

Л.О. КАРАХАНИЯ

МЕТОД ВЫРАВНИВАНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ ОСЕСИММЕТРИЧНОГО ПОЛЯ

Рассматривается задача перераспределения напряженности электрического поля в межэлектродном пространстве цилиндрического конденсатора введением в основную полимерную изоляцию в расплавленном состоянии частиц наполнителя с высокой диэлектрической проницаемостью. Выведено аналитическое выражение зависимости объемной концентрации наполнителя от координаты заданной точки межэлектродного пространства, при которой обеспечивается равномерное распределение напряженности поля в неоднородной среде. Построены графики зависимости скорости инородной частицы от координаты при первоначальном неоднородном поле.

Ключевые слова: неоднородное электрическое поле, пондеромоторная сила, динамическая вязкость, диэлектрическая проницаемость.

В ряде электротехнических устройств с осесимметричным электрическим полем параметры диэлектрической среды выбираются, исходя из максимальной напряженности поля у поверхности проводника (электрода). В результате такого выбора коэффициент использования изоляции и надежность ее работы получаются низкими. Это обстоятельство приводит к заключению, что для создания совершенной изоляционной конструкции, помимо чистых диэлектрических материалов, необходимо также обеспечить равномерное распределение напряженности электрического поля внутри конструкции, что может привести к существенному снижению расхода диэлектрических материалов вследствие уменьшения толщины диэлектрика, а также повышению надежности работы.

Исследования электрической изоляции осесимметричных конструкций из полимеров показывают, что в принципе можно получить равномерное распределение напряженности электрического поля между цилиндрическими соосными электродами введением в полимерную среду частиц инородного диэлектрика с высокой диэлектрической проницаемостью.

В настоящей статье рассматривается возможность создания макроскопически однородного поля в цилиндрическом конденсаторе перераспределением концентрации частиц наполнителя с диэлектрической проницаемостью (ДП) большей, чем ДП жидкого диэлектрика (расплава), под воздействием сил электрического поля.

Из теории электростатического поля известно, что для выравнивания электрического поля в изоляции цилиндрического конденсатора диэлектрическая проницаемость в межэлектродном пространстве должна меняться по закону

$$\epsilon_r r = \text{const}, \quad (1)$$

где ϵ_r - диэлектрическая проницаемость элементарного слоя анизотропного диэлектрика толщиной dr на расстоянии r от оси.

Следовательно, для обеспечения равномерного распределения напряженности поля в осесимметричной системе электродов необходимо создать анизотропную композиционную среду, диэлектрическая проницаемость которой является функцией координаты r .

Как известно, при наполнении расплава диэлектрика мелкодисперсным наполнителем образуется хаотическая композиционная смесь, средняя диэлектрическая проницаемость которой определяется формулой Максвелла - Вагнера:

$$\epsilon_{cp} = \epsilon_1 + 3\epsilon_1 P \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + 2\epsilon_1}, \quad (2)$$

где ϵ_1 , ϵ_2 - диэлектрические проницаемости основного диэлектрика и наполнителя; P - объемная доля (концентрация) наполнителя.

Поскольку уравнение (1) имеет место для каждого сечения в композиционной смеси, то на основании (2) можно определить закон изменения концентрации частиц наполнителя вдоль радиуса r .

Принимая $P = 0$ при $r = R_2$ (у поверхности внешней обкладки), т.е. $\epsilon_{cp} = \epsilon_1$, получим

$$\left(\epsilon_1 + 3\epsilon_1 P \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + 2\epsilon_1} \right) r = R_2 \epsilon_1, \quad (3)$$

откуда зависимость концентрации частиц наполнителя от координаты определится формулой

$$P(r) = \frac{(R_2 - r)(\epsilon_2 + 2\epsilon_1)}{3r(\epsilon_2 - \epsilon_1)}. \quad (4)$$

При $r = R_1$ (у поверхности внутренней обкладки) P имеет максимальное значение и стремится к нулю у поверхности внешней обкладки. Для перераспределения концентрации частиц наполнителя по выражению (4) рассмотрим их перемещение в электрическом поле цилиндрического конденсатора. Пусть сферическая частица наполнителя радиуса a , плотностью вещества D , диэлектрической проницаемостью ϵ_2 находится в вязкой среде (расплаве) с диэлектрической проницаемостью ϵ_1 . Коэффициент динамической вязкости расплава равен η .

На поляризованную в электрическом поле частицу наполнителя действует пондеромоторная сила [1, 2]

$$F_n = 4\pi a^3 \frac{\epsilon_1(\epsilon_2 - \epsilon_1)}{\epsilon_2 + 2\epsilon_1} E |\text{grad} E|, \quad (5)$$

и скорости частицы от координаты при: мкм, Па.с, мм, мм, начальной поля в точке с координатой r : U - напряжение между обкладками.

С учетом (6) пондеромоторная сила определится формулой

$$F_n = 4\pi a^3 \frac{\epsilon_1(\epsilon_2 - \epsilon_1)}{\epsilon_2 + 2\epsilon_1} \frac{U^2}{r^3 \left(\ln \frac{R_2}{R_1} \right)^2}. \quad (7)$$

Кроме силы F_n , на движущуюся частицу действует сила сопротивления Стокса, которая при малых скоростях пропорциональна первой степени скорости частицы [3]:

$$F_c = 6\pi a \eta V, \quad (8)$$

где V - скорость.

Уравнение движения частицы получается согласно принципу Даламбера с учетом приложенных к частице сил F_n , F_c и силы инерции

$$m \frac{dV}{dt} + 6\pi a \eta V - 4\pi a^3 \frac{\epsilon_1(\epsilon_2 - \epsilon_1)}{\epsilon_2 + 2\epsilon_1} \frac{U^2}{r^3 \ln \frac{R_2}{R_1}} = 0, \quad (9)$$

где $m = \frac{4}{3} \pi a^3 D$ - масса сферической частицы.

Предполагается, что ускорение частицы направлено к оси конденсатора, а r отсчитывается от оси. Преобразуем уравнение (8) для получения зависимости мгновенной скорости от координаты r :

$$V \frac{dV}{dr} = \frac{-6,5\eta V}{a^2 D} + \frac{3\epsilon_1(\epsilon_2 - \epsilon_1)}{\epsilon_2 + 2\epsilon_1} \frac{U^2}{r^3 \ln \frac{R_2}{R_1}}. \quad (10)$$

Решение нелинейного уравнения (9) осуществлено методом Рунге - Кутты. По результатам расчета на рис. 1 - 3 приведены графики зависимости скорости частицы от координаты при: $a = 100 \text{ мкм}$, $\eta = 10 \text{ Па.с}$, $\epsilon_2 = 125\epsilon_1$, $R_1 = 10 \text{ мм}$, $R_2 = 15 \text{ мм}$, начальной координате частицы 15 мм , $D = 5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ и напряжении $U = 6, 12, 18 \text{ кВ}$ соответственно.

Поскольку сила F_c тормозит частицу, а F_n ускоряет, в результате она ускоряется. Однако при реализуемых на практике значениях напряжений U скорости частицы малы, т.е. составляют доли миллиметра в секунду (рис. 1 - 3).

Определим начальную концентрацию наполнителя и его объем для пространства между коаксиальными электродами радиусами R_1 и R_2 , обеспечивающую равномерное распределение (выравнивание) электрического поля. Выделим в межэлектродном пространстве длиной l кольцевую полосу радиуса r и шириной dr , объем которой определится выражением

$$dV = 2\pi l r dr. \quad (11)$$

Занятый наполнителем объем при этом будет равен

$$dV_{\text{нап}} = P dV, \quad (12)$$

где P выражается по (4).

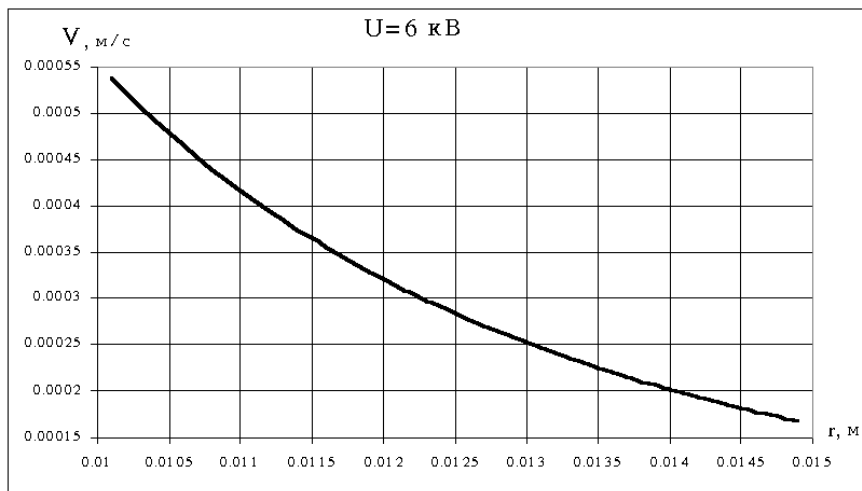


Рис.1. Зависимость скорости частицы от координаты при $U = 6$ кВ

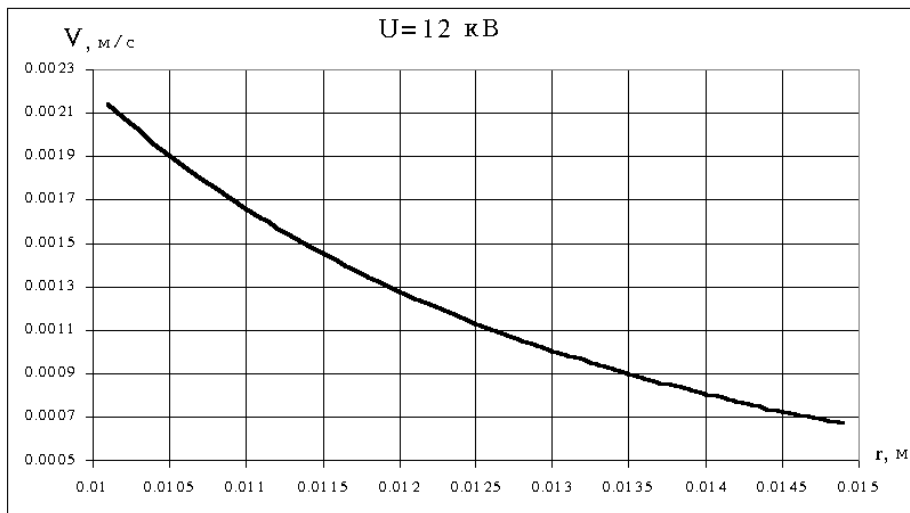


Рис.2. Зависимость скорости частицы от координаты при $U = 12$ кВ

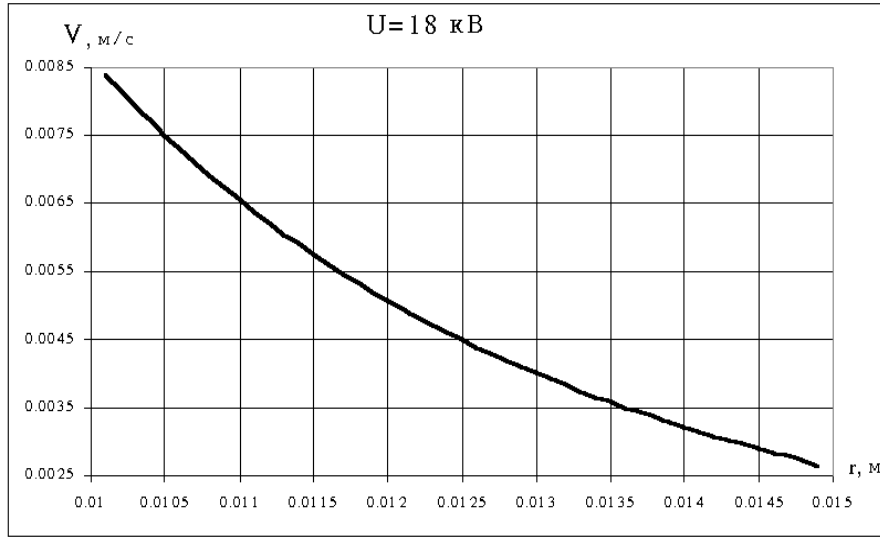


Рис.3. Зависимость скорости частицы от координаты при $U = 18 \text{ кВ}$

Следовательно,

$$dV_{\text{нап}} = 2\pi l r dr \frac{(R_2 - r)(\epsilon_2 + 2\epsilon_1)}{3r(\epsilon_2 - \epsilon_1)}. \quad (13)$$

Интегрируя (12) в пределах от R_1 до R_2 , получим

$$V_{\text{нап.}} = \int_{R_1}^{R_2} \frac{2\pi l (\epsilon_2 + 2\epsilon_1)(R_2 - r)dr}{3(\epsilon_2 - \epsilon_1)r} = \frac{2\pi l (\epsilon_2 + 2\epsilon_1)}{3(\epsilon_2 - \epsilon_1)} \left[R_2(R_2 - R_1) - \frac{R_2^2 - R_1^2}{2} \right] = \quad (14)$$

$$= \frac{\pi l (\epsilon_2 + 2\epsilon_1)}{3(\epsilon_2 - \epsilon_1)} (R_2 - R_1)^2.$$

В соответствии с определением первоначальной концентрации наполнителя (до перераспределения) имеем

$$P_{\text{н.}} = \frac{V_{\text{нап.}}}{V} = \frac{(R_2 - R_1)^2 (\epsilon_2 + 2\epsilon_1)}{3(\epsilon_2 - \epsilon_1)(R_2^2 - R_1^2)}, \quad (15)$$

поскольку объем межэлектродного пространства равен

$$V = \pi(R_2^2 - R_1^2)l. \quad (16)$$

Таким образом, объем наполнителя, необходимый для выравнивания напряженности электрического поля между соосными цилиндрическими электродами конденсатора, кроме геометрических размеров, зависит также от диэлектрических проницаемостей наполнителя и основного диэлектрика.

Выводы

Скорость движения сферической частицы наполнителя в неоднородном электрическом поле, в вязкой среде прямо пропорциональна динамической вязкости среды и квадрату напряжения между электродами.

1. Перераспределение концентрации частиц наполнителя вдоль радиуса данного сечения будет устанавливаться по мере выравнивания напряженности поля в межэлектродном пространстве.
2. По известным геометрическим размерам и значениям электрофизических параметров полимерного диэлектрика и наполнителя можно определить необходимый объем наполнителя на единицу длины конденсатора по полученному аналитическому выражению.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Тамм И.Е.** Основы теории электричества. - М.: Наука, 1976. - 616 с.
2. **Татур Т.А.** Основы теории электромагнитного поля. - М.: Высш. шк., 1989. - 270 с.
3. **Сой С.** Гидродинамика многофазных систем. - М.: Мир, 1971. - 536с.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 19.11.2002.

Լ.Հ. ԿԱՐԱԽԱՆՅԱՆ

ԱՌԱՆՑՔԱՀԱՄԱՉԱՓ ԴԱՇՏԻ ԼԱՐՎԱԾՈՒԹՅԱՆ ՀԱՎԱՍԱՐԵՑՄԱՆ ՄԵԹՈԴ

Դիտարկվում է գլանական կոնդենսատորի միջէլեկտրոդային տարածության մեջ էլեկտրական դաշտի լարվածության վերաբաշխման խնդիրը՝ հալված վիճակում գտնվող հիմնական պոլիմերային մեկուսացման մեջ բարձր դիէլեկտրիկական թափանցելիությամբ լցանյութի մասնիկներ մտցնելու միջոցով: Արտածված է խտության բանաձև, որն արտահայտում է լցանյութի ծավալային կոնցենտրացիայի կախումը միջէլեկտրոդային տարածության տրված կետի կոորդինատից. վերջինիս իրագործման դեպքում ապահովվում է դաշտի լարվածության հավասարաչափ բաշխումն անհամասեռ միջավայրում: Կառուցված են մասնիկի արագության կախումը կոորդինատից արտահայտող գրաֆիկներ՝ սկզբնական անհամասեռ էլեկտրական դաշտի դեպքում:

L.H. KARAKHANYAN

METHOD OF EQUALIZING AXISYMMETRICAL FIELD INTENSITY

The electric field intensity redistribution problem in cylindrical condenser interelectrode space by introducing filler particles with high permeability into the main polymer insulation being in melted state is considered. An analytical formula reflecting the filler volume concentration dependence on the given point coordinates in interelectrode space is derived and the uniform distribution of field intensity in non-homogeneous medium is provided. The graphs of foreign particle velocity dependence on coordinates in initial non-uniform electric field are plotted.