

Электрохимическая энергетика. 2026. Т. 26, № 3. С. 158–167

Electrochemical Energetics, 2026, vol. 26, no. 3, pp. 158–167

<https://energetica.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1608-4039-2026-26-3-158-167>, EDN: ZNYYZG

Научная статья

УДК 544.6.018.2

НАНОКОМПОЗИТНЫЙ ПОЛИМЕРНЫЙ ГЕЛЬ-ЭЛЕКТРОЛИТ ДЛЯ ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ЛИТИЙ-ОРГАНИЧЕСКОГО АККУМУЛЯТОРА

К. Г. Хатмуллина^{1,2}, А. В. Юдина¹, Г. Р. Баймуратова¹, Г. З. Тулибаева¹,
А. В. Мумятов¹, О. В. Ярмоленко^{1✉}

¹Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН
Россия, 142432, Московская обл., г. Черноголовка, пр-кт Акад. Семенова, д. 1

²Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт»
Россия, 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 17

Хатмуллина Кюнсылу Гумеровна, кандидат химических наук, ¹доцент кафедры химии и электрохимической энергетике; ²научный сотрудник лаборатории электрохимической динамики и электролитных систем, khatmullina_k@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7670-8839>

Юдина Алёна Владимировна, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории электрохимической динамики и электролитных систем, gvinok@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8037-5117>

Баймуратова Гузалия Рафиковна, кандидат химических наук, научный сотрудник лаборатории перспективных электродных материалов для химических источников тока, guzalia.rb@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8325-1002>

Тулибаева Галия Зайнетдиновна, кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории электрохимической динамики и электролитных систем, glukiss@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4564-9028>

Мумятов Александр Валерьевич, кандидат химических наук, заведующий лабораторией функциональных материалов для электроники и медицины, mumyatov@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4554-8630>

Ярмоленко Ольга Викторовна, доктор химических наук, заведующий лабораторией электрохимической динамики и электролитных систем, oyarm@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3088-8165>

Аннотация. Работа посвящена разработке прототипа твердотельного литиевого аккумулятора на основе нанокompозитного полимерного гель-электролита с введением до 50 мас.% ионной жидкости (тетрафторбората 1-этил-3-метилимидазолия), которая остается жидкой до $T_{\text{разл}} = 320^\circ\text{C}$. Для этой цели был выбран органический катодный материал – поли(фенилфеназин), в который при окислении функциональных групп интеркалируется тетрафторборатный анион. Показано, что при испытаниях в течение 100 циклов заряда-разряда прототип литий-органического аккумулятора имеет высокий средний потенциал 3.3 В при максимальной разрядной емкости 150 мА·ч/г в расчете на активное вещество катода при плотности тока С/4.

Ключевые слова: нанокompозитный полимерный гель-электролит, ионная жидкость, твердотельный литий-органический аккумулятор

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект № 124013000743-3 в рамках государственного задания ФИЦ ПХФ и МХ РАН (FFSG-2024-0008).

Для цитирования: Хатмуллина К. Г., Юдина А. В., Баймуратова Г. Р., Тулибаева Г. З., Мумятов А. В., Ярмоленко О. В. Нанокompозитный полимерный гель-электролит для твердотельного литий-органического аккумулятора // Электрохимическая энергетика. 2026. Т. 26, № 3. С. 158–167. <https://doi.org/10.18500/1608-4039-2026-26-3-158-167>, EDN: ZNYYZG

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

Nanocomposite polymer gel electrolyte for solid-state lithium-organic battery

K. G. Khatmullina^{1,2}, A. V. Yudina¹, G. R. Baymuratova¹, G. Z. Tulibaeva¹,
A. V. Mumyatov¹, O. V. Yarmolenko^{1✉}

¹Federal Research Center of Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry RAS

1 Ac. Semenov Ave., Moscow region, Chernogolovka 142432, Russia

²National Research University "Moscow Power Engineering Institute"

17 Krasnokazarmennaya St., Moscow 111250, Russia

Kyunsylu G. Khatmullina, khatmullina_k@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7670-8839>

Alena V. Yudina, gvinok@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8037-5117>

Guzaliya R. Baymuratova, guzalia.rb@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8325-1002>

Galiya Z. Tulibaeva, glukiss@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4564-9028>

Alexander V. Mumyatov, mumyatov@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4554-8630>

Olga V. Yarmolenko, oyarm@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3088-8165>

Abstract. The work is dedicated to the development of a prototype of a solid-state lithium battery based on the nanocomposite polymer gel-electrolyte with the introduction of up to 50 wt.% of the ionic liquid (1-ethyl-3-methylimidazolium tetrafluoroborate), which remains liquid up to the decomposition temperature of 320°C. For this purpose, the organic cathode material—poly(phenylphenazine) was chosen, into which a tetrafluoroborate anion was intercalated during oxidation of their functional groups. It was shown that during 100 charge-discharge cycles, the prototype of the lithium-organic battery has a high average potential of 3.3 V with the maximum discharge capacity of 150 mAh/g based on the active substance of the cathode at the current density of C/4.

Keywords: nanocomposite polymer gel electrolyte, ionic liquid, solid-state lithium-organic battery

Acknowledgments. The work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. 124013000743-3) as part of the state assignment of FRC of PCP and MC RAS (FFSG-2024-0008).

For citation: Khatmullina K. G., Yudina A. V., Baymuratova G. R., Tulibaeva G. Z., Mumyatov A. V., Yarmolenko O. V. Nanocomposite polymer gel electrolyte for solid-state lithium-organic battery. *Electrochemical Energetics*, 2026, vol. 26, no. 3, pp. 158–167 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1608-4039-2026-26-3-158-167>, EDN: ZNYYZG

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

ВВЕДЕНИЕ

Разработка твердотельных литий-металлических аккумуляторов (ЛМА) с неорганическим катодом началась давно и достигла определенных успехов [1,2], но в настоящее время возрождаются работы по литиевым аккумуляторам с органическим катодом [3–5].

Органические катоды имеют такие преимущества, как высокая теоретическую емкость, обычно > 400 мА·ч/г, легкий вес и гибкость, экологичность в утилизации [3–5]. Но существуют и недостатки, а именно низкая электронная проводимость и растворимость в жидких органических электролитах. Их решают введением в состав катода до 50 мас.% проводящей сажи, а растворимость подавляют заменой «малых молекул» активного материала катода на редокс-полимеры или заменой жидкого электролита на твердый полимерный [6, 7].

Данная работа посвящена разработке прототипа твердотельного литий-органиче-

ского аккумулятора с твердым полимерным электролитом, в состав которого входит термостабильная ионная жидкость.

Созданию электролитов на основе ионных жидкостей в последние годы уделяется большое внимание в связи с такими свойствами, как термическая стабильность, негорючесть и незначительное давление паров, и высокими электрохимическими характеристиками (стабильностью и проводимостью) [8]. Особо выделяется среди них ионная жидкость (ИЖ) (тетрафторбората 1-этил-3-метилимидазолия, EMIBF₄), которая не имеет температуры кипения и после перегрева жидкости начинает разлагаться при 320°C.

Кроме того, существует направление композитных полимерных электролитов, содержащих наноразмерные неорганические материалы (SiO₂, TiO₂, Al₂O₃, CeO₂ и др.), которые наряду с улучшением механических свойств также улучшают электрохимические свойства и термостабильность [9].

В работах [10–15] нами были разработаны электролиты на основе пяти компонентов, представляющих собой разные классы соединений (олигомер, соли лития, апротонная ионная жидкость, апротонный органический растворитель, неорганические порошки $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$). Создание полимерной сетчатой архитектуры одновременно с ионным и молекулярным дизайном позволило получить состав сетчатого нанокompозитного полимерного гель-электролита (НПЭ) на основе диакрилата полиэтиленгликоля (ПЭГДА), который при содержании 30 мас.% удерживает до 50 мас.% ионной жидкости EMIBF_4 и до 10 мас.% наночастиц SiO_2 и TiO_2 , что позволило наряду с высокой проводимостью получить высокую термостабильность электролита до 320°C за счет безопасных компонентов.

Испытания разработанного НПЭ с введением наночастиц SiO_2 в прототипе литий-органического аккумулятора с катодом *n*-типа [16] показали побочную реакцию образования дирадикалов из катиона имидазолия [11]. Диапазон работы органического катода на основе соли лития производного тетраазапентацена с карбонильными группами составляет 0.7–3.5 В отн. Li/Li^+ . При заряде он восстанавливался, а при разряде – окислялся. В катодный материал при этом внедрялся катион лития. Побочная реакция восстановления катиона 1-этил-3-метилимидазолия происходила в районе 1.0 В отн. Li/Li^+ . Из-за высокой плотности заряда имидазольевого кольца он легко принимает электрон, образуя радикалы, которые затем димеризуются, что и было показано электрохимическими и спектральными методами анализа состава пленки НПЭ.

В данной работе предлагается новый подход к созданию твердотельного литий-органического аккумулятора, а именно использование для НПЭ на основе ионной жидкости катода поли(фенилфеназина) [17], диапазон рабочих потенциалов которого лежит намного выше (2.5–4.5 В отн. Li/Li^+), что свойственно большинству катодов *p*-типа. При использовании органического ка-

тода на основе полифенилфеназина (ПФФ) в среде ионной жидкости EMIBF_4 процессы анодного окисления приобретают принципиально иной характер. Вместо деструктивного разрушения электролита здесь протекает обратимое легирование (*p*-допирование) полимера анионами электролита, сопряженное с высокой электрохимической стабильностью интерфейса. В случае использования НПЭ на основе EMIBF_4 молярное содержание анионов BF_4^- в 7 раз будет превосходить содержание катиона лития.

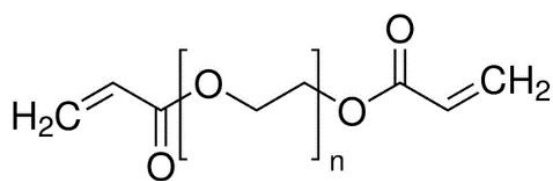
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Компоненты нанокompозитных полимерных электролитов

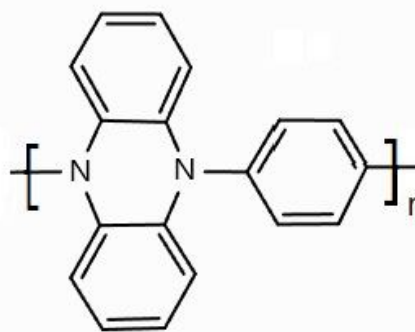
Диакрилат полиэтиленгликоля (ПЭГДА) (Sigma Aldrich, США, $M_n = 700$, $T_{\text{пл}} = 12\text{--}17^\circ\text{C}$) (рис. 1, а). Перекись бензоила (ПБ) (Sigma Aldrich, США) очищали перекристаллизацией из хлороформа с последующей осушкой при комнатной температуре сначала на воздухе, затем в вакууме. LiBF_4 (Sigma Aldrich, США, степень чистоты 99%). Тетрафторборат 1-этил-3-метилимидазолия (EMIBF_4) (Sigma Aldrich, США, степень чистоты $\geq 98\%$). Этиленкарбонат (ЭК) (Sigma Aldrich, США, $T_{\text{melt}} = 36^\circ\text{C}$, степень чистоты 99%, вода $< 0.005\%$). Наночастицы TiO_2 (Sigma Aldrich, США, марки Evonik Aeroxide P25, площадь поверхности по BET до $65 \text{ м}^2/\text{г}$, средний размер частиц 21 нм, степень чистоты $\geq 99.5\%$) сушили в термошкафу при 100°C до постоянного веса.

Синтез образцов полимерного электролита

Нанокompозитные полимерные гель-электролиты синтезировали путем радикальной полимеризации в присутствии 1 мас.% ПБ. Состав полимеризуемой смеси был следующим: ПЭГДА, LiBF_4 , ЭК, EMIBF_4 , TiO_2 . Смесь отверждали в стеклянном герметичном реакторе размером $80 \times 120 \text{ мм}$ с заданной толщиной (0.25 мм), так как реакцию радикальной полимеризации ингибирует кислород воздуха. По данным кинетики поли-



a/a



б/б

Рис. 1. Структура: *a* – диакрилата полиэтиленгликоля, *б* – звена поли(фенилфеназина)

Fig. 1. Structure: *a* – of polyethylene glycol diacrylate, *b* – of a poly(phenylphenazine) unit

меризации, был выбран следующий режим отверждения: 60°C – 3 ч, 70°C – 1 ч, 80°C – 1 ч [10]. В итоге получали пленки белого цвета толщиной ~0.25 мм.

Компоненты электрохимических ячеек

Органический катодный материал поли(N-фенил-5,10-дигидро-феназин) (ПФФ, рис. 1, б) был синтезирован по методике, опубликованной в работе [18]. В качестве электроактивной добавки в катодный материал использовали углерод марки Timcal Super C65 (MTI Corp., США), размер частиц 60 мкм. В качестве полимерного связующего – поливинилидендифторид (ПВДФ) марки HSV 900 (Kynar Flex, Франция). В качестве добавки, структурирующей органический катод [19], использовали наночастицы SiO₂ марки Evonik Аэросил 380 (Sigma Aldrich, США), площадь поверхности по BET 380 м²/г, средний размер частиц 7 нм. Таким образом, катод состоял из 50 мас.% ПФФ, 40 мас.% углерода, 5 мас.% ПВДФ, 5 мас.% SiO₂.

Катодную массу готовили при растворении ПВДФ в N-метилпирролидоне из расчета 2.5 мл растворителя на 1 г катодного материала, перемешивая смесь при 50°C на магнитной мешалке до полного растворения полимера. В бюкс с полученным раствором засыпали предварительно перетертую в ступке смесь порошка ПФФ, углерода и SiO₂. Смесь перемешивали в течение 12 ч

при 20°C на магнитной мешалке, полученную катодную массу наносили на графитированную Al-фольгу (*d* = 20 мкм, MTI Corp., США) методом Doctor Blade (аппарат для нанесения покрытий Gelon Lib Group Co, Китай). После испарения растворителя при 160°C в течение 6 ч. «сухие» катоды прессовали на вальцах. Далее катоды сушили для удаления растворителя в течение 6 ч при температуре 120°C в вакуумном шкафу.

При сборке дискового элемента CR2032 в качестве анода использовали металлический литий круглой формы диаметром 16 мм, на который помещали пленку полимерного электролита такого же размера. После этого поверхность электродов пропитывали жидким электролитом 1 М LiTFSI в 1,3-диоксолан/диметоксиэтан (ДОЛ/ДМЭ) (1/1 об.) в количестве 10 мкл для пропитки пористого катода, а также модификации поверхности металлического лития, который, как показано в работе [14], создает переходный слой с меньшей энергией сольватации лития, чем в НПЭ на основе ИЖ. Сборку ячеек проводили в аргоновом перчаточном боксе MBraun (Германия).

Электрохимические характеристики макетов источника тока оценивали с помощью системы тестирования аккумуляторов BTS-5V10mA (Neware Technology Ltd., Китай) путем проведения циклов заряда/разряда в гальваностатическом режиме.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве наноккомпозитного полимерного электролита использовали пленки лучшего состава НПЭ, оптимизированного в работе [10], с мольным содержанием компонентов ПЭГДА/LiBF₄/EMIBF₄/ЭК = 1/1/6/4, при этом массовое содержание компонентов составляло 30/4/51/12 с введением 2 мас.% TiO₂.

Собраны и испытаны прототипы литиевых аккумуляторов с органическим катодом. В качестве катодного материала *p*-типа был выбран поли(фенилфеназин) [20] со N,N'-замещенными звеньями дигидрофеназина, которые подвергаются обратимому двухэлектронному окислению при относительно высоких потенциалах (> 3 В относи-

тельно Li⁺/Li) (рис. 2). Теоретическая разрядная емкость составляет 206 мА·ч/г (2ē).

Были проведены квантово-химические расчеты структуры полимера ПФФ и его окисленной формы методом функционала плотности с использованием неэмпирического обменно-корреляционного функционала Perdew-Burke-Ernzerof (PBE) [21] и расширенного базиса H [6s2p/2s1p], C, N, F, B[10s7p3d/3s2p1d], Li [10s7p3d/4s3p1d]. Для всех расчетов, проведенных в Объединенном суперкомпьютерном центре Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», использовался программный пакет Природа [22]. Результаты квантово-химического моделирования представлены на рис. 3.

Из рис. 3, а, б видно, что структура имеет линейное строение, причем феназиновые

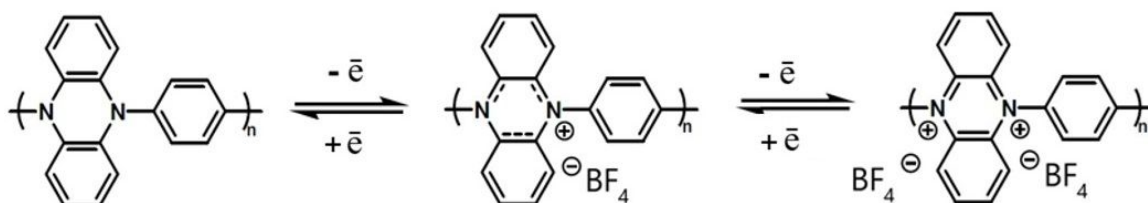


Рис. 2. Окислительно-восстановительная реакция поли(фенилфеназина)

Fig. 2. Redox reaction of poly(phenylphenazine)

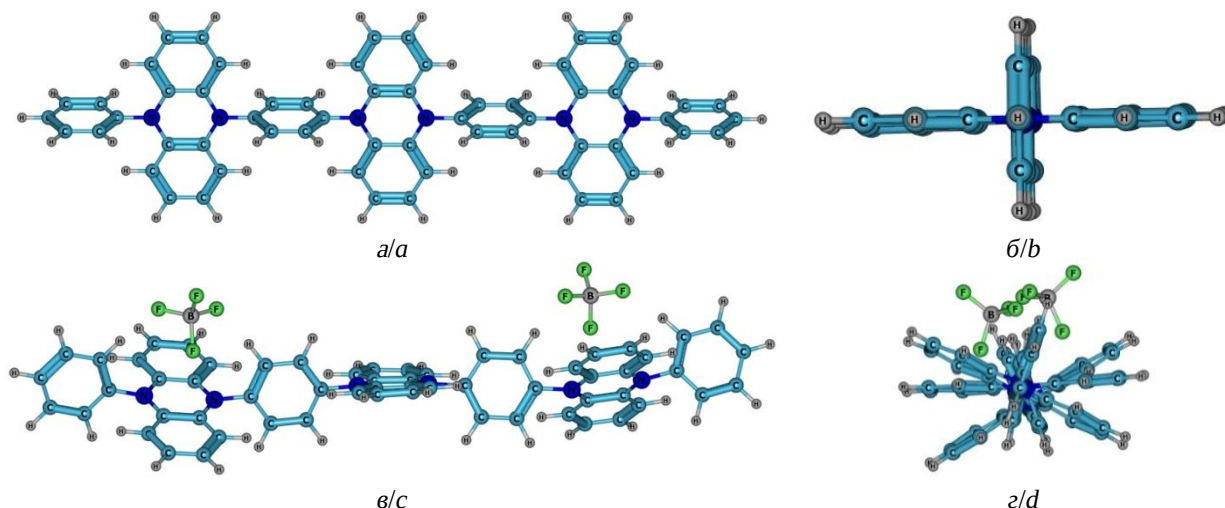


Рис. 3. Квантово-химическая модель структуры полимера ПФФ и его окисленной формы: а – исходный полимер, б – вид сбоку, в – окисленная форма полимера, г – вид сбоку

Fig. 3. Quantum-chemical model of the structure of the PPP polymer and its oxidized form: a – original polymer, b – side view, c – oxidized form of the polymer, d – side view

фрагменты лежат в одной плоскости, а фенильные – перпендикулярно. Реакция внедрения двух анионов BF_4^- идет с затратой энергии 184.6 ккал/моль. Также видно, что цепь полимера скручивается (рис. 3, в, г), однако при деинтеркаляции скелет полимерной цепи выравнивается и приобретает первоначальную структуру (см. рис. 3, а, б). Надо понимать, что теоретические расчеты изо-

лированной цепи полимера не отображают поведение ПФФ в композитном катоде, где все процессы скрутки-раскрутки затруднены. Кроме того, при интеркаляции анионов BF_4^- или TFSI^- их часть может не выйти из скрученных цепей, что свойственно для редокс активных полимеров.

Ячейки Li/НПЭ/ПФФ были исследованы при плотности тока $C/10$ (рис. 4) в течение

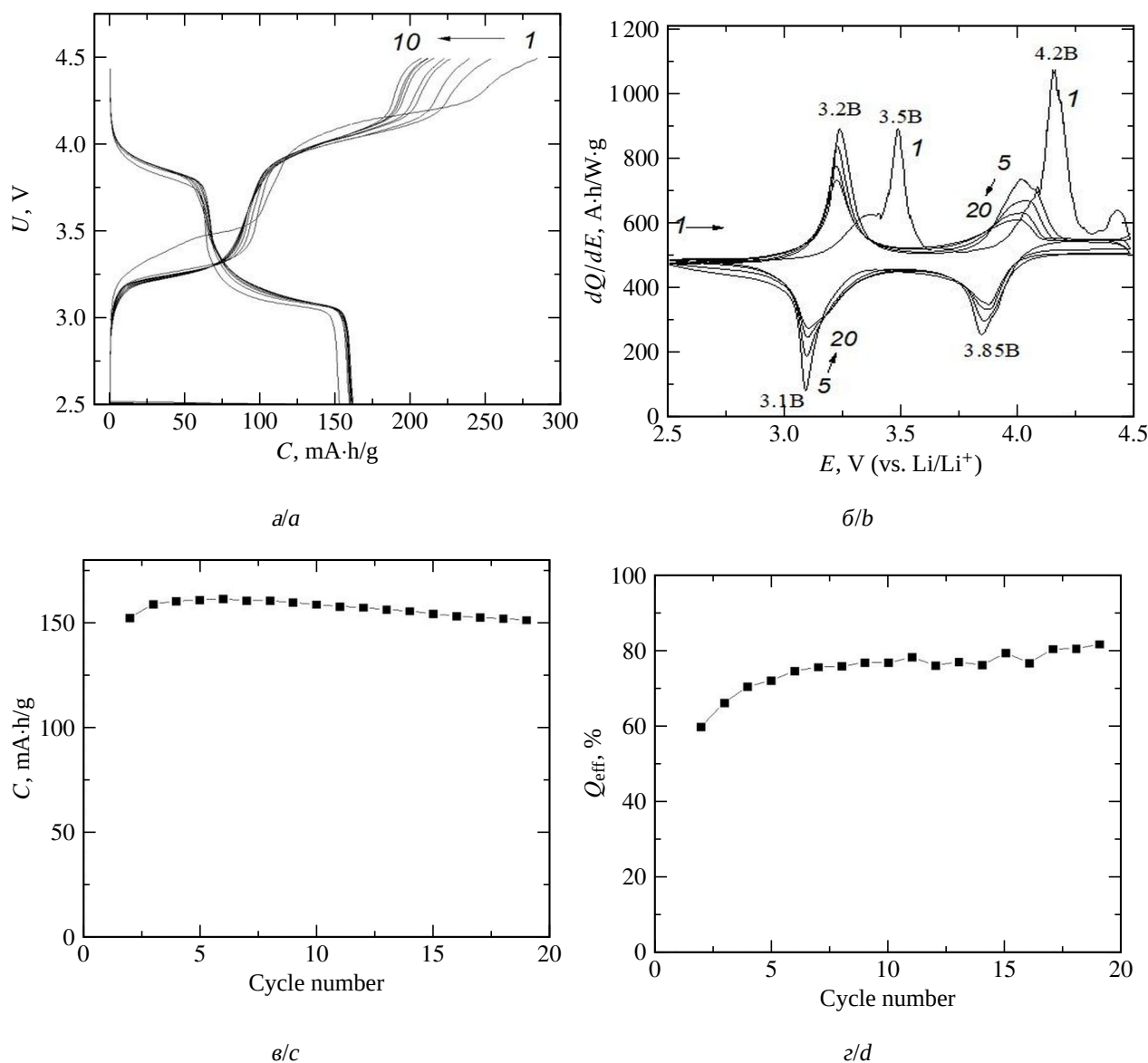


Рис. 4. Характеристики Li/НПЭ/ПФФ ячеек: а – профили заряда-разряда при плотности тока $C/10$ (20 мА/г) для первых 10 циклов; б – зависимость дифференциальной емкости (dQ/dE) от напряжения; в – емкость; г – кулоновская эффективность для 20 циклов в интервале напряжений 2.5–4.5 В при 25°C

Fig. 4. Characteristics of Li/NPE/pPhPz cells: а – charge-discharge profiles at a current density of $C/10$ (20 mA/g) for the first 10 cycles; б – dependence of differential capacity (dQ/dE) on voltage; в – capacity; г – Coulombic efficiency for 20 cycles in the voltage range of 2.5–4.5 V at 25°C

ние 20 циклов, а затем ячейки другой сборки были исследованы при плотности тока $C/4$ в течение 100 циклов. При этом зависимость потенциала (E) от dQ/dE приведена только для медленной скорости $C/10$, так как при больших скоростях данные не корректны.

Профили заряда-разряда Li/НПЭ/ПФФ ячеек при плотности тока $C/10$ показаны

на рис. 4, а. При заряде аккумулятора катод окисляется, при этом внедряется сначала анион TFSI^- , на последующих циклах – анион BF_4^- , при разряде ПФФ восстанавливается (см. рис. 2), на литии при этом происходит реакция $\text{Li}^+ + \bar{e} \leftrightarrow \text{Li}^0$.

Из рис. 4, а видно, что осуществляется двухступенчатый редокс-переход, как показано на рис. 2. При медленной скорости

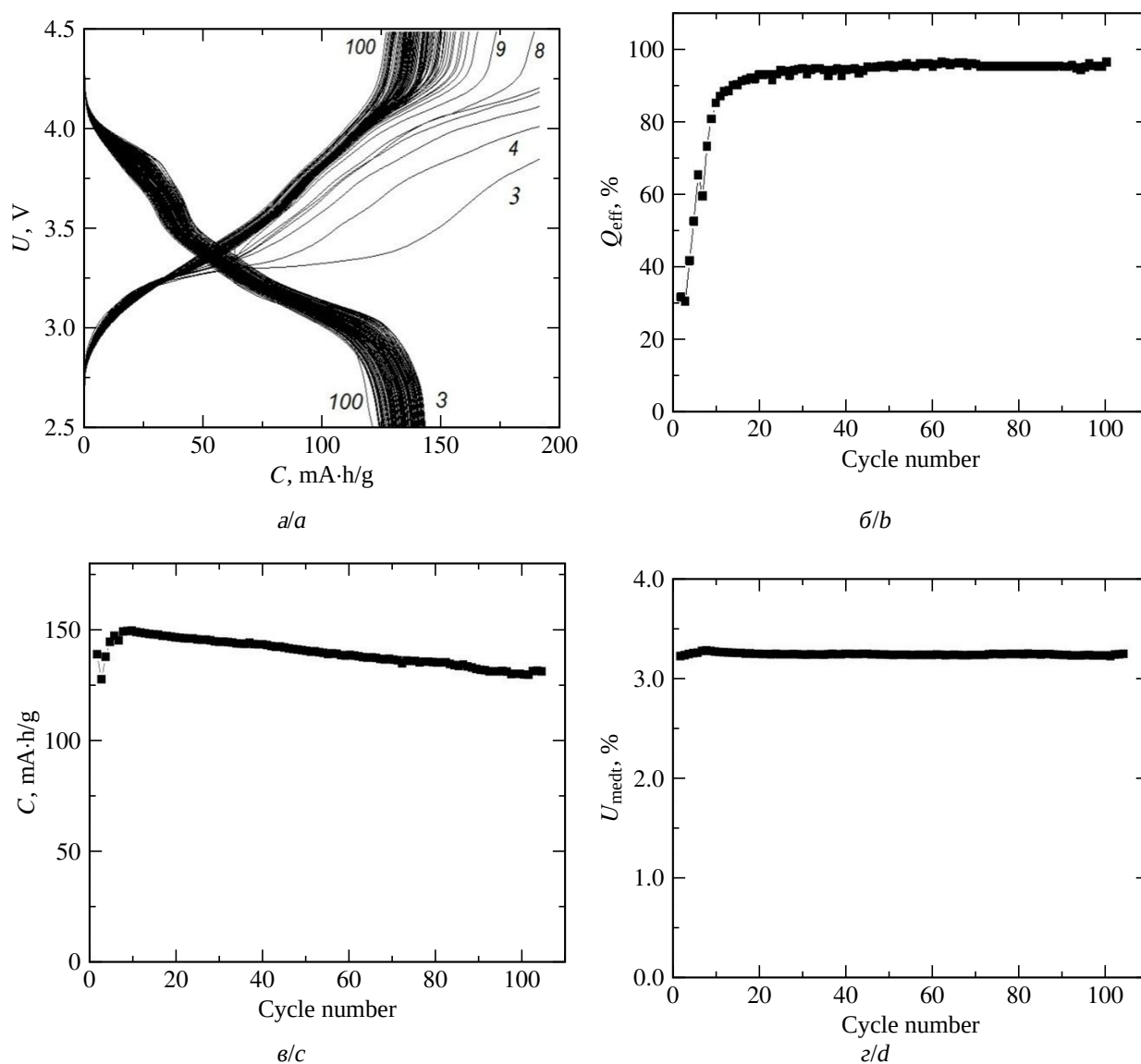


Рис. 5. Характеристики Li/НПЭ/ПФФ ячеек: а – профили заряда – разряда; б – кулоновская эффективность; в – зависимость эффективной емкости; г – среднего напряжения ячейки в течение 100 циклов при плотности тока $C/4$ (50 мА/г) в интервале напряжений 2.5–4.5 В при 25°C

Fig. 5. Characteristics of Li/NPE/pPhPz cells: а – charge-discharge profiles; б – Coulombic efficiency; в – dependence of effective capacity on cycle number; г – average cell voltage during 100 cycles at the current density of $C/4$ (50 mA/g) in the voltage range of 2.5–4.5 V at 25°C

C/10 плато разряда/разряда более пологое и разрядная емкость достигает 160 мА·ч/г.

На рис. 4, б приведены зависимости дифференциальной емкости (dQ/dE) от потенциала (E), где Q – заряд (мА·ч). Данная зависимость показывает, как изменяется заряд аккумулятора (Q) относительно потенциала (E) в процессе заряда-разряда. Для наглядности приведены данные для 1, 5, 10, 15 и 20 циклов.

Видно, что первый полуцикл от 2.5 до 4.5 В имеет 2 острых пика при 3.5 и 4.2 В. Это указывает, что встраивание аниона TFSI[−] в «чистый» ПФФ происходит очень быстро и при высоких потенциалах. Затем структура полимерных цепей ПФФ уже не возвращается в исходное положение, и дальнейшие редокс-переходы происходят при потенциалах −3.1/3.2 В и при −3.85/4.0 В, причем первые пики более острые (быстрые переходы), а второй (широкий пик) свидетельствует о более медленном постепенном внедрении анионов BF₄[−].

Такое поведение присуще всем полимерным редокс-материалам, так как в твердой фазе легко внедряется только первый ион (катион или анион), а последующий – труднее, тем более, что квантово-химические расчеты показали значительную деформацию структуры ПФФ во время редокс-реакции.

Из рис. 4, б также видно, что от цикла к циклу высота пиков и, соответственно, площади под ними уменьшаются, таким образом, сокращается количество материала, вовлеченного в электродную реакцию.

На рис. 5 приведены характеристики Li/НПЭ/ПФФ ячеек при плотности тока C/4 в течение 100 циклов. При такой плотности тока система Li/НПЭ/ПФФ на первых 10 циклах показала большую необратимую емкость (рис. 5, а) (1-й и 2-й циклы не приведены, так как их длительность составляла 3–5 суток, вследствие заторможенного внедрения объемного аниона TFSI[−]

на больших скоростях тока). Об этом также свидетельствует низкая кулоновская эффективность на первых 10 циклах (рис. 5, б).

После формировки материала он выходит на более стабильную работу, причем кулоновская эффективность достигает 95%, в то время как для плотности тока C/10 всего 80%.

При циклировании ячеек при плотности тока C/4 (50 мА/г) система Li/НПЭ/ПФФ работает хуже, разрядная емкость уменьшается с 150 до 130 мА·ч/г за 100 циклов (рис. 5, в), но при этом среднее напряжение ячейки стабильно и достигает 3.3 В относительно Li/Li⁺.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В прототипах литий-органических аккумуляторов с катодом *p*-типа на основе поли(фенилфеназина) испытан нанокомпозитный полимерный гель-электролит состава ПЭГДА, LiBF₄, EMIBF₄, ЭК (1/1/6/4 моль) с 2 мас.% TiO₂. Был использован режим «катион-анионного разделения»: при заряде анионы TFSI[−] и BF₄[−] идут в катод ПФФ, а катионы Li⁺ восстанавливаются на аноде, осаждаясь в виде металлического лития. При разряде процессы идут в обратном направлении. Катионы EMIB⁺ в самом транспорте заряда практически не участвуют, выполняя роль стабильной жидкой матрицы.

Получена емкость 150 мА·ч/г при плотности тока C/4, при этом среднее напряжение достигает 3.3 В относительно Li/Li⁺, что является лучшим показателем для систем с разработанными электролитами на основе ПЭГДА, ИЖ, ЭК и наночастиц SiO₂ и TiO₂ для прототипов литий-органических аккумуляторов, а также для систем Li/LiFePO₄ [10, 12]. Это исследование показывает, что органические редокс-активные полимеры *p*-типа являются весьма перспективными материалами для разработки перезаряжаемых источников тока следующего поколения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Abraham K. M., W. A. van Schalkwijk, Hasoun J. *Lithium Batteries. Advanced Technologies and Applications*. Ed. by B. Scrosati. Wiley, 2018. 390 p.
2. Manthiram A., Yu X., Wang S. Lithium battery chemistries enabled by solid-state electrolytes. *Nature Reviews Materials*, 2017, vol. 2, art. 16103. <https://doi.org/10.1038/natrevmats.2016.103>
3. Kim J., Kim Y., Yoo J., Kwon G., Ko Y., Kang K. Organic batteries for a greener rechargeable world. *Nature Reviews Materials*, 2023, vol. 8, pp. 54–70. <https://doi.org/10.1038/s41578-022-00478-1>
4. Poizot P., Gaubicher J., Renault S., Dubois L., Liang Y., Yao Y. Opportunities and challenges for organic electrodes in electrochemical energy storage. *Chemical Reviews*, 2020, vol. 120, pp. 6490–6557. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.9b00482>
5. Gu T., Zhou M., Huang B., Cao S., Wang J., Tang Y., Wang K., Cheng S., Jiang K. Advanced Li-organic batteries with super-high capacity and long cycle life via multiple redox reactions. *Chemical Engineering Journal*, 2019, vol. 373, pp. 501–507. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.05.062>
6. Song Z., Chen F., Martinez-Ibañez M., Feng W., Forsyth M., Zhou Z., Armand M., Zhang H. A reflection on polymer electrolytes for solid-state lithium metal batteries. *Nature Communications*, 2023, vol. 14, art. 4884. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-40609-y>
7. Lopez J., Mackanic D. G., Cui Y., Bao Z. Designing polymers for advanced battery chemistries. *Nature Reviews Materials*, 2019, vol. 4, pp. 312–330. <https://doi.org/10.1038/s41578-019-0103-6>
8. Simonetti E., Carewska M., Maresca G., Francesco M. D., Appetecchi G. B. Highly conductive, ionic liquid-based polymer electrolytes. *Journal of The Electrochemical Society*, 2016, vol. 164, pp. A6213–A6219. <https://doi.org/10.1149/2.0331701jes>
9. Boaretto N., Meabe L., Martinez-Ibañez M., Armand M., Zhang H. Review—polymer electrolytes for rechargeable batteries: From nanocomposite to nanohybrid. *Journal of The Electrochemical Society*, 2020, vol. 167, art. 070524. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ab7221>
10. Slesarenko N. A., Chernyak A. V., Khatmullina K. G., Baymuratova G. R., Yudina A. V., Tulibaeva G. Z., Shestakov A. F., Volkov V. I., Yarmolenko O. V. Nanocomposite Polymer Gel Electrolyte Based on TiO₂ Nanoparticles for Lithium Batteries. *Membranes*, 2023, vol. 13, art. 776. <https://doi.org/10.3390/membranes13090776>
11. Khatmullina K. G., Slesarenko N. A., Chernyak A. V., Baymuratova G. R., Yudina A. V., Berezin M. P., Tulibaeva G. Z., Slesarenko A. A., Shestakov A. F., Yarmolenko O. V. New Network Polymer Electrolytes Based on Ionic Liquid and SiO₂ Nanoparticles for Energy Storage Systems. *Membranes*, 2023, vol. 13, iss. 6, art. 548. <https://doi.org/10.3390/membranes13060548>
12. Slesarenko N. A., Chernyak A. V., Khatmullina K. G., Yudina A. V., Slesarenko A. A., Chernyaev D. A., Yarmolenko O. V. The Ion Transport Properties in Ionic-Liquid-Added Polymer Gel Electrolytes for Lithium Electrochemical Systems. *Russian Journal of Electrochemistry*, 2025, vol. 61, no. 6, pp. 274–285. <https://doi.org/10.1134/S1023193525600282>
13. Slesarenko N. A., Chernyak A. V., Volkov V. I., Khatmullina K. G., Yudina A. V., Tulibaeva G. Z., Slesarenko A. A., Baymuratova G. R., Shestakov A. F., Yarmolenko O. V. The role of diglyme and tetraglyme in the formation of ion transport pathways in gel electrolytes based on polyethylene glycol diacrylate. *Mendeleev Communications*, 2025, vol. 35, pp. 746–748. <https://doi.org/10.71267/mencom.7792>
14. Baymuratova G. R., Yudina A. V., Khatmullina K. G., Slesarenko A. A., Yarmolenko O. V. The Effect of TiO₂ Nanoparticles and the Liquid-Phase Therapy on the Resistance of the Interphase Lithium/Polymer Electrolyte with the Introduction of Ionic Liquid. *Russian Journal of Electrochemistry*, 2024, vol. 60, no. 10, pp. 807–812. <https://doi.org/10.1134/S102319352470037X>
15. Yarmolenko O. V., Khatmullina K. G., Baymuratova G. R., Emelianov N. A., Baimuratova R. K., Yudina A. V. Influence of TiO₂ and SiO₂ Nanoparticles on the Properties of Polymer Electrolytes Based on Ionic Liquid and Lithium Salt. *High Energy Chemistry*, 2023, vol. 57, no. 2, pp. S375–S382. <https://doi.org/10.1134/S0018143923080258>
16. Dantas R., Ribeiro C., Souto M. Organic electrodes based on redox-active covalent organic frameworks for lithium batteries. *Chemical Communications*, 2024, vol. 60, pp. 138–149. <https://doi.org/10.1039/D3CC04322C>
17. Baskoro F., Sharma S. U., Lammiduk Lubis A., Yen H.-J. Recent advances in p-type polymeric electrode materials towards high-voltage 4.0 V-class organic lithium-ion batteries (Review Article). *Journal Materials Chemistry A*, 2025, vol. 13, pp. 1552–1589. <https://doi.org/10.1039/D4TA06028H>
18. Kapaev R. R., Obrezkov F. A., Stevenson K. J., Troshin P. A. Metal-ion batteries meet supercapacitors: High capacity and highrate capability rechargeable batteries with organic cathodes and Na/K alloy anode. *Chemical Communications*, 2019, vol. 55, pp. 11758–11761. <https://doi.org/10.1039/C9CC05745E>
19. Yudina A. V., Baymuratova G. R., Mumyatov A. V., Tulibaeva G. Z., Kabachkov E. N., Troshin P. A., Shestakov A. F., Yarmolenko O. V. Features of the SiO₂ addition to the operation of a polyimide cathode in a sodium battery. *Mendeleev Communications*, 2022, vol. 32, pp. 655–657. <https://doi.org/10.1016/j.mencom.2022.09.029>

20. Gannett C. N., Peterson B. M., Melecio-Zambrano L., Trainor C. Q., Fors B. P., Abruña H. D. Performance Optimization and Fast Rate Capabilities of Novel Polymer Cathode Materials through Balanced Electronic and Ionic Transport. *Journal Materials Chemistry A*. 2021, vol. 9, art. 5657. <https://doi.org/10.1039/d0ta11099j>

21. Perdew J. P., Burke K., Ernzerhof M. Generalized gradient approximation made simple. *Physical Review Letters*, 1996, vol. 77, pp. 3865–3868. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.77.3865>

22. Laikov D. N. Fast Evaluation of Density Functional Exchange-Correlation Terms Using the Expansion of the Electron Density in Auxiliary Basis Sets. *Chemical Physics Letters*, 1997, vol. 281, pp. 151–156.

Поступила в редакцию 21.07.2026; одобрена после рецензирования 06.08.2026;
принята к публикации 17.08.2026; опубликована 30.09.2026
The article was submitted 21.07.2026; approved after reviewing 06.08.2026;
accepted for publication 17.08.2026; published 30.09.2026