

Научная статья

УДК 691.175.5/8:544.6.018.462

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-2-73-83

## ГЕЛЬ-ПОЛИМЕРНЫЕ ЭЛЕКТРОЛИТЫ НА ОСНОВЕ ПОЛИВИНИЛОВОГО СПИРТА И LiTFSI: СИНТЕЗ И ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ

Е.А. Архипова<sup>1</sup>, А.А. Леонов<sup>2</sup>, А.С. Иванов<sup>1</sup>,  
Д.А. Деянков<sup>1</sup>, С.Ю. Купреенко<sup>1</sup>, Н.Н. Кузнецова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Москва, Россия; dekanat@chem.msu.ru

<sup>2</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

**Аннотация.** Представлены результаты исследования гель-полимерных электролитов на основе поливинилового спирта, пропиленгликоля и соли LiTFSI. Методами инфракрасной спектроскопии, дифференциальной сканирующей калориметрии, синхронного термического анализа и импедансной спектроскопии изучено влияние состава на химическую структуру, термические свойства и ионную проводимость полученных материалов. Установлено, что увеличение содержания LiTFSI приводит к значительному повышению электропроводности – до  $25,96 \cdot 10^{-2}$  мСм/см при 343 К. Показано, что полученные электролиты демонстрируют высокую термическую стабильность и перспективны для применения в твердотельных источниках тока.

**Ключевые слова:** гель-полимерные электролиты, LiTFSI, поливиниловый спирт, удельная электропроводность, термическая стабильность

**Для цитирования:** Архипова Е.А., Леонов А.А., Иванов А.С., Деянков Д.А., Купреенко С.Ю., Кузнецова Н.Н. Гель-полимерные электролиты на основе поливинилового спирта и LiTFSI: синтез и характеристика // Труды ВИАМ. 2026. № 2 (156). С. 73–83. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-2-73-83.

Scientific article

## GEL POLYMER ELECTROLYTES BASED ON POLYVINYL ALCOHOL AND LiTFSI: SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION

Е.А. Arkhipova<sup>1</sup>, А.А. Leonov<sup>2</sup>, А.С. Ivanov<sup>1</sup>,  
Д.А. Deyankov<sup>1</sup>, S.Yu. Kupreenko<sup>1</sup>, N.N. Kuznetsova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; dekanat@chem.msu.ru

<sup>2</sup>Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

**Abstract.** The present work presents results of a study of gel polymer electrolytes based on polyvinyl alcohol, propylene glycol and LiTFSI salt. Using methods of IR spectroscopy, differential scanning calorimetry, synchronous thermal analysis and impedance spectroscopy, the influence of composition on the chemical structure, thermal properties, and ionic conductivity of the materials was examined. The increase in the LiTFSI content was found to lead to a significant increase in electrical conductivity – up to  $25,96 \cdot 10^{-2}$  mS/cm at 343 K. Produced electrolytes demonstrate high thermal stability and conductivity, which make them promising materials for application in solid-state power sources.

**Keywords:** gel polymer electrolytes, LiTFSI, polyvinyl alcohol, ionic conductivity, thermal stability

**For citation:** Arkhipova E.A., Leonov A.A., Ivanov A.S., Deyankov D.A., Kupreenko S.Yu., Kuznetsova N.N. Gel polymer electrolytes based on polyvinyl alcohol and LiTFSI: synthesis and characterization. *Trudy VIAM*, 2026, no. 2 (156), pp. 73–83. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-2-73-83.

## Введение

В связи с усилением экологических проблем, связанных с выбросами парниковых газов и сокращением запасов невозобновляемого ископаемого топлива, поиск и внедрение альтернативной возобновляемой энергии являются ключевыми направлениями современных научных исследований. Кроме того, переход к эффективной системе хранения энергии необходим для обеспечения бесперебойного энергоснабжения существующих устройств портативной электроники, электротранспорта, средств специального назначения, в том числе для авиационной промышленности [1–3]. Среди устройств хранения энергии суперконденсаторы (СК) привлекают внимание энергетических компаний и крупнейших мировых производителей в сфере телекоммуникаций благодаря быстрой зарядке (1–10 с), высокой удельной мощности (3000–40000 Вт/кг), электрохимической стабильности и длительному сроку службы (>10000 циклов) [4, 5]. Эксплуатационные параметры СК зависят от типа электролита и свойств электродного материала [6, 7]. В частности, электропроводность, ширина электрохимического окна, температурная стабильность электролита определяют скорость переноса ионов, величину запасаемой энергии и рабочий температурный интервал эксплуатации устройства.

В настоящее время в качестве электролитов СК используют водные и органические растворы, гель-полимерные и твердотельные системы [8–10]. Традиционные водные растворы отличаются безопасностью, негорючестью и низкой стоимостью. Однако небольшая ширина электрохимического окна, значение которой ограничено электролизом воды (<1,2 В [11]), существенно снижает плотность энергии. Кроме того, такие системы склонны к замерзанию и кипению, что не позволяет их использовать в области низких и высоких температур. В отличие от водных растворов, органические электролиты, представляющие собой соли, растворенные в различных нитрилах или карбонатах, обладают более широким электрохимическим окном, которое обеспечивает рабочий интервал напряжений >3 В [12] и, следовательно, большую величину запасаемой энергии. Однако применение жидких органических электролитов требует соблюдения повышенных норм безопасности вследствие их возможной утечки, воспламеняемости и возгорания [13, 14].

Использование твердых электролитов, представляющих собой ионопроводящие соединения на основе керамических материалов, позволяет избежать проблем с безопасностью. Кроме того, такие электролиты отличаются термической и электрохимической стабильностью. Тем не менее твердые электролиты имеют ряд серьезных ограничений [15, 16]. К ним относят низкую ионную проводимость, неудовлетворительный контакт на границе раздела «электрод–электролит», приводящий к высокому сопротивлению, а также растрескивание при механических нагрузках, что не позволяет их использовать в гибкой электронике.

Гель-полимерные электролиты (ГПЭ) рассматриваются как перспективные гибридные системы, использование которых позволяет преодолеть недостатки жидких и твердых электролитов. Имобилизация жидкого компонента в пористой полимерной матрице обеспечивает формирование уникальной квазитвердой структуры, объединяющей преимущества твердых и жидких материалов, благодаря чему ГПЭ обладают

повышенной безопасностью, не склонны к утечкам, демонстрируют отличную механическую и электрохимическую стабильность, гибкость, широкий температурный интервал эксплуатации [14, 17], что позволяет их использовать в составе электрохимических источников тока в условиях экстремальных температур.

В составе ГПЭ полимерная матрица представлена поливиниловым спиртом (ПВС), полиэтиленоксидом (ПЭО), поли(винилиденфторид-со-гексафторпропиленом) (ПВДФ-ГФП), полиметилметакрилатом [18], полиакриламидом [19], полиакриловой кислотой [20]. Благодаря высокому значению диэлектрической проницаемости и наличию сильных электроноакцепторных связей С–F ГПЭ на основе ПВДФ-ГФП обладают химической стойкостью и механической прочностью. При этом включение в структуру ПВДФ звеньев ГФП приводит к снижению кристалличности и температуры плавления полимера. В результате ПВДФ-ГФП демонстрирует повышенную склонность к набуханию в растворителях, обеспечивая эффективное поглощение жидкого электролита [14]. Наличие атомов кислорода в основной цепи поликарбонатов (ПЭО и др.) делает их цепи гибкими и улучшает механические свойства. Однако высокая кристалличность (75–80 %) приводит к низкой электропроводности ГПЭ на их основе при температурах ниже температуры плавления ПЭО. Кроме того, при высоких напряжениях (>4 В относительно Li/Li<sup>+</sup>) ПЭО подвержен окислению [16]. Одним из наиболее изученных полимеров является ПВС [21]. Линейная структура с высокой гидрофильностью, нетоксичность, хорошие пленкообразующие свойства, термическая и химическая стабильность, высокая гибкость способствуют получению ГПЭ с высокой прочностью при разрыве (до 11,5 МПа) [22, 23]. Благодаря низкому давлению насыщенных паров ионных жидкостей ГПЭ на их основе обладают низкой летучестью. Одним из методов повышения электропроводности ГПЭ является введение в полимерную структуру проводящих компонентов [17, 24]. Как правило, в ПВС вводят различные неорганические соединения, включающие H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, KOH, NaOH, KCl, NaCl и LiCl [23], углеродные добавки, а также органические компоненты, в том числе обладающие редокс-природой [25]. Введение редокс-компонентов позволяет повысить удельную емкость СК за счет вкладов обратимых окислительно-восстановительных процессов.

В данной работе изучены новые ГПЭ на основе бис(трифторметансульфонил)имиды лития (lithium bis(trifluoromethanesulfonyl)imide – LiTFSI), иммобилизованного в систему, содержащую ПВС и пропиленгликоль (ПГ). Введение ПГ в качестве пластифицирующего агента позволяет снизить кристалличность полимера и повысить подвижность носителей заряда в полимерной матрице. В ходе проведения испытаний установлены корреляции между составом ГПЭ и удельной электропроводностью и термической стабильностью полимера.

### Материалы и методы

Для синтеза ГПЭ использованы ПВС (марка 098-15(G)), ПГ, LiTFSI (≥99,9 %). В ходе синтеза ГПЭ навеску LiTFSI массой 0,15; 0,34; 0,58; 0,90 и 1,35 г растворяли в 5 мл дистиллированной воды и перемешивали при температуре 333 К до полного растворения. К полученному раствору добавляли ПВС (1,05 г в 10 мл дистиллированной воды). Реакционную смесь нагревали и выдерживали при 393 К при постоянном перемешивании в течение 45 мин. Затем к полученному раствору вязкой консистенции приливали 0,30 г предварительно нагретого ПГ для минимизации температурных градиентов. После внесения пластификатора систему выдерживали при перемешивании в течение 15 мин для достижения полной гомогенизации. Полученные растворы заливали в чашки Петри для формирования пленок, которые затем сушили в термостатном вакуумном шкафу при температуре 323 К в течение 22 ч. Полученным образцам присвоен шифр ГПЭ<sub>ω</sub>, где ω – массовая доля соли.

Анализ удельной электропроводности ГПЭ проведен методом спектроскопии электрохимического импеданса с использованием потенциостата-гальваностата. Кривые Найквиста зарегистрированы в интервале частот от 1 МГц до 100 мГц с амплитудой напряжения переменного тока 10 мВ в интервале температур 298–343 К с шагом 5 К. Удельную электропроводность  $\sigma$  (мСм/см) рассчитывали по формуле

$$\sigma = 1000d/(R_{об}A),$$

где  $R_{об}$  – объемное сопротивление, Ом;  $d$  – толщина пленки, см;  $A$  – площадь пленки, см<sup>2</sup>.

Инфракрасные (ИК) спектры поглощения пленок ГПЭ получены с помощью приставки нарушенного внутреннего полного отражения с алмазным кристаллом в ИК-Фурье-спектрометре. В ходе измерения проведено накопление 32 сканов с разрешением 2 см<sup>-1</sup>.

Термическая стабильность ГПЭ изучена с использованием синхронного термического анализатора. При проведении дифференциального термического анализа пленку помещали в тигель из оксида алюминия, который далее нагревали в печи прибора со скоростью 1 К/мин до 313 К, продувая потоком азота (99,999 %) печь и весовой блок со скоростью 50 и 20 мл/мин соответственно. Затем при тех же скоростях потоков осуществляли нагрев со скоростью 10 К/мин до 873 К, регистрируя сигналы дифференциального термического анализа и термогравиметрии. При проведении анализа использовали коррекцию базовой линии по данным измерения пустого тигля. Калибровки по температуре и чувствительности с использованием стандартов (In, Sn, Bi, Zn, Al, Ag, Au) применяли для обеспечения точности определения температуры  $\pm 3$  К и тепловых эффектов  $\pm 5$  %. Обработку данных проводили в специализированной программе.

Температуру фазовых переходов определяли с использованием низкотемпературного дифференциального сканирующего калориметра. Для этой цели диск полимерной пленки помещали в алюминиевый тигель с крышкой и запечатывали, затем нагревали в печи прибора, продуваемой потоком аргона (99,993 %; 20 мл/мин) со скоростью 1 К/мин до 293 К и выдерживали 20 мин в режиме ожидания, после чего охлаждали жидким азотом со скоростью 10 К/мин до 103 К. После повторяли нагрев до 293 К, регистрируя сигнал калориметра. Калибровки по температуре и чувствительности с использованием стандартов (адамantan, In, Sn, Bi, Zn, CsCl) обеспечили точность измерения температур  $\pm 1$  К и тепловых эффектов  $\pm 2$  %.

### Результаты и обсуждение

Для изучения влияния состава пленкообразующего раствора на структуру полученных материалов ГПЭ исследованы с помощью ИК-спектроскопии (рис. 1). В спектрах поглощения пленок наблюдаются линии, характерные для ПГ, ПВС и LiTFSI, смещенные в зависимости от окружения [26]. Интенсивность линий поглощения ПВС и ПГ при волновых числах 3286–3351, 2939–2949, 2910–2914, 1417–1419, 1377–1382, 1086–1090, 990–995, 919–922, 837–841, 763–766, 651–661 см<sup>-1</sup> уменьшается с повышением содержания соли, а для полос, соответствующих LiTFSI (при волновых числах 3478–3506, 1336–1344, 1316–1325, 1181–1187, 1129–1137, 1049–1051, 785–793, 608–613, 594–600, 563–570, 501–507 см<sup>-1</sup>), увеличивается. Пик валентных колебаний ОН-групп монотонно смещается от 3286 см<sup>-1</sup> для ГПЭ\_10 до 3351 см<sup>-1</sup> для ГПЭ\_50 из-за ослабления водородных связей. Полосы при волновых числах 1415–1419 и 1377–1382 см<sup>-1</sup> обусловлены деформационными и изгибными колебаниями ОН-групп. Возникновение

полос при волновом числе  $1086\text{--}1090\text{ см}^{-1}$  связано с растягивающими колебаниями связи С–О, в то время как в областях  $2939\text{--}2949$  и  $2910\text{--}2914\text{ см}^{-1}$  наблюдаются симметричные и асимметричные валентные колебания связи С–Н при насыщенном углеродном атоме. Полосы при волновых числах  $1417\text{--}1419$  и  $1377\text{--}1382\text{ см}^{-1}$  соответствуют деформационным колебаниям групп С–Н, маятниковые колебания возникают при волновом числе  $837\text{--}841\text{ см}^{-1}$ . Линии LiTFSI проявляются в виде полос, отвечающих симметричным ( $1336\text{--}1344\text{ см}^{-1}$ ) и асимметричным растягивающим модам колебаний  $\text{CF}_3$  ( $1316\text{--}1325\text{ см}^{-1}$ ), растягивающим колебаниям  $\text{SO}_2$  ( $1181\text{--}1187\text{ см}^{-1}$ ) и асимметричной растягивающей моде колебаний S–N–S ( $785\text{--}793\text{ см}^{-1}$ ).

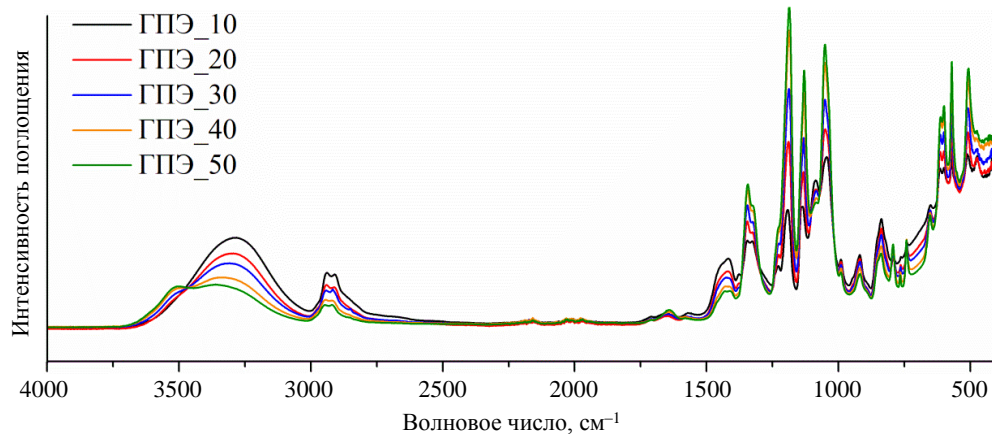


Рис. 1. Инфракрасные спектры поглощения гель-полимерных электролитов

Изучение термических свойств ГПЭ позволяет определить их температурный интервал эксплуатации в составе СК (рис. 2). Методом дифференциальной сканирующей калориметрии изучены низкотемпературные характеристики ГПЭ. Установлено, что при уменьшении содержания LiTFSI в полимерной матрице температура стеклования пленок  $T_g$  смещается в сторону больших температур от 245 (ГПЭ\_50) до 243 (ГПЭ\_40) и 240 К (ГПЭ\_30), что сопровождается снижением величины скачкообразного изменения теплоемкости  $\Delta c_p$  с 0,660 до 0,535 и 0,397 Дж/(г·К) соответственно. Температуры стеклования образцов больше  $T_g$  ПГ (168 К [27]) и меньше  $T_g$  ПВС (348–358 К [28]).

С помощью синхронного термического анализа изучена термическая стабильность ГПЭ. Установлено, что нагрев до температуры  $>350\text{ К}$  приводит к плавлению образцов, а дальнейшее повышение температуры – к их термическому разложению. Основная потеря массы происходит при температурах  $>500\text{ К}$  (рис. 2, б). При этом остаточная масса коррелирует с содержанием LiTFSI: при увеличении доли соли остаточная масса, определенная при 873 К, повышается с 10,5 (ГПЭ\_10) до 17,7 % (ГПЭ\_50). Эндотермический пик на кривой дифференциального термического анализа (рис. 2, в) при 363–373 К обусловлен удалением воды в процессе разложения фрагментов ПВС, в ходе которого образуются полиены. Последующий нагрев приводит к дальнейшему разрушению основной полимерной цепи ПВС, сопровождающемуся выделением летучих органических соединений (ацетальдегида,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{C}_4\text{H}_6\text{O}$ ,  $\text{CH}_3\text{COOH}$ ,  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ,  $\text{CH}_4$ ) в диапазоне температур 500–650 К [29]. Экзотермический пик при  $\sim 710\text{ К}$  соответствует разложению соли LiTFSI, интенсивный распад которой начинается при нагревании до температур  $>550\text{ К}$  [30] и протекает параллельно с разложением ПГ [31].

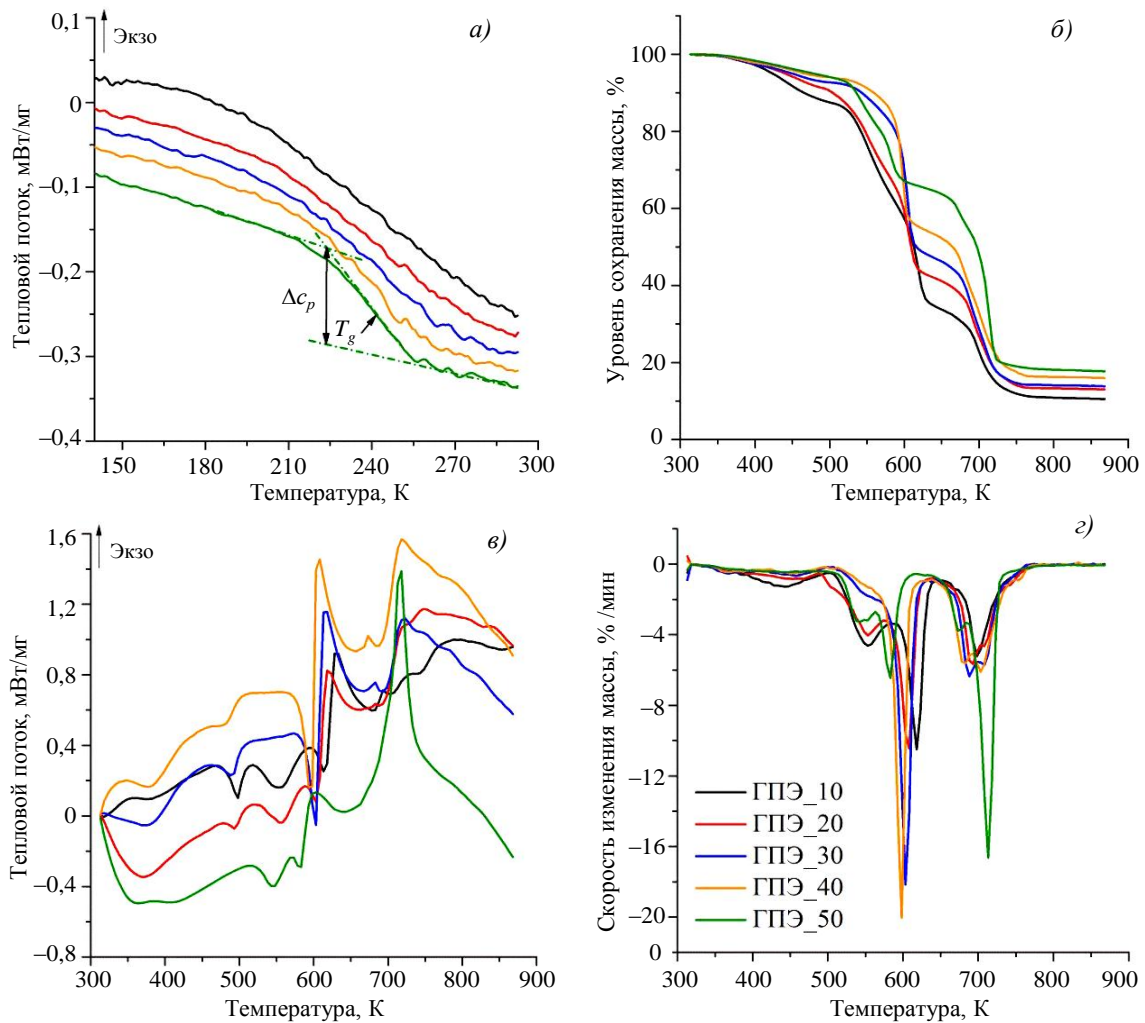


Рис. 2. Сигналы дифференциальной сканирующей калориметрии (а), термогравиметрии (б), дифференциального термического анализа (в) и дифференциальной термогравиметрии (г) гелеполимерных электролитов ( $\Delta c_p$  – теплоемкость,  $T_g$  – температура стеклования)

Графики Найквиста ГПЭ (рис. 3, а) демонстрируют наличие полуокружности в высокочастотной области, описывающей проводимость в объеме материала, и наклонной прямой при низких частотах, связанной с диффузией ионов внутри полимерной матрицы на границе раздела [32]. С увеличением концентрации соли в полимерной матрице электропроводность ГПЭ возрастает за счет повышения количества носителей заряда (рис. 3, б) и при 298 К составляет  $0,04 \cdot 10^{-2}$ ;  $0,06 \cdot 10^{-2}$ ;  $0,08 \cdot 10^{-2}$ ;  $0,24 \cdot 10^{-2}$  и  $0,52 \cdot 10^{-2}$  мСм/см для образцов ГПЭ\_10–ГПЭ\_50 соответственно. Наблюдаемая зависимость согласуется с результатами исследований схожих систем [33, 34]. С повышением температуры значения удельной электропроводности ГПЭ возрастают и при 343 К достигают  $1,92 \cdot 10^{-2}$ ;  $2,13 \cdot 10^{-2}$ ;  $4,60 \cdot 10^{-2}$ ;  $12,00 \cdot 10^{-2}$  и  $25,96 \cdot 10^{-2}$  мСм/см для образцов ГПЭ\_10–ГПЭ\_50 соответственно. Улучшение проводящих свойств при увеличении температуры обусловлено повышением свободного объема, что приводит к усилению сегментного движения полимерной цепи [35]. Полученные значения электропроводности ГПЭ сопоставимы с системами на основе ПВС и LiTFSI–EMITFSI ( $5,30 \cdot 10^{-4}$  мСм/см),  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  (1,6 мСм/см),  $\text{H}_3\text{PO}_4$  ( $8,06 \cdot 10^{-2}$  мСм/см), LiAsF–TiO<sub>2</sub> (0,51 мСм/см) [36] и подтверждают перспективность разработанных электролитов для систем хранения энергии.

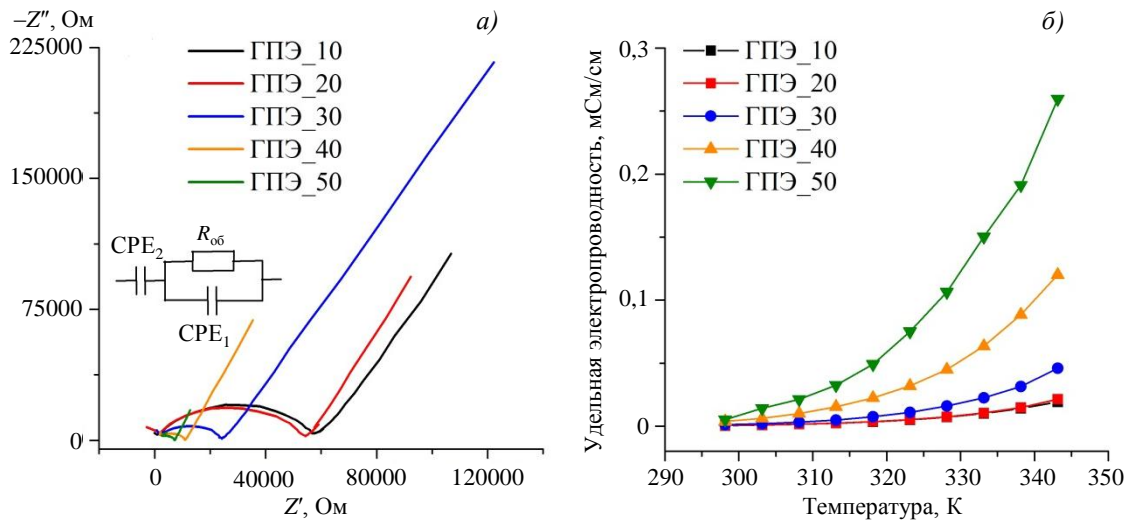


Рис. 3. Кривые Найквиста, зарегистрированные при температуре 298 К (а), и зависимость удельной электропроводности гель-полимерного электролита от температуры (б). CPE (Constant Phase Element) – элемент постоянной фазы,  $R_{об}$  – объемное сопротивление

### Заключения

Комплексное исследование ГПЭ методами ИК-спектроскопии, низкотемпературной дифференциальной сканирующей калориметрии, синхронного термического анализа и импедансной спектроскопии позволило установить взаимосвязь между составом, структурой и ключевыми свойствами. Показано, что увеличение концентрации соли LiTFSI в структуре ГПЭ приводит к ослаблению водородных связей в полимерной матрице, снижению температуры стеклования и значительному возрастанию ионной электропроводности как при комнатной температуре, так и в области повышенных температур. Термический анализ подтвердил, что материалы сохраняют стабильность до температуры  $\sim 350$  К, при этом основные процессы распада происходят при нагреве до температуры  $> 500$  К. Наибольшую перспективу для применения в твердотельных СК демонстрирует образец ГПЭ\_50, обладающий максимальной электропроводностью ( $0,52 \cdot 10^{-2}$  мСм/см при 298 К и  $25,96 \cdot 10^{-2}$  мСм/см при 343 К) и удовлетворительной термической стабильностью.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (Проект № 25-19-00263).*

### Список источников

1. Леонов А.А., Трофимов Н.В. Магний-ионные аккумуляторы: перспективы и вызовы в области энергетики // Труды ВИАМ. 2024. № 3 (133). С. 41–51. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.12.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-3-41-51.
2. Каблов Е.Н., Лаптев А.Б., Прокопенко А.Н., Гуляев А.И. Релаксация полимерных композиционных материалов под длительным действием статической нагрузки и климата (обзор). Часть 1. Связующие // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 4 (65). С. 70–80. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 01.12.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-70-80.
3. Леонов А.А., Заварзин С.В., Трофимов Н.В. О некоторых особенностях влияния состава магниевого анода на электрохимическое поведение применительно к магний-ионным аккумуляторам // Труды ВИАМ. 2024. № 6 (136). С. 18–28. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.12.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-6-18-28.

4. Arkhipova E.A., Ivanov A.S., Maslakov K.I. et al. Mesoporous graphene nanoflakes for high performance supercapacitors with ionic liquid electrolyte // *Microporous and Mesoporous Materials*. 2020. Vol. 294. P. 109851.
5. Dai H., Zhang G., Rawach D. et al. Polymer gel electrolytes for flexible supercapacitors: Recent progress, challenges, and perspectives // *Energy Storage Materials*. 2021. Vol. 34. P. 320–355.
6. Luo Y., Wang S., Xu Y. et al. Exploring redox-active electrolytes to boost energy density of carbon-based supercapacitors // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2025. Vol. 684. P. 729–734.
7. Ma J., Xie Y. Electrochemical performance of the homologous molybdenum (VI) redox-active gel polymer electrolyte system // *New Journal of Chemistry*. 2021. Vol. 45. P. 3418–3431.
8. Vijaya B., Usha Rani M. A free-standing CaO infused PVdF-HFP/PMMA polymer-nanocomposite as solid-state electrolytes for energy storage applications // *Ionics*. 2024. Vol. 30. P. 6061–6071.
9. Салахова Р.К., Тихообразов А.Б. Термостойкость электролитических хромовых покрытий // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 2 (55). С. 60–67. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-60-67.
10. Yun S., Park S.H., Yeon J.S. et al. Materials and Device Constructions for Aqueous Lithium–Sulfur Batteries // *Advanced Functional Materials*. 2018. Vol. 28. P. 1707593.
11. Тюриков Е.В., Тихообразов А.Б., Салахова Р.К. Исследование свойств разбавленного саморегулирующегося электролита хромирования, содержащего наноразмерные частицы оксида алюминия // *Труды ВИАМ*. 2015. № 6. С. 45–52. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.12.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-6-6-6.
12. Nguyen H.V.T., Bin Faheem A., Kwak K., Lee K.K. Propionitrile as a single organic solvent for high voltage electric double-layer capacitors // *Journal of Power Sources*. 2020. Vol. 463. P. 228134.
13. Chen Z., Wang K., Pei P. et al. Advances in electrolyte safety and stability of ion batteries under extreme conditions // *Nano Research*. 2023. Vol. 16. P. 2311–2324.
14. Aruchamy K., Ramasundaram S., Divya S. et al. Gel Polymer Electrolytes: Advancing Solid-State Batteries for High-Performance Applications // *Gels*. 2023. Vol. 9. P. 585.
15. Janek J., Zeier W.G. A solid future for battery development // *Nature Energy*. 2016. Vol. 1. P. 16141.
16. Воропаева Д.Ю., Стенина И.А., Ярославцев А.Б. Твердые электролиты: на пути к повышению мощности литий-ионных аккумуляторов // *Успехи химии*. 2024. Т. 93. № 6. Ст. RCR5126. DOI: 10.59761/RCR5126.
17. Liu J., Khanam Z., Ahmed S. et al. A study of low-temperature solid-state supercapacitors based on Al-ion conducting polymer electrolyte and graphene electrodes // *Journal of Power Sources*. 2021. Vol. 488. P. 229461.
18. Кулова Т.Л., Скундин А.М. Полимерные электролиты для натрий-ионных аккумуляторов // *Электрохимическая энергетика*. 2018. Т. 18. С. 26–47.
19. Zhang W., Liu K., Wang T. et al. Tough and self-healing all-in-one supercapacitor enabled by triple-network redox carrageenan and sodium carboxymethylcellulose reinforcing gel polymer electrolyte // *Journal of Alloys and Compounds*. 2024. Vol. 1006. P. 176106.
20. Qin G., Wu C., Song X. et al. Multifunctional enhanced energy density integrated supercapacitor based on self-healing redox-mediated gel polymer electrolyte // *Fuel*. 2024. Vol. 357. P. 130033.
21. Степанова Е.В., Ивахненко Ю.А., Максимов В.Г., Истомин А.В. Исследование технологически значимых физических свойств различных марок поливинилового спирта // *Труды ВИАМ*. 2024. № 2 (132). С. 23–33. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.12.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-2-23-33.
22. Deng X., Huang Y., Song A. et al. Gel polymer electrolyte with high performances based on biodegradable polymer polyvinyl alcohol composite lignocellulose // *Materials Chemistry and Physics*. 2019. Vol. 229. P. 232–241.
23. Jinisha B., Anilkumar K.M., Manoj M. et al. Solid-state supercapacitor with impressive performance characteristics, assembled using redox-mediated gel polymer electrolyte // *Journal of Solid State Electrochemistry*. 2019. Vol. 23. P. 3343–3353.

24. Wang J., Chen G., Song S. Na-ion conducting gel polymer membrane for flexible supercapacitor application // *Electrochimica Acta*. 2020. Vol. 330. P. 135322.
25. Tu Q.-M., Fan L.-Q., Pan F. et al. Design of a novel redox-active gel polymer electrolyte with a dual-role ionic liquid for flexible supercapacitors // *Electrochimica Acta*. 2018. Vol. 268. P. 562–568.
26. George Socrates. Infrared and raman characteristic group frequencies: tables and charts. 3rd ed. Wiley, 2001. 368 p.
27. Elamin K., Björklund J., Nyhlén F. et al. Glass transition and relaxation dynamics of propylene glycol–water solutions confined in clay // *Journal of Chemical Physics*. 2014. Vol. 141. P. 034505.
28. Tsiptsias C., Fardis D., Ntampou X. et al. Thermal behavior of poly(vinyl alcohol) in the form of physically crosslinked film // *Polymers*. 2023. Vol. 15. P. 1843.
29. Taghizadeh M.T., Yeganeh N., Rezaei M. The investigation of thermal decomposition pathway and products of poly(vinyl alcohol) by TG-FTIR // *Journal of Applied Polymer Science*. 2015. Vol. 132. P. 42117.
30. Lu Z., Yang L., Guo Y. Thermal behavior and decomposition kinetics of six electrolyte salts by thermal analysis // *Journal of Power Sources*. 2006. Vol. 156. P. 555–559.
31. Song L.X., Guo X.Q., Du F.Y., Bai L. Thermal degradation comparison of polypropylene glycol and its complex with  $\beta$ -cyclodextrin // *Polymer Degradation and Stability*. 2010. Vol. 95. P. 508–515.
32. Muhammad A.G., Nazir S., Rawat N. et al. Electrochemical application of poly(vinylidene fluoride-co-hexafluoropropylene) incorporated with trihexyl(tetradecyl)phosphonium dicyanamide and polyether-derived carbon // *Ionics*. 2025. Vol. 31. P. 4383–4392.
33. Rawat S., Singh P.K., Jain A. et al. Ionic liquid (1-butyl-1-methylpyrrolidinium trifluoromethanesulfonate) doped polyethylene polymer electrolyte for energy devices // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2024. Vol. 35. P. 1643.
34. Kumar S., Singh P.K., Agarwal D. et al. Structure, dielectric, and electrochemical studies on poly(vinylidene fluoride-co-hexafluoropropylene)/ionic liquid 1-ethyl-3-methylimidazolium tricyanomethanide-based polymer electrolytes // *Physica Status Solidi (a)*. 2022. Vol. 219. P. 2100711.
35. Saeed M.A.M., Abdullah O.Gh. Effect of high ammonium salt concentration and temperature on the structure, morphology, and ionic conductivity of proton-conductor solid polymer electrolytes based PVA // *Membranes*. 2020. Vol. 10. P. 262.
36. Dennis J.O., Shukur M.F., Aldaghri O.A. et al. A review of current trends on polyvinyl alcohol (PVA)-based solid polymer electrolytes // *Molecules*. 2023. Vol. 28. P. 1781.

### References

1. Leonov A.A., Trofimov N.V. Magnesium ion batteries: prospects and challenges in the field of energy. *Trudy VIAM*, 2024, no. 3 (133), pp. 41–51. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 01, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-3-41-51.
2. Kablov E.N., Laptev A.B., Prokopenko A.N., Gulyaev A.I. Relaxation of polymeric composite materials under the prolonged action of static load and climate (review). Part 1. Binders. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 4 (65), pp. 70–80. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 01, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-70-80.
3. Leonov A.A., Zavarzin S.V., Trofimov N.V. On some features of the influence of the composition of the magnesium anode on its electrochemical behavior in relation to magnesium-ion batteries. *Trudy VIAM*, 2024, no. 6 (136), pp. 18–28. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 01, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-6-18-28.
4. Arkhipova E.A., Ivanov A.S., Maslakov K.I. et al. Mesoporous graphene nanoflakes for high performance supercapacitors with ionic liquid electrolyte. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2020, vol. 294, p. 109851.
5. Dai H., Zhang G., Rawach D. et al. Polymer gel electrolytes for flexible supercapacitors: Recent progress, challenges, and perspectives. *Energy Storage Materials*, 2021, vol. 34, pp. 320–355.
6. Luo Y., Wang S., Xu Y. et al. Exploring redox-active electrolytes to boost energy density of carbon-based supercapacitors. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2025, vol. 684, pp. 729–734.

7. Ma J., Xie Y. Electrochemical performance of the homologous molybdenum (VI) redox-active gel polymer electrolyte system. *New Journal of Chemistry*, 2021, vol. 45, pp. 3418–3431.
8. Vijaya B., Usha Rani M. A free-standing CaO infused PVdF-HFP/PMMA polymer-nanocomposite as solid-state electrolytes for energy storage applications. *Ionics*, 2024, vol. 30, pp. 6061–6071.
9. Salakhova R.K., Tikhoobrazov A.B. Thermal resistance of electrolytic chromium coatings. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 2 (55), pp. 60–67. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-60-67.
10. Yun S., Park S.H., Yeon J.S. et al. Materials and Device Constructions for Aqueous Lithium–Sulfur Batteries. *Advanced Functional Materials*, 2018, vol. 28, p. 1707593.
11. Tyurikov E.V., Tihoobrazov A.B., Salahova R.K. Research of properties of the diluted self-regulating chromium plating electrolyte with nano-scale aluminum oxide particles. *Trudy VIAM*, 2015, no. 6, pp. 45–52. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 01, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-6-6-6.
12. Nguyen H.V.T., Bin Faheem A., Kwak K., Lee K.K. Propionitrile as a single organic solvent for high voltage electric double-layer capacitors. *Journal of Power Sources*, 2020, vol. 463, p. 228134.
13. Chen Z., Wang K., Pei P. et al. Advances in electrolyte safety and stability of ion batteries under extreme conditions. *Nano Research*, 2023, vol. 16, pp. 2311–2324.
14. Aruchamy K., Ramasundaram S., Divya S. et al. Gel Polymer Electrolytes: Advancing Solid-State Batteries for High-Performance Applications. *Gels*, 2023, vol. 9, p. 585.
15. Janek J., Zeier W.G. A solid future for battery development. *Nature Energy*, 2016, vol. 1, p. 16141.
16. Voropaeva D.Yu., Stenina I.A., Yaroslavtsev A.B. Solid electrolytes: towards increasing the power of lithium-ion batteries. *Uspekhi khimii*, 2024, vol. 93, no. 6, art. RCR5126. DOI: 10.59761/RCR5126.
17. Liu J., Khanam Z., Ahmed S. et al. A study of low-temperature solid-state supercapacitors based on Al-ion conducting polymer electrolyte and graphene electrodes. *Journal of Power Sources*, 2021, vol. 488, p. 229461.
18. Kulova T.L., Skundin A.M. Polymer electrolytes for sodium-ion batteries. *Elektrokhimicheskaya energetika*, 2018, vol. 18, pp. 26–47.
19. Zhang W., Liu K., Wang T. et al. Tough and self-healing all-in-one supercapacitor enabled by triple-network redox carrageenan and sodium carboxymethylcellulose reinforcing gel polymer electrolyte. *Journal of Alloys and Compounds*, 2024, vol. 1006, p. 176106.
20. Qin G., Wu C., Song X. et al. Multifunctional enhanced energy density integrated supercapacitor based on self-healing redox-mediated gel polymer electrolyte. *Fuel*, 2024, vol. 357, p. 130033.
21. Stepanova E.V., Ivakhnenko Yu.A., Maximov V.G., Istomin A.V. Investigation of technologically significant physical properties of various brands of polyvinyl alcohol. *Trudy VIAM*, 2024, no. 2 (132). pp. 23–33. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 01, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-2-23-33.
22. Deng X., Huang Y., Song A. et al. Gel polymer electrolyte with high performances based on biodegradable polymer polyvinyl alcohol composite lignocellulose. *Materials Chemistry and Physics*, 2019, vol. 229, pp. 232–241.
23. Jinisha B., Anilkumar K.M., Manoj M. et al. Solid-state supercapacitor with impressive performance characteristics, assembled using redox-mediated gel polymer electrolyte. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 2019, vol. 23, pp. 3343–3353.
24. Wang J., Chen G., Song S. Na-ion conducting gel polymer membrane for flexible supercapacitor application. *Electrochimica Acta*, 2020, vol. 330, p. 135322.
25. Tu Q.-M., Fan L.-Q., Pan F. et al. Design of a novel redox-active gel polymer electrolyte with a dual-role ionic liquid for flexible supercapacitors. *Electrochimica Acta*, 2018, vol. 268, pp. 562–568.
26. George Socrates. *Infrared and raman characteristic group frequencies: tables and charts*. 3rd ed. Wiley, 2001, 368 p.

27. Elamin K., Björklund J., Nyhlén F. et al. Glass transition and relaxation dynamics of propylene glycol–water solutions confined in clay. *Journal of Chemical Physics*, 2014, vol. 141, p. 034505.
28. Tsiptsias C., Fardis D., Ntampou X. et al. Thermal behavior of poly(vinyl alcohol) in the form of physically crosslinked film. *Polymers*, 2023, vol. 15, p. 1843.
29. Taghizadeh M.T., Yeganeh N., Rezaei M. The investigation of thermal decomposition pathway and products of poly(vinyl alcohol) by TG-FTIR. *Journal of Applied Polymer Science*, 2015, vol. 132, p. 42117.
30. Lu Z., Yang L., Guo Y. Thermal behavior and decomposition kinetics of six electrolyte salts by thermal analysis. *Journal of Power Sources*, 2006, vol. 156, pp. 555–559.
31. Song L.X., Guo X.Q., Du F.Y., Bai L. Thermal degradation comparison of polypropylene glycol and its complex with  $\beta$ -cyclodextrin. *Polymer Degradation and Stability*, 2010, vol. 95, pp. 508–515.
32. Muhammad A.G., Nazir S., Rawat N. et al. Electrochemical application of poly(vinylidene fluoride-co-hexafluoropropylene) incorporated with trihexyl(tetradecyl)phosphonium dicyanamide and polyether-derived carbon. *Ionics*, 2025, vol. 31, pp. 4383–4392.
33. Rawat S., Singh P.K., Jain A. et al. Ionic liquid (1-butyl-1-methylpyrrolidinium trifluoromethanesulfonate) doped polyethylene polymer electrolyte for energy devices. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2024, vol. 35, p. 1643.
34. Kumar S., Singh P.K., Agarwal D. et al. Structure, dielectric, and electrochemical studies on poly(vinylidene fluoride-co-hexafluoropropylene)/ionic liquid 1-ethyl-3-methylimidazolium tricyanomethanide-based polymer electrolytes. *Physica Status Solidi (a)*, 2022, vol. 219, p. 2100711.
35. Saeed M.A.M., Abdullah O.Gh. Effect of high ammonium salt concentration and temperature on the structure, morphology, and ionic conductivity of proton-conductor solid polymer electrolytes based PVA. *Membranes*, 2020, vol. 10, p. 262.
36. Dennis J.O., Shukur M.F., Aldaghri O.A. et al. A review of current trends on polyvinyl alcohol (PVA)-based solid polymer electrolytes. *Molecules*, 2023, vol. 28, p. 1781.

#### Информация об авторах

**Архипова Екатерина Анатольевна**, старший научный сотрудник, к.х.н., МГУ им. М.В. Ломоносова, dekanat@chem.msu.ru

**Леонов Александр Андреевич**, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Иванов Антон Сергеевич**, старший научный сотрудник, к.х.н., МГУ им. М.В. Ломоносова, dekanat@chem.msu.ru

**Деянков Данила Андреевич**, аспирант, МГУ им. М.В. Ломоносова, dekanat@chem.msu.ru

**Купренко Степан Юрьевич**, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н., МГУ им. М.В. Ломоносова, dekanat@chem.msu.ru

**Кузнецова Наталья Николаевна**, старший научный сотрудник, к.х.н., МГУ им. М.В. Ломоносова, dekanat@chem.msu.ru

#### Information about the authors

**Ekaterina A. Arkhipova**, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Chem.), Lomonosov Moscow State University, dekanat@chem.msu.ru

**Alexander A. Leonov**, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Anton S. Ivanov**, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Chem.), Lomonosov Moscow State University, dekanat@chem.msu.ru

**Danila A. Deyankov**, Graduate Student, Lomonosov Moscow State University, dekanat@chem.msu.ru

**Stepan Yu. Kuprenko**, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Phys. & Math.), Lomonosov Moscow State University, dekanat@chem.msu.ru

**Natalia N. Kuznetsova**, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Chem.), Lomonosov Moscow State University, dekanat@chem.msu.ru

Статья поступила в редакцию 08.12.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 26.12.2025.

The article was submitted 08.12.2025; approved and accepted for publication after reviewing 26.12.2025.