

DOI: 10.17516/1999-494X-0437

УДК 537.31

Electrophysical Characteristics of a Polymer Composite Based on Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene with CuO Nanoparticles

Leonid Yu. Fedorov^{*a, b}, Nikolay A. Drokin^c,
Igor V. Karpov^{a, b} and Anatoly V. Ushakov^{a, b}

^a*Siberian Federal University
Krasnoyarsk, Russian Federation*

^b*Federal Research Center Krasnoyarsk
“Scientific Center of the SB RAS”
Krasnoyarsk, Russian Federation*

^c*Kirensky Institute of Physics
Federal Research Center KSC, SB RAS
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 25.08.2022, received in revised form 07.10.2022, accepted 04.11.2022

Abstract. The electrophysical properties of a composite material based on ultrahigh molecular weight polyethylene with a limited mass concentration of 0.5 wt% copper oxide CuO in the frequency range from 10^2 to 10^8 Hz were studied by impedance spectroscopy. It is assumed that the introduction of low concentrations of nanoparticles into the polymer composition contributes to their more uniform deposition on the surfaces of polymer granules. This makes it possible to reveal the most probable mechanisms of their polarization and the flow of electric current in a relatively homogeneous ensemble of nanoparticles in a polymer matrix during testing of such samples. It has been established that nanoparticles introduced into the polymer matrix have little effect on the processes of electric polarization, but lead to the appearance of frequency-dependent conductivity in a wide frequency range. This process is accompanied by a significant increase in dielectric losses. The electrophysical characteristics of the resulting composites are discussed taking into account the transfer of electric charges (ions or electrons) both along the internal and surface structures of CuO nanoparticles.

Keywords: vacuum arc discharge, nanocomposites, copper oxide, impedance, dielectric properties.

Acknowledgements. The research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation (project No. 20–19–00021).

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

* Corresponding author E-mail address: 1401-87@mail.ru

Citation: Fedorov L. Yu., Drokin N. A., Karpov I. V., Ushakov A. V. Electrophysical characteristics of a polymer composite based on ultrahigh molecular weight polyethylene with CuO nanoparticles. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2022, 15(7), 802–811. DOI:10.17516/1999-494X-0437

Электрофизические характеристики полимерного композита на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена с наночастицами CuO

Л. Ю. Федоров^{а, б}, Н. А. Дрокин^в,
И. В. Карпов^{а, б}, А. В. Ушаков^{а, б}

*^аСибирский федеральный университет
Российская Федерация, Красноярск*

*^бФедеральный исследовательский центр
«Красноярский научный центр СО РАН»*

Российская Федерация, Красноярск

*^вИнститут физики им. Л. В. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН
Российская Федерация, Красноярск*

Аннотация. Методом импедансной спектроскопии исследованы электрофизические свойства композитного материала на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена с ограниченной массовой концентрацией 0,5 мас.% оксида меди CuO в диапазоне частот от 10^2 до 10^8 Гц. Предполагается, что введение в состав полимера малых концентраций наночастиц способствует более равномерному их осаждению на поверхностях полимерных гранул. Это позволяет в процессе тестирования таких образцов выявить наиболее вероятные механизмы их поляризации и протекания электрического тока в относительно однородном ансамбле наночастиц в полимерной матрице. Установлено, что внедряемые в полимерную матрицу наночастицы незначительно влияют на процессы электрической поляризации, но приводят к появлению частотно-зависимой проводимости в широком диапазоне частот. Этот процесс сопровождается существенным возрастанием диэлектрических потерь. Электрофизические характеристики полученных композитов обсуждаются с учётом переноса электрических зарядов (ионов или электронов) как по внутренней, так и по поверхностной структуре наночастиц CuO.

Ключевые слова: вакуумный дуговой разряд, нанокompозиты, оксид меди, импеданс, диэлектрические свойства.

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20–19–00021).

Цитирование: Федоров Л. Ю. Электрофизические характеристики полимерного композита на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена с наночастицами CuO / Л. Ю. Федоров, Н. А. Дрокин, И. В. Карпов, А. В. Ушаков // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2022, 15(7). С. 802–811. DOI:10.17516/1999-494X-0437

Введение

При создании полимерных композиционных материалов вводимые добавки различных проводящих или диэлектрических компонент позволяют придавать им специфические электрофизические свойства, требуемые в практических применениях [1]. Например, добавление в поли-

мерную матрицу таких электропроводящих материалов, как нанопорошки металлов, углеродные нанотрубки (УНТ), вызывает существенное увеличение диэлектрической проницаемости при сохранении приемлемого уровня высокочастотных диэлектрических потерь [2, 3]. Кроме того, такие композиты могут обладать и повышенными прочностными характеристиками [4]. Диэлектрические характеристики композитов при введении в их структуру сферических наночастиц теоретически были подробно рассмотрены в работе [5].

В настоящее время уже общепризнанно, что резистивно-емкостные свойства полимерных композитов определяются совокупностью механизмов локализации электрических зарядов вблизи структурных неоднородностей и специфического движения свободных зарядов по сложным траекториям между проводящими частицами или их конгломератами [6]. Для некоторых композитов при введении в полимер микро- или наночастиц с отличающимися значениями диэлектрической проницаемости и проводимости их характеристики могут хорошо описываться в рамках модели Максвелла–Вагнера [7].

Сам процесс введения в полимер проводящих добавок является сложной технической задачей, поскольку эти добавки легко собираются в агломераты и сложно добиться их однородного распределения в структуре полимера. Это часто вызывает непредсказуемое поведение процессов поляризации и электропроводности таких композитов. В подобных системах наличие макроскопических проводящих включений в матрице полимера может способствовать накоплению электрических зарядов на границах с диэлектриком, что приводит к искажению внутреннего электрического поля и специфической объемной поляризации. Процесс накопления и перераспределения электрических зарядов обычно эффективно происходит в области низких частот, но в некоторых случаях неравновесное распределение зарядов может следовать за внешним полем вплоть до килогерцового диапазона.

Исследованию электрофизических свойств композитов с добавлением в полимер наноструктурированных оксидов металлов, которые проявляют полупроводниковые свойства, посвящено весьма ограниченное количество работ [8, 9]. Особенностью таких композитов является существование прыжкового или релаксационного механизма проводимости как внутри оксидной частицы, так и между соседними частицами. Наибольшее внимание было уделено исследованию наночастиц соединения CuO [10], которое проявляет как магнитные, так и полупроводниковые свойства в зависимости от структуры поверхности наночастиц и наличия прыжковой и даже поляронной проводимости [11, 12].

Целью настоящей работы является исследование методом импедансной спектроскопии электрофизических свойств композиционного материала на основе стабилизированных в матрице СВМПЭ наночастиц оксида меди (CuO) в минимальной концентрации (0,5 мас.%). По полученным частотным зависимостям импеданса, диэлектрической проницаемости, активной и реактивной компонентам проводимости рассмотреть вероятные механизмы электропереноса и локализации зарядов в системе пространственно разделённых и частично контактирующих между собой наночастиц оксида меди.

Экспериментальная часть. Получение нанопорошков оксида меди с заданным фазовым составом проводилось при плазменном вакуумно-дуговом синтезе [13, 14]. В методе реализуется направленное воздействие на условия протекания плазмохимических реакций, степень гомогенизации синтезируемых соединений и скорость закалки. Это достигается посредством

варьирования технологических параметров оборудования. В работе исследованы материалы исходного СВМПЭ с нанесенными на поверхность микрогранул полимера наночастицами CuO, с временем напыления 40 мин. Использовались следующие параметры режима синтеза наночастиц: ток дугового разряда 90 А, давление в камере 60 Па, соотношение смеси газов Ar/O₂ = 80/20 %.

Был использован исходный СВМПЭ марки Braskem UTEC 5041 (Бразилия) с молекулярной массой 6·10⁶ г/моль. Он представляет собой порошок с частицами неправильной формы размером ~130 мкм. Формирование и осаждение наночастиц на полимер происходило в едином технологическом цикле. Порошок СВМПЭ располагался на вращающейся ($\omega = 10 \text{ мин}^{-1}$) чаше из нержавеющей стали диаметром 300 мм в плоскости, лежащей на 100 мм ниже плоскости катода; расстояние от края чаши до торца катода – 300 мм.

Сканирующая электронная микроскопия получаемых композитов проводилась на микроскопе Hitachi TM-3000. Для определения электрофизических характеристик полученных образцов использовался метод импедансной спектроскопии с использованием векторного анализатора цепей E 5061B (Agilent Technology). Образцы для исследований готовились в форме дисков с диаметром 16 мм и толщиной 1 мм методом горячего прессования полученной шихты при давлении 6 МПа и температуре 160 °С. Для проведения импедансных измерений на торцевые поверхности образцов прикатывался тонкий слой индия или наносились графитовые электроды с минимальным (1–5 Ом) переходным сопротивлением. Процесс измерений сводился к регистрации модуля импеданса $|Z|$ и сдвига фазы между током и напряжением (φ) в диапазоне частот от 10² до 10⁸ Гц. Полученные данные позволяют рассчитать действительную $Z'(f) = |Z| \cdot \cos\varphi$ и мнимую $Z''(f) = |Z| \cdot \sin\varphi$ компоненты импеданса, а также другие искомые характеристики композитов – действительную и мнимую компоненты диэлектрической проницаемости (ДП) и удельной проводимости с использованием следующих формул:

$$\varepsilon'(\omega) = \frac{Z''(\omega)}{\omega C_0 (Z(\omega))^2}, \quad (1)$$

$$\varepsilon''(\omega) = \frac{Z'(\omega)}{\omega C_0 (Z(\omega))^2}, \quad (2)$$

$$\sigma'(\omega) = \frac{1}{Z'(\omega)} \frac{d}{S}, \quad (3)$$

$$\sigma''(\omega) = \frac{1}{Z''(\omega)} \frac{d}{S}, \quad (4)$$

где d – толщина образца, S – площадь электродов измерительной ячейки, ω – круговая частота, C_0 – геометрическая емкость.

Результаты и их обсуждение. На рис. 1 представлена микрофотография гранул СВМПЭ с нанесенными на их поверхность наночастицами CuO по описанной выше технологии [13–15]. Видно, что отдельные агломераты нанодисперсных частиц (светлые области) равномерно распределены по всей поверхности полимерных гранул. Сама структура полимерных гранул в процессе внедрения наночастиц CuO не претерпевает видимых изменений, отсутствуют оплавленные или поврежденные от воздействия низкотемпературной плазмы гранулы. Это свидетельствует об отсутствии деструкционных изменений в полимере [15].

Таким образом, полученный композит можно рассматривать как систему, состоящую из пространственно разделённых наночастиц полупроводника CuO в диэлектрической матри-

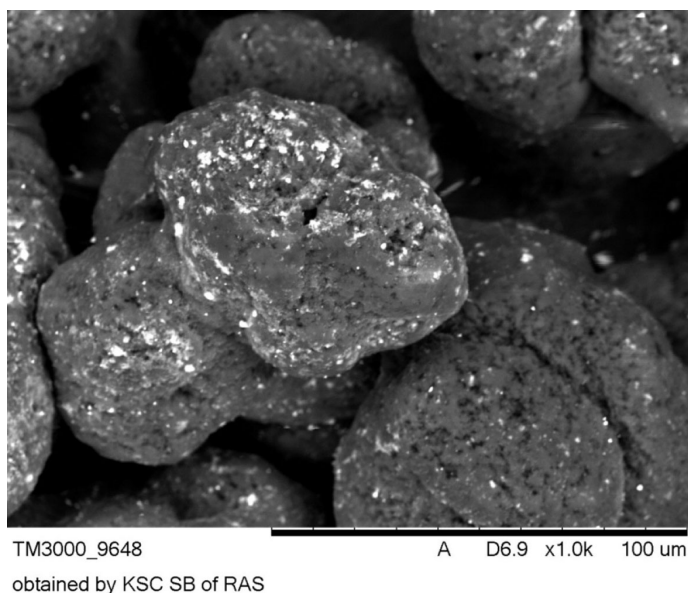


Рис. 1. Микрофотография гранул СВМПЭ с нанесенными наночастицами CuO (светлые области) с массовой концентрацией 0,5 мас.%

Fig. 1. Scanning electron microscopy of UHMWPE granules coated with CuO nanoparticles (light areas) with a mass concentration of 0.5 wt.%

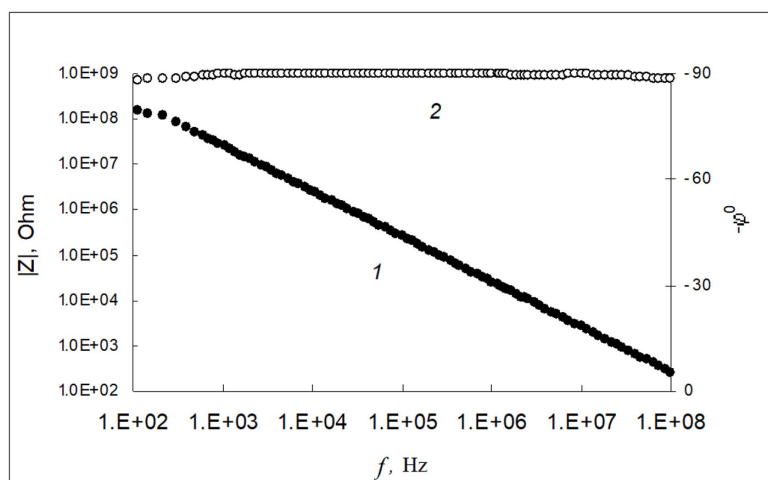


Рис. 2. Спектр импеданса (1) и фазовый угол (2) композита

Fig. 2. Impedance spectrum (1) and phase angle (2) of the composite

це неполярного полимера СВМПЭ. По нашим оценкам, концентрация наночастиц в матрице полимера составляет 0,5 мас.%.

Экспериментально измеренный спектр импеданса $|Z|$ и фазовый угол φ между током и напряжением полученного композита приведены на рис. 2.

Так как концентрация вводимых в полимер наночастиц CuO мала, то на низких частотах импеданс образца достигает значений $|Z| = 1,3 \cdot 10^8 \text{ Ом}$ и такой образец может рассматриваться как

диэлектрик. Уменьшение модуля импеданса с возрастанием частоты происходит как $|Z| = 1/\omega C_x$, где C_x – электрическая ёмкость измеряемого образца. Фазовый угол (2) фиксируется вблизи -90° , и лишь с возрастанием частоты до 10^8 Гц немного уменьшается до значений $(-89-87^\circ)$. Но даже такое небольшое отклонение фазового угла от -90° уже говорит о появлении в данном композите не только реактивной, но и активной компоненты тока в области высоких частот. На рис. 3 приведены полученные в расчётах по приведённым выше формулам частотные зависимости действительной (1) и мнимой (2) компонент комплексной диэлектрической проницаемости ϵ' и ϵ'' , а на рис. 4 приведён соответствующий спектр тангенса угла диэлектрических потерь.

Можно отметить, что действительная компонента ДП нанокompозита (1) в широком диапазоне частот находится в пределах $\epsilon_{\text{comp}}' = 2,48-2,36$ и лишь незначительно отличается по величине от исходного полиэтилена. Это позволяет сделать заключение, что введённый в полимерную матрицу наполнитель ввиду малой концентрации наночастиц практически не оказывает влияния на процессы поляризации матрицы полиэтилена. Однако даже малозаметное на рис. 2 отклонение фазового угла от -90° на высоких частотах приводит к хорошо видимому возрастанию мнимой компоненты ДП (кривая 2), которое сопровождается более заметным возрастанием тангенса угла диэлектрических потерь на частотах $f > 10^6$ Гц (рис. 4). Такое поведение ДП и тангенса потерь можно объяснить лишь тем, что на высоких частотах возникает заметная сквозная проводимость (активная компонента) данного композита даже при низкой концентрации наночастиц. На рис. 5 приведены рассчитанные по формулам (3 и 4) частотные зависимости действительной и мнимой компонент проводимости.

Так как действительная компонента ДП композита $\epsilon'(f)$ практически не зависит от частоты (рис. 3), частотная зависимость реактивной компоненты удельной проводимости (2) на рис. 5 фактически определяется уравнением (5) и линейно возрастает с ростом частоты:

$$\sigma''(\omega) = \epsilon' \epsilon_0 \omega, \quad (5)$$

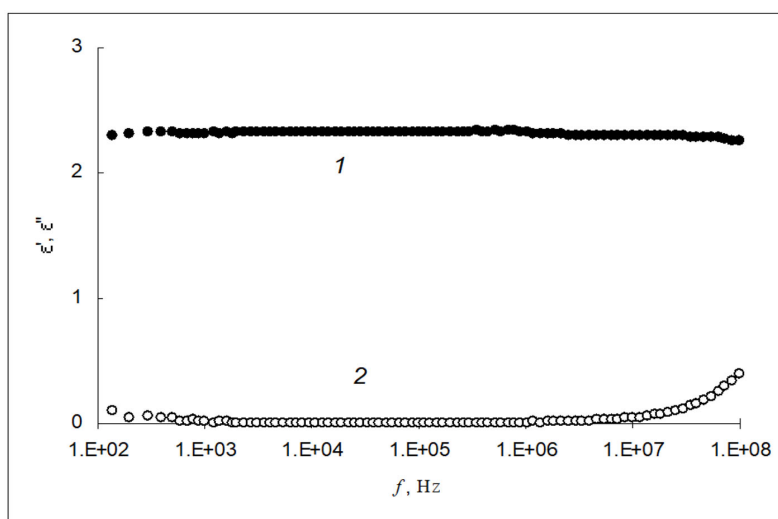


Рис. 3. Дисперсия действительной и мнимой компонент диэлектрической проницаемости композита

Fig. 3. Dispersion of the real and imaginary components of the permittivity of the composite

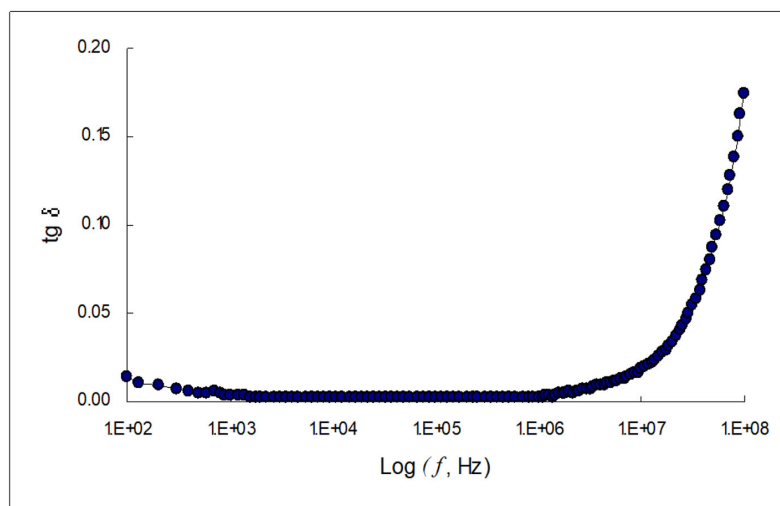
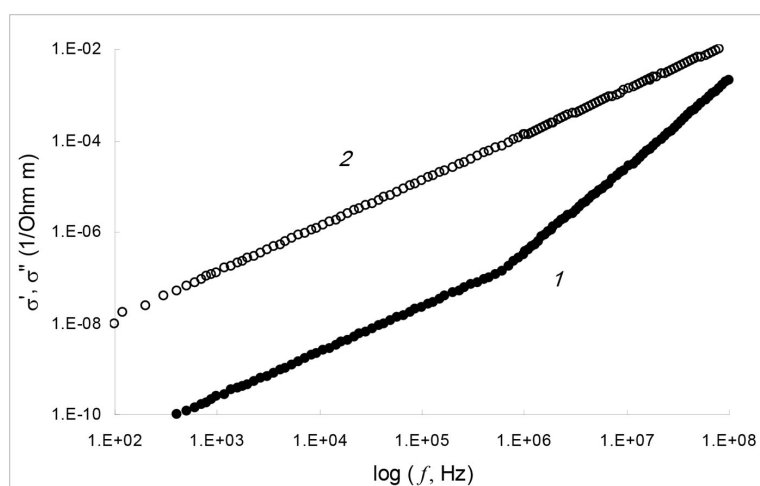


Рис. 4. Частотная зависимость тангенса угла потерь

Fig. 4. Frequency dependence of the loss tangent

Рис. 5. Частотные зависимости активной σ' (1), реактивной σ'' (2) компонент комплексной проводимостиFig. 5. Frequency dependences of active σ' (1), reactive σ'' (2) components of complex conductivity

Как видно на рис. 5, активная компонента проводимости (1) на низких частотах чрезвычайно мала $\sigma' < 1 \cdot 10^{-10}$ Ом, но с ростом частоты проводимость начинает возрастать, а на частотах $f > 10^6$ МГц возрастание проводимости заметно увеличивается. Это увеличение проводимости происходит из-за возрастания $\varepsilon''(f)$ на высоких частотах в соответствии с уравнением (6):

$$\sigma'(\omega) = \varepsilon'' \varepsilon_0 \omega, \quad (6)$$

Конечно, возникает вопрос, в чем причина такого сильного возрастания проводимости и тангенса угла потерь на высоких частотах в данном композите. По своей природе оксид меди является полупроводником, но в наноструктурированном виде как на поверхности, так и в объ-

ёме наночастиц проводимость может возникать из-за термически активированных прыжков электронов между разновалентными ионами меди (Cu^{2+} – Cu^+) [16–19]. Однако термическая активация таких электронных перескоков внутри и снаружи наночастицы может быть различной, так как аморфная поверхность частиц CuO сильнее искажена и эффективная подвижность переноса зарядов по поверхности может отличаться от интенсивности переноса зарядов через объём наночастицы. Эти два механизма пространственного переноса зарядов и могут быть причиной различной по величине проводимости в области низких и высоких частот. Действительно, проведённые дополнительные измерения импеданса и проводимости аналогичных композитов, полученных в разное время и содержащих различные концентрации наночастиц, показали, что в некоторых образцах частотная зависимость проводимости на высоких и низких частотах оказывалась почти одинаковой, а в отдельных образцах низкочастотная проводимость даже превышала по величине высокочастотную проводимость.

Вероятно, следует предположить, что активная проводимость в таких композитах определяется прохождением тока между металлическими электродами, как за счет внутренних электронных переходов между ближайшими наночастицами, так и за счёт электронов, находящихся на поверхности наночастиц. В данном эксперименте, по-видимому, наружные электроны связаны со сложной дефектной структурой поверхности наночастиц, и активизация их прыжковой проводимости заметно увеличивается именно на высоких частотах. Однако характер поведения диэлектрической проницаемости и проводимости в нанокompозитах с добавлением порошков оксида меди вакуумно-дугового синтеза, видимо, существенно зависит от технологических режимов, которые ещё предстоит установить. Кроме того, важную роль играет концентрация вводимых в полимер наночастиц.

Заключение. Таким образом, изучение особенностей частотной зависимости импеданса композиционных материалов с полимерной матрицей и непроводящими добавками может дать важную информацию о режимах проводимости и механизмах переноса заряда в таких системах, позволяя учитывать собственные резистивно-емкостные характеристики компонентов. В рассматриваемом композиционном материале СВМПЭ/нано CuO было отмечено нехарактерное возрастание активной компоненты проводимости с возрастанием частоты, отнесенное к прыжковой проводимости в наночастицах CuO .

Список литературы / References

- [1] Елецкий А.В., Книжник А.А., Потапкин Б.В., Кенни Х.М. Электрические характеристики полимерных композитов, содержащих углеродные нанотрубки. *Успехи физических наук*, 2015, 85(3), 225–270. DOI: 10.3367/UFNr.0185.201503a.0225. [Eletskii A. V., Knizhnik A. A., Potapkin B. V., Kenny J. M. Electrical characteristics of carbon nanotube doped composites. *Physics-Uspeski*, 2015, 58(3), 209–251. DOI: 10.3367/UFNe.0185.201503a.0225 (in Rus.)]
- [2] Яковенко Е.С., Мацуй Л.Ю., Вовченко Л.Л., Олейник В.В., Лаунец В.Л., Труханов А.В. Диэлектрические свойства композитных материалов с ориентированными углеродными нанотрубками. *Неорганические материалы*, 2016, 52(11), 1271–1276. DOI: 10.7868/S 0002337X1611018X. [Yakovenko O. S., Matzui L. Yu., Vovchenko L. L., Oliynyk V. V., Launetz V. L., Trukhanov A. V. Dielectric properties of composite materials containing aligned carbon nanotubes. *Inorganic Materials*, 2016, 52(11), 1198–1203. DOI: 10.1134/S 0020168516110182 (in Rus.)]

[3] Комаров Ф. Ф., Парфимович И. Д., Ткачев А. Г., Щегольков А. В., Мильчанин О. В., Щегольков А. В., Бондарев В. Влияние методов формирования полимерных композитных материалов с углеродными нанотрубками на механизмы электропроводности. *Журнал технической физики*, 2021, 91(3), 475–483. DOI: 10.21883/JTF.2021.03.50526.222–20. [Komarov F. F., Parfimovich I. D., Tkachev A. G., Shchegol'kov A.V., Shchegol'kov A.V., Mil'chanin O.V., Bondarev V. Effect of Methods for Fabrication of Polymer Composites with Carbon Nanotubes on Conduction Processes. *Technical Physics*, 2021, 66(3), 461–469. DOI: 10.1134/S 1063784221030129 (in Rus.)]

[4] Маркевич И. А., Селютин Г. Е., Дрокин Н. А., Селютин А. Г. Электрофизические и механические свойства композита с повышенной диэлектрической проницаемостью на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена, модифицированного углеродными нанотрубками. *Журнал технической физики*, 2020, 90(7), 1151–1158. DOI: 10.21883/JTF.2020.07.49450.391–19. [Markevich I. A., Selyutin G. E., Drokin N. A., Selyutin A. G. Electrophysical and mechanical properties of a composite with increased permittivity based on ultrahigh molecular weight polyethylene modified with carbon nanotubes. *Technical Physics*, 2020, 65(7), 1106. DOI: 10.1134/S 1063784220070129 (in Rus.)]

[5] Беляев Б. А., Тюрнев В. В., Ходенков С. А. Эффективная диэлектрическая проницаемость анизотропного композита из сфероидных частиц в диэлектрической матрице. *Письма в Журнал технической физики*, 2021, 47(23), 22–26. DOI: 10.21883/PJTF.2021.23.51779.18984. [Belyaev B. A., Tyurnev V. V., Khodenkov S. A. Effective permittivity of an anisotropic composite of spheroidal particles in a dielectric matrix. *Letters to the Journal of Technical Physics*, 2021, 47(23), 22–26. DOI: 10.21883/PJTF.2021.23.51779.18984 (in Rus.)]

[6] Баронин Г. С., Бузник В. М., Мищенко С. В., Завражин Д. О. Исследование строения и свойств полимерных композитов на основе политетрафторэтилена и наночастиц кобальта, титана и кремния. *Инженерно-физический журнал*, 2021, 94(6), 1655–1662. [Baronin G. S., Buznik V. M., Mishchenko S. V., Zavrzhin D. O. Investigation of the structure and properties of polymer composites based on polytetrafluoroethylene and cobalt, titanium and silicon nanoparticles. *Engineering and Physics Journal*, 2021, 94(6), 1655–1662. (in Rus.)]

[7] Kremer F., Schönhals A. *Broadband Dielectric Spectroscopy*. New York, Springer-Verlag, 2003.

[8] Ульзутуев А. Н., Ушаков Н. М. Переходные процессы на границе нанонаполненный полиэтилен-металлический контакт. *Письма в Журнал технической физики*, 2012, 38(14), 56–63. [Ul'zutuev A. N., Ushakov N. M. Transient processes at the nanofilled polyethylene-metal contact interface. *Technical Physics Letters*, 2012, 38(7), 668–671. DOI: 10.1134/S 1063785012070243 (in Rus.)]

[9] Ушаков Н. М., Ульзутуев А. Н., Кособудский И. Д. Термодиелектрические свойства полимерных композитных наноматериалов на основе медь-оксид меди в матрице полиэтилена высокого давления. *Журнал технической физики*, 2008, 78(12), 65–69. [Ushakov N. M., Ul'zutuev A. N., Kosobudskii I. D. Thermodielectric properties of polymer composites based on CuO-covered Cu particles in high-pressure polyethylene. *Technical Physics*, 2008, 53(12), 1597–1601. DOI: 10.1134/S 1063784208120104 (in Rus.)]

[10] Lepeshev A. A., Drokin N. A., Ushakov A. V., Karpov I. V., Fedorov L. Yu., Bachurina E. P. Localization and transfer of charge carriers in CuO nanopowder by impedance spectroscopy. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2018, 29(14), 12118–12125. DOI: 10.1007/s10854-018-9319-2.

- [11] Арбузова Т.И., Наумов С.В., Арбузов В.Л., Шальнов К.В., Ермаков А.Е., Мысик А.А. Поверхностный магнетизм нанокристаллического монооксида меди. *Физика твердого тела*, 2003, 45(2), 290–295. [Arbuzova T.I., Naumov S.V., Arbuzov V.L., Shal'nov K.V., Ermakov A.E., Mysik A.A. Surface magnetism of nanocrystalline copper monoxide. *Physics of the Solid State*, 2003, 45(2), 304–310. DOI: 10.1134/1.1553536 (in Rus.)]
- [12] Bieniasz K., Oleś A.M. Polaron States in a CuO Chain. *Acta Phys. Polonica A*. 2015, 127(2), 269–271. DOI: 10.12693/APhysPolA.127.269.
- [13] Карпов И.В., Ушаков А.В., Лепешев А.А., Федоров Л.Ю. Плазмохимический реактор на основе импульсного дугового разряда низкого давления для синтеза нанопорошков. *Журнал технической физики*, 2017, 87(1), 140–145. DOI: 10.21883/JTF.2017.01.44031.1851. [Karpov I.V., Ushakov A.V., Lepeshev A.A., Fedorov L. Yu. Plasma-chemical reactor based on a low-pressure pulsed arc discharge for synthesis of nanopowders. *Technical Physics*, 2017, 62(1), 168–173. DOI: 10.1134/S 106378421701011X (in Rus.)]
- [14] Ushakov A.V., Karpov I.V., Lepeshev A.A., Petrov M.I. Plasma-chemical synthesis of copper oxide nanoparticles in a low-pressure arc discharge. *Vacuum*, 2016, 133, 25–30. DOI: 10.1016/j.vacuum.2016.08.007.
- [15] Федоров Л.Ю., Карпов И.В., Ушаков А.В., Лепешев А.А., Иваненко А.А. Структурное состояние сверхвысокомолекулярного полиэтилена при одностадийном осаждении наночастиц из плазмы дугового разряда. *Письма в Журнал технической физики*, 2017, 43(21), 24–32. DOI: 10.21883/PJTF.2017.21.45158.16747. [Fedorov L. Yu., Karpov I.V., Ushakov A.V., Lepeshev A.A., Ivanenko A.A. The structural state of ultrahigh-molecular-weight polyethylene in single-stage arc-discharge plasma deposition of nanoparticles. *Technical Physics Letters*, 2017, 43(11), 965–968. DOI: 10.1134/S 1063785017110037 (in Rus.)]
- [16] Koshy J., Soosen S.M., Chandran A., George K.C. Correlated barrier hopping of CuO nanoparticles. *Journal of Semiconductors*, 2015, 36(12) 122003. DOI: 10.1088/1674–4926/36/12/122003.
- [17] Elmahdy M.M., El-Shaer A. Structural, optical and dielectric investigations of electrodeposited *p*-type Cu₂O. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2019, 30, 19894–19905. DOI: 10.1007/s10854–019–02356-z.
- [18] Anu A., Khadar M.A. Charge transport in grain size tuned CuO nanocrystal films, *Journal of Electroceramics*, 2020, 45, 15–21. DOI: 10.1007/s10832–020–00220–9.
- [19] Oruç Ç., Altındal A. Structural and dielectric properties of CuO nanoparticles, *Ceramics International*, 2017, 43(14), 10708–10714. DOI: 10.1016/j.ceramint.2017.05.006.