



<https://doi.org/10.15407/polymerj.46.02.096>
UDC: 537.226

SERHII BILYI^{1*} (ORCID: 0000-0002-6967-9037), EDUARD LYSENKOV^{2**} (ORCID: 0000-0002-1369-4609),
VALERY KLEPKO¹ (ORCID: 0000-0001-8089-8305)

¹Institute of Macromolecular chemistry NAS of Ukraine, 48, Kharkivske Highway, Kyiv, 02155, Ukraine,

²Petro Mohyla Black Sea National University, 10, 68 Desantnykiv Str., Mykolaiv, 54003, Ukraine

*e-mail: sergeybilyi@gmail.com

**e-mail: ealysenkov@ukr.net

THE EFFECT OF DISPERSION TIME OF MONTMORILLONITE ON THE DIELECTRIC PROPERTIES AND CONDUCTIVITY OF SYSTEMS BASED ON POLYETHYLENE GLYCOL

In this work, the effect of ultrasonic dispersion time on the dielectric properties and conductivity of nanocomposites was studied. Model systems based on polyethylene glycol and montmorillonite (PEG-MMT) were prepared. All samples had the same composition and filler content (5% by weight), and the ultrasonic treatment time ranged from 5 to 12 minutes. To determine the dependence of the properties of the systems on the dispersion time, the method of dielectric relaxation spectroscopy was used.

It was found that an increase in the dispersion time leads to an increase in the dielectric constant of the systems. The effect of increasing the dispersion time on the dielectric constant in the case of the PEG-MMT system is similar to the effect caused by increasing the nanoclay content due to the decrease in the mobility of the macromolecular segments and the partial intercalation of the polymer into the interlayer space of the MMT. When analyzing the relaxation characteristics of the investigated systems, it was found that as the dispersion time increases, the relaxation regions shift toward higher frequencies, while the relaxation time decreases. This phenomenon is explained by the inhibition of the segmental mobility of the macromolecules due to the increase in the number of steric hindrances caused by the delamination of MMT. In addition, there may have been an increase in the number of charge carriers that are released during the intercalation of the polymer into the interlayer space of MMT, leading to their contribution to the dielectric properties in the form of conductivity relaxation. The experimental values of electrical conductivity at alternating current for the PEG-MMT system were modeled using the Jonscher equation. From the obtained parameters, a change in the degree of interaction between the charge carriers and the matrix was revealed, which is a consequence of the initial delamination of montmorillonite plates, and then their subsequent aggregation into denser structures, the area of interaction with the polymer matrix is much smaller.

Key words: nanocomposites, montmorillonite, dielectric relaxation spectroscopy, ultrasonic dispersion, polyethylene glycol.

УДК 537.226

Сергій Білий^{1*}, Едуард Лисенков^{2**}, Валерій Клепко¹

¹Інститут хімії високомолекулярних сполук НАН України, 48, Харківське шосе, Київ, 02155, Україна,

²Чорноморський національний університет імені Петра Могили, 10, вул. 68 десанників, Миколаїв, 54003,

Україна

*e-mail: sergeybilyi@gmail.com

**e-mail: ealysenkov@ukr.net

Цитування: Bilyi Serhii, Lysenkov Eduard, Klepko Valery. The effect of dispersion time of montmorillonite on the dielectric properties and conductivity of systems based on polyethylene glycol. Polimernyi Zhurnal. 2024. 46, no. 2: 096—102. <https://doi.org/10.15407/polymerj.46.02.096>

© Publisher PH "Akadempriodyka" of the NAS of Ukraine, 2024. This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons CC BY-NC-ND licence

ВПЛИВ ТРИВАЛОСТІ ДИСПЕРГУВАННЯ МОНТМОРИЛОНІТУ НА ДІЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТА ПРОВІДНІСТЬ СИСТЕМ НА ОСНОВІ ПОЛІЕТИЛЕНГЛІКОЛЮ

Методом діелектричної релаксаційної спектроскопії досліджено вплив тривалості ультразвукового диспергування на діелектричні властивості та провідність нанокомпозитів на основі поліетиленгліколю й монтморилоніту (ММТ). Усі модельні системи мали однаковий склад (вміст наповнювача становив 5 % мас.), а тривалість ультразвукової обробки змінювалася від 5 до 12 хвилин. Встановлено, що збільшення тривалості диспергування підвищує діелектричну проникність систем; подібний вплив чинить підвищення вмісту наноглини в композитах унаслідок зменшення рухливості сегментів макромолекул і часткової інтеркаляції полімеру в міжшаровий простір наночастинок ММТ. Аналіз релаксаційних характеристик досліджуваних систем показав, що зі зростанням тривалості диспергування відбувається зсув областей релаксації у бік вищих частот, час релаксації при цьому скорочується. Це явище пояснюється гальмуванням сегментальної рухливості макромолекул за рахунок збільшення кількості стеричних перешкод внаслідок розшарування ММТ. Крім того, можливе зростання кількості носіїв заряду, які вивільняються під час інтеркаляції полімеру в міжшаровий простір ММТ, та їхнього внеску в діелектричні характеристики у формі релаксації провідності. Експериментальні значення електропровідності при змінному струмі для системи ПЕГ–ММТ були промодельовані за допомогою рівняння Йоншера. З аналізу отриманих параметрів було виявлено зміну ступеня взаємодії між носіями заряду й матрицею; ця зміна є наслідком послідовних процесів розшарування пластинок ММТ і подальшої їх агрегації у щільніші структури, площа взаємодії яких з полімерною матрицею значно менша.

Ключові слова: нанокомпозити, монтморилоніт, діелектрична релаксаційна спектроскопія, ультразвукове диспергування, провідність.

Вступ

Протягом останніх двох десятиліть велику увагу науковців привертають полімерні нанокомпозитні матеріали [1], які є багатофазними системами, що складаються з нанорозмірних частинок наповнювача (наноаповнювача), диспергованих у полімерну матрицю. Навіть незначна кількість введеного наноаповнювача, який зазвичай має значно більшу площу поверхні, ніж наповнювачі мікрометрового розміру з такою ж об'ємною часткою, може призвести до сильної взаємодії з полімерною матрицею [2]. Тому, нанокомпозитні полімерні матеріали, особливо ті, що містять наноаповнювачі з високим аспектним відношенням (відношенням довжини до товщини), мають значно кращі фізичні характеристики, такі як міцність на розрив, стійкість до діелектричного пробоя та термічні властивості, порівняно з ненаповненим полімером.

Нанокомпозити на основі полімерів і наноглини викликають підвищений промисловий та академічний інтерес завдяки їхнім унікальним механічним, термічним, хімічним та електричним властивостям [3]. Для виготовлення таких систем використовують кілька видів наноаповнювачів – шаруватих силікатів, найпо-

ширенішим з яких є монтморилоніт (ММТ) [4, 5]. Органічні полімери, наповнені невеликими кількостями (0,5–3,0 мас. %) ММТ, утворюють полімерно-глиняні нанокомпозити, які характеризуються прямим зв'язком структури матеріалу та його діелектричних властивостей [6]. Загалом дослідження нових полімерних матеріалів у галузі енергетики й електричних технологій мають велике значення як на національному, так і на міжнародному рівнях через дедалі більший попит на економічні та екологічно придатні матеріали для енергетичного обладнання [7, 8]. Тому нині полімерні нанокомпозитні матеріали привертають увагу багатьох дослідників у галузі діелектрики [9], де полімерні нанокомпозити вважаються сучасним діелектричним матеріалом із поліпшеними діелектричними характеристиками [10].

При дослідженні властивостей полімерних ММТ-вмісних нанокомпозитних матеріалів було встановлено, що їхні діелектричні властивості істотно залежать від кількості введеного наповнювача, функціоналізації його поверхні, характеру розподілу та фазового стану [11, 12]. Так у роботі [13] досліджували діелектричні властивості полімерних нанокомпозитів на основі поліетилену та ММТ. Встановлено, що попри низьку концентрацію додавання

дисперсного ММТ спричинило істотні зміни діелектричної реакції матеріалу – виникнення різноманітних процесів міжфазної релаксації та збільшення транспорту носіїв заряду всередині непровідного матеріалу. Крім того, початок нелінійного процесу перенесення заряду спостерігали за середніх частот для зразків з відносно малою кількістю наночастинок ММТ. Діелектричні властивості істотно залежать від характеру взаємодії між матрицею та наповнювачем. У роботі [14] досліджено особливості взаємодії між ціаноетильованою целюлозою та ММТ і діелектричні властивості такого матеріалу. Показано, що за частоти 1 кГц нанокомпозити мали високі значення діелектричної сталої – 71, 55 і 42 при наповненні 5, 10 і 15 % ММТ відповідно. Зменшення діелектричної сталої зі збільшенням вмісту ММТ дослідники пояснюють утворенням сітки, про що свідчить сильна взаємодія зв'язків між целюлозною матрицею й ММТ, що призводить до зниження молекулярної рухливості.

У недавніх роботах [15, 16] показано, що варіювання тривалості змішування (ультразвукового диспергування чи екструдуювання) істотно впливає на властивості полімерних нанокомпозитів. Зі збільшенням тривалості змішування зростає міжплощинна відстань у ММТ, що вказує на підвищення ступеня інтерналяції полімерної матриці. Водночас знижується кристалічність нанокомпозиту, що відповідає зростанню площі граничного шару полімер/наповнювач. Однак недостатньо вивченим залишається вплив тривалості змішування ММТ на діелектричні характеристики таких систем. Тому метою цієї роботи було вивчення впливу тривалості ультразвукового диспергування на діелектричні властивості та провідність систем на основі поліетиленгліколю (ПЕГ) і ММТ.

Експериментальна частина

Для дослідження впливу тривалості диспергування на структуру та властивості нанокомпозитів використовували модельні системи на основі ПЕГ і ММТ.

Поліетиленгліколь $M_w = 1000$, виробництва компанії Fluka, був обраний полімерною матрицею. Як наповнювач використовували органомодифікований ММТ.

ММТ з Пижевського родовища попередньо очищували за методикою, наведеною в роботі [17]. В органічну форму ММТ переводили у дві стадії: спочатку водну дисперсію мінералу (0,1 моль/л) обробляли п'ятикратним об'ємом розчину хлориду натрію. Потім мінерал відокремлювали від оброблюваного розчину центрифугуванням з подальшим відмиванням від хлориду натрію до негативної реакції на хлор-іон з азотнокислим сріблом. Органомодифікований ММТ отримували шляхом оброблення Na-форми мінералів гексадецилтриметиламонійбромідом ("Merck") за температури 75 °C протягом 24 год.

Перед використанням ПЕГ зневоднювали нагріванням у вакуумі протягом 4 год за температури 80–100 °C і залишкового тиску 300 Па. Зразки були виготовлені методом ультразвукового змішування в розплаві за температури 80 °C за допомогою ультразвукового диспергатора УЗД А-650. Вміст наповнювача становив 5 мас.%. (далі %). Всі зразки попередньо механічно змішували у розплаві протягом 2 хв.

Діелектричні властивості досліджували методом діелектричної релаксаційної спектроскопії, реалізованої на базі вимірювача іммітансу Е7-20. Частотний інтервал вимірювання становив від 10 Гц до 1 МГц, товщина зразків – 100 мкм, похибка вимірювання – не більше 1 %.

Результати дослідження та їх обговорення

На рис. 1 наведено графіки залежності діелектричної проникності (ϵ) від частоти для нанокомпозитів ПЕГ–ММТ, отриманих ультразвуковим диспергуванням. З рисунка видно, що діелектрична проникність усіх досліджуваних систем знижується зі збільшенням частоти, а її значення істотно залежить від тривалості диспергування. При збільшенні тривалості диспергування ϵ зростає. Для зразків, отриманих методом механічного змішування без застосування ультразвукового диспергатора ($t = 0$ хв), за частоти 1 кГц її значення становило 23,8. При збільшенні тривалості диспергування до 12 хв значення ϵ становило 65. Вплив на діелектричну проникність для систем ПЕГ–ММТ від збільшення тривалості диспергування аналогічний ефекту від збільшення вмісту

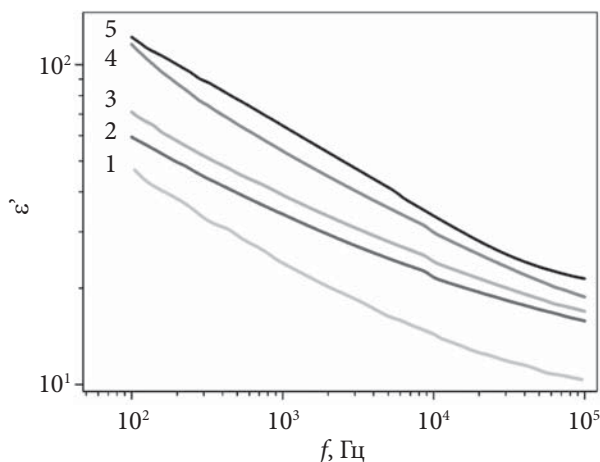


Рис. 1. Криві частотної залежності діелектричної проникності для систем на основі ПЕГ і ММТ, тривалість диспергації яких становила: 0 (1); 5 (2); 7 (3); 10 (4) та 12 хв (5)

наноглини через зниження рухливості макромолекулярних сегментів і часткову інтеркаляцію полімеру в міжшаровий простір ММТ [18]. Ще однією причиною такої поведінки діелектричної проникності є дипольні характеристики ММТ. Як відомо, ММТ містить на поверхні пластинок позитивні й негативні заряди і, отже, робить дипольний внесок у діелектричні характеристики нанокompозиту [19]. Зі збільшенням концентрації ММТ діелектрична проникність зростає через накопичення заряду на границях між матрицею та нанонаповнювачем.

Разом з тим, як видно з рис. 1, для досліджуваних систем ПЕГ–ММТ максимуми, пов'язані з дипольною релаксацією, не спостерігаються, що, ймовірно, пояснюється маскуванням релаксаційних ефектів поверхневими. При подальшому аналізі діелектричних спектрів використовували формалізм електричних модулів, який дає змогу уникнути маскування релаксації провідності і отримати додаткову інформацію про релаксаційні процеси в досліджуваних нанокompозитних системах. Спектри уявної частини комплексного електричного модуля для систем ПЕГ–ММТ наведені на рис. 2.

Як видно з рис. 2, на кривих частотної залежності M'' ($M'' = \epsilon'' / ((\epsilon')^2 + (\epsilon'')^2)$) спостерігаються максимуми, які, ймовірно, пов'язані з релаксацією провідності.

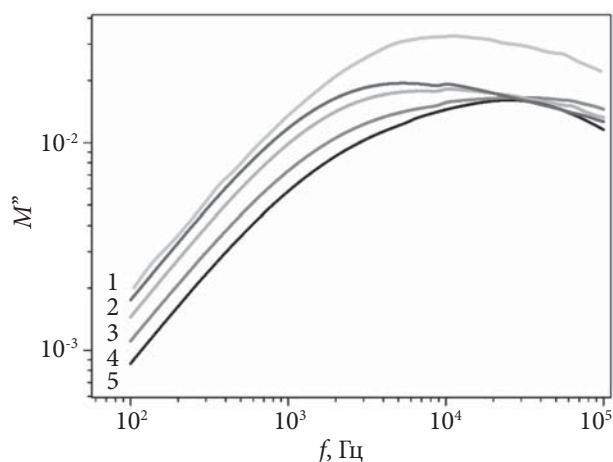


Рис. 2. Криві частотної залежності уявної частини електричного модуля для систем на основі ПЕГ і ММТ, тривалість диспергації яких становила: 0 (1); 5 (2); 7 (3); 10 (4) та 12 хв (5)

З використанням виразу $\tau = 1/2\pi f_{\max}$, а також значення f_{\max} залежності $M''(f)$, було розраховано часи релаксації для досліджуваних нанокompозитів з різною тривалістю диспергування наповнювача. Аналіз поданих на рис. 2 кривих показує, що при переході від механічного змішування до диспергування максимуми зміщуються в бік нижчих частот, при цьому час релаксації зростає від $2 \cdot 10^{-5}$ до $4,5 \cdot 10^{-5}$ с. При збільшенні тривалості диспергування спостерігається зсув областей релаксації у бік вищих частот, при цьому час релаксації знижується з $4,5 \cdot 10^{-5}$ до $5,2 \cdot 10^{-6}$ с. У цьому разі відбуваються два конкуруючих процеси. Перший процес пов'язаний з гальмуванням сегментальної рухливості макромолекул через зростання кількості стеричних перешкод внаслідок розшарування ММТ. Другий процес характеризує збільшення кількості носіїв заряду, які вивільняються при інтеркаляції полімеру в міжшаровий простір ММТ і роблять свій внесок у діелектричні характеристики у вигляді релаксації провідності. Варто відзначити, що час релаксації після 10 хв диспергації не змінюється, що може свідчити про певне «насичення» процесу змішування.

На рис. 3 наведені криві залежності електропровідності при змінному струмі від частоти електричного поля для нанокompозитів на основі ПЕГ і ММТ з різною тривалістю диспергування. З рисунка видно, що частота

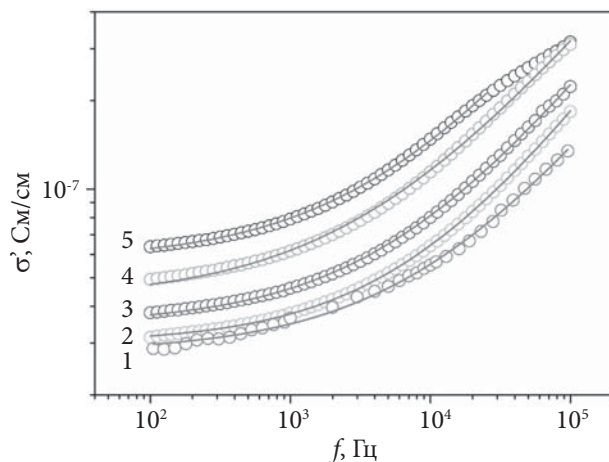


Рис. 3. Криві частотної залежності електропровідності при змінному струмі для систем на основі ПЕГ і ММТ, тривалість диспергації яких становила: 0 (1); 5 (2); 7 (3); 10 (4) та 12 хв (5). Суцільна лінія – модель Йоншера (рівняння (1))

електричного поля і тривалість диспергації наповнювача істотно впливають на електрофізичні властивості матеріалів. Встановлено, що за частоти 1 кГц електропровідність полімерного нанокмозиту, отриманого механічним змішуванням ($t = 0$ хв), становила $3,6 \cdot 10^{-8}$ См/см. Слід зауважити, що при переході від механічного змішування до ультразвукового диспергування ($t = 5$ хв), простежується незначне зростання електропровідності ($\sigma = 4 \cdot 10^{-8}$ См/см). Подальше збільшення тривалості диспергації до 12 хв підвищує цю величину до $\sigma = 8 \cdot 10^{-8}$ См/см. Така поведінка електропровідності цілком прогнозована й узгоджується з літературними даними для систем ПЕГ–органоглина [20]. Зростання електропровідності змінного струму зі збільшенням тривалості диспергації для систем ПЕГ–ММТ можна пояснити двома причинами. По-перше, через інтеркаляцію полімерних молекул у міжшаровий простір ММТ зростає кількість вільних носіїв заряду. По-друге, інтеркаляція спричиняє збільшення поверхні контакту між матрицею й наповнювачем, що знижує кристалічність полімеру, і, отже, збільшує частку аморфної фази, яка забезпечує швидші шляхи переносу зарядів [21].

За низьких частот носії заряду проходять велику відстань всередині композиту до зміни напрямку електричного поля. У цьому разі середня відстань, яку проходять носії заряду за

Таблиця. Параметри моделі Йоншера

Тривалість диспергації, хв	σ_{DC} , См/см	A , См/см	n
0	$2,8 \cdot 10^{-8}$	$3,4 \cdot 10^{-11}$	0,60
5	$3,0 \cdot 10^{-8}$	$2,5 \cdot 10^{-11}$	0,65
7	$3,4 \cdot 10^{-8}$	$5,2 \cdot 10^{-11}$	0,61
10	$4,2 \cdot 10^{-8}$	$1,3 \cdot 10^{-10}$	0,57
12	$5,7 \cdot 10^{-8}$	$1,2 \cdot 10^{-10}$	0,59

частот, менших від критичної частоти, більша, ніж довжина кореляції (розмір найбільшого кластера кінцевих розмірів). За високих частот електропровідність реалізується шляхом стрибків носіїв заряду між локалізованими станами, тому спостерігається майже лінійне зростання на графіку $\sigma(\omega)$ [22]. Електропровідність змінного струму в неупорядкованих твердих тілах $\sigma(\omega)$ проявляє універсальну поведінку й описується степеневим законом Йоншера [23]:

$$\sigma(\omega) = \sigma_{DC} + \sigma_{AC} = \sigma_{DC} + A\omega^n, \quad (1)$$

де: σ_{DC} – електропровідність постійного струму (поведінка, незалежна від частоти); ω – циклічна частота прикладеного електричного поля ($\omega = 2\pi f$), A – передекспоненційний фактор, n – показник степеня. Показник n характеризує ступінь взаємодії між носіями заряду й середовищем матриці.

Отримані криві частотної залежності електропровідності системи ПЕГ–ММТ (рис. 3) були промодельовані у рамках рівняння (1), розраховані параметри якого наведено в таблиці.

З таблиці видно, що параметр взаємодії n зростає при переході від механічного змішування до диспергації наповнювача у системі. Після цього спостерігається поступове зниження параметра n у діапазоні від 5 до 10 хв. Через 12 хв змішування за допомогою ультразвукового диспергатора параметр знижується. Це свідчить про зміну ступеня взаємодії між носіями заряду й матрицею, що є наслідком спочатку розшарування пластинок ММТ, а згодом подальшої їх агрегації у більш щільні агрегати, площа взаємодії яких з полімерною матрицею набагато менша.

Висновки

У результаті проведеного дослідження було вивчено вплив тривалості диспергування ММТ на діелектричні властивості та провід-

ність систем на основі ПЕГ. Показано, що діелектрична проникність систем зростає при збільшенні тривалості диспергування, аналогічно ефекту від збільшення вмісту наноглини, завдяки зниженню рухливості макромолекулярних сегментів і частковій інтеркаляції полімеру в міжшаровий простір ММТ.

При аналізі релаксаційних характеристик досліджуваних систем було встановлено, що за тривалішого диспергування спостерігається зсув областей релаксації у бік вищих частот, при цьому час релаксації знижується з $4,5 \cdot 10^{-5}$ до $5,2 \cdot 10^{-6}$ с. Такий ефект пояснюється гальмуванням сегментальної рухливості макромолекул через зростання кількості стеричних перешкод внаслідок розшарування ММТ. Крім того можливе зростання кількості носіїв заряду, які вивільняються при інтеркаляції полімеру в міжшаровий простір ММТ і роблять свій внесок у діелектричні характеристики у вигляді релаксації провідності.

Також було вивчено особливості електропровідності досліджуваних матеріалів. Встановлено, що частота електричного поля та

тривалість диспергації ММТ істотно впливають на електричні властивості досліджуваних систем. Електропровідність композиту, отриманого протягом 12 хв за допомогою ультразвукової диспергації, демонструє лише подвійне зростання, що пояснюється інтеркаляцією полімерних молекул у міжшаровий простір ММТ і збільшенням кількості вільних носіїв заряду. Крім того, інтеркаляція спричиняє зростання поверхні контакту між матрицею та наповнювачем, що збільшує частку аморфної фази, яка забезпечує швидші шляхи перенесення зарядів.

Експериментальні значення електропровідності при змінному струмі для систем ПЕГ-ММТ промодельовано у рамках рівняння Йоншера. З розрахованих параметрів виявлено зміну ступеня взаємодії між носіями заряду й матрицею, що є наслідком спочатку розшарування пластинок ММТ, а згодом подальшої їх агрегації у більш щільні агрегати, площа взаємодії яких з полімерною матрицею набагато менша.

REFERENCES

1. Darwish MSA, Mostafa MH, Al-Harbi LM. Polymeric Nanocomposites for Environmental and Industrial Applications. *Int J Mol Sci.* 2022, **23**(3): 1023. <https://doi.org/10.3390/ijms23031023>.
2. Karthick L., Rathinam R., Kalam S. A. et al. Influence of Nano-/Microfiller Addition on Mechanical and Morphological Performance of Kenaf/Glass Fibre-Reinforced Hybrid. *Composites Journal of Nanomaterials.* 2022, Article ID 9778224, <https://doi.org/10.1155/2022/9778224>.
3. Nagy D., Kókai E. Polymer-Based Nanocomposites with Nanoclay. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2018, **448**: 012021. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/448/1/012021>.
4. Vilarinho F., Vaz M.F., Silva A.S. The Use of Montmorillonite (MMT) in Food Nanocomposites: Methods of Incorporation, Characterization of MMT/Polymer Nanocomposites and Main Consequences in the Properties. *Recent Pat Food Nutr Agric.* 2020, **11**(1):13–26. <https://doi.org/10.2174/2212798410666190401160211>.
5. Soykan C., Akbay M. In-Situ Synthesis of Polymer–Clay Nanocomposites: Exfoliation of Organophilic Montmorillonite Nanolayers in Poly 2-ThiozylMethacrylamide. *Journal of Material Science and Technology Research.* 2016, **6**: 22–33. <https://doi.org/10.31875/2410-4701.2019.06.4>.
6. You L., Liu B., Hua H., Jiang H., Yin C., Wen F. Energy Storage Performance of Polymer-Based Dielectric Composites with Two-Dimensional Fillers. *Nanomaterials.* 2023, **13**(21):2842. <https://doi.org/10.3390/nano13212842>.
7. Amin K. F., Sen A., Hoque M. E. Polymer nanocomposites for energy. Chapter 13. In book: *Advanced Polymer Nanocomposites.* Woodhead Publishing. Ed.: Hoque E., Ramar K., Sharif A., Woodhead Publishing: 2022, ISBN: 978-0-12-824492-0 <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824492-0.00007-6>.
8. Pandey, J. C., & Singh, M. Dielectric polymer nanocomposites: Past advances and future prospects in electrical insulation perspective. *SPE polymers,* 2021, **2**(4): 236–256 <https://doi.org/10.1002/pls2.10059>.
9. Latif S., Izhar F. Imran M., Hussain N., Bilal M. Polymer nanocomposites for dielectric and energy storage applications, Chapter 20. In book: *Smart Polymer Nanocomposites: 435-460,* Ed.: Ali N., Bilal M., Khan A., Gupta R.K., Nguyen T.A. Elsevier: 2023, ISBN: 978-0-323-91611-0, <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91611-0.00016-5>.
10. Wang S., Luo Z., Liang J., Hu J., Jiang N., He J., Li Q. Polymer Nanocomposite Dielectrics: Understanding the Matrix/Particle Interface *ACS Nano* 2022, **16**, 9: 13612–13656 <https://doi.org/10.1021/acsnano.2c07404>.

11. Anwar N, Ishtiaq M, Shakoora A, et al. Dielectric properties of polymer/clay nanocomposites. *Polymers and Polymer Composites*. 2021, **29**, 6: 807–813. <https://doi.org/10.1177/0967391120953250>.
12. Yu G., Cheng Y., Duan Z. Research Progress of Polymers/Inorganic Nanocomposite Electrical Insulating Materials. *Molecules*. 2022, **27**, 22: 7867. <https://doi.org/10.3390/molecules27227867>.
13. David E., Fréchet M., Zazoum B., Daran-Daneau C., Ngô A. D., Couderc H. Dielectric Properties of PE/Clay Nanocomposites. *Journal of Nanomaterials*, 2013, Article ID 703940, <http://dx.doi.org/10.1155/2013/703940>.
14. Madusanka N., Shivareddy S. G., Eddleston M. D., Hiralal P., Oliver R. A., Amaratunga, G. A. Dielectric behaviour of montmorillonite/cyanoethylated cellulose nanocomposites. *Carbohydrate Polymers*, 2017, **172**: 315–321. <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.05.057>.
15. Bilyi S.A., Lysenkov E.A., Nesin S.D., Klepko V.V. Effect of montmorillonite dispersion time on the structure and thermophysical properties of systems based on polyethylene glycol. *Polimernyi Zhurnal*, 2022, **44**, 4: 283–289. <https://doi.org/10.15407/polymerj.44.04.283>.
16. Bilyi S.A., Lysenkov E.A., Nesin S.D., Klepko V.V. Effect of mixing time on the structure and thermophysical characteristics of systems based on polyethylene glycol and organomodified montmorillonite. *Physics of disperse systems*, 2023, **61**: 8-16. <https://doi.org/10.18524/0367-1631.2023.61.290833>.
17. Bezrodnaya T.V., Nesprava V.V., Puchkovskaya G.A. et al. Structure and spectroscopic properties of organoclays doped by multiwall carbon nanotubes. *Journal of Applied Spectroscopy*, 2011, **78**: 50–58. <https://doi.org/10.1007/s10812-011-9424-y>.
18. Lysenkov E.A., Gomza Y.P., Minenko M.M., Klepko V.V. Dielectric properties and conductivity of electrolytes based on oligoethylene glycol and anisometric nanofillers // *Polimernyi Zhurnal*, 2010, **32**, no.1: 17–22.
19. George S., Varughese K. T., Thomas, S. Dielectric properties of isotactic polypropylene/nitrile rubber blends: Effects of blend ratio, filler addition, and dynamic vulcanization. *Journal of Applied Polymer Science*, 1999, **73**, 2: 255–270. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4628\(19990711\)73:2<255::AID-APP12>3.0.CO;2-B](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4628(19990711)73:2<255::AID-APP12>3.0.CO;2-B).
20. Lysenkov E.A., Gomza Yu.P., Klepko V.V., Kunytskyi Yu.A., Kunytska L.Yu. Influence of the nature of mineral nanofillers on the structure and properties of nanocomposites based on polyethylene glycol. *Nanosistemy, nanomaterialy, nanotehnolohii* 2010, **8**, 3: 1001–1016. https://www.imp.kiev.ua/nanosys/ru/articles/2010/3/nano_vol8_iss3_p0675p0689_2010_abstract.html
21. Chen W., Xu Q., Yuan R. Z. Effect on ionic conductivity with modification of polymethylmethacrylate in poly (ethylene oxide)-layered silicate nanocomposites (PLSN). *Materials Science and Engineering: B*, 2000, **77**, 1: 15–18 [https://doi.org/10.1016/S0921-5107\(00\)00448-7](https://doi.org/10.1016/S0921-5107(00)00448-7).
22. Sinha S., Chatterjee S. K., Ghosh J., Meikap A. K. Analysis of the dielectric relaxation and ac conductivity behavior of polyvinyl alcohol-cadmium selenide nanocomposite films. *Polymer Composites*, 2015, **38**, 2: 287–298. <https://doi.org/10.1002/pc.23586>.
23. Rebeque, P. V., Silva, M. J., Cena, C. R., Nagashima, H. N., Malmonge, J. A., Kanda, D. H. F. Analysis of the electrical conduction in percolative nanocomposites based on castor-oil polyurethane with carbon black and activated carbon nanopowder. *Polymer Composites*, 2019, **40**, 1: 7–15 <https://doi.org/10.1002/pc.24588>.

Received 11.12.2023