

ВЛИЯНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО НАПОЛНИТЕЛЯ НА ИЗМЕНЕНИЕ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИЯХ

*Ровенский государственный гуманитарный университет,
ул. Бандеры, 12, г. Ровно, 33028, Украина*

Изучено влияние дисперсного металлического наполнителя на величину напряженности электрического поля в гетерогенной полимерной системе. Рассмотренная модель может быть использована для оценки термодеполаризационных эффектов в полимерах и электрической прочности полимерных композиционных материалов, а также для получения термоэлектретов.

Введение

Среди огромного разнообразия гетерогенных полимерных систем (ГПС) недостаточно изучены металлонаполненные композиции [1]. Это относительно новый класс в ряду как наполненных полимеров, так и „металлонаполненных систем” (под последними чаще понимают макроскопические комбинации полимеров и металлов). Наиболее примечательная черта полимеров с дисперсными наполнителями – диаметрально противоположность практически всех физических свойств компонентов системы. Все это обуславливает ряд теоретических и практических проблем, решение которых приобретает все большее значение в физике и физической технологии металлонаполненных полимеров. Особо следует отметить тот факт, что в металлонаполненных системах существует значительный и достаточно стабильный электретный эффект [2], в некоторых случаях эти системы имеют свойства полупроводников [3], при этом открываются перспективы их использования в качестве генераторов и трансформаторов энергии [4].

Работами [5] показано, что свойства ГПС определяются типом и объемным соотношением их компонентов, формой и размером дисперсных частиц [6], морфологией системы [7] и характером взаимодействия фаз на границе раздела [8]. Если с этих позиций рассматривать наличие диаметральной противоположности свойств компонентов полимер–высокодисперсный металлический наполнитель, то определяется одна из актуальных задач: изучение причины усиления приложенного электрического поля в Т-р режиме в случае использования ГПС в качестве термоэлектрета [2].

Для решения этой задачи необходимо рассчитать напряженность E электрического поля внутри заряженной металлонаполненной полимерной системы. В [9] был предложен метод расчета E поля, созданного двумя сферическими включениями для случая значительного расстояния между ними. С помощью метода изображения [10] удалось рассчитать коэффициент усиления электрического поля на поверхности каждой из двух близко размещенных металлических частиц. Однако в реальных ГПС процессы распределения электрического поля между частицами металлического наполнителя в полимере имеют более сложную природу, обусловленную нелинейностью эффектов [11]. В [12] рассмотрен один из случаев такой нелинейности, когда в ГПС существует электрическое поле с напряженностью $E_{\text{ср}}$ и определено значение $E_{\text{макс}}$ на поверхности металлического сферического включения. При этом указано, что определить значение E в произвольной точке ГПС для любого соотношения между r и l (где r и l – соответственно радиус частицы и расстояние между ними) не представляется возможным [12].

Для определения аналитического выражения, с помощью которого можно количественно определить величину E электрического поля в различных точках ГПС при любом соотношении между r и l (то есть в зависимости от объемного содержания наполнителя), нами использован метод электрических изображений. С его помощью найдем величины дипольных моментов, индуцированных на электропроводящем сферическом включении в виде дисперсного металлического наполнителя.

Теоретический анализ

Предположим, что при отсутствии сегрегации частицы наполнителя имеют сферическую

форму, причем центры сфер образуют простую кубическую решетку как единственный возможный тип строения тела при минимальном объеме. Ее узлы погружены в полимерную матрицу (рис.1) и в случае квазиодномерной модели при размере сферических включений r среднестатистическое расстояние между ними l . Методом «электрических изображений» выполняем расчет величины дипольного момента индуцированных на электропроводящем сферическом включении зарядов. Для этого определяем потенциалы электрического поля в точках А и В, которые находятся на поверхности частицы металлического наполнителя, центр которой – точку О принимаем за начало координат (рис.1). На рис.1 представлен результат использования метода электрических изображений, основанный на условии постоянства потенциала на подложках и на поверхности электропроводящих включений.

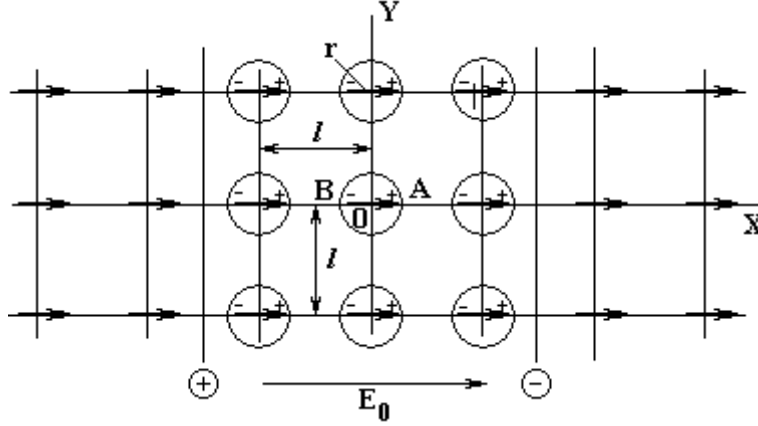


Рис. 1. Модель неоднородного диэлектрика со сферическими включениями

Здесь стрелками показан точечный дипольный момент шаров и их фиктивных изображений. Из рис. 1 видно, что потенциал электрического поля в точке А определяется по формуле

$$\varphi_A = -\frac{p}{4\pi\epsilon\epsilon_0 l^2} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{(i+\xi)^2} - \frac{p}{4\pi\epsilon\epsilon_0 l^2} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{(i-\xi)^2} + \frac{p}{\pi\epsilon\epsilon_0 l^2} \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{i+\xi}{[(i+\xi)^2 + j^2 + k^2]^{\frac{3}{2}}} - \frac{p}{\pi\epsilon\epsilon_0 l^2} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{i-\xi}{[(i-\xi)^2 + j^2 + k^2]^{\frac{3}{2}}}, \quad (1)$$

где $\xi = r/l$; 1-е слагаемое – вклад полей центрального диполя, диполей металлических шаров и их фиктивных изображений, которые находятся на отрицательной полуоси ОХ; 2-е слагаемое – вклад диполей металлического наполнителя и фиктивных изображений, что лежат на положительной оси ОХ; 3-е и 4-е слагаемые – вклад остальных диполей объема, находящихся соответственно с левой и правой стороны от плоскости ОУZ. Аналогично имеем для точки В:

$$\varphi_B = -\frac{p}{4\pi\epsilon\epsilon_0 l^2} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{(i+\xi)^2} + \frac{p}{4\pi\epsilon\epsilon_0 l^2} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{(i-\xi)^2} - \frac{p}{\pi\epsilon\epsilon_0 l^2} \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{i+\xi}{[(i+\xi)^2 + j^2 + k^2]^{\frac{3}{2}}} + \frac{p}{\pi\epsilon\epsilon_0 l^2} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{i-\xi}{[(i-\xi)^2 + j^2 + k^2]^{\frac{3}{2}}} + E_0 2r, \quad (2)$$

где E_0 – напряженность приложенного электрического поля.

Потенциал всех точек шара одинаковый, поэтому $\varphi_A = \varphi_B$. Приравняв (1) и (2), получим выражение для определения дипольного момента индуцированных на электропроводном сферическом включении зарядов:

$$p = \frac{4\pi\epsilon\epsilon_0 l^3 E_0 \xi}{\sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{(i+\xi)^2} - \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{(i-\xi)^2} + \frac{1}{\xi^2} + 4 \left(\sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{i+\xi}{[(i+\xi)^2 + j^2 + k^2]^{\frac{3}{2}}} - \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{i-\xi}{[(i-\xi)^2 + j^2 + k^2]^{\frac{3}{2}}} \right)}. \quad (3)$$

Имея выражение для p , можем найти соотношения, которые позволят определить численное значение напряженности электрического поля в любых точках внутри полимерной системы в зависимости от объемного содержания металлического наполнителя. Для этого потенциал электрического поля в произвольной точке с координатами x, y, z (рис. 2) представим восемью слагаемыми, каждое из которых дает вклад диполей одного из октантов, что окружают данную точку:

1-е слагаемое – вклад полей диполей 1-го октанта

$$\varphi_1 = -\frac{p}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{il-x}{[(il-x)^2 + (jl-y)^2 + (kl-z)^2]^{\frac{3}{2}}};$$

2-е слагаемое – вклад полей диполей 2-го октанта

$$\varphi_2 = -\frac{p}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{il - x}{\left[(il - x)^2 + (jl + y)^2 + (kl - z)^2 \right]^{\frac{3}{2}}};$$

3-е слагаемое – вклад полей диполей 3-го октанта

$$\varphi_3 = -\frac{p}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{il - x}{\left[(il - x)^2 + (jl - y)^2 + (kl + z)^2 \right]^{\frac{3}{2}}};$$

4-е слагаемое – вклад полей диполей 4-го октанта

$$\varphi_4 = -\frac{p}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{il - x}{\left[(il - x)^2 + (jl + y)^2 + (kl + z)^2 \right]^{\frac{3}{2}}};$$

5-е слагаемое – вклад полей диполей 5-го октанта

$$\varphi_5 = \frac{p}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{il + x}{\left[(il + x)^2 + (jl - y)^2 + (kl - z)^2 \right]^{\frac{3}{2}}};$$

6-е слагаемое – вклад полей диполей 6-го октанта

$$\varphi_6 = \frac{p}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{il + x}{\left[(il + x)^2 + (jl + y)^2 + (kl - z)^2 \right]^{\frac{3}{2}}};$$

7-е слагаемое – вклад полей диполей 7-го октанта

$$\varphi_7 = \frac{p}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{il + x}{\left[(il + x)^2 + (jl - y)^2 + (kl + z)^2 \right]^{\frac{3}{2}}};$$

8-е слагаемое – вклад полей диполей 8-го октанта

$$\varphi_8 = \frac{p}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{il + x}{\left[(il + x)^2 + (jl + y)^2 + (kl + z)^2 \right]^{\frac{3}{2}}}.$$

$$\varphi(x, y, z) = \sum_{n=1}^8 \varphi_n.$$

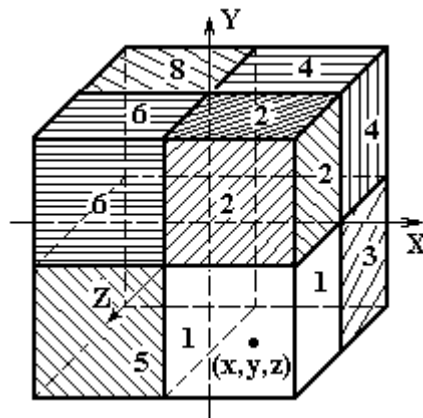


Рис. 2. Объем полимерной матрицы, разделенный на восемь октантов (точка с координатами x, y, z находится в первом октанте)

Зная потенциал электрического поля, можем найти его напряженность, которая определяется непосредственно из потенциальной функции: $\vec{E} = -grad\varphi$. Проекция вектора E на ось x :

$$\Delta E_{x_n} = -\frac{\partial \varphi_n}{\partial x};$$

$$\begin{aligned} \Delta E_{x_1} &= \frac{p}{4\pi\epsilon\epsilon_0 l^3} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2(i-\eta_x)^2 - (j-\eta_y)^2 - (k-\eta_z)^2}{\left[(i-\eta_x)^2 + (j-\eta_y)^2 + (k-\eta_z)^2 \right]^{\frac{5}{2}}}; \\ \Delta E_{x_2} &= \frac{p}{4\pi\epsilon\epsilon_0 l^3} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2(i-\eta_x)^2 - (j+\eta_y)^2 - (k-\eta_z)^2}{\left[(i-\eta_x)^2 + (j+\eta_y)^2 + (k-\eta_z)^2 \right]^{\frac{5}{2}}}; \\ \Delta E_{x_3} &= \frac{p}{4\pi\epsilon\epsilon_0 l^3} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{2(i-\eta_x)^2 - (j-\eta_y)^2 - (k+\eta_z)^2}{\left[(i-\eta_x)^2 + (j-\eta_y)^2 + (k+\eta_z)^2 \right]^{\frac{5}{2}}}; \\ \Delta E_{x_4} &= \frac{p}{4\pi\epsilon\epsilon_0 l^3} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{2(i-\eta_x)^2 - (j+\eta_y)^2 - (k+\eta_z)^2}{\left[(i-\eta_x)^2 + (j+\eta_y)^2 + (k+\eta_z)^2 \right]^{\frac{5}{2}}}; \\ \Delta E_{x_5} &= \frac{p}{4\pi\epsilon\epsilon_0 l^3} \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2(i+\eta_x)^2 - (j-\eta_y)^2 - (k-\eta_z)^2}{\left[(i+\eta_x)^2 + (j-\eta_y)^2 + (k-\eta_z)^2 \right]^{\frac{5}{2}}}; \\ \Delta E_{x_6} &= \frac{p}{4\pi\epsilon\epsilon_0 l^3} \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2(i+\eta_x)^2 - (j+\eta_y)^2 - (k-\eta_z)^2}{\left[(i+\eta_x)^2 + (j+\eta_y)^2 + (k-\eta_z)^2 \right]^{\frac{5}{2}}}; \\ \Delta E_{x_7} &= \frac{p}{4\pi\epsilon\epsilon_0 l^3} \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{2(i+\eta_x)^2 - (j-\eta_y)^2 - (k+\eta_z)^2}{\left[(i+\eta_x)^2 + (j-\eta_y)^2 + (k+\eta_z)^2 \right]^{\frac{5}{2}}}; \\ \Delta E_{x_8} &= \frac{p}{4\pi\epsilon\epsilon_0 l^3} \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{2(i+\eta_x)^2 - (j+\eta_y)^2 - (k+\eta_z)^2}{\left[(i+\eta_x)^2 + (j+\eta_y)^2 + (k+\eta_z)^2 \right]^{\frac{5}{2}}}; \\ E_x(x, y, z) &= \sum_{n=1}^8 \Delta E_{x_n} + E_0, \text{ где } \eta_x = \frac{x}{l}, \eta_y = \frac{y}{l}, \eta_z = \frac{z}{l}. \end{aligned}$$

Проекция вектора E на оси y и z :

$$\begin{aligned} E_{y_n} &= -\frac{\partial\Phi_n}{\partial y}; & E_{z_n} &= -\frac{\partial\Phi_n}{\partial z}; \\ E_{y_1} &= \frac{3p}{4\pi\epsilon\epsilon_0 l^3} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(i-\eta_x)(j-\eta_y)}{\left[(i-\eta_x)^2 + (j-\eta_y)^2 + (k-\eta_z)^2 \right]^{\frac{5}{2}}}; & E_{z_1} &= \frac{3p}{4\pi\epsilon\epsilon_0 l^3} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(i-\eta_x)(k-\eta_z)}{\left[(i-\eta_x)^2 + (j-\eta_y)^2 + (k-\eta_z)^2 \right]^{\frac{5}{2}}}; \\ E_{y_2} &= \frac{3p}{4\pi\epsilon\epsilon_0 l^3} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(i-\eta_x)(j+\eta_y)}{\left[(i-\eta_x)^2 + (j+\eta_y)^2 + (k-\eta_z)^2 \right]^{\frac{5}{2}}}; & E_{z_2} &= \frac{3p}{4\pi\epsilon\epsilon_0 l^3} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(i-\eta_x)(k-\eta_z)}{\left[(i-\eta_x)^2 + (j+\eta_y)^2 + (k-\eta_z)^2 \right]^{\frac{5}{2}}}; \\ E_{y_3} &= \frac{3p}{4\pi\epsilon\epsilon_0 l^3} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(i-\eta_x)(j-\eta_y)}{\left[(i-\eta_x)^2 + (j-\eta_y)^2 + (k+\eta_z)^2 \right]^{\frac{5}{2}}}; & E_{z_3} &= -\frac{3p}{4\pi\epsilon\epsilon_0 l^3} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(i-\eta_x)(k+\eta_z)}{\left[(i-\eta_x)^2 + (j-\eta_y)^2 + (k+\eta_z)^2 \right]^{\frac{5}{2}}}; \\ E_{y_4} &= -\frac{3p}{4\pi\epsilon\epsilon_0 l^3} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(i-\eta_x)(j+\eta_y)}{\left[(i-\eta_x)^2 + (j+\eta_y)^2 + (k+\eta_z)^2 \right]^{\frac{5}{2}}}; & E_{z_4} &= -\frac{3p}{4\pi\epsilon\epsilon_0 l^3} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(i-\eta_x)(k+\eta_z)}{\left[(i-\eta_x)^2 + (j+\eta_y)^2 + (k+\eta_z)^2 \right]^{\frac{5}{2}}}; \\ E_{y_5} &= -\frac{3p}{4\pi\epsilon\epsilon_0 l^3} \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(i+\eta_x)(j-\eta_y)}{\left[(i+\eta_x)^2 + (j-\eta_y)^2 + (k-\eta_z)^2 \right]^{\frac{5}{2}}}; & E_{z_5} &= -\frac{3p}{4\pi\epsilon\epsilon_0 l^3} \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(i+\eta_x)(k-\eta_z)}{\left[(i+\eta_x)^2 + (j-\eta_y)^2 + (k-\eta_z)^2 \right]^{\frac{5}{2}}}; \\ E_{y_6} &= \frac{3p}{4\pi\epsilon\epsilon_0 l^3} \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(i+\eta_x)(j+\eta_y)}{\left[(i+\eta_x)^2 + (j+\eta_y)^2 + (k-\eta_z)^2 \right]^{\frac{5}{2}}}; & E_{z_6} &= -\frac{3p}{4\pi\epsilon\epsilon_0 l^3} \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(i+\eta_x)(k-\eta_z)}{\left[(i+\eta_x)^2 + (j+\eta_y)^2 + (k-\eta_z)^2 \right]^{\frac{5}{2}}}; \\ E_{y_7} &= \frac{3p}{4\pi\epsilon\epsilon_0 l^3} \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(i+\eta_x)(j-\eta_y)}{\left[(i+\eta_x)^2 + (j-\eta_y)^2 + (k+\eta_z)^2 \right]^{\frac{5}{2}}}; & E_{z_7} &= \frac{3p}{4\pi\epsilon\epsilon_0 l^3} \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(i+\eta_x)(k+\eta_z)}{\left[(i+\eta_x)^2 + (j-\eta_y)^2 + (k+\eta_z)^2 \right]^{\frac{5}{2}}}; \end{aligned}$$

$$E_{y_8} = \frac{3p}{4\pi\epsilon\epsilon_0 l^3} \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(i+\eta_x)(j+\eta_y)}{[(i+\eta_x)^2 + (j+\eta_y)^2 + (k+\eta_z)^2]^{\frac{5}{2}}};$$

$$E_{z_8} = \frac{3p}{4\pi\epsilon\epsilon_0 l^3} \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(i+\eta_x)(k+\eta_z)}{[(i+\eta_x)^2 + (j+\eta_y)^2 + (k+\eta_z)^2]^{\frac{5}{2}}};$$

$$E_y(x, y, z) = \sum_{n=1}^8 E_{y_n}$$

$$E_z(x, y, z) = \sum_{n=1}^8 E_{z_n}$$

Представленные ряды сходящиеся и могут быть рассчитаны с нужной точностью. Для нахождения модуля вектора E воспользуемся формулой

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2}.$$

Условия проведения исследований, их результаты и обсуждение

Исследовалось влияние металлического наполнителя на электретный эффект в промышленном поливинилхлориде (ПВХ) суспензионной полимеризации марки С-65 методом термостимулированной деполяризации (ТСД). В качестве наполнителя для ПВХ использовался дисперсный порошок вольфрама (W) с преобладающим размером частиц 7 мкм. Образцы для исследований диаметром (29 ± 1) мм и толщиной $(0,2 \pm 0,02)$ мм готовились горячим прессованием в Т-р режиме при температуре 403 К и давлении 10,0 МПа. Поляризация образцов проводилась при температуре 383 К в электрическом поле с постоянной напряженностью 20 кВ/см на протяжении 5 мин. После этого образец охлаждался до комнатной температуры в поле той же напряженности на протяжении 30 мин. Измерение токов ТСД и расчеты параметров электрической релаксации композиций проводили в соответствии с ГОСТ 25209-82. Ток разрядки регистрировался электрометрическим усилителем У5-9. Рассчитанные по кривым тока ТСД (скорость нагревания – 3 К/мин) параметры электрической релаксации представлены в таблице (σ – поверхностная плотность заряда электрета, W – энергия активации релаксации заряда, τ_e – минимальное время релаксации заряда в условиях эксплуатации). Измерения удельного объемного электрического сопротивления ρ_v проводились методом вольтметра-амперметра в соответствии с ГОСТ 6433.2–71.

Некоторые параметры электрической релаксации композиций

Состав образцов	Температура максимума, К	$\sigma \cdot 10^{-4}$, нКл/м ²	W , кДж/моль	τ_e , с
ПВХ без добавок	357	0,20	271	10^8
ПВХ, W (0,5 об.%)	357	0,55	237	10^7

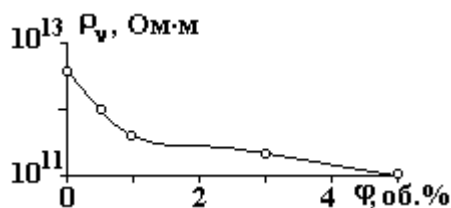
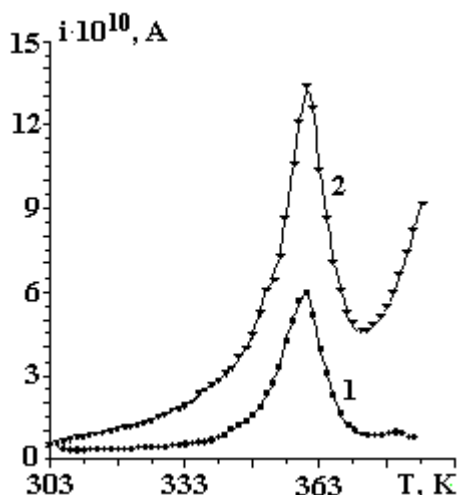


Рис. 3. Кривые тока ТСД для ПВХ без добавок (1) и с добавкой W в количестве 0,5 об.% (2)

Рис. 4. Концентрационная зависимость ρ_v для систем ПВХ с добавкой W при $T=298$ К

Как следует из данных, представленных на рис. 3, наличие электрического поля внутри ПВХ-системы с добавкой высокодисперсного порошка W в количестве 0,5 об.% приводит к усилению величины тока ТСД. Это является следствием наличия электрического поля в ГПС. Воспользуемся полученными соотношениями для исследования распределения напряженности электрического поля

между металлическими частицами при $\xi = 0,1$. Этот случай отвечает концентрации сфер 0,4 об.% ($\theta = 4\pi\xi^3/3$) и может служить моделью ПВХ с добавкой дисперсного порошка W с предпочтительным размером частиц 7 мкм [13]. Такая композиция не является электропроводной (рис. 4), в то время, когда электрофизические свойства композиций с $\xi \geq 0,3$ приближаются к свойствам металлов и не обладают электретным эффектом. Для случая $\xi = 0,1$ в формуле (3):

$$\sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{(i+0,1)^2} = 101,4332992, \quad \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{(i-0,1)^2} = 101,92254,$$

$$\sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{i+0,1}{[(i+0,1)^2 + j^2 + k^2]^{\frac{3}{2}}} - \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{i-0,1}{[(i-0,1)^2 + j^2 + k^2]^{\frac{3}{2}}} = 0,119192$$

остается только одно слагаемое $\frac{1}{\xi^2} = 100$.

Подставляя координаты точек, которые лежат на оси X между двумя соседними частицами, в формулы для определения E , после соответствующих расчетов, погрешность которых по абсолютной величине не превышает 10^{-6} , получаем распределение напряженности электрического поля вдоль координатной оси X . Оно изображено на рис. 5 и с достаточной степенью точности описывается формулой

$$E = A \operatorname{csc}^{3+\varepsilon} \pi \eta_x + \alpha, \quad (4)$$

где $\varepsilon = 0,1$; $A = 0,053$; $\alpha = 0,977$.

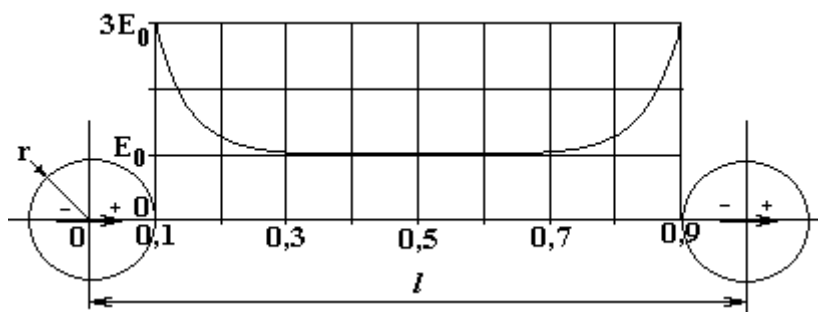


Рис. 5. Распределение напряженности электрического поля вдоль координатной оси X

Как видно из рис. 5, максимальная напряженность $3E_0$ имеет место на поверхности частиц металлического наполнителя. Распределение электрического поля вдоль координатных осей Y и Z имеет вид, представленный на рис. 6:

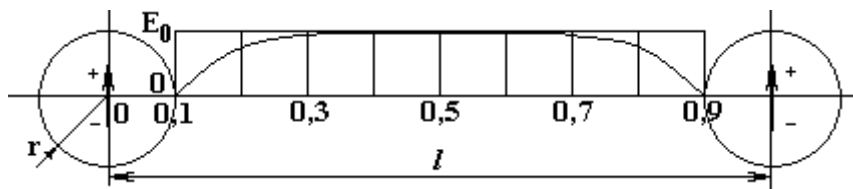


Рис. 6. Распределение напряженности электрического поля вдоль координатной оси Y

Полученные соотношения позволяют находить значения напряженности электрического поля в разных точках внутри металлонаполненной системы. Распределение напряженности на поверхности частиц наполнителя представлено на рис. 7 и аналитически описывается формулой

$$E = 3E_0 \cos \theta \quad (5)$$

С помощью полученных соотношений можно определять значения величины напряженности электрического поля в разных точках внутри полимерной системы. На рис. 8 представлено распределение напряженности электрического поля на плоскости OXY при $\xi = 0,1$.

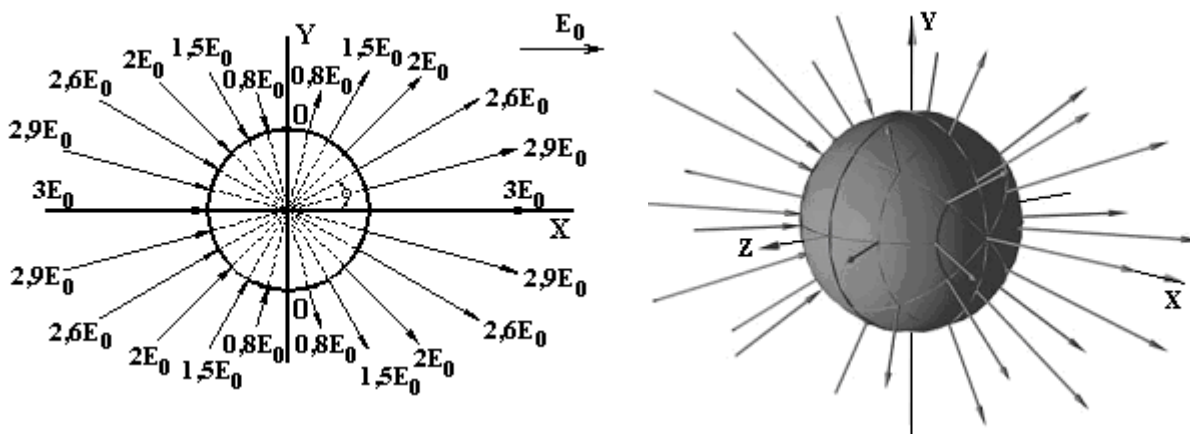


Рис. 7. Распределение напряженности электрического поля на поверхности металлического наполнителя

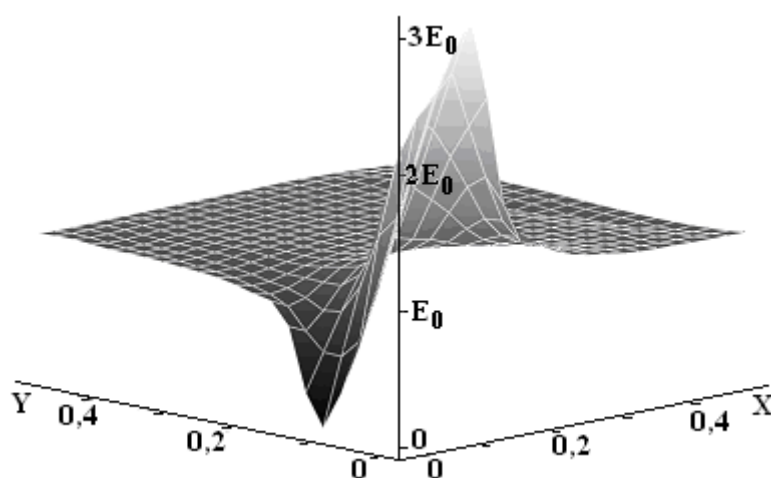


Рис. 8. Распределение напряженности электрического поля на плоскости OXY

Заключение

Таким образом, введение в полимер высокодисперсного металлического наполнителя создает неоднородное электрическое поле в случае формирования композита во внешнем электрическом поле в Т-р режиме. Предложенная модель гетерогенной системы позволяет определять величину напряженности электрического поля в такой системе и указать пути направленного регулирования комплекса свойств ГПС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Помогайло А.Д., Розенберг А.С., Уфлянд И.Е. Наночастицы металлов в полимерах. М., 2000.
2. Электреты / Под ред. Г.Сеслера. М., 1983.
3. Луцкейкин Г.А. Полимерные электреты. М., 1984.
4. Френкель С.И., Цыгельный И.М., Колупаев Б.С. Молекулярная кибернетика. Львов, 1990.
5. Липатов Ю.С. Физикохимия многокомпонентных полимерных систем. Киев, 1986.
6. Колупаев Б.С. Релаксационные и термические свойства наполненных полимерных систем. Львов, 1980.
7. Липатов Ю.С. Физико-химические основы наполнения полимеров. М., 1991.
8. Липатов Ю.С. Межфазные явления в полимерах. Киев, 1980.
9. Мучник В.М., Фишман Б.Е. Электризация грубодисперсных аэрозолей в атмосфере. Л., 1982.
10. Саранин В.А. Напряженность электрического поля заряженных проводящих шаров и пробой воздушного промежутка между ними // Успехи физических наук. 2002. № 12. С.1449–1454.
11. Миролюбов Н.Н., Костенко М.В., Левинштейн М.Л., Тиходеев Н.Н. Методы расчета электростатических полей. М., 1963.
12. Сканава Г.И. Физика диэлектриков (область сильных полей). М., 1958. С.822–838.

Summary

It is investigated the influence of disperse metallic filler on size of intensity of an electric field in heterogeneous polymeric system. The considered model can be used for an estimation of termodepolarizing effects of polymers, reception of termoelectrets, estimation of electric durability of polymeric composite materials.

В.В. Шамко, А.И. Вовченко, Л.А. Каменская, Г.А. Барбашова

УПРАВЛЕНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ ПРИ МОНОИМПУЛЬСНОМ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОМ ПРЕОБРАЗОВАНИИ ЭНЕРГИИ

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
Октябрьский пр., 43-а, г. Николаев-18, 54018, Украина*

Введение

В разрядноимпульсных технологиях по электровзрывной очистке отливок от формовочных и стержневых смесей и запрессовке труб реализуются, как правило, моноимпульсные режимы разряда (см., например, [1]). Важной технологической задачей при этом является получение в зоне объекта обработки оптимальной по форме и интенсивности волны давления, когда бы обрабатываемый объект смог поглотить максимум излучаемой электровзрывным источником акустической энергии.

Данная работа посвящена численному исследованию возможностей управления гидродинамическими процессами подводного электровзрыва с моноимпульсным энерговодом путем вариации параметров импульса электрической мощности $N(t)$.

В ряде более ранних исследований [2–8] было показано, что форма эпюр давление–время для разрядного канала и окружающей его жидкости не претерпевает существенных изменений при вариации параметров импульса мощности, а амплитуда давления зависит в основном от скорости ввода мощности. Причем аналитические решения задачи [2, 4, 7] предсказывают постоянство давления при неизменной скорости ввода мощности, тогда как по результатам численного решения давление представляется изменяющейся функцией времени [3, 5, 6]. К тому же в отмеченных работах разрядный канал моделировался либо сферическим излучающим источником [6], либо бесконечным цилиндром [2–4, 7, 8], в то время как разряды с моноимпульсным вводом энергии соответствуют в подавляющем большинстве модели короткого либо длинного (но конечного) цилиндра [1, 5]. Поэтому в настоящей работе решалась двумерная гидродинамическая задача.

Математическая постановка задачи

В области, ограниченной контактными разрывом плазма–вода и ударной волной, требуется найти решение системы двумерных нелинейных уравнений газовой динамики, представляющих собой законы сохранения массы, импульса и энергии [9]:

$$\frac{\partial(rF_1)}{\partial t} + \frac{\partial(rF_2)}{\partial z} + \frac{\partial(rF_3)}{\partial r} = F_4, \quad (1)$$

где $F_1 = [\rho, \rho v_r, \rho v_z, e]^T$; $F_2 = [\rho v_z, \rho v_z v_r, \rho v_z^2 + P, (e + P)v_z]^T$; $F_3 = [\rho v_r, \rho v_r^2 + P, \rho v_r v_z, (e + P)v_r]^T$; $F_4 = [0, P, 0, 0]^T$; T указывает на то, что матрицу-строку необходимо трансформировать; t – время;