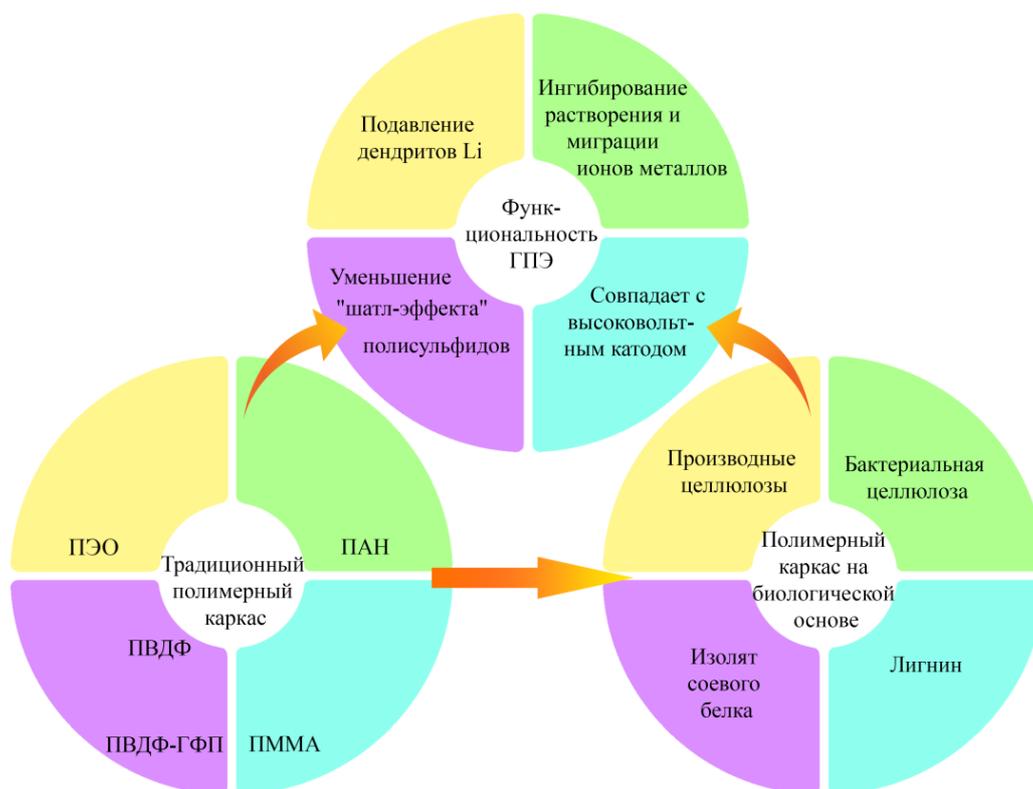


Рисунок 3. Классификация ГПЭ согласно [30]

Гибридные мембранные ГПЭ, на основе ПВДФ/SiO<sub>2</sub>-g-поли(метилметакрилат) и ПВДФ/SiO<sub>2</sub>-g-поли(метилметакрилат-со-гидроксиэтилметакрилат) (PMMA-со-HEMA) были получены в работе [48] методом инверсии фаз, в котором ПММА и П(ММА-со-HEMA) были успешно привиты на поверхность наночастиц SiO<sub>2</sub> методом радикальной полимеризации с переносом атома. Авторами было установлено, что характеристики приготовленных мембран в сочетании с 1 M LiClO<sub>4</sub> в пропиленкарбонате значительно улучшились за счет введения HEMA-групп. Ионная проводимость таких ГПЭ составила 2,63 мСм·см<sup>-1</sup> при 298 К. Было установлено, что окно электрохимической стабильности ГПЭ, содержащего SiO<sub>2</sub>-g-P(MMA-со-HEMA), достигает 4,8 В. Научная группа во главе с *Wu et al* [49] разработала цвиттер-ионный гель-электролит поли(пропилсульфонат диметиламмоний пропилметакриламид) (ППДП)/LiCl путем радикальной полимеризации пропилсульфоната диметиламмоний пропилметакриламида (ПДП) и физического смешивания с LiCl. Твердотельный суперконденсатор на основе PPDP-LiCl показал более высокую плотность энергии (41,78 Вт·ч·л<sup>-1</sup>), чем на основе PVC/LiCl (26,89 Вт·ч·л<sup>-1</sup>). *MacFarlane* с соавторами [50] предложил новый подход к приготовлению самоподдерживающихся гелевых мембран с ионной жидкостью путем включения двух ионогелей [EMIM][NTf<sub>2</sub>]/[C<sub>4</sub>mput][eFAP] в полимерную матрицу ПВДФ-ГФП. Симметричный суперконденсатор

на основе такой мембраны [NTf<sub>2</sub>]-ионогеля может достигать емкости 153/101 Ф·г<sup>-1</sup> при 0,1/10 А·г<sup>-1</sup>, а гибкий СК по-прежнему сохраняет удельную емкость 119 Ф·г<sup>-1</sup> при 1 А·г<sup>-1</sup>.

### 3. ПРИМЕНЕНИЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ В СК НА ОСНОВЕ ГПЭ

Несмотря на то, что начало использованию углеродных материалов при конструировании СК было положено еще в 1975 году, до недавнего времени углеродные материалы в основном использовались в качестве материала электродов благодаря своим свойствам, таким как удельная площадь поверхности, инертность, низкая себестоимость, экологичность методов синтеза [17]. Во многих авторитетных научных работах, опубликованных за последние 5 лет, было продемонстрировано, что ионная проводимость ГПЭ может быть значительно улучшена за счет легирования наноразмерными структурами на основе углерода [17, 25, 51, 52]. Высокая термическая, химическая и электрохимическая стабильность (в различных растворах от сильноокислых до щелочных сред), высокая электропроводность, а также симметричный гальваностатический профиль заряда-разряда позволяют рассматривать углеродные материалы как в качестве электродных материалов [23, 24], так и в качестве легирующих компонентов ГПЭ [37, 53]. В работе [51] авторами были синтезированы новые типы ГПЭ на основе полиакриламида (ПАА), легированного углеродными нанотрубками (УНТ), оксидом

графена (ОГ) и их смеси. Было установлено, что легирование углеродными материалами значительно увеличивает срок службы и снижает степень деградации емкости СК. Так, смешанные образцы на основе УНТ и ГО продемонстрировали на 50% более высокую термическую стабильность по сравнению с СК на основе только ГПЭ. Кроме того, диффузия ионов между слоями ОГ в данном типе образцов значительно увеличивается за счет уменьшения агрегации листов ОГ и ионная проводимость геля возрастает с 41 до 132 мСм см<sup>-1</sup>.

Пористый ГПЭ на основе ПВДФ и графена (0,002 мас.%) был получен в работе [54] методом фазового разделения, не индуцированного растворителем. При этом ионная проводимость такого ГПЭ значительно увеличилась с  $1,85 \cdot 10^{-3}$  См см<sup>-1</sup> до  $3,61 \cdot 10^{-3}$  См см<sup>-1</sup> по сравнению с ГПЭ на основе только ПВДФ мембраны. ПВДФ также был допирован иономер-модифицированным ОГ (ИМГО) [55] с использованием метода фазового разделения. Было установлено, что при относительном содержании ИМГО 10 мас. % приготовленный ГПЭ имеет самую высокую ионную проводимость ( $3,35 \cdot 10^{-3}$  См см<sup>-1</sup>), а электрохимическое окно стабильно до 4,8 В. Собранный полимерный литий-ионный аккумулятор на его основе показал наивысшую зарядно-разрядную емкость (168,4 мА·ч·г<sup>-1</sup>), а емкости элементов (LiCoO<sub>2</sub>/ГПЭ/Li) удалось сохранить до 90% после 50 циклов.

Помимо однокомпонентных электролитов на основе полимеров, все больше и больше разрабатываются твердотельные электролиты на основе многокомпонентных полимерных гелей для улучшения их электрохимических и механических характеристик. В работе [56] авторами был разработан многокомпонентный гель-электролит путем прививки оксида графена и аминогрупп к основной цепи ПВС-КОН. Модифицированный ГПЭ ПВС-КОН продемонстрировал гораздо более высокую ионную проводимость (108,7 мСм/см), нежели в немодифицированных ГПЭ состава ПВС-КОН (30,5 мСм/см). Помимо улучшения электрохимических характеристик, твердотельные электролиты на основе многокомпонентных полимерных гелей также обладают впечатляющими улучшениями механических характеристик. Так, в работе [57] сополимеризацией 2-акриламида-2-метилпропансульфоновой кислоты (AMPS) и N,N-диметилакриламида (DMAAm) был синтезирован многофункциональный композитный ГПЭ. СК на основе электролита состава поли(AMPS-co-DMAAm)/лапонит/ОГ продемонстрировал превосходную механическую растяжимость (до 1000%) и отличные характеристики самовосстановления, как при нагревании, так и при обработке светом.

ГПЭ на основе природного морского полисахарида – агарозы (АГ) и ОГ был теоретически и экспериментально изучен в работе [33]. СК на основе указанного ГПЭ и углеродного электрода имеет высокую

ионную проводимость (73,8 мСм см<sup>-1</sup>) и удельную емкость до 791,67 мФ см<sup>-2</sup> при плотности тока 5,0 мА см<sup>2</sup>. Кроме того, ГПЭ состава АГ/ОГ обладает отличной механической прочностью (0,115 МПа) и огнестойкими характеристиками (мощность тепловыделения 11,08 кВт/м<sup>2</sup> и общее тепловыделение – 0,79 МДж м<sup>2</sup>).

Мембрана с литий-ионным проводящим ГПЭ, содержащая ПЭО в качестве полимерной основы и жидкий электролит, была приготовлена с помощью простой одностадийной процедуры [58] и имеет не только хорошую ионную проводимость  $3,3 \cdot 10^{-3}$  См см<sup>-1</sup> и высокое число переноса ионов лития равное 0,76 при комнатной температуре, но и также демонстрирует высокую термическую стабильность. Ячейка на основе синтезированного электролита обеспечивает хорошую стабильность при циклировании с высоким сохранением емкости на уровне 81% после 500 циклов и такими же хорошими характеристиками, как LiFeO<sub>4</sub>, испытанный в жидком электролите.

Yang et al. синтезировали высокоэффективный ионный гель на основе ПВДФ-ГФП легированный ОГ с использованием сополимера ПВДФ-ГФП в качестве полимерной матрицы, ионной жидкости (тетрафторборат 1-этил-3-метилимидазолия EMIMBF<sub>4</sub>) в качестве поддерживающего электролита и ОГ в качестве промотора ионной проводимости. Этот ионный гель, легированный ОГ, имеет значительно улучшенную ионную проводимость по сравнению с ионным гелем. Авторами было показано, что чистый ионный гель без добавления ОГ из-за однородно распределенного ОГ в виде трехмерной сети по всему объему геля, действует как ионная «магистраль» для облегчения переноса ионов. При включении в ионный гель лишь небольшого количества ОГ (1 мас. %) наблюдается резкое улучшение ионной проводимости примерно на 260% по сравнению с чисто ионным гелем. Кроме того, полностью твердотельный СК изготовленный на основе указанного ГПЭ демонстрирует более высокие электрохимические характеристики, чем полностью твердотельный суперконденсатор с чистым ионным гелем и обычным суперконденсатор с чистым EMIMBF<sub>4</sub>, в аспекте меньшего внутреннего сопротивления, более высокой емкости и лучшей циклической стабильности. Эти превосходные характеристики обусловлены высокой ионной проводимостью, отличной совместимостью с угольными электродами и долговременной стабильностью ионного геля, легированного ОГ [1].

В таблице представлены данные об использовании графена и его производных в качестве наполнителей ГПЭ. Как видно из представленных данных, технологический подход, основанный на использовании углеродных нанонаполнителей в ГПЭ не только обеспечивает исключительные характеристики, но и значительно повышает ионную проводимость СК.

**ПРИМЕНЕНИЕ ГЕЛЬ-ПОЛИМЕР ЭЛЕКТРОЛИТОВ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ  
ДЛЯ РАЗРАБОТКИ УСТРОЙСТВ ХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ – МИНИ ОБЗОР**

*Таблица. Электрохимические характеристики ГПЭ на основе углеродных наноматериалов*

Полимер	Наполнитель	Метод синтеза	Пористость, %	UA, %	$\sigma$ (мСм см <sup>-1</sup> )	T <sub>L+</sub>	Ист.
ПВДФ	—	термическая инверсия фазы	31,21	175,67	—	0,18	[55]
	графен		50,43	260,67	—	0,42	
LAGO/ПВС/Н <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	0,1 вес% ОГ	отливка раствора			21,36		[37]
	10 вес% ОГ				5,46		
SAGO/ПВС/Н <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	2 вес% ОГ		—	—	13,46		
ПЭО/ПАН	0,05 вес% ОГ	электроспиннинг	94,1±0,1	592±11	0,45·10 <sup>-3</sup>	—	[59]
	0,5 вес% ОГ	электроспиннинг	93,0±5,9	585±13	0,42·10 <sup>-3</sup>	—	
	—	электроспиннинг	91,1±0,6	500±10	0,36·10 <sup>-3</sup>	—	
ПАА	—	отливка раствора	—	—	41	—	[51]
	УНТ	разбавление исходных растворов	—	—	59	—	
	ОГ	отливка раствора	—	—	64	—	
	УНТ/ОГ	разбавление исходных растворов	—	—	132	—	
ПВДФ-ГФП	—	отливка раствора	68,8	296,1	0,165	—	[60]
	1 вес% ОГ		75,9	338,3	0,19	—	
	2,5вес% ОГ		86,8	342,4	0,423	—	
	5 вес% ОГ		70,2	331,25	0,301	—	
ПВДФ-ГФП	—	отливка раствора	—	—	3,9·10 <sup>-3</sup>	—	[61]
	0,1 вес% ОГ		—	—	0,17	—	
	0,2 вес% ОГ		—	—	6,1·10 <sup>-2</sup>	—	
	0,3 вес% ОГ		—	—	1,6·10 <sup>-2</sup>	—	
	0,4 вес% ОГ		—	—	6,7·10 <sup>-2</sup>	—	
ПВДФ-ГФП	—	отливка раствора	68,8	296,4	0,198	0,13	[62]
ПВДФ-ГФП/ полианилин (ПАНИ)	—		77,3	340,4	1,04·10 <sup>-4</sup>	0,20	
ПВДФ-ГФП/ПАНИ/ОГ	ОГ		88,7	367,6	6,64·10 <sup>-4</sup>	0,30	
Полиакриловая кислота	ОГ	отливка раствора	—	—	168,1	—	[63]
Иономер полиуретана	0,5 вес% ОГ	—	—	—	4,48	—	[64]

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Неоспорим тот факт, что твердотельные СК стали прорывным открытием в науке и технике последнего десятилетия и играют все более важную роль во множестве разнообразных систем накопления энергии. В данном мини-обзоре кратко описаны основные механизмы различных типов СК и материалов для их изготовления. Особое внимание уделено современным данным о применении ГПЭ на основе углеродных материалов. Как показывает анализ литературных данных, твердотельные ГПЭ на основе графена и его производных являются многообещающими кандидатами для приближения к высокопроизводительным устройствам хранения энергии благодаря их уникальным электрохимическим характеристикам. Многокомпонентные полимерные матрицы также могут обеспечить как высокие механические, так и электрохимические характеристики гибких СК.

Несмотря на то, что было разработано много впечатляющих и обнадеживающих методов для приближения к высокопроизводительным гибким СК, остается нерешенной проблема повышения плотности энергии гибких СК. Первоочередной задачей является исследование и разработка новых псевдоемкостных материалов с высокой емкостью и большими ра-

бочими окнами. Требуется более детальное рассмотрение понимания динамики переноса ионов в нерегулярных пористых структурах. Большинство сообщаемых механизмов или симуляций основаны на идеальной модели, которая не может полностью описать реальные образцы. И наконец, для масштабного применения твердотельных СК на основе ГПЭ необходимо проводить исследования, ориентированные на разработку недорогих и легкообрабатываемых материалов.

*Данная работа была выполнена в рамках реализации проекта грантового финансирования АР14869845, финансируемого Комитетом науки Министерства науки и высшего образования РК.*

### ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Yang X., Zhang F., Zhang L., Zhang T., Huang Y., Chen Y. A High-Performance Graphene Oxide-Doped Ion Gel as Gel Polymer Electrolyte for All-Solid-State Supercapacitor Applications // Adv. Funct. Mater. – 2013. – Vol. 23. – No. 26. – P. 3353–3360.
2. Gür T.M. Review of electrical energy storage technologies, materials and systems: challenges and prospects for large-scale grid storage // Energy Environ. Sci. – 2018. – Vol. 11. – No. 10. – P. 2696–2767.

- Mitali J., Dhinakaran S., Mohamad A.A. Energy storage systems: a review // *Energy Storage Sav.* – 2022. – Vol. 1. – No. 3. – P. 166–216.
- Zhong C., Deng Y., Hu W., Qiao J., Zhang L., Zhang J. A review of electrolyte materials and compositions for electrochemical supercapacitors // *Chem. Soc. Rev.* – 2015. – Vol. 44. – No. 21. – P. 7484–7539.
- Manuel Stephan A. Review on gel polymer electrolytes for lithium batteries // *Eur. Polym. J.* – 2006. – Vol. 42. – No. 1. – P. 21–42.
- Cheng X., Pan J., Zhao Y., Liao M., Peng H. Gel Polymer Electrolytes for Electrochemical Energy Storage // *Adv. Energy Mater.* – 2018. – Vol. 8. – No. 7. – P. 1702184.
- Ngai K.S., Ramesh S., Ramesh K., Juan J.C. A review of polymer electrolytes: fundamental, approaches and applications // *Ionics (Kiel).* – 2016. – Vol. 22. – No. 8. – P. 1259–1279.
- Rao M., Geng X., Liao Y., Hu S., Li W. Preparation and performance of gel polymer electrolyte based on electro-spun polymer membrane and ionic liquid for lithium ion battery // *J. Memb. Sci.* – 2012. – Vol. 399–400. – P. 37–42.
- Porcarelli L., Gerbaldi C., Bella F., Nair J.R. Super Soft All-Ethylene Oxide Polymer Electrolyte for Safe All-Solid Lithium Batteries // *Sci. Rep.* – 2016. – Vol. 6. – No. 1. – P. 19892.
- Sagadevan S., Marlinda A.R., Chowdhury Z.Z., Wahab Y.B.A., Hamizi N.A., Shahid M.M., Mohammad F., et al. Fundamental electrochemical energy storage systems // *Advances in Supercapacitor and Supercapattery* Elsevier, 2021. – P. 27–43.
- Tahir M.B., Abrar M., Tehseen A., Awan T.I., Bashir A., Nabi G. Nanotechnology: the road ahead // *Chemistry of Nanomaterials* Elsevier, 2020. – P. 289–308.
- Liu Y., Jiang S.P., Shao Z. Intercalation pseudocapacitance in electrochemical energy storage: recent advances in fundamental understanding and materials development // *Mater. Today Adv.* – 2020. – Vol. 7. – P. 100072.
- N. Pronkin S., Yu. Shokina N., Pham-Huu C. Redox Transitions in Pseudocapacitor Materials: Criteria and Ruling Factors // *Redox Chemistry – From Molecules to Energy Storage.* – IntechOpen, 2022. – Available from: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.104084>
- Jiang Y., Liu J. Definitions of Pseudocapacitive Materials: A Brief Review // *Energy Environ. Mater.* – 2019. – Vol. 2. – No. 1. – P. 30–37.
- Herrero E., Buller L.J., Abruña H.D. Underpotential Deposition at Single Crystal Surfaces of Au, Pt, Ag and Other Materials // *Chem. Rev.* – 2001. – Vol. 101. – No. 7. – P. 1897–1930.
- Wen S., Lee J.-W., Yeo I.-H., Park J., Mho S. The role of cations of the electrolyte for the pseudocapacitive behavior of metal oxide electrodes, MnO<sub>2</sub> and RuO<sub>2</sub> // *Electrochim. Acta* – 2004. – Vol. 50. – No. 2–3. – P. 849–855.
- Forouzandeh P., Kumaravel V., Pillai S.C. Electrode materials for supercapacitors: A review of recent advances // *Catalysts* – 2020. – Vol. 10. – No. 9. – P. 1–73.
- Afif A., Rahman S.M., Tasfiah Azad A., Zaini J., Islan M.A., Azad A.K. Advanced materials and technologies for hybrid supercapacitors for energy storage – A review // *J. Energy Storage* – 2019. – Vol. 25. – P. 100852.
- Yang Y. A mini-review: Emerging all-solid-state energy storage electrode materials for flexible devices // *Nanoscale* – 2020. – Vol. 12. – No. 6. – P. 3560–3573.
- Yang Y., Zhu T., Shen L., Liu Y., Zhang D., Zheng B., Gong K., et al. Recent progress in the all-solid-state flexible supercapacitors // *SmartMat* – 2022. – Vol. 3. – No. 3. – P. 349–383.
- Shafiei N., Nasrollahzadeh M., Hegde G. Biopolymer-based (nano)materials for supercapacitor applications // *Chemistry for Sustainable Applications* – 2021. – P. 609–671.
- Nagarajarao S.H., Nandagudi A., Viswanatha R., Basavaraja B.M., Santosh M.S., Praveen B.M., Pandith A. Recent Developments in Supercapacitor Electrodes: A Mini Review // *ChemEngineering* – 2022. – Vol. 6. – No. 1. – P. 5.
- Dhamodharan D., Ghoderao P.P., Dhinakaran V., Mubarak S., Divakaran N., Byun H.S. A review on graphene oxide effect in energy storage devices // *J. Ind. Eng. Chem.* – 2022. – Vol. 106. – P. 20–36.
- Abdel Maksoud M.I.A., Fahim R.A., Shalan A.E., Abd Elkodous M., Olojede S.O., Osman A.I., Farrell C., et al. Advanced materials and technologies for supercapacitors used in energy conversion and storage: a review // *Environ. Chem. Lett.* – 2021. – Vol. 19. – No. 1. – P. 375–439.
- Rajagopal S., Pulapparambil Vallikkattil R., Mohamed Ibrahim M., Velev D.G. Electrode Materials for Supercapacitors in Hybrid Electric Vehicles: Challenges and Current Progress // *Condens. Matter* – 2022. – Vol. 7. – No. 1. – P. 6.
- Ren W., Ding C., Fu X., Huang Y. Advanced gel polymer electrolytes for safe and durable lithium metal batteries: Challenges, strategies, and perspectives // *Energy Storage Mater.* – 2021. – Vol. 34. – P. 515–535.
- Huang C., Zhang J., Young N.P., Snaith H.J., Grant P.S. Solid-state supercapacitors with rationally designed heterogeneous electrodes fabricated by large area spray processing for wearable energy storage applications // *Sci. Rep.* – Nature Publishing Group, 2016. – Vol. 6. – No. July 2015. – P. 1–15.
- Meng C., Liu C., Chen L., Hu C., Fan S. Highly flexible and all-solid-state paperlike polymer supercapacitors // *Nano Lett.* – 2010. – Vol. 10. – No. 10. – P. 4025–4031.
- Ren W., Ding C., Fu X., Huang Y. Advanced gel polymer electrolytes for safe and durable lithium metal batteries: Challenges, strategies, and perspectives // *Energy Storage Mater.* – Elsevier B.V., 2021. – Vol. 34. – No. August 2020. – P. 515–535.
- Zhu M., Wu J., Wang Y., Song M., Long L., Siyal S.H., Yang X., et al. Recent advances in gel polymer electrolyte for high-performance lithium batteries // *Journal of Energy Chemistry* Elsevier B.V. and Science Press, 2019. – Vol. 37. – P. 126–142.
- Yang Q., Deng N., Chen J., Cheng B., Kang W. The recent research progress and prospect of gel polymer electrolytes in lithium-sulfur batteries // *Chem. Eng. J.* – 2021. – Vol. 413. – P. 127427.
- Fang Y., Yuan R., Ge W., Wang Y., Liu G., Li M., Xu J., et al. Synthesis and biological evaluation of 1,2,4,5-tetra-substituted imidazoles // *Res. Chem. Intermed.* – Springer Netherlands, 2017. – Vol. 43. – No. 8. – P. 4413–4421.

33. Lv L., Hui B., Zhang X., Zou Y., Yang D. Lamellar agarose/graphene oxide gel polymer electrolyte network for all-solid-state supercapacitor // *Chem. Eng. J.* – Elsevier B.V., 2023. – Vol. 452. – No. P3. – P. 139443.
34. Liu B., Huang Y., Cao H., Song A., Lin Y., Wang M., Li X. A high-Performance and environment-friendly gel polymer electrolyte for lithium ion battery based on composited lignin membrane // *J. Solid State Electrochem.* – 2018. – Vol. 22. – No. 3. – P. 807–816.
35. Tafete G.A., Abera M.K., Thothadri G. Review on nanocellulose-based materials for supercapacitors applications // *J. Energy Storage* – 2022. – Vol. 48. – P. 103938.
36. Song A., Huang Y., Zhong X., Cao H., Liu B., Lin Y., Wang M., et al. Gel polymer electrolyte with high performances based on pure natural polymer matrix of potato starch composite lignocellulose // *Electrochim. Acta* – 2017. – Vol. 245. – P. 981–992.
37. Alipoori S., Torkzadeh M.M., Moghadam M.H.M., Mazinani S., Aboutalebi S.H., Sharif F. Graphene oxide: An effective ionic conductivity promoter for phosphoric acid-doped poly (vinyl alcohol) gel electrolytes // *Polymer (Guildf)*. – 2019. – Vol. 184. – P. 121908.
38. Tleukenov Y.-T., Kalimuldina G., Arinova A., Issatayev N., Bakenov Z., Nurpeissova A. Polyacrylonitrile–Polyvinyl Alcohol-Based Composite Gel–Polymer Electrolyte for All-Solid-State Lithium-Ion Batteries // *Polymers (Basel)*. – 2022. – Vol. 14. – No. 23. – P. 5327.
39. Wang J., Zhao Z., Song S., Ma Q., Liu R. High Performance Poly(vinyl alcohol)-Based Li-Ion Conducting Gel Polymer Electrolyte Films for Electric Double-Layer Capacitors // *Polymers (Basel)*. – 2018. – Vol. 10. – No. 11. – P. 1179.
40. Wang G., Zhang L., Zhang J. A review of electrode materials for electrochemical supercapacitors // *Chem. Soc. Rev.* – 2012. – Vol. 41. – No. 2. – P. 797–828.
41. Hou X., Pollard T.P., He X., Du L., Ju X., Zhao W., Li M., et al. “Water-in-Eutectogel” Electrolytes for Quasi-Solid-State Aqueous Lithium-Ion Batteries // *Adv. Energy Mater.* – 2022. – Vol. 12. – No. 23. – P. 2200401.
42. Chen S., Lan R., Humphreys J., Tao S. Perchlorate Based “Oversaturated Gel Electrolyte” for an Aqueous Rechargeable Hybrid Zn–Li Battery // *ACS Appl. Energy Mater.* – 2020. – Vol. 3. – No. 3. – P. 2526–2536.
43. Lu W., Henry K., Turchi C., Pellegrino J. Incorporating Ionic Liquid Electrolytes into Polymer Gels for Solid-State Ultracapacitors // *J. Electrochem. Soc.* – 2008. – Vol. 155. – No. 5. – P. A361.
44. Rajeevan S., John S., George S.C. Polyvinylidene fluoride: A multifunctional polymer in supercapacitor applications // *J. Power Sources* – 2021. – Vol. 504. – P. 230037.
45. Arthi R., Jaikumar V., Muralidharan P. Development of electrospun PVdF polymer membrane as separator for supercapacitor applications // *Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff.* – 2019. – P. 1–15.
46. Pazhamalai P., Mariappan V.K., Sahoo S., Kim W.Y., Mok Y.S., Kim S.-J. Free-Standing PVDF/Reduced Graphene Oxide Film for All-Solid-State Flexible Supercapacitors towards Self-Powered Systems // *Micromachines* – 2020. – Vol. 11. – No. 2. – P. 198.
47. Huang X., Zeng S., Liu J., He T., Sun L., Xu D., Yu X., et al. High-Performance Electrospun Poly(vinylidene fluoride)/Poly(propylene carbonate) Gel Polymer Electrolyte for Lithium-Ion Batteries // *J. Phys. Chem. C* – 2015. – Vol. 119. – No. 50. – P. 27882–27891.
48. Jamalpour S., Ghahramani M., Ghaffarian S.R., Javanbakht M. The effect of poly(hydroxyl ethyl methacrylate) on the performance of PVDF/P(MMA-co-HEMA) hybrid gel polymer electrolytes for lithium ion battery application // *Polymer (Guildf)*. – Elsevier Ltd, 2020. – Vol. 195. – No. March. – P. 122427.
49. Peng X., Liu H., Yin Q., Wu J., Chen P., Zhang G., Liu G., et al. A zwitterionic gel electrolyte for efficient solid-state supercapacitors // *Nat. Commun.* – 2016. – Vol. 7. – No. 1. – P. 11782.
50. Zhang X., Kar M., Mendes T.C., Wu Y., MacFarlane D.R. Supported Ionic Liquid Gel Membrane Electrolytes for Flexible Supercapacitors // *Adv. Energy Mater.* – 2018. – Vol. 8. – No. 15. – P. 1702702.
51. Zhao X., Wu Z., Zhang Z., Wang N., Tao C.A., Wang J., Gong H. The polymer composite electrolyte with polyethylene oxide-grafted graphene oxide as fillers toward stable highcurrent density lithium metal anodes // *Mater. Res. Express* – IOP Publishing, 2021. – Vol. 8. – No. 10..
52. Azizighannad S., Wang Z., Siddiqui Z., Kumar V., Mitra S. Nano carbon doped polyacrylamide gel electrolytes for high performance supercapacitors // *Molecules* – 2021. – Vol. 26. – No. 9. – P. 2631.
53. Liu J., Wu X., He J., Li J., Lai Y. Preparation and performance of a novel gel polymer electrolyte based on poly(vinylidene fluoride)/graphene separator for lithium ion battery // *Electrochim. Acta* – 2017. – Vol. 235. – P. 500–507.
54. Li W., Zhu Z., Shen W., Tang J., Yang G., Xu Z. A novel PVdF-based composite gel polymer electrolyte doped with ionomer modified graphene oxide // *RSC Adv.* – Royal Society of Chemistry, 2016. – Vol. 6. – No. 99. – P. 97338–97345.
55. Chen Z., Yang Y., Ma Z., Zhu T., Liu L., Zheng J., Gong X. All-Solid-State Asymmetric Supercapacitors with Metal Selenides Electrodes and Ionic Conductive Composites Electrolytes // *Adv. Funct. Mater.* – 2019. – Vol. 29. – No. 38. – P. 1904182.
56. Li H., Lv T., Sun H., Qian G., Li N., Yao Y., Chen T. Ultrastretchable and superior healable supercapacitors based on a double cross-linked hydrogel electrolyte // *Nat. Commun.* – 2019. – Vol. 10. – No. 1. – P. 536.
57. Li W., Pang Y., Liu J., Liu G., Wang Y., Xia Y. A PEO-based gel polymer electrolyte for lithium ion batteries // *RSC Adv.* – 2017. – Vol. 7. – No. 38. – P. 23494–23501.
58. Abdollahi S., Sadadi H., Ehsani M., Aram E. Highly efficient polymer electrolyte based on electrospun PEO/PAN/single-layered graphene oxide // *Ionics (Kiel)*. – Springer Berlin Heidelberg, 2021. – Vol. 27. – No. 8. – P. 3477–3487.
59. Ahmad A.L., Farooqui U.R., Hamid N.A. Effect of graphene oxide (GO) on Poly(vinylidene fluoride-hexafluoropropylene) (PVDF-HFP) polymer electrolyte membrane // *Polymer (Guildf)*. – Elsevier Ltd, 2018. – Vol. 142. – P. 330–336.
60. Shanmugaraj P., Swaminathan A., Ravi R.K., Dasaiah M., Senthil Kumar P., Sakunthala A. Preparation and characterization of porous PVdF-HFP/graphene oxide composite membranes by solution casting technique // *J. Mater. Sci. Mater. Electron.* – Springer US, 2019. – Vol. 30. – No. 22. – P. 20079–20087.

61. Ahmad A.L., Farooqui U.R., Hamid N.A. Porous (PVDF-HFP/PANI/GO) ternary hybrid polymer electrolyte membranes for lithium-ion batteries // RSC Adv. – Royal Society of Chemistry, 2018. – Vol. 8. – No. 45. – P. 25725–25733.
62. Xin Y., Yu Z., Soomro R.A., Sun N. Facile Synthesis of Polyacrylic Acid/Graphene Oxide Composite Hydrogel Electrolyte for High-Performance Flexible Supercapacitors // Coatings – 2023. – Vol. 13. – No. 2. – P. 382.
63. Kumar S., Yadav P.K., Prakash R., Santra A., Maiti P. Multifunctional graphene oxide implanted polyurethane ionomer gel electrolyte for quantum dots sensitized solar cell // J. Alloys Compd. – 2022. – Vol. 922. – P. 166121.

## ЭНЕРГИЯ САҚТАУ ҚҰРЫЛҒЫЛАРЫН ӨЗІРЛЕУДЕ КӨМІРТЕКТІ НАНОМАТЕРИАЛДАР НЕГІЗІНДЕГІ ГЕЛЬ-ПОЛИМЕРЛІ ЭЛЕКТРОЛИТТЕРДІ ҚОЛДАНУ – ШАҒЫН ШОЛУ

А. А. Машенцева<sup>1,2\*</sup>, А. Ә. Алманов<sup>1,2</sup>, А. Н. Айманова<sup>1</sup>, А. М. Жұмабаев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> ҚР ЭМ «Ядролық физика институты» РМК, Алматы, Қазақстан

<sup>2</sup> «Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті» КеАҚ, Астана, Қазақстан

\* Байланыс үшін E-mail: a.mashentseva@inp.kz

Қазіргі уақытта қоғам алдында тұрған өзекті мәселелердің бірі шектеулі, жоғары ластаушы қазба отындарын пайдаланатын қолданыстағы энергетикалық жүйені таза және сарқылмайтын тұрақты көздерге негізделген жаңа тұжырымдамамен ауыстыру болып табылады. Жаңартылатын энергия көздерін кең ауқымда пайдалану және іштен жанатын қозғалтқыштардан электромобильдерге көшу жақын болашақта ғылым мен техниканы дамытудың перспективалық стратегиясының бірі болып табылады. Жаңа буынның суперконденсаторларын (СК) әзірлеудегі ең перспективалық тәсілдердің бірі сұйық және қатты бейорганикалық электролиттерге қарағанда жанбайтындығы, электролиттердің ағып кетпеуі, тамаша икемділігі және өндірістегі төмен құны сияқты шешуші артықшылықтары бар қатты полимерлі электролиттерді пайдалану болып табылады. Бұл шағын шолуда СК-дың негізгі түрлерін, гель полимерлі электролиттерді (ГПЭ) әзірлеу үшін қолданылатын материалдар және көміртекті материалдардың бірнеше түрлеріне негізделген ГПЭ әзірлеуіндегі соңғы жетістіктер талқыланады.

**Түйін сөздер:** суперконденсаторлар, гель-полимерлі электролиттер, көміртекті наноматериалдар, полимерлер, конденсаторлардың сыйымдылығы, энергия сақтау құрылғылары, графен, графен оксиді.

## APPLICATION OF GEL POLYMER ELECTROLYTES BASED ON CARBON NANOMATERIALS FOR THE DEVELOPMENT OF ENERGY STORAGE DEVICES – MINI REVIEW

A. A. Mashentseva<sup>1,2\*</sup>, A. A. Almanov<sup>1,2</sup>, A. N. Aimanova<sup>1</sup>, A. M. Zhumabayev<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> RSE “Institute of Nuclear Physics” ME RK, Almaty, Kazakhstan

<sup>2</sup> L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

\* E-mail for contacts: a.mashentseva@inp.kz

Currently, one of the most pressing problems facing society is the replacement of the existing energy system based on the limited, highly polluting fossil fuels, with a fundamentally new concept based on clean and limitless sustainable sources. The large-scale use of renewable energy sources and the transition from internal combustion engines to electric vehicles is one promising strategy for the development of science and technology in the foreseeable future. One of the most promising approaches in the development of new generation supercapacitors (SC) is the use of solid polymer electrolytes with decisive advantages over liquid and solid inorganic electrolytes, including non-combustibility, no electrolyte leakage, excellent flexibility and low cost of production. This mini-review discusses the main types of SCs, the materials used to develop polymer gel electrolytes (GPEs), and recent advances in the development of GPEs based on various types of carbon materials.

**Keywords:** supercapacitors, gel polymer electrolytes, carbon nanomaterials, polymers, capacitance, energy storage devices, graphene, graphene oxide.