

УДК 544.6.018.47-036.5

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-12-307-76-84

Научная статья

Original article

*А. Р. Ревенков, К. С. Харитонов, В. В. Климов, Е. С. Бочкарев
Е. В. Брюзгин, А. Н. Гайдадин, А. В. Навроцкий*

**ТВЕРДЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ ЭЛЕКТРОЛИТЫ НА ОСНОВЕ
ПОЛИГЛИЦИДИЛМЕТАКРИЛАТА, ПОЛУЧЕННЫЕ УФ-ПОЛИМЕРИЗАЦИЕЙ**

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

✉ Артем Романович Ревенков, Ar-rev1@mail.ru

Аннотация. Предложено использование УФ-индуцированной радикальной полимеризации для in-situ получения твердых полимерных электролитов на основе полиглицидилметакрилата (ПГМА) и его смесевых композиций с поливинилиденфторидом (ПВДФ) в присутствии литиевой соли бис(фторсульфонил)имида лития (LiFSI). Исследовано влияние концентрации фотоинициатора фенилбис(2,4,6-триметилбензоил)фосфиноксида (ВАРНО) и времени УФ-облучения на степень конверсии мономера. Методом ИК-спектроскопии подтверждено сохранение эпоксидных групп в боковых цепях полимера и формирование координационных связей кислородсодержащих групп полимерной матрицы с солью лития. Для ТПЭ на основе ПГМА с солью LiFSI установлена максимальная ионная проводимость 4×10^{-5} См/см при комнатной температуре, а для композитной системы с добавлением ПВДФ до 10^{-3} См/см.

Ключевые слова: полиглицидилметакрилат, поливинилиденфторид, твердые полимерные электролиты, ионная проводимость, литий-полимерные аккумуляторы, УФ-полимеризация

Финансирование: исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект № FZUC-2023-0003 на основании соглашения № 075-03-2023-055 от 13.01.2023).

Для цитирования: Ревенков А. Р., Харитонов К. С., Климов В. В., Бочкарев Е. С., Брюзгин Е. В., Гайдадин А. Н., Навроцкий А. В. Твердые полимерные электролиты на основе полиглицидилметакрилата, полученные УФ-полимеризацией. Известия ВолгГТУ. 2025; 12(307): 76–84. DOI: 10.35211/1990-5297-2025-12-307-76-84.

Информация об авторах:

Артем Романович Ревенков – аспирант ВолгГТУ

e-mail: ar-rev1@mail.ru

Катерина Сергеевна Харитонов – магистр 2 курса ВолгГТУ

e-mail: kharitonovakaterina3274@gmail.com

Виктор Викторович Климов – канд. техн. наук, доцент кафедры ТВБМ ВолгГТУ

<http://orcid.org/0000-0003-3468-7528>

WOS Research ID K-7485-2015

Scopus Author ID 56427609000

e-mail: vicklimov@gmail.com

Евгений Сергеевич Бочкарев – канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры ТВБМ ВолгГТУ

<http://orcid.org/0000-0002-2343-1562> Scopus Author ID 57222574440

e-mail: bochkarev_es@vstu.ru

Евгений Викторович Брюзгин – д-р техн. наук, профессор кафедры ТВБМ ВолгГТУ

<http://orcid.org/0000-0002-2930-1910> WOS Research ID L-9379-2015

Scopus Author ID 35572597900

e-mail: bryuzgin_e@mail.ru

Алексей Николаевич Гайдадин – канд. техн. наук, доцент кафедры ХТПЭ ВолгГТУ

<https://orcid.org/0000-0002-2192-5913> Scopus Author ID 6504726753

e-mail: lit@vstu.ru

Александр Валентинович Навроцкий – член-корреспондент РАН, д-р техн. наук, профессор, и. о. ректора ВолгГТУ

<http://orcid.org/0000-0001-9500-3607>

Scopus Author ID 57204594602

WOS Research ID N-4097-2015

e-mail: navrotskiy@vstu.ru

Вклад авторов:

А. Р. Ревенков – концептуализация, исследование, обработка данных, написание оригинального текста статьи.

К. С. Харитонов – исследование, обработка данных.

В. В. Климов – концептуализация, рецензирование и редактирование статьи.

Е. С. Бочкарев – концептуализация, рецензирование и редактирование статьи.

А. Н. Гайдадин – рецензирование и редактирование статьи.

Е. В. Брюзгин – концептуализация, привлечение финансирования, обзор и редактирование статьи.

А. В. Навроцкий – рецензирование и редактирование статьи, администрирование проекта, привлечение финансирования.

Введение

В современном мире наблюдается активное развитие отрасли производства литий-ионных аккумуляторов, а также рост популярности электротранспорта, который считается более экологически безопасным, чем традиционные автомобили с двигателем внутреннего сгорания [1–3]. Однако одной из главных проблем при использовании такого типа аккумуляторов является безопасность при их производстве, эксплуатации и утилизации, в связи с присутствием в их конструкции жидких органических растворителей [4]. Одним из возможных решений данной проблемы является замена жидких электролитов на твердые полимерные электролиты (ТПЭ) [5]. Помимо значительного снижения вероятности возгорания аккумулятора, ключевым преимуществом ТПЭ является подавление роста дендритов [24]. Кроме того, ТПЭ характеризуются высоким катионным числом переноса (более 0,4), что повышает эффективность работы аккумулятора [6]. Необходимо отметить, что главным недостатком ТПЭ является низкая ионная проводимость при комнатной температуре. Для сравнения, жидкие электролиты характеризуются ионной проводимостью порядка 10^{-2} См*см⁻¹, а самый популярный полимер для ТПЭ – полиэтиленоксид (ПЭО) около 10^{-6} – 10^{-8} См*см⁻¹, что ограничивает его широкое применение [5].

Перспектива создания аккумуляторов, использующих ТПЭ, в значительной степени зависит от разработки составов, сочетающих высокую ионную проводимость с механической стабильностью и электрохимической устойчивостью. Полимер, используемый в качестве основы для ТПЭ, должен иметь температуру стеклования, близкую к комнатной (25 °С), как можно меньшую степень кристалличности или быть полностью аморфным, обладать высокими физико-механическими характеристиками (прочность на растяжение – 5–20 МПа, модуль Юнга – 20–60 МПа [20; 21]), а также иметь в своем составе электроотрицательные функциональные группы [11]. Помимо грамотного подбора полимерной основы, существуют иные способы увеличения ионной проводимости: введение низкомолекулярного пластификатора (гель-полимерные электролиты) [12] или неорганических наполнителей [13], а также использование смесей полимеров [8].

Существует несколько путей получения ТПЭ в лабораторных условиях: метод горячего

прессования [15], метод набухания полимерной пленки в растворе литиевой соли [16], метод литья из расплава [17], а также самый популярный метод – формирование из растворов [18]. Однако все перечисленные методы содержат дополнительную стадию получения полимера, которая включает в себя процессы полимеризации, выделения и сушки. Продолжительность данных операций может занимать несколько суток, что является неэффективным в контексте реального производства.

Одним из путей решения данной проблемы является использование фотополимеризации для получения твердых и гель-полимерных электролитов, позволяющий существенно ускорить процесс их получения. Важно отметить, что применение фотополимеризации обеспечивает возможность проведения in-situ полимеризации электролита на электродах для улучшения межфазного контакта и повышения производительности аккумулятора. Для фотополимеризации необходимо несколько условий: мономер, фотоинициатор, а также источник света, обеспечивающий длину волны от 280 до 400 нм. В условиях конвейерного производства исключение промежуточных технологических этапов, таких как отдельная полимеризация мономеров, ведет к удешевлению конечного продукта и повышению его рентабельности.

Одним из перспективных кандидатов на роль полимера для матрицы ТПЭ является полиглицидилметакрилат (ПГМА), так как он содержит в себе необходимые электроотрицательные группы: карбоксильную и эпоксидную (оксирановую), а также гетероатом кислорода в эфирной связи и является аморфным полимером. Ранее мы продемонстрировали возможность получения ТПЭ на основе ПГМА [10], однако для изготовления полимера использовали растворную полимеризацию. В рамках данной работы мы предлагаем получать ТПЭ путем УФ-полимеризации ГМА в присутствии соли лития с дальнейшей сушкой пленок от растворителя. Целью данной работы является получение ТПЭ на основе ПГМА и его композиций с ПВДФ методом фотополимеризации, изучение морфологических особенностей и ионной проводимости.

Экспериментальная часть

Материалы. В работе использовали следующие материалы и реактивы: поливинилиденфторид (Solef 5130), глицидилметакрилат

(ГМА, Sigma-Aldrich, чист. 97 %), бис(фторсульфонил)имид лития (LiFSI, BLD-pharm, чист. 99,98 %), тетрагидрофуран (ТГФ, АО «Вектон», чист. 99,98 %), фенил-бис(2,4,6-триметилбензоил)-фосфиноксид (ВАРНО, Sigma-Aldrich, чист. 97 %).

Фотополимеризацию ГМА производили следующим способом. В виалу с ГМА добавляли навеску фотоинициатора в количестве 1,0; 1,5 и 2 масс. % по отношению к мономеру. Отдельно готовили 18 % раствор соли в ТГФ для лучшей ее сольватации и добавляли в виалы с мономером, чтобы массовое соотношение ГМА:LiFSI составило 75:25 соответственно. После тщательного перемешивания раствор отливали на фторопластовую подложку и проводили полимеризацию под УФ-излучением на расстоянии 20 см от светодиодной УФ-лампы в течение 5, 10 и 15 минут. После этого пленки сушили в термостате при 30 °С в течение 18 часов для удаления ТГФ.

При приготовлении смесевых ТПЭ отдельно растворяли ПВДФ в ТГФ. Массовое соотношение ПВДФ:ПГМА равно 3:1 соответственно. Все остальные соотношения и условия аналогичны фотополимеризации гомо-ГМА.

Определение остаточного содержания мономера. Навески полимеров 0,1 г помещали в виалы, добавляли 1 мл диэтилового эфира и оставляли на два часа при перемешивании. Затем в течение 30 минут содержимое виалы отстаивалось и далее удаляли растворитель. Оставшийся полимер сушили при пониженном давлении до постоянной массы и определяли остаточное содержание непрореагировавшего мономера по формуле:

$$n = (100 - \frac{m_{\text{пол}}}{m_{\text{мон}}}) * 100,$$

где $m_{\text{пол}}$ – масса полимера после сушки, г; $m_{\text{мон}}$ – масса мономера до полимеризации, г.

Выход полимера рассчитывали в процентах за вычетом n .

ИК-спектры с поверхности образцов снимали на ИК-Фурье-спектрометре ФТ-801 фирмы SIMEX (Россия) в диапазоне от 450 до 4000 см^{-1} с использованием методов однократного нарушенного полного внутреннего отражения и зеркально-диффузного отражения на универсальной приставке НПВО-ЗДО с элементом из селенида цинка и вкладышем ЗДО.

Морфологические особенности полимерных пленок исследовали методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на приборе Versa 3D (FEI, США), оснащенного энергодисперсионным (ЭДС) микроанализатором EDAX Apollo X в режиме низкого вакуума при давлении водяных паров в камере 10...80 Па, ускоряющем напряжении от 10 до 20 кВ, токе пучка от 13 пА до 4 нА.

Анализ ионной проводимости пленок ТПЭ проводили методом импедансной спектроскопии с помощью потенциостата/гальваностата PS-50, оснащенного модулем измерения импеданса FRA2. Для определения проводимости образцы помещали в ячейку между двумя электродами из нержавеющей стали, затем проводили измерения при частотах сканирования от 10 кГц до 10 Гц при температуре 25 °С.

Ионную проводимость σ рассчитывали по формуле:

$$\sigma = \frac{l}{S * R}$$

где l – толщина образца, см; S – площадь поперечного сечения ячейки, см^2 ; R – сопротивление, Ом.

Обсуждение результатов

Полиглицидилметакрилат получали с применением фотоинициатора фенилбис(2,4,6-триметилбензоил) фосфиноксида, относящегося к инициаторам первого типа (под действием УФ-излучения распадается на два радикала). При длине волны в диапазоне 365–420 нм происходит гомолитическое расщепление σ -связей в молекуле ВАРНО с образованием ацильных и фосфиноксильных радикалов [14] (рис. 1, а). На первой стадии иницирования активные радикалы присоединяются по двойной связи метакрилатной группы мономера ГМА, формируя активный центр растущей цепи. В ходе стадии роста цепи происходит последовательное присоединение новых молекул ГМА к растущему радикалу с образованием полиглицидилметакрилата (ПГМА). Радикальная полимеризация протекает преимущественно по винильной группе, при этом глицидильная (эпоксидная) группа остается химически неизменной и сохраняется в боковых ответвлениях макромолекулы (рис. 1, б).

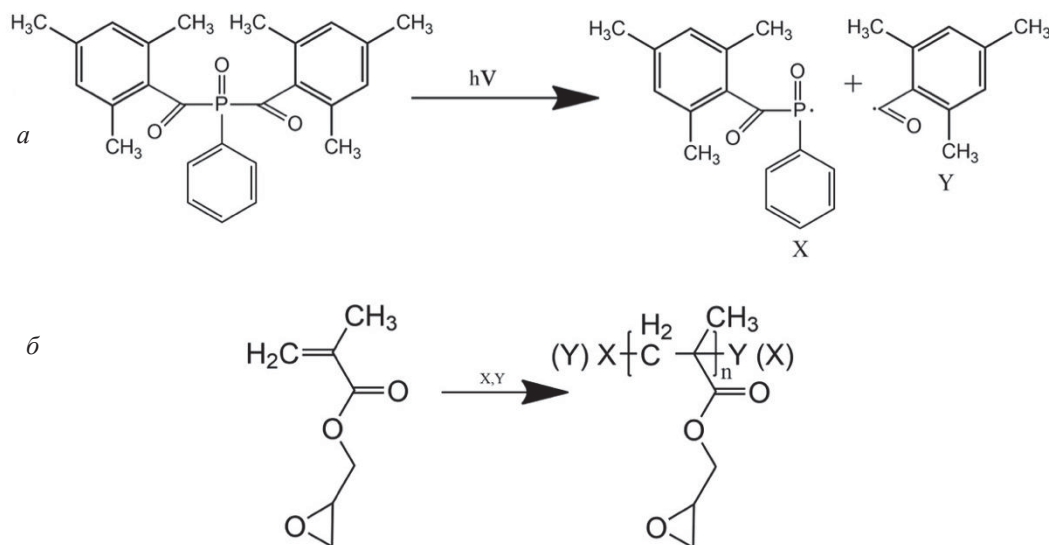


Рис. 1. Синтез ПГМА методом фотополимеризации:
а – распад инициатора; б – полимеризация ГМА

Стоит также отметить, что сохранение эпоксидных групп в боковых цепях потенциально позволяет осуществлять дополнительную стадию пост-отверждения ПГМА. В зависимости от условий и катализаторов эпоксидные кольца могут вступать в реакции раскрытия с участием нуклеофильных (например, аминных или тиольных) или электрофильных (например, протонных кислот или фотоиницируемых катионных агентов) реагентов [22], что обеспечивает образование поперечных связей и формирование трехмерной сетчатой структуры. Нераскрытые эпоксидные фрагменты могут быть задействованы на стадии постобработки, с использованием термического или катионного отверждения, что приведет к повышению степени сшивки и улучшению эксплуатационных свойств материала.

Таблица показывает зависимость выхода ПГМА от времени УФ-облучения и концентрации фотоинициатора. Концентрацию ВАРНО выбрали в интервале 1,0–2,0 масс. % для более равномерной полимеризации мономера. Время облучения 5, 10 и 15 минут выбрали для снижения вероятности избыточного перегрева образцов [23]. Из данных видно, что увеличение как времени облучения, так и концентрации инициатора приводит к росту выхода полимера. При минимальной концентрации инициатора (1 масс.%) выход полимера возрастает с 76,9 % после 5 минут облучения до 98,2 % через 15 минут. При увеличении содержания инициатора до 1,5 масс. % и 2 масс. % выход полимера составляет соответственно 98,7 и 99,4 % за тот же

промежуток времени. Таким образом, высокое содержание инициатора (2 масс. %) значительно увеличивает выход полимера даже при минимальном времени облучения в течении 5 минут, а при достижении 15 минут выход составляет почти 100 %. Стоит также отметить, что при максимальной концентрации инициатора, относительный прирост выхода полимера с увеличением времени полимеризации снижается, что может указывать на снижение подвижности макрорадикалов из-за роста вязкости реакционной среды. На основании вышеперечисленного, далее в работе для формирования полимерных пленок использовали концентрацию инициатора 2 масс. % и время облучения 15 минут.

Выход ПГМА при варьировании условий проведения процесса полимеризации

Время облучения, мин	Выход полимера при различной концентрации фотоинициатора, масс. %		
	1	1,5	2
5	76,9	81,5	88,9
10	87,3	89,2	92,3
15	98,2	98,7	99,4

На рис. 2 представлены ИК-спектры двух образцов: чистого полимера ПГМА и его смеси с бис(фторсульфонил)имидом лития (LiFSI, 25 масс. %). Анализ спектров позволяет проследить структурные изменения в полимерной матрице, происходящие при введении солей лития и последующей фотополимеризации. От-

сутствие пиков, характерных для двойных связей C=C, подтверждает отсутствие непрореагировавшего мономера в образцах. В спектре ПГМА наблюдается интенсивная полоса при 1719 см^{-1} , соответствующая валентным колебаниям карбонильной группы C=O метакрилатного звена. Полоса при 2962 см^{-1} соответствует асимметричным валентным колебаниям C–H в метильных и метиленовых группах боковой цепи. Также фиксируются колебания, характерные для глицидильных фрагментов: 987 см^{-1}

(деформационные колебания C–O–C цикла) и 838 см^{-1} (колебания C–H при эпоксидном кольце). Добавление соли LiFSI в состав композиции вызывает незначительное смещение колебаний карбонильных групп с 1719 см^{-1} до 1722 см^{-1} , что может свидетельствовать о координационном взаимодействии ионов Li^+ с кислородсодержащими группами. Подобные смещения отмечаются для ионных комплексов метакрилатных и акрилатных полимеров с солями лития [19].

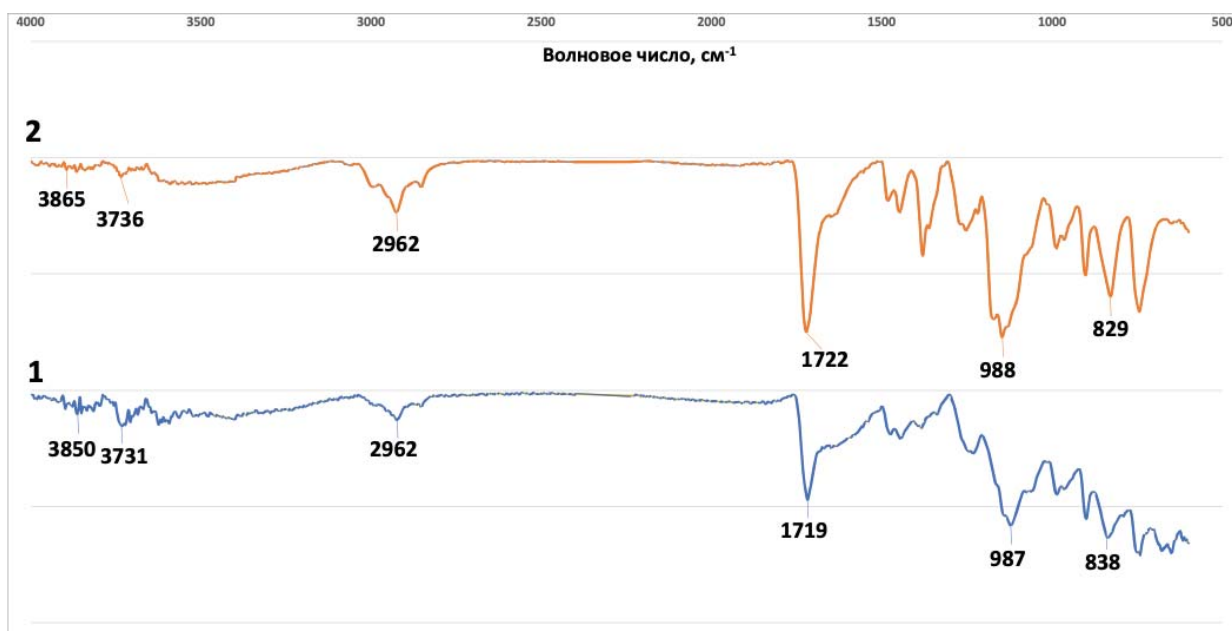


Рис. 2. ИК-спектры полученных образцов:
1 – ПГМА; 2 – ПГМА с добавлением LiFSI

Одним из способов повышения ионной проводимости ТПЭ является использование смесевых полимерных систем. Комбинирование полимеров может обеспечить уменьшение кристалличности матрицы, что приводит к увеличению ионной проводимости за счет создания проводящих каналов на границе раздела фаз двух полимеров [7; 8]. Перспективной полимерной парой является поливинилиденфторид-полиглицидилметакрилат (ПВДФ-ПГМА), так как в ней сочетается высокая диэлектрическая, химическая и механическая стабильность ПВДФ с реакционноспособной и аморфной матрицей ПГМА. В данной работе предлагается перенести процесс полимеризации ГМА непосредственно в стадию приготовления пленок полимерных электролитов и рассмотреть формирование композиционных ТПЭ.

На рис. 3 представлены СЭМ-изображения поверхности пленок, полученных методом фотополимеризации. На поверхности видна сплошная полимерная матрица с протяженными складками, что указывает на неравномерность усадки по поверхности пленки, признаки трещин отсутствуют (рис. 3, а). При большем увеличении (рис. 3, б) более отчетливо видны складки, образовавшиеся на поверхности полимера, увеличивающие удельную поверхность. При введении 25 масс. % LiFSI поверхность пленки выглядит преимущественно гладкой и сплошной, с небольшим количеством складок (рис. 3, в). При введении в композицию ПВДФ (рис. 3, д) поверхность пленки выглядит сплошной и малодефектной, однако в макропоре видно, что пленка составлена сферическими гранулами.

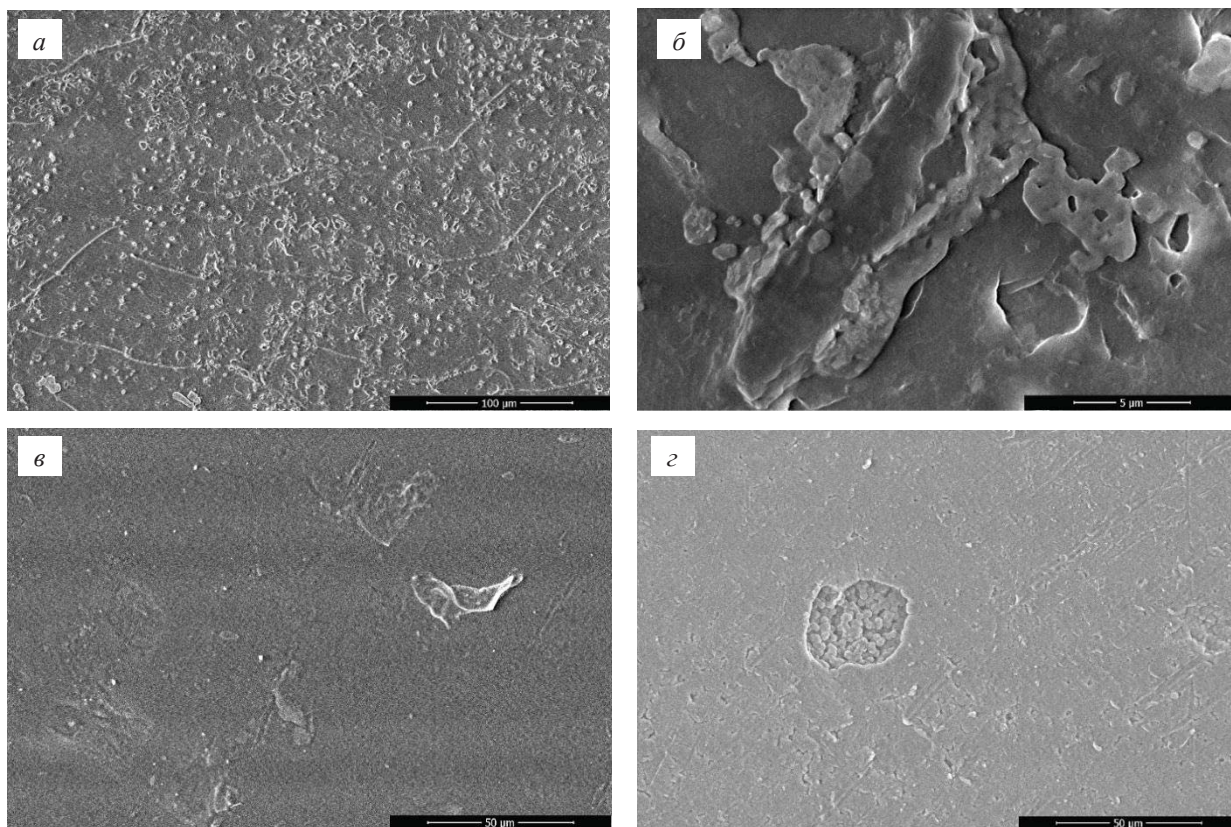


Рис. 3. СЭМ-изображение поверхности пленок полимерных электролитов, полученных с помощью УФ-полимеризации
 а – ПГМА $\times 1000$; б – ПГМА $\times 16000$; в – ПГМА с добавлением LiFSI 25 масс.% $\times 2000$;
 г – композиция ПФДФ с ПГМА с добавлением LiFSI 25 масс.% $\times 2000$

Измерения сопротивления полученных образцов проводили с помощью импедансной спектроскопии с дальнейшим расчетом ионной проводимости. Среднее содержание растворителя (ТГФ) в образцах составило 15 масс. %. ТПЭ на основе гомополимера ПГМА с LiFSI (25 масс. %) характеризуются невысокими значениями ионной проводимости до 2×10^{-4} См/см. Для композиционных систем на основе смесевой полимерной матрицы ПВДФ и ПГМА с солью LiFSI наблюдается увеличение ионной проводимости до 10^{-3} См/см, что указывает на реализацию синергетического эффекта при использовании смесевых полимерных матриц.

Выводы

Таким образом, на основе полиглицидилметакрилата и его смесевых композиций с поливинилиденфторидом в присутствии LiFSI получены твердые полимерные электролиты с использованием in-situ УФ-индуцированной радикальной полимеризации, характеризующиеся высокой ионной проводимостью до 10^{-3} См/см при 25 °С. Варьирование концентрации фотоинициатора и времени УФ-облучения позволя-

ет получить полимерные системы с высокой конверсией мономера. Для сформированных ТПЭ методом ИК-спектроскопии подтверждено сохранение эпоксидных групп в боковых цепях полимера, отсутствие сигналов непредельных связей мономера и формирование координационных связей кислородсодержащих групп полимерной матрицы с солью лития. Предложенный подход упрощает технологию получения ТПЭ, имеет перспективы для масштабирования и in-situ формирования электролита на электродах.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Zhang, S. S. A review on the separators of liquid electrolyte Li-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 2021.
2. Manthiram, A. An outlook on lithium-ion battery technology, *ACS Central Science*, 2020.
3. Tarascon, J. M., Armand, M. Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries, *Nature*, 2020.
4. Zheng, F., Yang, Y., Lee, Y. H., et al., A comprehensive review of solid polymer electrolytes: from fundamental to practical applications, *Progress in Polymer Science*, 2024.
5. Kato, Y., Hori, S., Saito, T., et al., High-power all-solid-state batteries using sulfide superionic conductors, *Nature Energy*, 2025.
6. Li, M., Lu, J., Chen, Z., Amine, K., 30 Years of Lithium-Ion Batteries, *Advanced Materials*, 2020.

7. Wu, F., Akaravičius, L., Kallio, T., Ion transport in polymer electrolytes for lithium-ion batteries: fundamentals and recent progress, *Journal of Materials Chemistry A*, 2024.
8. Liu, L. et al. Boosting ion conduction in polymer blends by tailoring polymer phase separation // *Journal of Power Sources*. – 2023. – T. 569. – C. 233005.
9. Gao, Y., Liu, X. Photopolymerization for solid polymer electrolyte preparation: mechanisms and applications, *Polymer Chemistry*, 2023.
10. Ревенков, А. Р. Исследование ионной проводимости квази-твердых полимерных электролитов на основе сшитого полиглицидилметакрилата / А. Р. Ревенков, И. Д. Иванов, В. В. Климов, О. В. Коляганова, Е. В. Брюзгин, А. Н. Гайдадин, А. В. Навроцкий, И. А. Новаков // *Известия ВолГТУ : научный журнал* № 5 (288) / ВолГТУ. – Волгоград, 2024. – (Серия «Химия и технология элементоорганических мономеров и полимерных материалов»). – С. 75–82.
11. Xi, G. et al. Polymer-based solid electrolytes: material selection, design, and application // *Advanced Functional Materials*. – 2021. – T. 31. – № 9. – C. 2007598.
12. Zhou, X. et al. Gel polymer electrolytes for rechargeable batteries toward wide-temperature applications // *Chemical Society Reviews*. – 2024. – T. 53. – № 10. – C. 5291–5337.
13. Li, J. et al. Insights into the effects of different inorganic fillers on the electrochemical performances of polymer solid electrolytes // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2023. – T. 671. – C. 131704.
14. Weiqing, R. et al. Application of acylphosphine oxide photoinitiator in the synthesis of super absorbent resin by UV photopolymerization // *Journal of Radiation Research and Radiation Processing*. – 2023. – T. 22. – № 4. – C. 213–218.
15. Sahu, L. et al. Hot-pressed sodium ion conducting solid polymer electrolytes: Preparation and materials characterization // *Materials Today: Proceedings*. – 2023.
16. Teo, L. P., Buraidah M. H., Arof A. K. Development on solid polymer electrolytes for electrochemical devices // *Molecules*. – 2021. – T. 26. – № 21. – C. 6499.
17. Sasieta-Barrutia, E. et al. Solid electrolyte manufacturing methods and its effect on SSB performance // *Chemical Engineering Journal*. – 2024. – T. 501. – C. 157391.
18. Xu, Y., Li J., Li W. A Strategy for Preparing Solid Polymer Electrolytes Containing In Situ Synthesized ZnO Nanoparticles with Excellent Electrochemical Performance // *Nanomaterials*. – 2022. – T. 12. – № 15. – C. 2680.
19. Xu, H. et al. Carbonyl-coordinating polymers for high-voltage solid-state lithium batteries: Solid polymer electrolytes // *MRS Energy & Sustainability*. – 2020. – T. 7. – C. E2.
20. Chen, Y. et al. Ultrathin solid polymer electrolyte enabling mechanically-strong energy storing fiber reinforced composites // *Composites Science and Technology*. – 2023. – T. 244. – C. 110319.
21. Wang, Z. et al. Quasi-Solid Composite Polymer Electrolyte-Based Structural Batteries with High Ionic Conductivity and Excellent Mechanical Properties // *Small Structures*. – 2024. – T. 5. – № 8. – C. 2400050.
22. Gilev, V. G. et al. Experimental study of curing processes epoxy binder ED-20 // *Vestnik Permskogo universiteta. Fizika–Bulletin of Perm University. Physics*. – 2019. – № 4. – C. 17–23.
23. Stiles, A. et al. Photoinitiator selection and concentration in photopolymer formulations towards large-format additive manufacturing // *Polymers*. – 2022. – T. 14. – № 13. – C. 2708.
24. Khurana, R. et al. Suppression of lithium dendrite growth using cross-linked polyethylene/poly (ethylene oxide) electrolytes: a new approach for practical lithium-metal polymer batteries // *Journal of the American Chemical Society*. – 2014. – T. 136. – № 20. – C. 7395–7402.
25. Klimov, V. V. et al. Solid Polymer Electrolytes Based on Reactive Copolymers of Glycidyl Methacrylate with 2-Hydroxyethyl Methacrylate // *Polymer Science, Series A*. – 2023. – T. 65. – № 2. – C. 128–136.

REFERENCES

1. Zhang, S. S. A review on the separators of liquid electrolyte Li-ion batteries, *Journal of Power Sources*, 2021.
2. Manthiram, A. An outlook on lithium-ion battery technology, *ACS Central Science*, 2020.
3. Tarascon, J. M., Armand, M. Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries, *Nature*, 2020.
4. Zheng, F., Yang, Y., Lee, Y.H., et al. A comprehensive review of solid polymer electrolytes: from fundamental to practical applications, *Progress in Polymer Science*, 2024.
5. Kato, Y., Hori, S., Saito, T., et al. High-power all-solid-state batteries using sulfide superionic conductors, *Nature Energy*, 2025.
6. Li, M., Lu, J., Chen, Z., Amine, K. 30 Years of Lithium-Ion Batteries, *Advanced Materials*, 2020.
7. Wu, F., Akaravičius, L., Kallio, T. Ion transport in polymer electrolytes for lithium-ion batteries: fundamentals and recent progress, *Journal of Materials Chemistry A*, 2024.
8. Liu, L. et al. Boosting ion conduction in polymer blends by tailoring polymer phase separation, *Journal of Power Sources*. – 2023. – Vol. 569. – P. 233005.
9. Gao, Y., Liu, X. Photopolymerization for solid polymer electrolyte preparation: mechanisms and applications, *Polymer Chemistry*, 2023.
10. Study of ionic conductivity of quasi-solid polymer electrolytes based on cross-linked polyglycidyl methacrylate / A. R. Revenkov, I. D. Ivanov, V. V. Klimov, O. V. Kolyaganova, E. V. Bryuzgin, A. N. Gaidadin, A. V. Navrotsky, I. A. Novakov // *Bulletin of VolGTU. Series: Chemistry and Technology of Organoelement Monomers and Polymer Materials*. – Volgograd, 2024. – No. 5 (288). – P. 75–82.
11. Xi, G. et al. Polymer-based solid electrolytes: material selection, design, and application // *Advanced Functional Materials*. – 2021. – Vol. 31. – No. 9. – P. 2007598.
12. Zhou, X. et al. Gel polymer electrolytes for rechargeable batteries toward wide-temperature applications // *Chemical Society Reviews*. – 2024. – Vol. 53. – No. 10. – P. 5291–5337.
13. Li, J. et al. Insights into the effects of different inorganic fillers on the electrochemical performances of polymer solid electrolytes // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2023. – T. 671. – P. 131704.
14. Weiqing, R. et al. Application of acylphosphine oxide photoinitiator in the synthesis of super absorbent resin by UV photopolymerization // *Journal of Radiation Research and Radiation Processing*. – 2023. – T. 22. – No 4. – P. 213–218.
15. Sahu, L. et al. Hot-pressed sodium ion conducting solid polymer electrolytes: Preparation and materials characterization // *Materials Today: Proceedings*. – 2023.
16. Teo, L. P., Buraidah M. H., Arof A. K. Development on solid polymer electrolytes for electrochemical devices // *Molecules*. – 2021. – T. 26. – No 21. – P. 6499.
17. Sasieta-Barrutia, E. et al. Solid electrolyte manufacturing methods and its effect on SSB performance // *Chemical Engineering Journal*. – 2024. – T. 501. – P. 157391.
18. Xu, Y., Li J., Li W. A Strategy for Preparing Solid Polymer Electrolytes Containing In Situ Synthesized ZnO Nanoparticles with Excellent Electrochemical Performance // *Nanomaterials*. – 2022. – T. 12. – No 15. – P. 2680.
19. Xu, H. et al. Carbonyl-coordinating polymers for high-voltage solid-state lithium batteries: Solid polymer electrolytes // *MRS Energy & Sustainability*. – 2020. – T. 7. – P. E2.

20. *Chen, Y. et al.* Ultrathin solid polymer electrolyte enabling mechanically-strong energy storing fiber reinforced composites // *Composites Science and Technology*. – 2023. – T. 244. – P. 110319.

21. *Wang, Z. et al.* Quasi-Solid Composite Polymer Electrolyte-Based Structural Batteries with High Ionic Conductivity and Excellent Mechanical Properties // *Small Structures*. – 2024. – T. 5. – No 8. – P. 2400050.

22. *Gilev, V. G. et al.* Experimental study of curing processes epoxy binder ED-20 // *Vestnik Permskogo universiteta. Fizika–Bulletin of Perm University. Physics*. – 2019. – No 4. – P. 17–23.

23. *Stiles, A. et al.* Photoinitiator selection and concentration in photopolymer formulations towards large-format additive manufacturing // *Polymers*. – 2022. – T. 14. – No 13. – P. 2708.

24. *Khurana, R. et al.* Suppression of lithium dendrite growth using cross-linked polyethylene/poly (ethylene oxide) electrolytes: a new approach for practical lithium-metal polymer batteries // *Journal of the American Chemical Society*. – 2014. – T. 136. – No 20. – P. 7395–7402.

25. *Klimov, V. V. et al.* Solid Polymer Electrolytes Based on Reactive Copolymers of Glycidyl Methacrylate with 2-Hydroxyethyl Methacrylate // *Polymer Science, Series A*. – 2023. – T. 65. – No 2. – P. 128–136.

**A. R. Revenkov, K. S. Kharitonova, V. V. Klimov, E. S. Bochkarev
E. V. Bryuzgin, A. N. Gaidadin, A. V. Navrotsky**

**SOLID POLYMER ELECTROLYTES BASED ON A POLY(VINYLLIDENE FLUORIDE)
AND POLY(GLYCIDYL METHACRYLATE) COMPOSITION PREPARED
BY UV PHOTOPOLYMERIZATION**

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

✉ Artem R. Revenkov, Ar-revl@mail.ru

Abstract. The use of UV-induced radical polymerization for the in situ preparation of solid polymer electrolytes based on polyglycidyl methacrylate (PGMA) and its blend composites with polyvinylidene fluoride (PVDF) in the presence of the lithium salt lithium bis(fluorosulfonyl)imide (LiFSI) is proposed. The influence of the concentration of the photoinitiator phenylbis(2,4,6-trimethylbenzoyl)phosphine oxide (BAPO) and the UV irradiation time on the degree of monomer conversion is studied. IR spectroscopy confirmed the retention of epoxy groups in the polymer side chains and the formation of coordination bonds between the oxygen-containing groups of the polymer matrix and the lithium salt. For SPE based on PGMA with LiFSI salt, the maximum ionic conductivity was established at room temperature of $4 \times 10^{-5} \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$, and for a composite system with the addition of PVDF up to $10^{-3} \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$.

Keywords: Polyvinylidene fluoride, polyglycidyl methacrylate, solid polymer electrolytes, ionic conductivity, lithium-polymer batteries, UV polymerization

Funding: The research was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. FZUC-2023-0003 based on agreement No. 075-03-2023-055 dated January 13, 2023).

For citation: Revenkov A. R., Kharitonova K. S., Klimov V. V., Bochkarev E. S., Bryuzgin E. V., Gaidadin A. N., Navrotsky A. V. Solid polymer electrolytes based on a poly(vinylidene fluoride) and poly(glycidyl methacrylate) composition prepared by uv photopolymerization. *Izvestiya VSTU*. 2025; 12(307): 76–84. DOI: 10.35211/1990-5297-2025-12-307-76-84.

Information about the authors:

Artem R. Revenkov – graduate student VSTU

e-mail: ar-revl@mail.ru

Katerina S. Kharitonova – 2nd year master's degree VSTU

e-mail: kharitonovakaterina3274@gmail.com

Viktor V. Klimov – Ph.D., Associate Professor of the Department of TVVM VSTU

<http://orcid.org/0000-0003-3468-7528>

WOS Research ID L-9379-2015

Scopus Author ID 56427609000

e-mail: vicklimov@gmail.com

Evgeny S. Bochkarev – Ph.D., Senior lecturer of the Department of TVVM VSTU

<http://orcid.org/0000-0002-2343-1562>

WOS Research ID L-9379-2015

Scopus Author ID 57222574440

e-mail: bochkarev_es@vstu.ru

Evgeny V. Bryuzgin – Doctor of Chemical Sciences, Professor of the Department of TVVM VSTU

<http://orcid.org/0000-0002-2930-1910>

WOS Research ID L-9379-2015

Scopus Author ID 35572597900

e-mail: bryuzgin_e@mail.ru

Alexey N. Gaydadin – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of KHTPE VSTU

<https://orcid.org/0000-0002-2192-5913>

WOS Research ID L-9379-2015

Scopus Author ID 6504726753

e-mail: lit@vstu.ru

Alexander V. Navrotsky – Corresponding Member of the RAS, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Acting Rector of VSTU

<http://orcid.org/0000-0001-9500-3607>

Scopus Author ID 6602180318

WOS Research ID N-4097-2015

e-mail: navrotskiy@vstu.ru

Contribution of the authors:

Artem R. Revenkov — conceptualization, research, data processing, and original writing.

Katerina S. Kharitonova — research and data processing.

Viktor V. Klimov — conceptualization, review, and editing.

Evgeny S. Bochkarev — conceptualization, review, and editing.

Alexey N. Gaidadin — review and editing.

Evgeny V. Bryuzgin — conceptualization, funding acquisition, review, and editing.

Alexander V. Navrotsky — review and editing, project administration, and funding acquisition.

Статья поступила в редакцию 29.10.2025 г., доработана 10.11.2025 г., подписана в печать 03.12.2025

The article was submitted 29.10.2025, revised 10.11.2025, accepted for publication 03.12.2025