

Диэлектрические и электретные свойства нанокompозитов полиэтилен-Fe₃O₄, закристаллизованных в постоянном магнитном поле

А. М. Магеррамов, Д. Ф. Рустамова

Получены нанокompозиции полиэтилен высокой плотности (ПЭВП)/Fe₃O₄ дисперсностью 20 – 23,5 нм методом кристаллизации расплава в магнитном поле $H = 18,4 \cdot 10^3$ А/м. Изучены диэлектрические (диэлектрическая проницаемость ϵ_k , тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$), электретные (плотность электретных зарядов $\sigma_{\text{эф}}$) свойства, измерены значения удельной намагниченности M нанокompозиций. Показано, что экспериментальные значения ϵ_k в зависимости от содержания компонентов и дисперсности наполнителя удовлетворительно описывается формулой Лихтенекера. Нанокompозиты ПЭВП/Fe₃O₄ состава 3 – 5 об. % Fe₃O₄ закристаллизованные в условиях действия постоянного магнитного поля приобретают стабильное электретное состояние с плотностью эффективных зарядов до $(2 - 3) \cdot 10^{-4}$ Кл/м, а при высоких концентрациях Fe₃O₄ нанокompозит переходит в антистатическое состояние.

Ключевые слова: нанокompозит ПЭВП/Fe₃O₄, кристаллизация в магнитном поле, диэлектрическая проницаемость нанокompозита, электрет.

Введение

В последние годы возрос интерес к синтезу новых наноматериалов и изучению возможностей применения их в качестве наполнителей [1 – 3]. Малые размеры нанонаполнителей с высокой удельной поверхностью должны приводить к росту эффективной площади поверхности раздела фаз. Вместе с тем, наночастицы склонны к агрегированию [1] из-за избыточной поверхностной энергии. Особый интерес вызывает создание полимерных нанокompозитов при непосредственном воздействии внешних полей *in vitro*, например, при воздействии магнитных полей. Проведение кристаллизации наполненных полимеров в постоянных и/или переменных магнитных и электрических полях может привести к изменению кинетики кристаллизации [1, 4] и тем самым, к изменению структуры и свойств нанокompозитов на их основе. В [4, 5] приведены результаты исследований по влиянию импульсной магнитной обработки (МО) с длительностью 10 мкс и амплитудным значением индукции 0,2 Тл на процессы кристаллизации и плавления полиэтиленоксида (ПЭО). Обнаружен эффект необратимого изменения темпе-

ратур кристаллизации и плавления ПЭО после импульсной МО.

Ранее нами было показано [6], что при кристаллизации композитов на основе полипропилена (ПП) и порошкообразного α -Al₂O₃ в условиях действия магнитного поля $H = 3 \cdot 10^5$ А/м снижаются диэлектрические потери $\text{tg}\delta$ при частотах $(2 - 3) \cdot 10^5$ Гц, и вместе с тем, уменьшается стабильность электретных зарядов. По данным [7] воздействие постоянного магнитного поля напряженностью 100 – 500 кА/м на ПЭ приводит к появлению на температурной зависимости тока поляризации двух пиков при 398 и 423 К. Авторы на основе рентгеноструктурного анализа объясняют эти результаты тем, что действие МП приводит к разориентации кристаллитов в плоскости (110), в результате чего ПЭ становится магнитоэлектретом с плотностью электретных зарядов $\sigma_{\text{эф}} \sim 2,9$ нКл/см². Нанокompозиты на основе полиэтилена и оксидов типа Cu₂O, Fe₂O₃, Fe₃O₄ с размерами кристаллитов 1 – 25 нм обладают существенно отличными электрофизическими свойствами, которые описываются теорией перколяции [2, 8], и/или с позиций теории фракталов [5].

В последнее время интенсивно исследуются магнитные полимерные нанокомпозиты на основе полимеров — ПЭВП/ Fe_3O_4 и поливинилденфторид (ПВДФ)/ Fe_3O_4 [11]. Использование в качестве нанонаполнителя оксида Fe_3O_4 обусловлено тем, что эти нанокомпозиты обладают рядом уникальных свойств, таких как антирадарные, антистатические и др. [9 – 11]. Однако, вопрос о влиянии магнитного поля на процессы кристаллизации таких нанокомпозитов исследованы недостаточно [12 – 15].

Цель данной работы — исследование влияния постоянного магнитного поля на процессы кристаллизации, а также на диэлектрические, короноэлектретные свойства полученных нанокомпозитов ПЭВП/ Fe_3O_4 .

Экспериментальная часть

Образцы нанокомпозитов были получены из порошкообразного ПЭВП с размером частиц ~ 1 мкм, с введением в полимер наночастиц Fe_3O_4 размером 5 – 10 нм по известной методике химической конденсации [3]. Для этого, соли $\text{FeSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$ и $\text{FeCl}_3 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$ отдельно растворяли в дистиллированной воде, с последующим перемешиванием, добавляли 25%-й раствор гидроксида аммония. Раствор ПЭВП/ Fe_3O_4 при различных концентрациях Fe_3O_4 термостатировали в медной чашке, где проводили дальнейшую кристаллизацию в магнитном поле

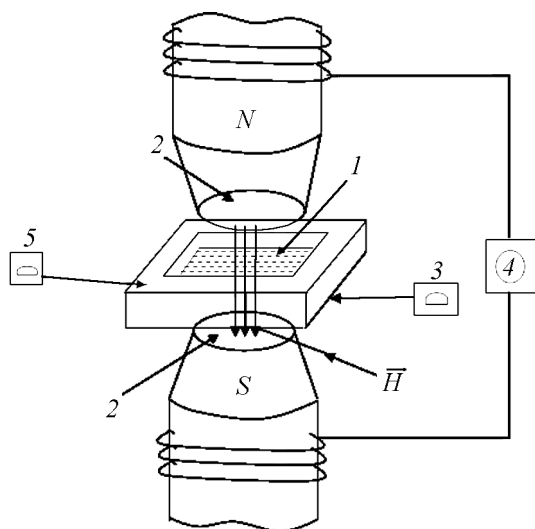


Рис. 1. Схема магнитной установки по воздействию магнитного поля на полимерные пленки: 1 – расплав полимера; 2 – полюса электромагнита; 3 – термостатирующая рубашка из меди; 4 – блок измерения и катушка регулирования напряженности H магнитного поля; 5 – блок измерения и регулирования температуры.

(рис. 1). Значения напряженности магнитного поля регулировали дополнительно с помощью катушки, а температуру расплава образцов — терморегулятором.

Электретную разность потенциалов U_3 измеряли компенсационным методом с помощью вибрирующего электрода по ГОСТ 25209-82. Поверхностная плотность зарядов $\sigma_{\text{эф}}$ вычисляли по формуле,

$$\sigma_{\text{эф}} = \frac{U_3 \epsilon \epsilon_0}{h},$$

где h — толщина, ϵ — диэлектрическая проницаемость образца, ϵ_0 — диэлектрическая постоянная.

Экспериментальные результаты и обсуждение

Изменение диэлектрической проницаемости ϵ_k образцов композитов от содержания наполнителя Fe_3O_4 ϕ приведены на рис. 2. Как видно, происходит линейный рост значений ϵ_k в зависимости от содержания наполнителя Fe_3O_4 в композиции с ПЭ. При значениях концентрации Fe_3O_4 $\phi \geq 4$ об.% наблюдается замедление роста ϵ_k . Кроме того, при содержании оксида более 4 об. % увеличиваются электропроводность и тангенс диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$. Вместе с тем, наблюдается стабилизация значений ϵ_k . Из рис. 2 следует, что постоянное магнитное поле напряженностью $H = 2,3 \cdot 10^3$ А/м приводит к росту значений ϵ_k (кривая 2).

До сих пор нет однозначной математической модели для описания имеющихся экспериментальных [3, 4, 13] и расчетных [10, 14] данных для значений $\text{tg}\delta$ и ϵ_k полимерных нанокомпозитов на основе Fe_3O_4 . Это может быть связано, с одной стороны, с выбором базовой модели для расчета ϵ_k и/или $\text{tg}\delta$, а с другой

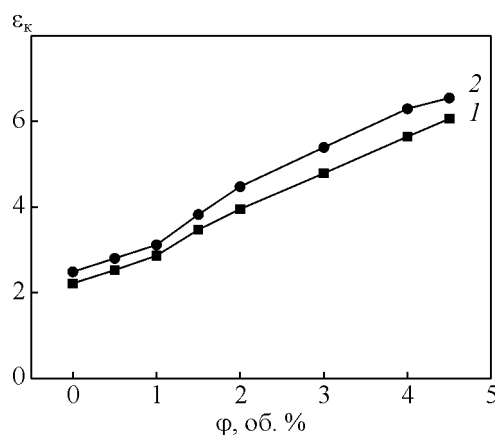


Рис. 2. Зависимость диэлектрической проницаемости ϵ_k нанокомпозитов на основе ПЭВП/ Fe_3O_4 от концентрации ϕ Fe_3O_4 в ПЭВП; 1 – $H = 0$; 2 – при $H = 2,3 \cdot 10^3$ А/м

— с технологией получения соответствующих нанокомпозитов непосредственно при действии магнитного поля.

Расчет значений ϵ_k и $\text{tg}\delta$ для смесей полимер/Fe₃O₄ при степенях наполнения ϕ до 10 – 15 об. %, в [16] проводили по модели Одолевского

$$\epsilon_k = \epsilon_2 \left[1 + \frac{\phi}{\frac{1-\phi}{3(\epsilon_2 - \epsilon_1)}} \right], \quad (1)$$

где ϵ_1 и ϵ_2 — диэлектрические проницаемости полимера и наполнителя, соответственно.

При малых размерах наполнителя (порядка несколько десятков нм), например наномангнитного наполнителя Fe₃O₄, значения $\epsilon_{\text{нк}}$ рассчитывали по формуле [14]:

$$\epsilon_{\downarrow\text{нк}} = \frac{\epsilon + 2}{3} \cdot \epsilon \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{\phi}{\epsilon_0} \cdot \frac{d_{\downarrow\text{макс}\uparrow 2}}{V_0 kT} \right), \quad (2)$$

где ϵ — диэлектрическая проницаемость полимера, $d_{\downarrow\text{макс}\uparrow 2}$ — максимальное значение дипольного момента, ϕ — объемная доля (концентрация) нанонаполнителя, V_0 — объем наночастицы, ϵ_0 — диэлектрическая постоянная. При расчетах значения ϵ для Fe₃O₄ принимается равным 10 [17], а для ПЭВП — 2,25 [16]. Расчетные значения $\epsilon_{\text{нк}}$ нанокомпозита на основе полистирола с наночастицами магнетита размером 5,4 нм по данным [18] линейно возрастают, и при степени наполнения $\phi = 3$ об. % магнетита составляют величину порядка 90 – 100. Значения $\epsilon_{\text{нк}}$ полученные из формулы (2) являются завышенными. Согласно [16], когда значения ϵ наполнителя в 10 раз превышают эти значения для полимера, то для таких композиций диэлектрическую проницаемость ϵ_k целесообразно рассчитывать по формуле

$$\lg \epsilon_k = v_1 \lg \epsilon_1 + v_2 \lg \epsilon_2, \quad (3)$$

где v_1 и v_2 — доля компонентов, а ϵ_1 и ϵ_2 — значения диэлектрической проницаемости компонентов. Рассчитанные по моделям (1) – (3) и экспериментальные значения ϵ_k композитов ПЭВП/Fe₃O₄ приведены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что образцы нанокомпозитов, закристаллизованных в магнитном поле, имеют более высокие значения ϵ_k . Данные расчетов по модели Лихтенекера (3) наиболее близки к экспериментальным значениям ϵ_k . Кристаллизация в магнитном поле $2,3 \cdot 10^3$ А/м приводит к увеличению значений ϵ_k . Таким образом, для образцов нанокомпозитов ПЭВП/Fe₃O₄ при содержании наполнителя до

Таблица 1

Экспериментальные и расчетные значения ϵ_k при 10^3 Гц для образцов нанокомпозитов ПЭВП/Fe₃O₄, закристаллизованных из расплава в режиме медленного охлаждения под действием постоянного магнитного поля и без (размеры наночастиц 20 – 23,5 нм)

	ϵ_k при содержании Fe ₃ O ₄ , об. %					
	0	1	3	5	10	20
Расчет по ф-ле (1)	2,25	12,3	17,3	22,19	36	68
Расчет по ф-ле (2)	2,25	4,9	8,5	15,9	28,7	37,5
Расчет по ф-ле (3)	2,25	2,60	3,51	4,73	8,12	17,2
Экспериментальные, при $H = 0$	2,23	2,9	4,9	5,4	9,3	17,4
Экспериментальные, кристаллизация в поле $H = 2,3 \cdot 10^3$ А/м	2,31	2,95	5,2	6,0	11	22

4 – 5 об. % с размерами 5 – 15 нм Fe₃O₄, значения ϵ_k удовлетворительно описывается формулой (3). Сравнение экспериментальных (рис. 2) и расчетных (табл. 1) данных ϵ_k показывает, что некоторая корреляция наблюдается при малых концентрациях Fe₃O₄ в смеси. При концентрациях наполнителя $\phi > 4$ – 5 об. % этого не наблюдается, что может быть связано с агломерацией наночастиц Fe₃O₄.

Кристаллизация полимерного нанокомпозита ПЭВП/Fe₃O₄ в магнитном поле приводит к измельчению надмолекулярных образований на более мелкие межфазные структуры, где наночастицы Fe₃O₄ служат центрами кристаллизации, и происходит формирование новых ориентированных структур, соразмерных с доменами Fe₃O₄. При высоких содержаниях наночастиц происходит их коагуляция, композит становится проводящим и снижается вероятность образования диполей и объемных зарядов.

При изменении размера наночастиц в интервале 3 – 15 нм максимальная длина диполя $l_{\text{макс}}$ и максимальное время для достижения максимального значения дипольного момента изменяются в интервалах 0,09 – 0,5 нм и 0,08 – 0,47 фс, соответственно. Зависимость длины диполя l и времени поляризации t от внешнего электрического поля E имеет вид [15]

$$l = \frac{eEl_{\downarrow\text{макс}\uparrow 2}}{2A}, \quad (4)$$

$$t = l_{\text{макс}} \left(\frac{m}{A} \right)^{1/2},$$

где m — магнитный момент наночастиц, $A = 4,5$ эВ — значение работы выхода электрона из металла для наночастиц магнетита [18].

Видно, что длина диполя линейно зависит от значения электрического поля E , а время устано-

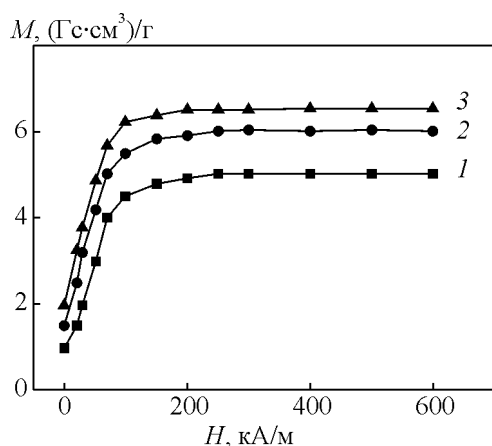


Рис. 3. Зависимости удельной намагниченности M образцов нанокмпозитов ПЭВП/3 об. % Fe_3O_4 при 293 К от интенсивности H магнитного поля при размерах наночастиц Fe_3O_4 20 – 23,5 нм в магнитном поле H , А/м: 1 – 0; 2 – $12,5 \cdot 10^3$; 3 – $18,4 \cdot 10^3$.

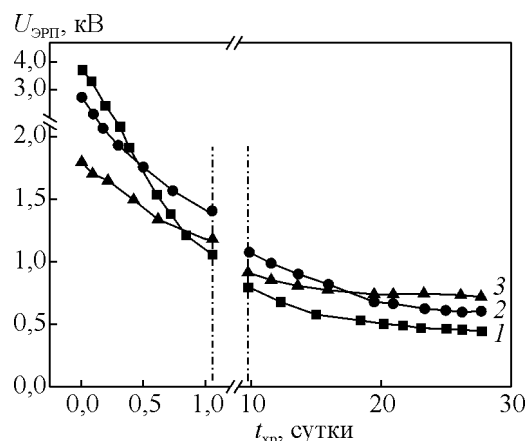


Рис. 4. Изменение значений электретной разности потенциалов $U_{\text{ЭРП}}$ образцов ПЭВП (1) и нанокмпозиций ПЭВП/ Fe_3O_4 (97/3 об.%) закристаллизованных при медленном охлаждении расплава композита (2) и при действии магнитного поля $H = 18,4 \cdot 10^3$ А/м (3).

вившейся поляризации зависит от размера наночастиц. Из этих феноменологических рассуждений вытекает, что процесс магнитной поляризации в композиционной системе полиэтилен/нано- Fe_3O_4 в присутствии магнитного поля является строго нелинейным.

На рис. 3 показаны зависимости удельной намагниченности M от интенсивности магнитного поля H для образцов ПЭВП + 3 об. % Fe_3O_4 . Видно, что при значениях H до $(15 - 30) \cdot 10^2$ А/м наблюдается возрастание удельной намагниченности, а затем наступает насыщение, значение намагниченности стабилизируется. Причинами увеличения намагниченности M полимерных нанокмпозитов в магнитном поле, на наш взгляд, может быть торможение релаксационных процессов. Кристаллизация из расплава композитов в условиях воздействия магнитного поля приводит к образованию упорядоченных дипольных моментов. Согласно [14], поляризуемость нанокмпозитов во внешнем электрическом поле соответствует закону Ланжевена для намагничивания сред с однодоменными магнитными частицами.

Одна из задач физики активных диэлектриков — это создание на их основе электретных и/или антистатических материалов [16 – 19]. На рис. 4 приведены зависимости значений электретной разности потенциалов $U_{\text{ЭРП}}$ от времени хранения короно-электретов различных композиций ПЭВП/ Fe_3O_4 до (кривая 2) и после воздействия магнитного поля напряженностью $H = 18,4 \cdot 10^3$ А/м. Для исходных образцов начальные значения $U_{\text{ЭРП}}$ составляют 3,7 кВ. У образцов, закристаллизованных под действием магнитного поля, после

их хранения в течении 28 суток при $T = 300$ К, значение $U_{\text{ЭРП}}$ составляет 0,7 кВ (кривая 3). Таким образом, кристаллизация из расплава нанокмпозиций ПЭВП/ Fe_3O_4 в условиях действия постоянного магнитного поля приводит к более стабильному электретному состоянию. Испытания на термическую стабильность показали, что кристаллизация в магнитном поле $H = 18,4 \cdot 10^3$ А/м приводит к более стабильному электретному состоянию (рис. 5, кривая 3).

В табл.2 приведены эффективные значения поверхностной плотности электретных зарядов $\sigma_{\text{эф}}$ образцов нанокмпозитов, закристаллизованных в магнитном поле H в зависимости от содержания Fe_3O_4 .

Таблица 2

Изменение эффективных значений поверхностной плотности электретных зарядов $\sigma_{\text{эф}}$, 10^{-5} Кл/м² нанокмпозитов на основе ПЭВП/ Fe_3O_4 , закристаллизованных в условиях действия постоянного магнитного поля $H = 18,4 \cdot 10^3$ А/м в зависимости от содержания Fe_3O_4 с дисперсностью 20 – 23,5 нм. Режим действия коронового разряда: $U_{\text{к}} = 8$ кВ, $t_{\text{к}} = 5$ мин в системе игла – плоскость

Состав	Значения $\sigma_{\text{эф}}$, 10^{-5} Кл/м ² при режиме кристаллизации			
	при $H = 0$		при $H = 18,4 \cdot 10^3$ А/м	
	после выдержки, ч			
	1	120	1	120
ПЭВП	2,37	0,88	2,41	0,65
ПЭВП/2 об. % Fe_3O_4	5,84	1,74	1,55	2,15
ПЭВП/4 об. % Fe_3O_4	5,44	1,62	1,83	2,02
ПЭВП/8 об. % Fe_3O_4	4,30	0,90	0,73	0,41

Из табл.2 следует, что значения $\sigma_{эф}$ коронозлектретов с 2 об. % Fe₃O₄, закристаллизованных при непосредственном действии магнитного поля $18,4 \cdot 10^3$ А/м более стабильны. После выдержки значения $\sigma_{эф}$ составляет $(2 - 2,15) \cdot 10^{-5}$ Кл/м².

Таким образом, повысить электретные свойства полимеров можно введением нанонаполнителей и проведением кристаллизации при воздействии магнитного поля. По данным [19, 20] при введении других оксидных наполнителей, типа NaNO₃, BaTiO₃, Al₂O₃, значения $\sigma_{эф}$ после выдержки в течении 30 суток составляют $(30 - 36) \cdot 10^{-6}$ Кл/м². Полученные эффекты объяснены образованием разрыхленной адсорбционной структуры в полимере. В нашем случае, наблюдаемая нелинейная зависимость значений $\sigma_{эф}$ от режима кристаллизации в магнитном поле нанокompозитов ПЭВП/Fe₃O₄ (табл. 2, рис. 4) может быть связана со снижением размеров кристаллитов и образованием новых межфазных слоев. Кристаллизация в магнитном поле нанонаполненных полимеров приводит к новому типу надмолекулярных образований — ориентированных ламелей. С другой стороны, в случае, когда нанонаполнитель Fe₃O₄ имеет доменную структуру и его дисперсность соизмерима с размерами доменов, достигается эффективная поляризация ламелей при коронировании.

Добавление наночастиц Fe₃O₄ в расплав, с последующей кристаллизацией в условиях действия постоянного магнитного поля $18 \cdot 10^3$ А/м приводит к стабильному электретному состоянию (рис. 4). Коронозлектреты на основе нанокompозитов закристаллизованных в условиях действия магнитного поля характеризуются высокой термической устойчивостью вплоть до 410 К (рис. 5, кривая 3). При высоких

содержаниях Fe₃O₄ в ПЭВП зависимости относительных значений электретного потенциала U_T/U_0 от температуры для различных образцов ПЭВП/Fe₃O₄ состава 3 об. % Fe₃O₄ обладают также более высокой термостабильностью (кривая 3). При степени наполнения $\phi \geq 4$ об.%, из-за возрастания электропроводности композит приобретает антистатические свойства.

Выводы

Повысить электретные свойства полимеров можно введением нанонаполнителей и проведением кристаллизации при воздействии магнитного поля.

Композиты ПЭВП/наночастицы Fe₃O₄, полученные кристаллизацией в условиях действия постоянного магнитного поля $18 \cdot 10^3$ А/м, имеют стабильные электретные состояния.

Коронозлектреты на основе нанокompозитов закристаллизованных в условиях действия магнитного поля характеризуются высокой термической устойчивостью вплоть до 410 К.

Результаты работы открывают широкие возможности создания новых электроактивных электретных и антистатических полимерных нанокompозитов с регулируемыми диэлектрическими, электретными и магнитными свойствами.

Литература

1. Фостер Л. Нанотехнологии. Наука, инновации и возможности. М.: Техносфера, 2008, 352 с.
2. Лякишев Н.П. Промышленное применение наноматериалов. Наука Москвы и регионов, 2005, № 1, с. 44 – 47.
3. Maharramov A.M., Ramazanov M.A., Alizade R.A., Asilbeqli P.B. Structure and dielectric properties of nanocomposites on the basis of polyethylene with Fe₃O₄ nanoparticles. Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures, 2013, v. 8, no. 4, p. 1447 – 1454.
4. Левин М.Н., Постников В.В., Матвеев Н.Н. Влияние импульсной магнитной обработки на кристаллизацию и плавления полиэтиленоксида. Журнал физической химии, 2003, т.77, №4, с. 758 – 761.
5. Козлов Г.В. Структура и свойства дисперсно-наполненных полимерных нанокompозитов. УФН, 2015, т. 185, № 1, с. 35 – 64.
6. Нуриев М.А., Рустамова Д.Ф., Шукюроева А.А., Велиев И.А. Влияние магнитного поля на электрофизические свойства полимеров. Материалы V Всероссийский конф. “Актуальные пробл. химии высок.энергий”, М.: РХТУ им. Менделеева, 2012, с. 183 – 186.
7. Александров П.А., Бударягин В.В. и др. Механические свойства некоторых материалов в магнитном поле. Вопросы атомной науки и техн. Сер. Термоядер.синтез, 2006, вып. 1, с. 24 – 30.

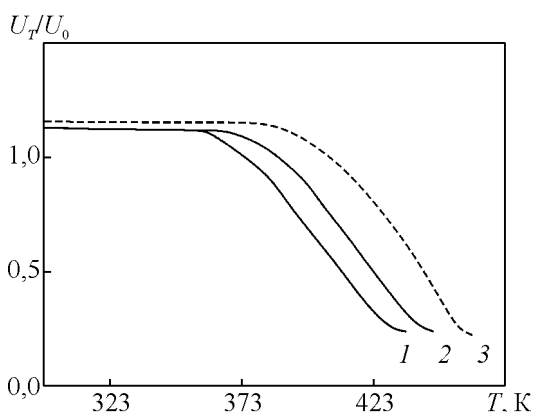


Рис. 5. Температурные зависимости относительных значений электретного потенциала U_T/U_0 коронозлектретов: 1 — из ПЭВП (1); 2 — композитов ПЭВП + 3 об. % Fe₃O₄; 3 — ПЭВП + 3 об. % закристаллизованных в магнитном поле $H = 18,4 \cdot 10^3$ А/м в течение 2 ч. $U_k = 8$ кВ, $t_k = 5$ мин)

8. Борисов В.С., Аграфонов Ю.В. и др. Особенности диэлектрического отклика гетерогенных систем с полярной матрицей содержащей электрически активные включения. ФТТ, 2011, т. 53, вып. 1, с. 52 – 57.
9. Магеррамов А.М., Рамазанов М.А., Агакишиева П.Б., Гаджиева Ф.В. Влияние микроструктуры на магнитные свойства полимерных нанокompозитов на основе ПЭ + Fe₃O₄. Пластические массы, 2008, № 1, с. 14 – 16.
10. Гаранин Д.А., Лутовинов В.С., и др. Влияние магнитного поля на релаксационный пик диэлектрических потерь в полимерах. ФТТ, 1990, т. 32, №4, с. 1172 – 1176
11. Волков А.В., Москвина М.А., и др. Получение, структура и магнитные свойства полимерных нанокompозитов поливинилового спирта-Fe₃O₄. Высокомолекулярная химия, 2005, т. 47 А, № 5, с. 755 – 762.
12. Рустамова Д.Ф., Велиев И.А., Магеррамов А.М. и др. К влиянию магнитного поля на диэлектрические и электреты свойства композиций полипропилен-алунд. Актуал.пробл.физики, 2012, Баку, VI-конференция, БГУ, с. 240 – 243.
13. Аббасов Т.Ф., Оруджев А.О. и др. Влияние магнитного поля на изменение электрофизических свойств полиэтилена высокого давления и композиций на его основе. Высокомолекулярная химия, 2000, сер. Б, т. 42, № 6, с. 1060 – 1064.
14. Ализаде Р.А. Диэлектрическая проницаемость нанокompозитов на основе наночастиц магнетита и полимерной матрицы (коллаген, полистирол). Журнал Физ. химии, 2010, т. 84, № 9, с. 1722 – 1727.
15. Яблоков М.Ю., Кечекян А.С., Гильман А.Б., Кузнецов А.Е. Механоэлектретирование нанокompозиционных материалов на основе полипропилена. Материалы XII Межд. Конф. “Физика диэлектриков”, 2011, т. 2, С.-Петербург: ГПУ им. Герцена, с. 205 – 208.
16. Сажин Б.И., Лобанов А.М. и др. Электрические свойства полимеров. Под.ред. Б.И.Сажина, Л.: Химия, 1986, 224 с.
17. Соцков В.А. Экспериментальное исследование влияния проводящих фаз на диэлектрические свойства композитов. ЖТФ, 2013, т. 83, вып. 10, с. 85 – 89.
18. Петров Ю.И. Физика малых частиц. М.: Наука, 1982, 360 с.
19. Луцейкин Г.А. Полимерные электреты. М.: Химия, 1984, 184 с.
20. Вшивков С.А. Фазовые переходы и структура жидкокристаллических систем в магнитном поле. В кн.: Фазовые переходы полимерных систем во внешних полях. С.-Петербург, Москва, Краснодар: ЛАНХ, 2013, с. 253 – 322.
21. Стадник А.Д., Кирик Г.В. Полимерные композиты и нанокompозиты в магнитных полях. Сумы: Университетская книга, 2005, 231 с.
22. Usakov N.M., Yurkov G.Yu. et al. Nanocomposites based on the cerium oxide nanoparticles and polyethylene materials. Acta materials, 2008, v. 56, p. 2336 – 2343.

References

1. Foster L.E. Nanotechnology: Science, Innovation, and Opportunity. Prentice Hall: Upper Saddle River, NJ, USA, 2005, 283 p.
2. Lyakishev N.P. Promishlennoe primenenie nanomaterialov [Industrial application of nanomaterials]. *Nauka Moskvyy i regionov — Science in Moscow and region*, 2005, no. 1, pp. 44 – 47.
3. Maharramov A.M., Ramazanov M.A., Alizade R.A., Asilbeqli P.B. Strukture and dielectric properties of nanocomposites on the basis of polyethylene with Fe₃O₄ nanoparticles. *Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures*, 2013, vol. 8, no. 4, pp. 1447 – 1454.
4. Levin M.N., Postnikov V.V., Matveev N.N. Vliyanie impulsnoy magnitnoy obrabotki na kristallizatsiyu i plavlениyepolietilenoksida [Effect of pulsed magnet treatment on polyethylene melting and crystallization]. *Jurnalfizicheskoykhimii — Russian Journal of Physical Chemistry A*, 2003, vol. 77, no. 4, pp.758 – 761.
5. Kozlov G.V. Struktura i svoystva dispersno-napolnennykh polimernykh nanokompозитов [Structure and properties of dispersion-filled polymer nano-composites]. *UFN — Physics-Uspekhi (Advances in Physical Sciences)*, 2015, vol. 185, no. 1, pp. 35 – 64.
6. Nuriev M.A., Rustamova D.F., Shukurova A.A., Veliev I.A. Vliyanie magnitnogo polya na elektrofizicheskie svoystva polimerov [Effect of magnetic field on electric properties of polymers]. *Proc. of V All-Russian Conf. Aktualnie problemy khimii vysokikh energiy [Actual problems of chemistry of high energies]*, Moscow, D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia Publ., 2012, pp. 183 – 186.
7. Aleksandrov P.A., Budaragin V.V. et al. Mekhanicheskie svoystva nekotorykh materialov v magnitnom pole [Mechanical properties of some materials in magnetic field]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Ser. Termoyadernny sintez — Problems of atomic science and engineering, Ser. Thernuclear fussion*, 2006, no. 1, pp. 24 – 30.
8. Borisov V.S., Agrafanov Y.V. et al. Osobennosti dielektricheskogo otklika geterogennykh sistem s polynarnoy martitsey soderjashey elektricheskii aktivnyey klyucheniya [Peculiarities of dielectric response of heterogeneous systems with polar matrix and electric active inclusions]. *FTT — Physics of the Solid State*, 2011, vol. 53, no. 1, pp. 52 – 57.
9. Magerramov A.M., Ramazanov M.A., Agakishiyeva P.B., Qadjieva F.V. Vliyanie mikrostruktury na magnitnye svoystva polimernykh nanokompозитов na osnove PE+Fe₃O₄. [Effect of microstructure on magnetic properties of polymer nanocomposite on PE+Fe₃O₄ base]. *Plasticheskie massy — International polymer science and technology*, 2008, no. 1, pp. 14 – 16.
10. Garaniin D.A., Lutovinov V.S., et al. Vliyanie magnitnogo polya na relaksatsionnyy pик dielektricheskikh poter v polimerakh [Effect of magnetic field on relaxation peak of dielectric losses in polymers]. *FTT — Physics of the Solid State*, 1990, vol. 32, no. 4, pp.1172 – 1176.

11. Volkov A.V., Mockvina M.A., Volkov I.A., Volynskii A.L., Bakeev N.F. Poluchenie, struktura i maqnitnye svoystva polimernykh nanokompозиzov poliviniloviy alcohol – Fe₃O₄. *Vysokomolekulyarnye soedineniya. Ser. A — Polymer Physics*, 2005, vol. 47A, no. 5, pp. 755 – 762.
12. Rustamova D.F., Veliev I.A., Maqerramov A.M. et al. *K vliyaniyu maqnitnogo polya na dielektricheskie i elektretnie svoystva kompозичиy polipropilen-alund* [On effect of magnet field on dielectric and electret properties of polypropilen-alund composition]. Actual probl. of physics, Nov 26, 2012, Baku, VII Conf., Baku State Univ. Publ., pp. 240 – 243.
13. Abbasov T.F., Orudzhev A.O., Khalafov F.R., Kuliev M.M., Rashidov S.F. Vliyanie maqnitnoqo polya na izmenenie elektricheskix svoystv polietolena visokoqo davleniya I kompозичиy na ego osnove [Effects of magnetic field on the electrical and mechanical properties of high-density poly(ethylene) and related blends]. *Vysokomolekulyarnye soedineniya. Ser. B — Polymer Chemistry*, 2000, 42B, no. 6, pp. 1060 – 1064.
14. Alizade R.A. Permittivity of nanocomposites based on magnetite nanoparticles and polymer matrices (collagen and polystyrene). *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 2010, vol. 84, no. 9, p. 1570 – 1575.
15. Yablokov M.Y., Kecheqyan A.S., Qilman A.B., Kuznechov A.E. *Mekhano-elektretirovanie nanokompозиtsionnykh materialov na ocнове polipropilena* [Mechanic electretation of nano-composite materials on polypropylene base]. Proc. XII Int. Conf. *Fizikadielektrikov* [Physics of dielectrics], St-Petersburg, Herzen University, 2011, vol. 2, pp. 205 – 208.
16. Sajin B.I., Lobanov A.M. et al. *Elektricheskie svoystva polimerov* [Electrical properties of polymers]. Ed. by B. I. Sajin, Leningrad, Khimiya Publ., 1986, 224 p.
17. Sochkov V.A. Eksperimentalnoe issledovanie vliyaniy aprovodyashikh fraktalnykh faz na dielektricheskuyu pronitsaemost kompозитov [Experimental study of conducting fractal phases on dielectric permeability of composites]. *JTF — Technical physics*, 2013, vol. 83, iss. 10, pp. 85 – 89.
18. Petrov Y.I. *Fizikamalykhchastits* [Physics of small particles]. Moscow, Nauka Publ., 1982, 360p.
19. Lusheykin Q.A. *Polimernye elektrety* [Polymer electrets]. Moscow, Khimiya Publ., 1984, 184 p.
20. Vshivkov S.A. *Fazovye perekhody polimernykh sistem vo vneshnikh polyakh* [Phase transformations of polymer system in external fields]. St-Petersburg, Lan Publ., 2013, 368 p.
21. Stadnik A.D., Kirik Q.V. *Polimernye kompозиты i maqnitnykh polyakh* [Polymer composites and nanocomposites in magnetic fields]. Sumy, Ukraine, Universitetckayakniqa Publ., 2005, 231 p.
22. Usakov N.M., Yurkov G.Yu. et.al. Nanocomposites based on the cerium oxide nanoparticles and polyethylene materials. *Acta materials*, 2008, vol. 56, pp. 2336 – 2343.

Статья поступила в редакцию 20.04.2015 г.

Магеррамов Ариф Муса оглы — Институт Радиационных Проблем АН Азербайджана (AZ1143, Азербайджанская Республика, г. Баку, Ф. Агаев 9), доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией, специалист по радиационной химии, радиационной материаловедению, диэлектрической и термоактивационной спектроскопии. E-mail: arifm50@yandex.ru

Рустамова Дурдана Фархат кызы — Института Радиационных Проблем АН Азербайджана (AZ1143, Азербайджанская Республика, г. Баку, Ф. Агаев 9), диссертант, специалист по электрофизике, материаловедению. E-mail: drf_63@mail.ru.

Dielectric and electret properties of nanocomposites of polyethylene- Fe₃O₄, crystallized in constant magnetic field

A. M. Maharramov, D. F. Rustamova

Crystallization of melt in magnetic field $H = 18,4 \cdot 10^3$ A/m allow to obtain polyethylene-Fe₃O₄ nano-composition within 20 – 23,5 nm dispersion. Their dielectric, electret properties is studied and specific magnetization M is measured. It is shown, that experimental value of dielectric properties depend on component content and dispersion, the filler is satisfactorily described by the Lichteneker formula. HDPE-Fe₃O₄ nanocompositewith 3 – 5 vol. % of Fe₃O₄ which have crystallized under the constant magnetic field conditions obtain a constant electret state with density of effective charge up to $(2 - 3) \cdot 10^{-4}$ q/m and at high concentrations of Fe₃O₄ the nanocomposite transforms to antistatic state.

Keyword: HDPE-Fe₃O₄ nanocomposite, crystallization, magnetic field, dielectric permittivity, electret properties.

***Maharramov Arif Musa oqlu** — Institute of Radiation Problems of Azerbaijan National Academy of Sciences (9B.Vahabzade str., Baku, Azerbaijan, AZ1143), DrSci (phys-math), professor, head of laboratory, expert in radiation chemistry, dielectric and thermo-activation spectroscopy. E-mail: arifm50@yandex.ru.*

***Rustamova Durdana Farxatqizi** — Institute of Radiation Problems of Azerbaijan National Academy of Sciences (9B.Vahabzade str., Baku, Azerbaijan, AZ1143), PhD, specialist in electro-physics, materials science. E-mail: drf_63@mail.ru.*