

Л. К. Матковская^{1,2}, М. В. Юрженко¹, Е. П. Мамуня¹, Ж. Буато²

¹Институт химии высокомолекулярных соединений Национальной академии наук Украины, Киев, Украина

²Университет Лион 1, Лаборатория инженерии полимерных материалов, Виллербан, Франция

ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ СТРУКТУРОЙ, ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ ИОНОПРОВОДЯЩИХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ЭПОКСИДНЫХ ОЛИГОМЕРОВ И СОЛИ ПЕРХЛОРАТА ЛИТИЯ

Аннотация. Твердые полимерные электролиты (ТПЭ) могут выступать в качестве ионопроводящего материала в различных электрохимических устройствах. Значительные усилия исследователей в области полимеров направлены на достижение высокой ионной проводимости одновременно с улучшенной механической стабильностью ТПЭ. Целью данной работы является исследование взаимосвязи между структурой, электрическими и диэлектрическими свойствами сшитого ионопроводящего полимера на основе смеси олигомеров, которые имеют сходные функциональные эпоксидные группы. Методами дифференциальной сканирующей калориметрии, широкоугольной дифракции рентгеновских лучей и широкополосной диэлектрической спектроскопии изучено влияние содержания соли перхлората лития на структуру и свойства полимерных систем, синтезированных на основе эпоксидного алифатического олигомера – диглицидилового эфира полиэтиленгликоля ДЭГ-1 и эпоксидиановой смолы ЭД-20, отверждение которых проводилось полиэтиленполиамином. Установлено, что температура стеклования синтезированных систем возрастает с увеличением количества соли LiClO₄, что связано с образованием координационных комплексов между катионами лития и атомами макромолекулярных цепей ДЭГ-1 и ЭД-20. Присутствие на широкоугольной рентгеновской дифрактограмме одного дифракционного максимума диффузного типа, угловое значение которого составляет приблизительно 19,6, свидетельствует, что системы являются аморфными и характеризуются ближним порядком при трансляции в пространстве фрагментов их межузловых молекулярных звеньев. Действительные составляющие диэлектрической проницаемости и комплексной электрической проводимости зависят от содержания соли перхлората лития и температуры, при которой проводились измерения. Максимальный уровень ионной проводимости и диэлектрической проницаемости выявлен при повышенных температурах у систем, синтезированных с концентрацией соли перхлората лития 30 м. ч.

Ключевые слова: алифатический и ароматический олигомеры, соль перхлората лития, аморфная система, температура стеклования, ионная проводимость

Для цитирования. Взаимосвязь между структурой, электрическими и диэлектрическими свойствами ионопроводящих полимерных композитов на основе эпоксидных олигомеров и соли перхлората лития / Л. К. Матковская [и др.] // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2017. – №4. – С. 32–37.

L. K. Matkovska^{1,2}, M. V. Iurzhenko¹, Ye. P. Mamunya¹, G. Boiteux²

¹Institute of Macromolecular Chemistry of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

²University of Lyon, University Lyon 1, Laboratory for Polymer Materials Engineering, Villeurbanne, France

THE RELATIONSHIP BETWEEN STRUCTURE, ELECTRICAL AND DIELECTRIC PROPERTIES OF THE ION-CONDUCTING POLYMER COMPOSITES BASED ON THE EPOXY OLIGOMERS AND THE LITHIUM PERCHLORATE SALTS

Abstract. Solid polymer electrolytes (SPE) have received a great attention to the decisive role as an ionic conductor in various electrochemical devices. Significant efforts have been devoted to the high ionic conductivity with better mechanical stability of SPE. The aim of this work is to investigate the relationship between structure, electrical and dielectric properties of the crosslinked ion-conducting polymers based on a mixture of oligomers with similar functional epoxy groups. The effect of lithium perchlorate salt content on structure and properties of the synthesized polymer systems based on aliphatic epoxy oligomer – diglycidylether of ethylene glycol DEG-1 and epoxy-diane resin ED-20, which were cured by polyethylene polyamine, has been studied by means of the Differential Scanning Calorimetry, the Wide Angle X-ray Diffraction and the Broadband Dielectric Spectroscopy. It was found that the glass transition temperature of the synthesized systems increases with increasing amount of the LiClO₄ that is connected with formation of coordination complexes between lithium cations and atoms of macromolecular chains. Presence of one single diffraction maximum of the diffuse type, an angular value of which is approximately 19.6, on the wide angle X-ray diffractograms indicates that systems are amorphous and they are characterized by the short-range ordering. The real parts of permittivity and complex electrical conductivity depend on the content of lithium perchlorate salt and temperature of measurements. The maximum level of ionic conductivity and permittivity at elevated temperatures was revealed for the systems with a concentration 30 phr. of the lithium perchlorate salt.

Keywords: aliphatic and aromatic oligomers, lithium perchlorate salt, amorphous system, glass transition temperature, ionic conductivity

For citation. Matkovska L. K., Iurzenko M. V., Mamunya Ye. P., Boiteux G. The relationship between structure, electrical and dielectric properties of the ion-conducting polymer composites based on the epoxy oligomers and the lithium perchlorate salts. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2017, no. 4, pp. 32–37 (in Russian).

Введение. Разработка новых твердых полимерных электролитов (ТПЭ) была и остается важной задачей (поскольку до сих пор не достигнуто оптимальное соотношение между высокой ионной проводимостью и хорошей технологичностью материала [1]) в связи с необходимостью поиска новых, более эффективных видов электролитов для расширения области их применения в различных устройствах [2]. ТПЭ, как правило, включают в себя соли различных металлов, растворенных в полимере, который формирует твердую матрицу с ионной проводимостью [3, 4]. Также считается, что при разработке и создании твердотельного электролитного материала целесообразно использовать полимеры, поскольку они могут сочетать в себе такие важные характеристики, как технологичность формирования и обработки, высокая термическая стабильность (по сравнению с существующими жидкостными аналогами), гибкость и легкость формообразования, универсальность, высокая плотность энергии, безопасность, нетоксичность и т. д. [5–7]. Добавление солей в полимеры обеспечивает наличие источника ионов и сопутствует их движению вдоль полимерной цепи, что играет решающую роль в процессе переноса ионов в полимерных электролитах [8]. Среди полимеров, применяемых для создания ТПЭ, наиболее изучен полиэтиленоксид (ПЭО). Это связано с эффективностью координации ионов металлов в нем благодаря оптимальным расстояниям и ориентации атомов эфирного кислорода в его цепях [3]. В то же время ПЭО характеризуется низкой ионной проводимостью при комнатной температуре, что обусловлено высокой степенью его кристалличности и высокой температурой плавления его кристаллической фазы [7, 9, 10]. Однако наличие атомов эфирного кислорода в полимерной цепи характерно не только для ПЭО, но и, к примеру, для эпоксидного алифатического олигомера – диглицидилового эфира полиэтиленгликоля (ДЭГ), что обеспечивает и в нем необходимый перенос катиона металла.

Эпоксидные смолы – это широкоизвестные термореактивные материалы, многие из которых благодаря своим термомеханическим, барьерным, химическим и электрическим свойствам, низкой усадке при отверждении и высокой адгезии к различным подложкам являются интересными объектами для использования в высокотехнологических областях промышленности [11]. Свойства конечных полимеров на их основе существенным образом зависят от конкретной комбинации используемого типа эпоксидных смол и отвердителей [12, 13]. Например, они часто применяются в качестве матрицы как в изоляционных, так и в электропроводящих полимерных композитах [14, 15]. Для получения материалов с оптимизированными свойствами широко используются смеси полимеров [16]. Сополимеры, которые имеют сходные функциональные эпоксидные группы, позволяют формировать сшитые системы благодаря единой для них реакции с диамином – отверждающим агентом [17].

Целью данной работы являлось исследование тепловых и электрических свойств сшитого в присутствии соли перхлората лития аморфного полимера на основе смеси алифатического и ароматического олигомеров, которые имеют сходные функциональные эпоксидные группы.

Методы. Для синтеза эпоксиполимерного ионопроводящего материала использовали эпоксидный олигомер ДЭГ-1 (45 %), эпоксидиановую смолу ЭД-20 (45 %) и соль перхлората лития (LiClO_4) с концентрацией от 0 до 30 м. ч. (массовых частей) к 100 % полимерной матрицы. Соль перхлората лития, ДЭГ-1 и ЭД-20 предварительно сушили 8 ч в вакууме при 80 °С. После высушивания соль растворяли в олигомере ДЭГ-1, нагревая раствор на песчаной бане, и добавляли ЭД-20. В качестве отвердителя использовали полиэтиленполиамин (10 %).

Теплофизические характеристики изучали методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) на приборе TA Instruments DSC Q2000 в интервале температур от –70 до +200 °С со скоростью нагрева 10 °С/мин. Температуры стеклования синтезированных полимерных систем ($T_{\text{ст}}$) определяли по ДСК-кривым при втором нагреве.

Особенности упорядоченности фрагментов макроцепи при трансляции их в объеме полимерных систем на основе эпоксидного полимера и соли перхлората лития LiClO_4 исследовали методом широкоугольной дифракции рентгеновских лучей (ШДРЛ) с использованием рентгеновского дифрактометра ДРОН-4-07, рентгенооптическая схема которого выполнена по методу

Дебая – Шерера на прохождение монохроматизированного Ni-фильтром первичного пучка через исследуемый образец полимера с использованием CuK_α -излучения ($\lambda = 1,54 \cdot 10^{-10}$ м). В качестве источника характеристического рентгеновского излучения использовали рентгеновскую трубку БСВ27Cu, которая работала в режиме $U = 30$ кВ, $I = 30$ мА. Исследование выполняли методом автоматического пошагового сканирования в интервале углов рассеяния (2θ) от 2,6 до 40 градусов, время экспозиции составляло 5 с. Эксперимент проводили при температуре $T = 20 \pm 2$ °С.

Электрическую (действительная составляющая комплексной электрической проводимости σ') и диэлектрическую (действительная составляющая комплексной диэлектрической проницаемости ϵ') характеристики синтезированных систем изучали с помощью широкополосного диэлектрического анализатора Novocontrol Alpha высокого разрешения, совмещенного с Novocontrol Quatro Cryosystem и оборудованного двухэлектродной схемой, в частотном диапазоне 10^{-1} – 10^7 Гц и температурном интервале от -60 до $+200$ °С. Напряжение, которое при этом прикладывалось к образцу, составляло 0,5 В. Исследуемые образцы имели геометрию диска диаметром 30 мм и толщиной 0,5 мм, на которые во избежание ошибок эксперимента и для высокой точности результатов предварительно путем напыления в вакууме наносилось алюминиевые покрытия, выступающие в роли электродов. Измерения проводились в изотермических условиях, скорость нагрева между изотермическими полками составляла 2 °С/мин. Данные анализировались с помощью программного обеспечения Novocontrol WinDETA версии 3.8.

Результаты. Температуры стеклования синтезированных систем напрямую зависят от содержания перхлората лития в реакционной смеси. Так, при содержании LiClO_4 равном 0 м. ч. температура стеклования в первом приближении равна 40 °С, при 5 м. ч. – 63 °С, при 10 м. ч. – 75 °С, при 15 м. ч. – 83 °С, при 20 м. ч. – 92 °С, а при 30 м. ч. – 103 °С. При введении в систему соли LiClO_4 , в структуру которой входят катионы лития Li^+ , в результате их электростатического взаимодействия с атомами макромолекулярных цепей ДЭГ-1 и ЭД-20 образуются координационные комплексы, что сопровождается смещением электронной плотности атомов кислорода и их частичной поляризацией. В результате происходит существенное уменьшение сегментальной подвижности цепей эпоксидных полимеров в пределах образованных комплексов, что и может быть причиной роста температуры стеклования полимерной матрицы.

Анализ широкоуголовых рентгеновских дифрактограмм систем на основе алифатического и ароматического олигомеров и LiClO_4 показал, что они являются аморфными (рис. 1) и, соответственно, характеризуются ближним порядком при трансляции в пространстве фрагментов их меж-

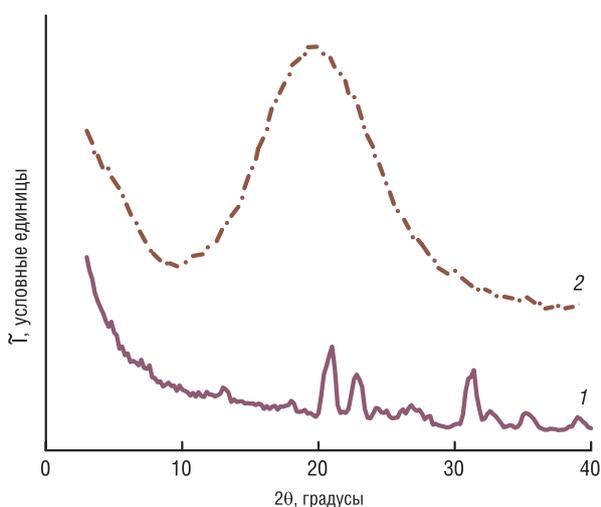


Рис. 1. Широкоуголовые рентгеновские дифрактограммы соли перхлората лития (1) и системы на основе алифатического ДЭГ-1 и ароматического олигомера ЭД-20 с 30 м. ч. LiClO_4 (2)

Fig.1. Wide-angle X-ray diffraction patterns of lithium perchlorate salt (1) and systems based on aliphatic DEG-1 and aromatic oligomer ED-20 with 30 phr. of LiClO_4 (2)

узловых молекулярных звеньев [18]. Об этом свидетельствует проявление на дифрактограмме одного дифракционного максимума диффузного типа, угловое положение ($2\theta_m$) которого составляет приблизительно 19,6. Средняя величина периода (d) ближнего порядка междуузловых молекулярных звеньев ДЭГ-1 и ЭД-20 при размещении их в пространстве, согласно уравнению Брэгга: $d = l (2\sin\theta_m)^{-1}$, где l – длина волны характеристического рентгеновского излучения ($l = 1,54 \cdot 10^{-10}$ м для CuK_α -излучения), – составляет $4,1 \cdot 10^{-10}$ м.

На рис. 2 приведены изотермы действительной составляющей диэлектрической проницаемости (ϵ') и действительной составляющей комплексной электрической проводимости (σ') для различной концентрации LiClO_4 в системах, полученные в пределах температур от -60 до $+200$ °С. Из приведенных данных очевидно, что числовые значения и характер кривых σ' и ϵ' зависят от двух факторов – содержания соли LiClO_4 и температуры изотермической пол-

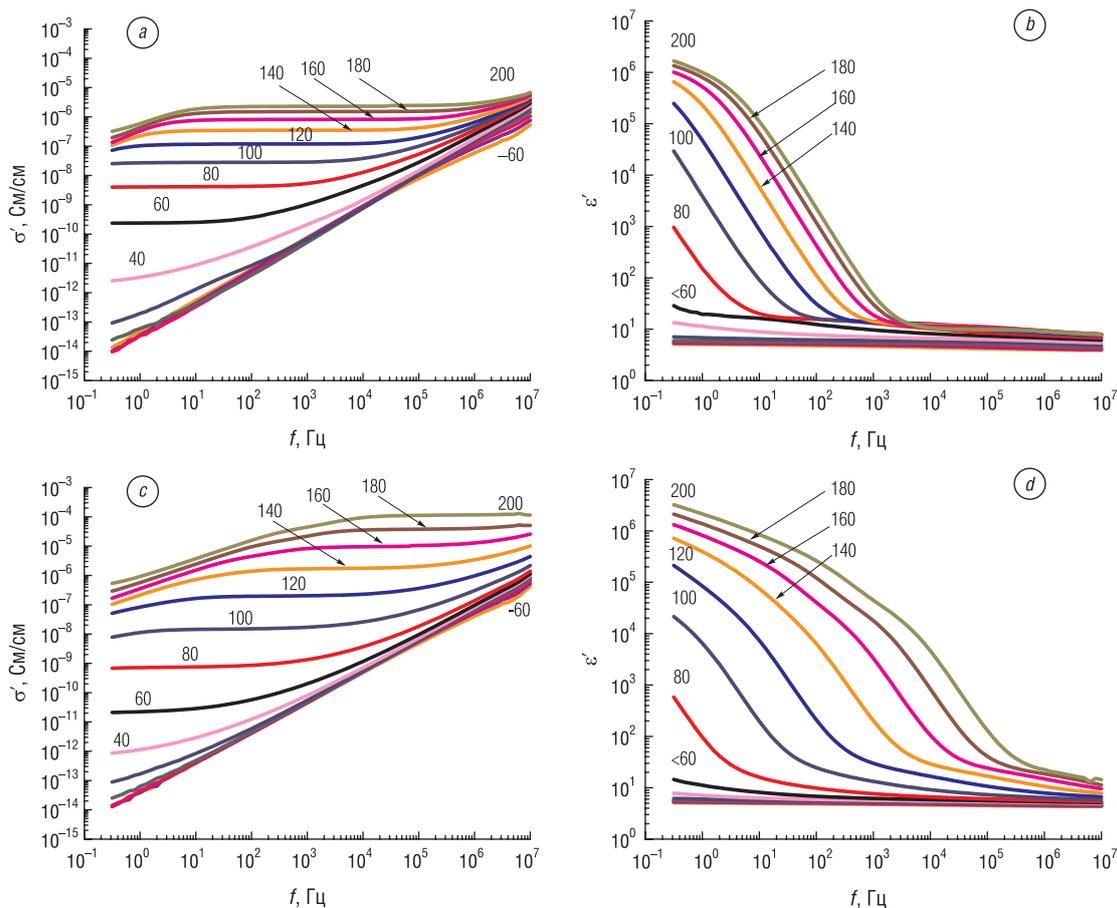


Рис. 2. Спектры действительной составляющей комплексной электропроводимости (a, c) и действительной составляющей комплексной диэлектрической проницаемости (b, d) эпоксидных систем с содержанием соли LiClO_4 0 м. ч. (a, b) и 30 м. ч. (c, d). Цифрами на кривых обозначены температуры измерений

Fig. 2. Spectra of the real part of complex conductivity (a, c) and the real part of complex dielectric permittivity (b, d) of the epoxy systems with 0 (a, b) and 30 (c, d) phr. of LiClO_4 . The values of temperature are shown near curves

ки, при которой проводилось измерение. При температурах ниже температуры стеклования диэлектрическая проницаемость систем имеет низкие значения, неизменные с частотой, что прежде всего свидетельствует о низкой подвижности макромолекулярных цепей полимерной матрицы. При увеличении температуры подвижность макромолекулярных цепей возрастает и количество свободных носителей заряда – ионов лития Li^+ , преодолевающих энергетический барьер и переходящих в проводящее состояние. Свободные катионы лития начинают двигаться вдоль полимерной цепи, образуя и разрушая координационные комплексы с эфирной связью полиэтиленоксидного фрагмента ДЭГ-1 и ОН-группой раскрытого эпоксидного цикла ДЭГ-1, а также с вторичной аминогруппой полиэтиленполиамин, с вторичной или третичной аминогруппами и эфирной связью одновременно [19]. Этот перенос заряда приводит к росту уровня электропроводимости систем и появлению плато при низких частотах (так называемое плато DC электропроводимости – область изотермы, на которой ее значения не зависят от частоты) на спектрах их действительной составляющей комплексной электропроводимости σ' .

Заключение. Таким образом, установлено, что синтезированные эпоксидные системы являются аморфными, при этом соль перхлората лития существенно влияет на их структуру, о чем свидетельствует повышение температуры стеклования их полимерной матрицы с 40 до 103 °C с увеличением концентрации соли LiClO_4 от 0 до 30 м. ч. Также добавление соли ведет к увеличению количества носителей заряда – катионов лития Li^+ и, соответственно, сопутствует росту ионной проводимости и диэлектрической проницаемости синтезированных систем. Максимальный уровень ионной проводимости ($\sim 10^{-4}$ См/см) и диэлектрической проницаемости ($3 \cdot 10^4$) при повышенных температурах (до 200 °C) выявлен для систем, синтезированных с концентрацией соли LiClO_4 30 м. ч.

Благодарности

Работа проводилась в рамках проекта «Создание новых электроактивных полимерных композитов с гибридными нанонаполнителями на основе концепции синергизма» Целевой комплексной программы фундаментальных исследований Национальной академии наук Украины «Фундаментальные проблемы создания новых наноматериалов и нанотехнологий».

Л. К. Матковская благодарит за финансовую поддержку Министерство иностранных дел Франции, грант Eiffel № 870734L.

Acknowledgments

This work was carried out in the frame of the project “Creation of new electroactive polymer composites with hybrid nanofillers based on synergism concept” of Target complex programme of fundamental investigations of the National Academy of Sciences of Ukraine “Fundamental problems of creation of new nanomaterials and nanotechnologies”.

L. K. Matkovska acknowledges the financial support of the French Ministry of Foreign Affairs, Eiffel grant № 870734L.

Список использованных источников

1. Ionic conductivity in polyethylene-b-poly(ethylene oxide)/lithium perchlorate solid polymer electrolytes / L. A. Guilherme [et al.] // *Electrochim. Acta*. – 2007. – Vol. 53, № 4. – P. 1503–1511.
2. Chai, M. N. Investigation on the conduction mechanism of carboxyl methylcellulose-oleic acid natural solid polymer electrolyte / M. N. Chai, M. I. N. Isa // *Int. J. Adv. Technol. Eng. Res.* – 2012. – Vol. 2, № 6. – P. 36–39.
3. Solid polymer electrolytes based on polyethylene oxide and lithium trifluoro-methane sulfonate (PEO–LiCF₃SO₃): Ionic conductivity and dielectric relaxation / N. K. Karan [et al.] // *Solid State Ionics*. – 2008. – Vol. 179, № 19–20. – P. 689–696.
4. Supramolecular polymer/metal salt complexes containing quadruple hydrogen bonding units / Kyung Ju Lee [et al.] // *J. Polym. Sci. Part B: Polym. Phys.* – 2007. – Vol. 45. – P. 3181–3188.
5. Guhathakurta, S. Lithium sulfonate promoted compatibilization in single ion conducting solid polymer electrolytes based on lithium salt of sulfonated polysulfone and polyether epoxy / S. Guhathakurta, K. Min // *Polymer*. – 2010. – № 51. – P. 211–221.
6. Free mesogen assisted assembly of the star-shaped liquid-crystalline copolymer/polyethylene oxide solid electrolytes for lithium ion batteries / Yo. Tonga [et al.] // *Electrochim. Acta*. – 2014. – № 118. – P. 33–40.
7. Klongkan, S. Effects of the addition of LiCF₃SO₃ salt on the conductivity, thermal and mechanical properties of PEO–LiCF₃SO₃ solid polymer electrolyte / S. Klongkan, J. Pumchusak // *Int. J. Chem. Eng. Appl.* – 2015. – Vol. 6, № 3. – P. 165–168.
8. Dey, A. Effect of nanofillers on thermal and transport properties of potassium iodide–polyethylene oxide solid polymer electrolyte / A. Dey, S. Karan, S. K. De // *Solid State Communications*. – 2009. – Vol. 149, № 31–32. – P. 1282–1287.
9. Das, S. Ionic conductivity and dielectric permittivity of PEO–LiClO₄ solid polymer electrolyte plasticized with propylene carbonate / S. Das, A. Ghosh // *AIP Advances*. – 2015. – Vol. 5, № 2. – Id. 027125.
10. Karmakar, A. Structure and ionic conductivity of ionic liquid embedded PEO–LiCF₃SO₃ polymer electrolyte / A. Karmakar, A. Ghosh // *AIP Advances*. – 2014. – № 4. – Id. 087112.
11. A review of lithium and non-lithium based solid state batteries / J. G. Kim [et al.] // *J. Power Sources*. – 2015. – № 282. – P. 299–322.
12. Co-continuous structural electrolytes based on ionic liquid, epoxy resin and organoclay: Effects of organoclay content / Ya. Yu [et al.] // *Materials & Design*. – 2016. – № 104. – P. 126–133.
13. Effects of curing agent on conductivity, structural and dielectric properties of an epoxy polymer / W. Jilani [et al.] // *Polymer*. – 2015. – № 79. – P. 73–81.
14. Development of a novel type of solid polymer electrolyte for solid state lithium battery applications based on lithium enriched poly(ethylene oxide) (PEO)/poly(vinyl pyrrolidone) (PVP) blend polymer / B. Jinisha [et al.] // *Electrochim. Acta*. – 2017. – № 235. – P. 210–222.
15. Soumen, J. Electrical conductivity enhancement of a polymer using butyl glycidyl ether (BGE)–lithium hexafluorophosphate (LiPF₆) complex / J. Soumen, Zh. Wei-Hong // *J. Mater. Sci.* – 2008. – № 43. – P. 4607–4617.
16. Polu, A. R. Ionic liquid doped PEO-based solid polymer electrolytes for lithium-ion polymer batteries / A. R. Polu, H.-W. Rhee // *Int. J. Hydrogen Energy*. – 2017. – № 42. – P. 7212–7219.
17. Study of ageing effects in polymer-in-salt electrolytes based on poly(acrylonitrile-co-butyl acrylate) and lithium salts / A. K. Łasińska [et al.] // *Electrochim. Acta*. – 2015. – № 169. – P. 61–72.
18. Штомпель, В. И. Структура линейных полиуретанов / В. И. Штомпель, Ю. Ю. Керча. – Киев: Наук. думка, 2008. – 247 с.
19. Вплив перхлорату літію на структуру епоксидних полімерних композитів / Л. Матковська [та ін.] // *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології*. – 2017. – Т. 15, № 1. – С. 175–184.

References

1. Guilherme L. A., Borges R. S., Mara E., Moraes S., Silva G. G., Pimentac M. A., Marletta A., Silva R. A. Ionic conductivity in polyethylene-b-poly(ethylene oxide)/lithium perchlorate solid polymer electrolytes. *Electrochimica Acta*, 2007, vol. 53, no.4, pp. 1503–1511.
2. Chai M. N., Isa M. I. N. Investigation on the conduction mechanism of carboxyl methylcellulose-oleic acid natural solid polymer electrolyte. *International Journal of Advanced Technology & Engineering Research*, 2012, vol. 2, no.6, pp. 36–39.
3. Karan N. K., Pradhan D. K., Thomas R., Natesan B., Katiyar R. S. Solid polymer electrolytes based on polyethylene oxide and lithium trifluoro-methane sulfonate (PEO–LiCF₃SO₃): Ionic conductivity and dielectric relaxation. *Solid State Ionics*, 2008, vol. 179, no.19–20, pp. 689–696.

4. Kyung Ju Lee, Yong Woo Kim, Joo Hwan Koh, Jong Hak Kim. Supramolecular polymer/metal salt complexes containing quadruple hydrogen bonding units. *Journal of Polymer Science. Part B: Polymer Physics*, 2007, vol. 45, pp. 3181–3188. Doi: 10.1002/polb.21316
5. Guhathakurta S., Min K. Lithium sulfonate promoted compatibilization in single ion conducting solid polymer electrolytes based on lithium salt of sulfonated polysulfone and polyether epoxy. *Polymer*, 2010, no. 51, pp. 211–221.
6. Tonga Yo., Chen L., He X., Chen Yi. Free mesogen assisted assembly of the star-shaped liquid-crystalline copolymer/polyethylene oxide solid electrolytes for lithium ion batteries. *Electrochimica Acta*, 2014, no. 118, pp. 33–40.
7. Klongkan S., Pumphusak J. Effects of the addition of LiCF₃SO₃ salt on the conductivity, thermal and mechanical properties of PEO-LiCF₃SO₃ solid polymer electrolyte. *International Journal of Chemical Engineering and Applications*, 2015, vol. 6, no. 3, pp. 165–168. Doi: 10.7763/IJCEA.2015.V6.474
8. Dey A., Karan S., De S. K. Effect of nanofillers on thermal and transport properties of potassium iodide–polyethylene oxide solid polymer electrolyte. *Solid State Communications*, 2009, vol. 149, no. 31–32, pp. 1282–1287.
9. Das S., Ghosh A. Ionic conductivity and dielectric permittivity of PEO-LiClO₄ solid polymer electrolyte plasticized with propylene carbonate. *AIP Advances*, 2015, vol. 5, no. 2, id. 027125. Doi: 10.1063/1.4913320
10. Karmakar A., Ghosh A. Structure and ionic conductivity of ionic liquid embedded PEO-LiCF₃SO₃ polymer electrolyte. *AIP Advances*, 2014, no. 4, id. 087112. Doi: 10.1063/1.4892855
11. Kim J. G., Son B., Mukherjee S., Schuppert N., Bates A., Kwon O., Choi M. J., Chung H. Y., Park S. A review of lithium and non-lithium based solid state batteries. *Journal of Power Sources*, 2015, no. 282, pp. 299–322.
12. Yu Ya., Zhang B., Wang Y., Qi G., Tian F., Yang J., Wang Sh. Co-continuous structural electrolytes based on ionic liquid, epoxy resin and organoclay: Effects of organoclay content. *Materials & Design*, 2016, no. 104, pp. 126–133.
13. Jilani W., Mzabi N., Fourati N., Zerrouki Ch., Gallot-Lavallee O., Zerrouki R., Guermazi H. Effects of curing agent on conductivity, structural and dielectric properties of an epoxy polymer. *Polymer*, 2015, no. 79, pp. 73–81.
14. Jinisha B., Anilkumar K. M., Manoj M., Pradeep V. S., Jayalekshmi S. Development of a novel type of solid polymer electrolyte for solid state lithium battery applications based on lithium enriched poly (ethylene oxide) (PEO)/poly (vinyl pyrrolidone) (PVP) blend polymer. *Electrochimica Acta*, 2017, no. 235, pp. 210–222.
15. Soumen J., Wei-Hong Zh. Electrical conductivity enhancement of a polymer using butyl glycidyl ether (BGE)–lithium hexafluorophosphate (LiPF₆) complex. *Journal of Materials Science*, 2008, no. 43, pp. 4607–4617. Doi: 10.1007/s10853-008-2677-z
16. Polu A. R., Rhee H.-W. Ionic liquid doped PEO-based solid polymer electrolytes for lithium-ion polymer batteries. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, no. 42, pp. 7212–7219.
17. Łasińska A. K., Marzantowicz M., Dygas J. R., Krok F., Florjańczyk Z., Tomaszewska A., Zygadło-Monikowska E., Żukowska Z., Lafont U. Study of ageing effects in polymer-in-salt electrolytes based on poly(acrylonitrile-co-butyl acrylate) and lithium salts. *Electrochimica Acta*, 2015, no. 169, pp. 61–72.
18. Shtompel V. I., Kercha Yu. Yu. *Structure of linear polyurethanes*. Kiev, Naukova dumka Publ., 2008. 247 p. (in Russian).
19. Matkovska L., Tkachenko I., Demchenko V., Iurzhenko M., Mamunya Ye. The effect of lithium perchlorate on the structure of epoxy resin composites. *Nanosistemi. Nanomateriali. Nanotehnologii*, 2017, vol. 15, no. 1, pp. 175–184 (in Ukrainian).

Информация об авторах

Матковская Любовь Казимировна – аспирант, Институт химии высокомолекулярных соединений Национальной академии наук Украины (Харьковское шоссе, 48, 02160, Киев, Украина); Лаборатория инженерии полимерных материалов, Университет Лион 1 (бульвар А. Латардже, 15, 69622, Виллербан, Франция). E-mail: lovemk@ukr.net

Юрженко Максим Владимирович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт химии высокомолекулярных соединений Национальной академии наук Украины (Харьковское шоссе, 48, 02160, Киев, Украина). E-mail: 4ewip@ukr.net

Мамуня Евгений Петрович – доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, Институт химии высокомолекулярных соединений Национальной академии наук Украины (Харьковское шоссе, 48, 02160, Киев, Украина). E-mail: ymamunya@ukr.net

Буато Жизель – доктор habilitованый, руководитель исследований, Лаборатория инженерии полимерных материалов, Университет Лион 1 (бульвар А. Латардже, 15, 69622, Виллербан, Франция). E-mail: gisele.boiteux@univ-lyon1.fr

Information about the authors

Liubov K. Matkovska – Postgraduate Student, Institute of Macromolecular Chemistry of the National Academy of Sciences of Ukraine (48, Kharkivske chaussee, 02160, Kyiv, Ukraine); University of Lyon, University Lyon 1, Laboratory for Polymer Materials Engineering, UMR CNRS 5223, IMP@LYON1 (15, Boulevard A. Latarjet, 69622, Villeurbanne, France). E-mail: lovemk@ukr.net

Maksym V. Iurzhenko – Ph. D. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Senior Researcher, Institute of Macromolecular Chemistry of the National Academy of Sciences of Ukraine (48, Kharkivske chaussee, 02160, Kyiv, Ukraine). E-mail: 4ewip@ukr.net

Yevgen P. Mamunya – D. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Leading Researcher, Institute of Macromolecular Chemistry of the National Academy of Sciences of Ukraine (48, Kharkivske chaussee, 02160, Kyiv, Ukraine). E-mail: ymamunya@ukr.net

Gisele Boiteux – Dr. Hab. (Physics), Director of Research CNRS, University of Lyon, University Lyon 1, Laboratory for Polymer Materials Engineering, UMR CNRS 5223, IMP@LYON1 (15, Boulevard A. Latarjet, 69622, Villeurbanne, France). E-mail: gisele.boiteux@univ-lyon1.fr