

Для цитирования: Ахриев А.С., Гайтукиева З.Х., Кунижев Б.И., Тхакахов Р.Б. Зависимость диэлектрической проницаемости и удельного объемного сопротивления полимерных композитов от концентрации наноразмерных частиц наполнителей алюминия и сажи. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017; 44 (2):18-27. DOI: 10.21822/2073-6185-2017-44-2-18-27

For citation: Akhriev A.S., Gaytukieva Z.Kh., Kunizhev B.I., Tkhakakhov R.B. The dependence of dielectric permeability and specific volume resistance of polymer composites on the concentration of nano-dimensional aluminium particles and carbon black fillers. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2017; 44 (2):18-27. (In Russ.) DOI: 10.21822/2073-6185-2017-44-2-18-27

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ МЕХАНИКА

УДК 532.2

DOI: 10.21822/2073-6185-2017-44-2-18-27

ЗАВИСИМОСТЬ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ И УДЕЛЬНОГО ОБЪЕМНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ ОТ КОНЦЕНТРАЦИИ НАНОРАЗМЕРНЫХ ЧАСТИЦ НАПОЛНИТЕЛЕЙ АЛЮМИНИЯ И САЖИ

Ахриев А.С.¹, Гайтукиева З.Х.², Кунижев Б.И.³, Тхакахов Р.Б.⁴

^{1,2}Ингушский государственный университет,
386001, РИ, г. Магас, пр. И.Б. Зязикова, 7, Россия

^{3,4}Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова,
360004, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 175, Россия

¹e-mail: ing_gu@mail.ru; ²e-mail: zareta.amatxanova@mail.ru

³e-mail: mathdean@kbsu.ru; ⁴e-mail: rbt50@mail.ru

Резюме. Цель. Основной идеей настоящего исследования было получение полимерных композитов на основе синтетического изопренового эластомера и полиэтилена низкой плотности, в которых содержатся наночастицы сажи и алюминия в различных количествах. **Метод.** В ходе исследования применялся экспоненциальный подход, позволяющий лучше контролировать область малых добавок, что исключается при линейном распределении нанонаполнителей при малых добавках. Композиты наполнялись наноразмерными частицами алюминия и сажи ДГ-100 с удельной адсорбционной поверхностью $100 \text{ м}^2/\text{г}$ средним размером частиц 20-30 нм. Измерение электрофизических параметров производились по стандартным методам: электронной микроскопии, электронного теневого микроскопа и гидростатического взвешивания. Применена теория и модель Максвелл-Вагнеровской поляризации. **Результат.** Экспериментально исследованы зависимости и построены графики диэлектрической проницаемости и удельного объемного сопротивления композита 80 % изопренового синтетического каучука (СКИ-3)+20% полиэтилена низкой плотности от концентрации наноразмерных частиц наполнителей алюминия и сажи. Рассмотрены особенности этих кривых. Показано, что при малых содержаниях в композите наночастиц Al и сажи наблюдаются существенные изменения - экстремумы - на кривых зависимости $\epsilon' = \epsilon'(C)$, $\rho_v = \rho_v(C)$, не укладывающиеся в рамки модели Максвелл-Вагнеровской поляризации. Наблюдалось распределение частиц технического углерода для некоторых гетерогенных полимерных смесей, которое приводило к сверхаддитивному электрическому сопротивлению. **Вывод.** При малых содержаниях в композите наночастиц Al и сажи наблюдаются существенные изменения - экстремумы - на кривых зависимости $\epsilon' = \epsilon'(C)$, $\rho_v = \rho_v(C)$, не укладывающиеся в рамки модели Максвелл-Вагнеровской поляризации.

Ключевые слова: синтетический изопреновый каучук, полиэтилен, диэлектрическая проницаемость, удельное сопротивление

PHYSICAL-MATEMATICAL SCIENCE
MECHANICS

THE DEPENDENCE OF DIELECTRIC PERMEABILITY AND SPECIFIC VOLUME
RESISTANCE OF POLYMER COMPOSITES ON THE CONCENTRATION
OF NANO-DIMENSIONAL ALUMINIUM PARTICLES AND CARBON BLACK FILLERS

Alikhan S. Akhriev¹, Zareta Kh. Gaytukieva², Boris I. Kunizhev³, Ruslan B. Tkhakakhov⁴

^{1,2} Ingush State University,

7 I. Zyazikova Ave., Magas 386001, Republic of Ingushetia, Russia,

^{3,4} H.M. Berbekov Kabardino-Balkarian State University,

175 Chernyshevskogo Str., Nal'chik 360004, Kabardino-Balkar Republic, Russia,

¹e-mail: ing_gu@mail.ru, ²e-mail: zareta.amatxanova@mail.ru,

³e-mail: mathdean@kbsu.ru, ⁴e-mail: rbt50@mail.ru

Abstract Objectives The main idea of the present study was the production of polymer composites based on synthetic isoprene elastomer and low-density polyethylene containing nanoparticles of carbon black and aluminium in various amounts. **Methods** An exponential approach was used throughout the study to better control the region of small additives; this control was impossible to achieve using a linear distribution of nanofillers among the small additives. The composites were filled with nanosized aluminium and DG-100 carbon black particles with a specific adsorption surface of 100 m²/g and having an average particle size of 20-30 nm. Electrophysical parameters were measured by conventional techniques of electron microscopy, electron shadow microscopy and hydrostatic weighing. Maxwell-Wagner theory and polarisation model were applied. **Results** For a composite containing 80% of isoprene synthetic rubber (SCI-3) and 20% of low-density polyethylene, the dielectric permeability and specific volume resistivity dependences were studied experimentally and their graphs were plotted against the concentration of nanosized particles of aluminium and carbon black fillers. The features of these curves were considered. It is shown that, for small amounts of Al and carbon black nanoparticles in the composite, significant changes (extrema) take place on the curves $\varepsilon' = \varepsilon'(C)$ and $\rho_v = \rho_v(C)$, which do not conform to the Maxwell-Wagner polarisation model. For some heterogeneous polymer mixtures, a distribution of carbon black particles was observed that led to a superadditive electrical resistance. **Conclusion** It is shown that for small amounts of Al and carbon black nanoparticles in composite materials, significant changes (extrema) take place on the curves $\varepsilon' = \varepsilon'(C)$ and $\rho_v = \rho_v(C)$ that do not fit within the framework of the Maxwell-Wagner polarisation model.

Keywords: synthetic isoprene rubber, polyethylene, dielectric permeability, specific resistivity

Введение. Исследование диэлектрических свойств полимерных систем (композиты, смеси), содержащие наноразмерные частицы в малых количествах, является актуальной задачей физики высокомолекулярных соединений и физики диэлектриков [1-5]. Одной из основных задач проведенных исследований является изучение влияния концентрации наночастиц сажи и алюминия на процесс диэлектрической поляризации и электропроводность полимерных композитов на основе изопренового синтетического каучука (СКИ-3) и полиэтилена низкой плотности (ПЭНП) [6-9].

Постановка задачи. Основной идеей настоящей работы является получение и исследование полимерных композитов на основе синтетического изопренового эластомера и полиэтилена низкой плотности, в которых содержатся наночастицы сажи и алюминия в различных количествах.

Методы исследования. Композиты наполнялись наноразмерными частицами алюминия и сажи ДГ-100 с удельной адсорбционной поверхностью 100 м²/г средним размером частиц 20-

30 нм. Распределение наночастиц сажи и алюминия по размерам представлены на рисунках 1 и 2.

Из рис.1 видно, что наночастицы алюминия довольно мелкие и большая часть их составляет 20-30 нм.

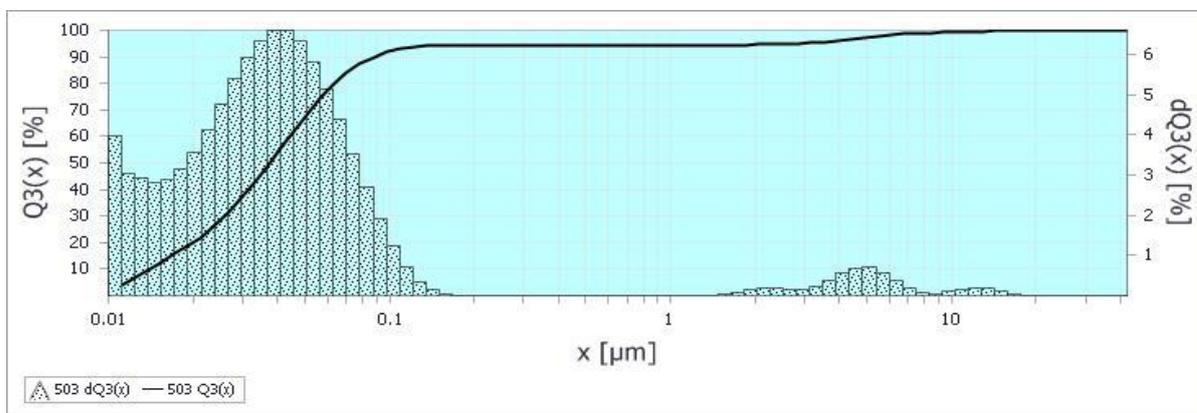


Рис.1. Распределение наночастиц алюминия по размерам
Fig.1. Distribution of aluminum nanoparticles by size

В отличие от инертного алюминия сажа очень активна и наночастицы образуют агломераты размерами от 100 нм до 10 мкм (рис. 2).

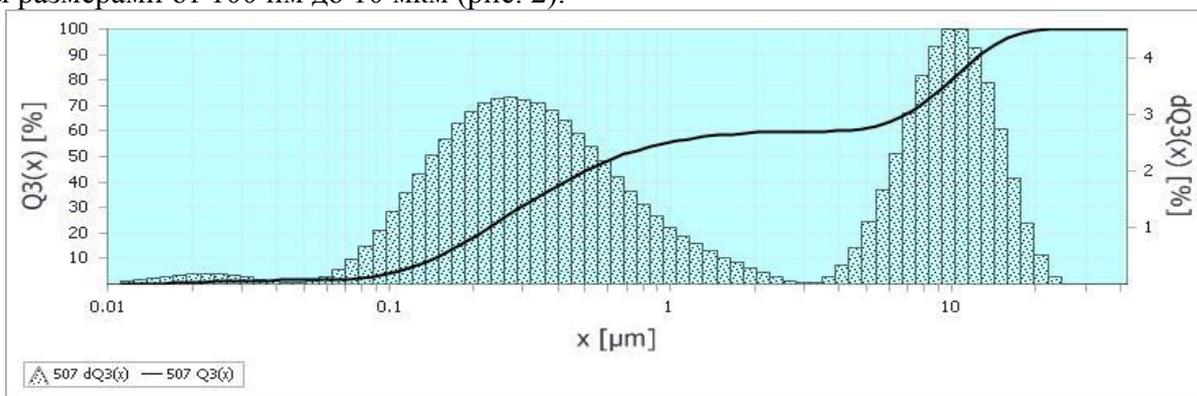


Рис.2. Распределение частиц сажи ДГ-100 по размерам
Fig.2. Distribution of soot particles DG-100 in size

Количество сажи и алюминия рассчитывались по формуле

$$c = 0,1e^n \quad (1)$$

где, c – содержание наполнителя, в масс.%,

n – целые числа от 0 до 4 включительно,

e – основание натуральных логарифмов, равное примерно 2,71.

Экспоненциальный подход позволяет лучше контролировать область малых добавок, что исключается при линейном распределении нанонаполнителей при малых добавках. В этом случае изменяя концентрацию нанонаполнителей (проводники), легко изменить сопротивление исследуемых композитов в широких пределах. Измерение электрофизических параметров производились по стандартным методикам. Следует учитывать, что эффективная диэлектрическая проницаемость – это комплексная величина, определяемая по формуле

$$\varepsilon = \varepsilon' + j'\varepsilon'' \quad (2)$$

Действительная часть диэлектрической проницаемости определялась как отношение емкостей

$$\varepsilon' = \frac{C_x}{C_0} \quad (3)$$

где C_0 – емкость пустой ячейки (воздушное заполнение); C_x – емкость образца из композита. Мнимая часть диэлектрической проницаемости определялась как величина

$$\varepsilon'' = tg \delta \cdot \varepsilon' = \frac{1}{Q} \cdot \varepsilon' \quad (4)$$

где, Q – добротность конденсатора.

Добротность конденсатора определялась для схемы параллельного соединения конденсатора и сопротивления по стандартной методике. Замеры емкости и добротности производились на частоте 1 кГц.

Обсуждение результатов. Основные результаты экспериментальных исследований электрических свойств композитов 80% СКИ-3+20% ПЭНП, содержащего наночастицы алюминия и сажи в различных количествах представлены на рисунках 3-7.

Из рис. 3 (кривая 2) и рис. 4 видно, что диэлектрическая проницаемость композита с увеличением содержания наночастиц Al до 0,73 масс % падает почти на 2 единицы, затем при дальнейшем увеличении содержания Al до 5,37 масс % значение действительной части диэлектрической проницаемости начинает увеличиваться и достигает величины $\varepsilon'=4,10$, что немного выше ε' исходного (чистого) композита.

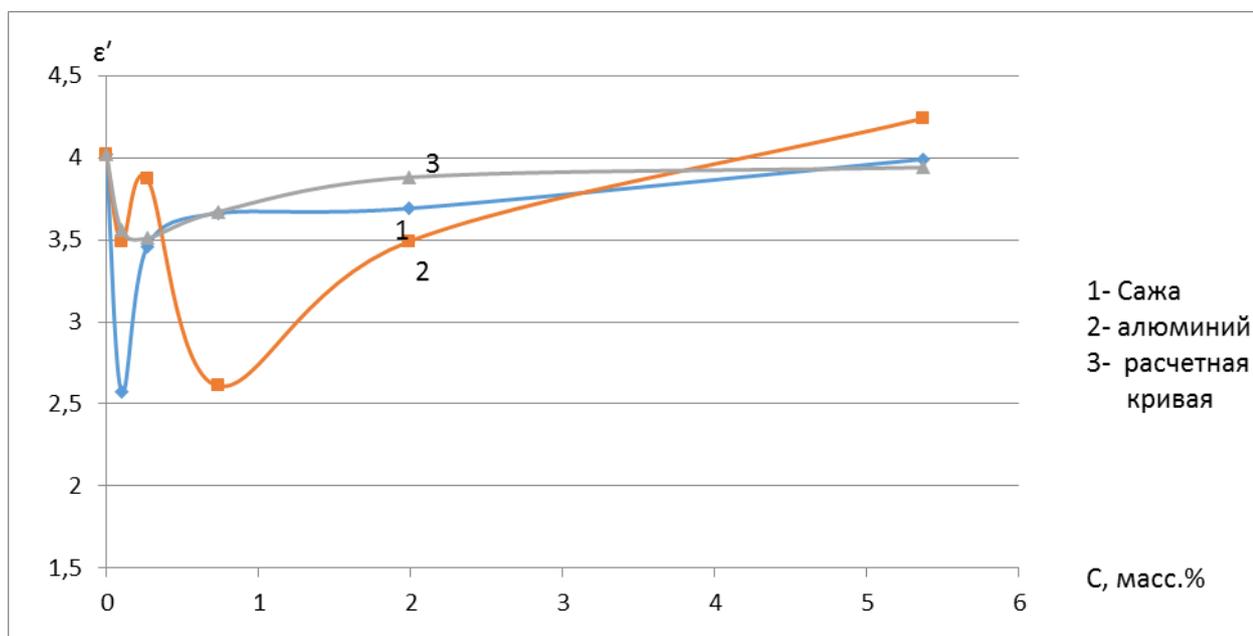


Рис. 3. Концентрационные зависимости действительной части диэлектрической проницаемости: 1 - 80% СКИ-3 + 20% ПЭНП + сажа; 2 – 80% СКИ-3 + 20% ПЭНП + Al; 3 – расчетная кривая, по методу контактных групп для композита 80% СКИ-3 + 20% ПЭНП + Al

Fig. 3. Concentration dependences of the real part of the dielectric constant: 1 - 80% SCI-3 + 20% LDPE + soot; 2 - 80% of SKI-3 + 20% of LDPE + Al; 3 - calculated curve, according to the contact group method for a composite of 80% SCI-3 + 20% LDPE + Al

Из рис.4 видно, что с увеличением содержания наночастиц Al до 0,73 масс % удельное объемное электрическое сопротивление ρ'_v уменьшается на порядок, а электрическая проводимость композита увеличивается в 10 раз. При дальнейшем увеличении содержания наночастиц Al зависимость $\rho_v(c)$ приводит к насыщению.

Из рисунка (кривая 1) видно, что в исследуемом композите 80% СКИ-3+20% ПЭНП при содержании 0,1% сажи значение диэлектрической проницаемости падает на 1,5 единицы, затем при дальнейшем увеличении нанодобавок сажи достигает значения $\varepsilon'=3,8$. Если сравнить зависимости $\varepsilon' = \varepsilon'(C)$ для композитов, содержащих наночастицы сажи (рис.1, кривая 1) и Al (рис.3, кривая 2), видно, что они существенно различаются.

У первого композита падение значения ε' наблюдается только в области добавок 0,1%, а затем начинается резкое возрастание значения ε' , а у второго падения ε' наблюдается при концентрации Al 0,73%, а затем постепенный рост ε' до 4 единиц.

Сравнение данных на зависимостях $\rho_v = \rho_v(C)$ для композита 80% СКИ-3+20% ПЭНП, содержащих наночастицы сажи (рис.5) и Al (рис.4), показывает, что ход этих кривых также сильно различается.

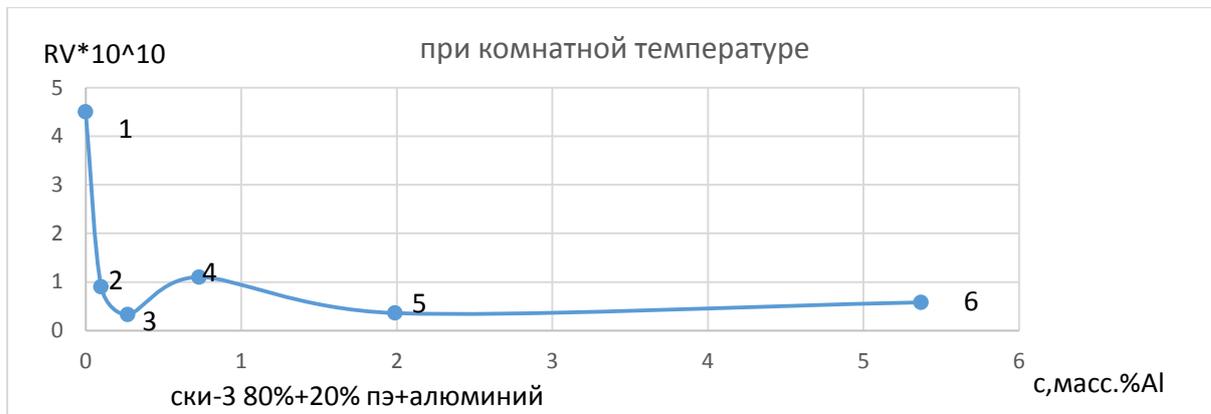


Рис.4. Концентрационные зависимости удельного сопротивления для композита 80% СКИ-3 + 20% ПЭНП + Al

Fig.4. Concentration dependencies of the resistivity for the composite 80% of the SKI-3 + 20% LDPE + Al

Если для композита, содержащего наночастицы Al 0,1%, 0,27% и 0,73%, как описано выше, значения ρ_v падает на 1,5 порядка, а затем приходит к насыщению, то для того же композита, содержащего наночастицы сажи, при таких концентрациях, значение ρ_v возрастает почти на 2 порядка, затем при дальнейшем увеличении содержания сажи, значения ρ_v приближаются к значениям ρ_v чистого композита.



Рис.5. Концентрационные зависимости удельного объемного электрического сопротивления для композита 80% СКИ-3 + 20% ПЭНП + сажа

Fig.5. Concentration dependencies of the specific volumetric electrical resistivity for the composite 80% of the SKI-3 + 20% LDPE + carbon black

Обычно при рассмотрении полимерного диэлектрика, содержащего электропроводящие примеси (частицы) используется теория и модель Максвелл-Вагнеровской поляризации, которая приводит к следующим отношениям:

$$\varepsilon' = \varepsilon'_{\infty} \left(1 + \frac{k}{1 + \omega^2 \tau^2} \right) \quad (5)$$

$$\varepsilon'' = \frac{\varepsilon'_{\infty} k \omega \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (6)$$

$$\varepsilon'_{\infty} = \varepsilon'_1 \left[1 + \frac{3C(\varepsilon'_2 - \varepsilon'_1)}{2\varepsilon'_1 + \varepsilon'_2} \right] \quad (7)$$

$$k = \frac{9C(\varepsilon'_2 - \varepsilon'_1)}{2\varepsilon'_1 + \varepsilon'_2} \quad (8)$$

$$\tau = \frac{\varepsilon'_\infty(2\varepsilon'_1 - \varepsilon'_2)}{\sigma_2} = \varepsilon'_\infty(2\varepsilon'_1 + \varepsilon'_2)\rho^2 \quad (9)$$

где, ε'_1 и ε'_2 - действительная часть диэлектрической проницаемости композита и включения, σ_1 и σ_2 - удельная проводимость соответственно композита и включения, ρ - удельное электрическое сопротивление, ε'_∞ - диэлектрическая проницаемость при высоких частотах, τ - время релаксации, ω - частота.

Из (9) следует, что время релаксации обратно пропорционально удельной проводимости включений, а ε' и ε'' композита и включений зависят от времени релаксации τ .

На рис. 6 и рис. 7 представлены логарифмические зависимости диэлектрической проницаемости от удельного объемного сопротивления композита 80% СКИ-3+20% ПЭНП, содержащего наночастицы Al и сажи. Отсюда видно, что концентрационная зависимость $\varepsilon' = f(\lg \rho_v)$ имеет сложнейший характер.

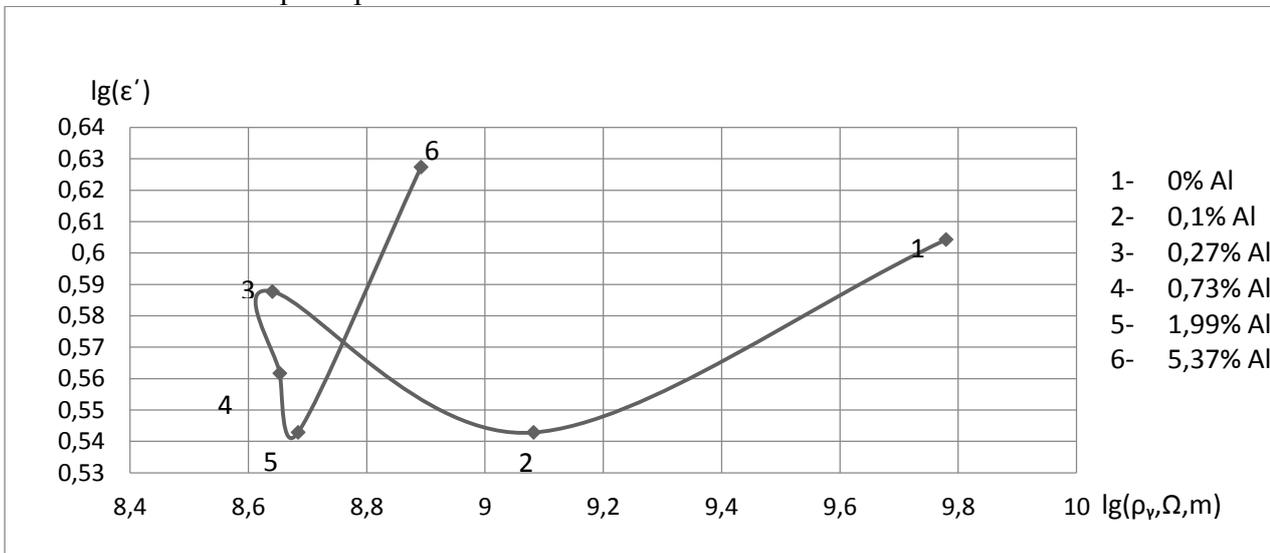


Рис.6. Логарифмическая зависимость диэлектрической проницаемости от объемного сопротивления композита 80% СКИ-3 + 20% ПЭНП + Al при температуре 300 К
Fig.6. Logarithmic dependence of the dielectric constant on the specific volume resistance of the composite 80% of the SKI-3 + 20% LDPE + Al at a temperature of 300 K

До концентрации 0,27 масс% Al, ρ_v падает на полтора порядка, а диэлектрическая проницаемость практически не меняется. А при содержании в композите 0,73 масс% ε' уменьшается почти на 2 единицы.

При дальнейшем увеличении содержания Al величины ρ_v и ε' принимают среднестатистические значения, соответствующие исследуемому композиту, содержащему включения в виде наночастиц алюминия.

Подобное парадоксальное падение или рост различных физических параметров исследуемого композита при малых добавках наночастиц Al и сажи можно назвать - наноэффектом, который и наблюдается при исследовании механической прочности композита, при изучении плотности композита и количества частиц алюминия и сажи на поверхности композита.

Исходя из вышеизложенного, полученные концентрационные зависимости $\rho_v(C)$ и $\varepsilon'(C)$ и функция $\lg \varepsilon' = f(\lg \rho_v)$ для исследуемого композита не представляется возможным объяснить в рамках модели Максвелл-Вагнеровской поляризации. Из рисунков 3-7 видно, что зависимости $\varepsilon' = \varepsilon'(C)$, $\rho_v = \rho_v(C)$, $\lg \varepsilon' = f(\lg \rho_v)$ претерпевают существенные изменения в области малых добавок наночастиц Al и сажи в композите СКИ-3 80 масс. % + 20 масс. % ПЭНП. Причем природа наночастиц (Al или сажи) определяет, иногда при одинаковых концентрациях, диаметрально противоположное изменение некоторых электрических параметров исследуемого композита.

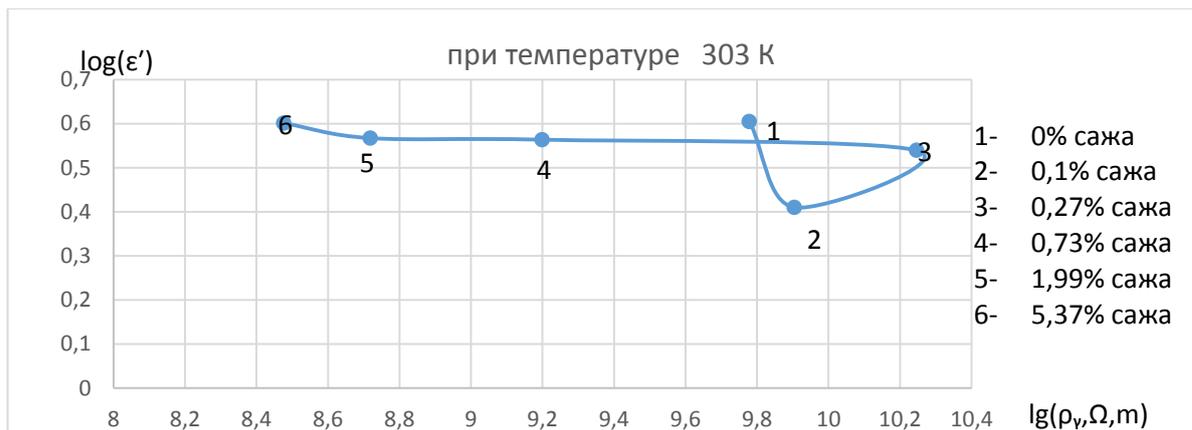


Рис.7. Логарифмические зависимости диэлектрической проницаемости от удельного объемного электрического сопротивления для композита 80% СКИ-3 + 20% ПЭНП + сажа
Fig.7. Logarithmic dependences of the dielectric constant on the specific volumetric electrical resistance for the composite 80% SKI-3 + 20% LDPE + soot

Эти результаты, как отмечено выше, невозможно объяснить ни Максвелл-Вагнеровской поляризацией диэлектриков с проводящими включениями, ни репационной моделью Хохлова-Гроссберга [6]. С целью объяснения полученных экспериментальных данных-диэлектрических параметров и удельной электрической проводимости нами проводились исследования структуры и морфологии, изменение плотности композита СКИ-380%+ ПЭНП 20%, с нано добавками *Al* и сажи методами электронной микроскопии, электронного теневого микроскопа и гидростатического взвешивания. Эти данные представлены на рис.8 и рис. 9 соответственно.

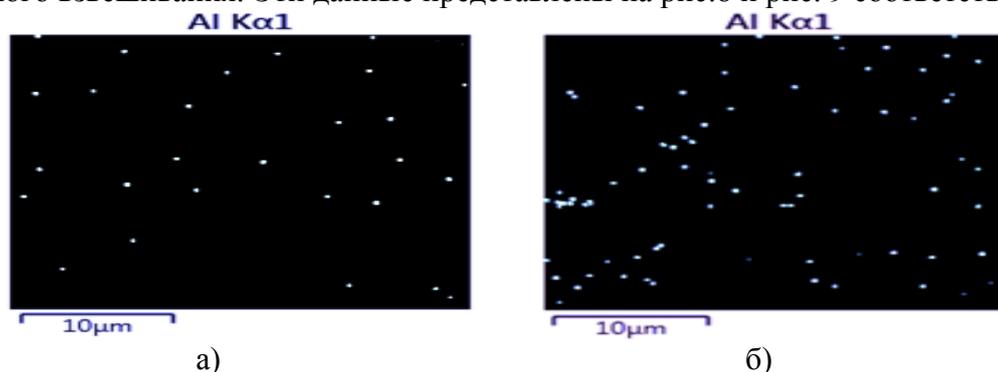


Рис.8. Распределение алюминия по поверхности СКИ-3, содержащего:
а) 0,1 масс. %; б) 5,37 масс. % частиц наполнителя
Fig.8. Aluminum distribution over the surface of SKI-3, containing:
а) 0.1 wt. %; б) 5.37 wt. % of the filler particles

Данные элементного сканирования поверхности, полученные на электронном микроскопе показывают (рис.8 а), что частицы алюминия при малых добавках равномерно распределяются в матрице композита. Однако при повышении содержания алюминия до 5,37 масс % определенная часть наночастиц выстраивается в линии 2-го порядка, возможно располагаясь на границах или очерчивая формы надмолекулярных образований в композите.

Такое расположение наночастиц *Al* в композите, по-видимому, связано с тем, что они занимают наиболее энергетически выгодные положения при смешении ингредиентов композита в расплаве. Авторы работы [10] наблюдали аналогичное распределение частиц технического углерода для некоторых гетерогенных полимерных смесей, которое приводило к сверхаддитивному электрическому сопротивлению. В работе [11] показано, что такое перераспределение частиц наполнителя обусловлено термодинамической выгодностью этого процесса и в подавляющем большинстве случаев наполнитель (выше 5масс %) локализуется на границе раздела фаз.

В отличие от инертного алюминия (из-за того, что частицы имеют оксидную пленку (Al_2O_3) сажа достаточно активна и ее наночастицы образуют агломераты размерами от 100 нм до 10 микрон (рис.9).



Рис.9. Снимок, полученный электронным теневым микроскопом для композита 80 масс. % СКИ-3 + 20 масс. % ПЭНП + 0,1 масс. % сажа

Fig.9. A photograph obtained by an electronic shadow microscope for a composite of 80 wt. % SCI-3 + 20 wt. % LDPE + 0.1 wt. % carbon black

Однако в процессе приготовления композита сажевые ассоциаты разрушаются до нанометров [12]. Авторы этой работы показали, что агломераты сажи дробятся на части под действием напряжений, возникающих при перемешивании. Другой подход состоит в том, что эти агломераты испытывают «коррозию», при которой из их поверхностей выламываются маленькие кусочки [13]. Авторы [13-14] показали, что работают оба механизма последовательно. На первых стадиях агломераты в основном разрушаются, а затем следует «коррозия».

Таким образом, наличие наночастиц Al в исследуемом композите выше 2,0 масс. % не оказывает существенного влияния на формирование макроскопических физических свойств и структуры данного композита.

Экспериментальные данные представленные на рис.3 (кривая 1), рис.5 и рис.7 для зависимостей $\varepsilon' = \varepsilon'(C)$, $\rho_v = \rho_v(C)$ и $lg \varepsilon' = (lg \rho_v)$, как отмечено выше, не укладываются в рамки известных моделей, что не позволяет объяснить структурными исследованиями. Но можно предположить существование особого эффекта – фрактальной поляризации для композита 80% СКИ-3+20% ПЭНП+сажа.

В работе [15] показан факт зависимости микроскопических свойств композита от фрактального строения. Установлено, что внутри кластера сохраняется индивидуальность отдельных частиц, хотя со стороны кластер представляется как структурное образование с качественно другими новыми свойствами, которые отсутствуют у отдельных, составляющих частиц.

При исследовании геометрии кластеров возник термин - фрактальный кластер, представляющий ассоциацию связанных между собою частиц, имеющих фрактальное строение [16].

Комплексный характер сопротивления между отдельными кластерами сохраняется. Это означает, что при переменном напряжении на электродах конденсатора перезаряд перколяционного кластера происходит через значительные активные и емкостные сопротивления.

Процесс перезаряда перколяционного кластера вносит свой вклад в изменение обеих частей диэлектрической проницаемости. Описанный механизм подтверждается ходом кривых $\varepsilon' = \varepsilon'(C)$, $\rho_v = \rho_v(C)$ и рис.3 и рис. 5 высокими значениями фактора потерь ε'' (табл. 1) для композита, содержащего наночастицы сажи более 2 масс. %

Таблица 1. Значения фактора диэлектрических потерь ε'' , обусловленных электропроводимостью композита 80% СКИ-3+20% ПЭНП содержащих наночастицы Al и сажи

Table 1. Values of the dielectric loss factor ε'' , due to the electrical conductivity of the composite 80% of the SKI-3 + 20% LDPE containing Al and carbon black nanoparticles

№	Al , С.масс%	$\varepsilon'' \cdot 10^3$	Сажа, С. масс. %	$\varepsilon'' \cdot 10^3$
1	0	2,74	0	2,74
2	0,10	13,84	0,10	2,25
3	0,27	4,50	0,27	1,00
4	0,73	1,12	0,73	9,00
5	1,99	4,50	1,99	18,00
6	5,37	3,60	5,37	3,00

Вывод. Экспериментально исследованы зависимости диэлектрической проницаемости и удельного объемного сопротивления композита 80 масс% СКИ-3+20%масс% ПЭНП от концентрации наноразмерных частиц наполнителей алюминия и сажи.

Рассмотрены особенности этих кривых. Показано, что при малых содержаниях в композите наночастиц Al и сажи наблюдаются существенные изменения - экстремумы - на кривых зависимости $\varepsilon' = \varepsilon'(C)$, $\rho_v = \rho_v(C)$, не укладывающиеся в рамки модели Максвелл-Вагнеровской поляризации.

Библиографический список:

1. Wegner F. Classical electrodynamics (lecture notes). Franz Wegner. Institut für Theoretische Physik. Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg. 2003; 112: XV-XX.
2. Lopez-Ramos A., Menendez J.R. and Pique C. Conditions for the validity of Faraday's law of induction and their experimental confirmation. Eur. J. Phys. 2008; 29(5): 1069-1076.
3. Sihvola A. Electromagnetic Mixing Formulas and Applications. IEE Electromagnetic Wave Series, 47. London: IEE, 1999; 284 p.
4. Smith D.R., Padilla W.J., Vier D.C., Nemat-Nasser S.C., Schultz S. Phys. Rev. Lett. 2000; 84 (18): 4184-4187.
5. Fenouillot F. Uneven distribution of nanoparticles in immiscible fluids: Morphology development in polymer blends. F. Fenouillot, P. Cassagnau, J.-C. Majeste. Polymer. 2009; 50 (6):1333–1350.
6. Блайт Э.Р., Блур Д. Электрические свойства полимеров/ Пер с англ. М: Физматлит, 2008, 376с.
7. Сушко М.Я., Крискив С.К. Метод компактных групп в теории диэлектрической проницаемости гетерогенных систем// Журнал технической физики, 2009. - Т.79. - Вып.3. - с 97-101.
8. Соцков В.А. Экспериментальное исследование проводящих фронтальных фаз на диэлектрическую проницаемость композитов // Журнал технической физики, 2013. - Т.83 - Вып.10.- с.85-89.
9. Зайкин А.Е., Жаринова Е.А., Бикмуллин Р.С., Особенности локализации технического углерода на границе раздела полимерных фаз// Высокомолек. соед. А. 2007.- Т.49 - № 3- с. 499-509.
10. Адамсон А. Физическая химия поверхности. М.: Мир 1979.
11. Manas-Zloczower I., Nir A., Tadmor Z. /Depressive mixing in rubber and plastics.// Rubber Chem. Tech. 1984 V. 57. № 3. P. 583-619.
12. Qi Li, Feki D.L., Manas-Zloczower I. Influence of aggregate structure and matrix infiltration on the dispersion behavior of carbon black agglomerates. Rubber.Chem.Technol., 1995, v.68, N.5, p.836-841.
13. Функциональные наполнители для пластмасс. / Под ред. М. Ксантоса. Пер. с англ. Кулезнева В.Н. – СПб: Научные основы и технологии, 2010 – 462 с.
14. Hong, S.M., Kim, J., Jana, S.C., 2003. The effects of shear-induced migration of conductive fillers on conductivity of injection molded articles. SPE ANTEC, 61, 1625-1629.
15. Смирнов Б.М. Физика фронтальных кластеров. М.:Наука, 1991. 136 с.
16. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982 с.58.

References:

1. Wegner F. Classical electrodynamics (lecture notes). Franz Wegner. Institut für Theoretische Physik. Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg. 2003; 112: XV-XX.
2. Lopez-Ramos A., Menendez J.R. and Pique C. Conditions for the validity of Faraday's law of induction and their experimental confirmation. Eur. J. Phys. 2008; 29(5): 1069-1076.
3. Sihvola A. Electromagnetic Mixing Formulas and Applications. IEE Electromagnetic Wave Series, 47. London: IEE, 1999; 284 p.
4. Smith D.R., Padilla W.J., Vier D.C., Nemat-Nasser S.C., Schultz S. Phys. Rev. Lett. 2000; 84 (18): 4184-4187.
5. Fenouillot F. Uneven distribution of nanoparticles in immiscible fluids: Morphology development in polymer blends. F. Fenouillot, P. Cassagnau, J.-C. Majeste. Polymer. 2009; 50 (6):1333–1350.
6. Blayt E.R., Blur D. Elektricheskie svoystva polimerov. Per s angl. M.: Fizmatlit; 2008. 376 s. [Blayt E.R., Blur D. Polymer electrical properties. Translated from English. Moscow: Fizmatlit; 2008. 376 p. (in Russ.)]
7. Sushko M.Ya., Kris'kiv S.K. Metod kompaknykh grupp v teorii dielektricheskoy pronitsaemosti geterogennykh sistem. Zhurnal tekhnicheskoy fiziki. 2009;79(3):97-101. [Sushko M.Ya., Kris'kiv S.K.

- Compact group method in theory of dielectric permeability of heterogeneous systems. Technical physics. The Russian journal of applied physics. 2009;79(3):97-101. (in Russ.)]
8. Sotskov V.A. Eksperimental'noe issledovanie provodyashchikh frontal'nykh faz na dielektricheskuyu pronitsaemost' kompozitov. Zhurnal tekhnicheskoy fiziki. 2013; 83(10):85-89. [Sotskov V.A. Experimental investigation of frontal conductive phases onto dielectric permeability of composites. Technical physics. The Russian journal of applied physics. 2013; 83(10):85-89. (in Russ.)]
 9. Zaykin A.E., Zharinova E.A., Bikmullin R.S. Osobennosti lokalizatsii tekhnicheskogo ugleroda na granitse razdela polimernykh faz. Vysokomolekulyarnye soedineniya. Seriya A - Fizika polimerov. 2007;49(3):499-509. [Zaykin A.E., Zharinova E.A., Bikmullin R.S. Features of technical carbon localisation on the polymer phase interface. Polymer Science Series A - Polymer Physics. 2007; 49(3):499-509. (in Russ.)]
 10. Adamson A. Fizicheskaya khimiya poverkhnosti. M.: Mir; 1979. 568 s. [Adamson A. Physical Chemistry of surface. Moscow: Mir; 1979. 568 p. (in Russ.)]
 11. Manas-Zloczower I., Nir A., Tadmor Z. Depressive mixing in rubber and plastics. Rubber Chem. Tech. 1984; 57(3): 583-619.
 12. Qi Li, Feke D.L., Manas-Zloczower I. Influence of aggregate structure and matrix infiltration on the dispersion behavior of carbon black agglomerates. Rubber.Chem.Technol. 1995; 68(5):836-841.
 13. Funktsional'nye napolniteli dlya plastmass. Pod red. M. Ksantosa. Per. s angl. Kulezneva V.N. SPb: Nauchnye osnovy i tekhnologii; 2010. 462 s. [Functional fillers for plastmasses. Ed. M. Ksantos. Translated from English by Kuleznev V.N. Saint-Petersburg: Nauchnye osnovy i tekhnologii; 2010. 462 p. (in Russ.)]
 14. Hong C.M., Kim J., Jana S.C. The effects of shear-induced migration of conductive fillers on conductivity of injection molded articles. SPE ANTEC. 2003; 61:1625-1629.
 15. Smirnov B.M. Fizika frontal'nykh klasterov. M: Nauka; 1991. 136 s. [Smirnov B.M. Physics of frontal clusters. Moscow: Nauka; 1991. 136 p. (in Russ.)]
 16. Landau L.D., Livshits E.M. Elektrodinamika sploshnykh sred. M.: Nauka; 1982. s.58. [Landau L.D., Livshits E.M. Electrodynamics of continuous media. Moscow: Nauka; 1982. p.58. (in Russ.)]

Сведения об авторах:

Ахриев Алихан Султанович – кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой теоретической физики.

Гайтукиева Зарета Хизировна – кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра теоретической физики.

Кунижев Борис Иналович – и.о. директора института физики и математики, доктор физико-математических наук, профессор кафедры теоретической и экспериментальной физики.

Тхакахов Руслан Баширович - доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики наносистем.

Information about the authors.

Alikhan S. Akhriev - Cand. Sci. (Physics and Mathematical), Assoc. Prof., Department of Theoretical Physics.

Zareta Kh. Gaytukieva - Cand. Sci. (Physics and Mathematical), Assoc. Prof., Department of Theoretical Physics.

Boris I. Kunizhev - Dr. Sci. (Physics and Mathematical), Prof. Department of Theoretical Physics, Institute of Physics and Mathematics.

Ruslan B. Tkhakakhov - Dr. Sci. (Physics and Mathematical), Prof., Department of Nanosystem Physics, Institute of Physics and Mathematics

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию 10.05.2017.

Принята в печать 08.06.2017.

Conflict of interest.

Received 10.05.2017.

Accepted for publication 08.06.2017.