

# ОЦЕНКА НИЖНЕЙ ГРАНИЦЫ КОНЦЕНТРАЦИИ ПРОВОДЯЩИХ ЧАСТИЦ В СИЛОВЫХ РЕЗИСТОРАХ И ПРИ ДИАГНОСТИРОВАНИИ СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ АППАРАТУРЫ

Тажибаев К., Иманакунова Ж.С., Суеркулов М.А., Абдымомунова А.К.  
Кыргызский технический университет им. И. Раззакова,  
Кыргызская республика, E-mail:rector@ktu.aknet.kg

В работе приведен метод оценки нижней границы концентрации проводящих частиц в системе диэлектрик-проводник, при которой возможно образование проводящих цепочек.

Решение такой задачи возникает при проектировании активного элемента силового резистора, а также при определении критического значения концентрации проводящих или полупроводящих частиц в изоляции, которые образуются в процессе его эксплуатации за счет его старения.

При решении поставленной задачи использованы результаты работы [6].

В [1] показано, что при больших содержаниях не проводящей фазы в смесях диэлектрик-проводник результат расчета по формуле Оделевского существенно отличаются от данных эксперимента. Совпадение расчетов с экспериментальными данными начинается лишь с  $\theta_2 \geq 0,33$ , где  $\theta_2$  – объемная доля проводящей фазы. Это противоречит результату, полученному в [2], где в системе диэлектрик-проводник с помощью теории протеканий, методом машинного моделирования, показано, что имеется пороговая концентрация проводящей компоненты  $m_c$  ( $m_c=0,15$ ), при которой эффективная проводимость совершает резкий скачок.

В реальных смесях диэлектрик-проводник, как показывают эксперименты, например, [1,3] резкого скачка не наблюдается. По-видимому это связано с контактными явлениями. Но крутизна зависимости проводимости смеси  $\lambda_{см} = f(\lambda_1, \lambda_2, \theta_2)$  действительно начинает увеличиваться, начиная с  $\theta_2 \approx 0,15$ . Более строгий анализ показывает, что пороговая концентрация будет зависеть не только от объемного содержания проводящей фазы, но и от относительного размера частиц диэлектрика и проводника, а также от плотности частиц, которая должна влиять на распределение компонент в объеме смеси. Ниже сделана попытка по установлению влияния диаметра частиц и относительной плотности проводящих частиц на концентрацию, выше которой возможно образование проводящих цепочек. Сделана попытка по установлению зависимости пороговой концентрации от диаметра частиц и от их относительных удельных весов.

Для простоты решения поставленной задачи воспользуемся двумерной моделью. Примем, что композиция состоит из диэлектрических и металлических частиц. Пусть объемное содержание металлических частиц и диэлектрика равны, соответственно  $Q_M$  и  $1 - Q_M$ . Форму частиц каждой компоненты смеси будем считать сферической, с диаметром  $d_M$  и  $d_D$ , где  $d_M$  - диаметр металлической частицы, а  $d_D$  - диаметр частицы из диэлектрика. Будем считать, что

$$d_M \ll d_D. \quad (1)$$

В процессе перемешивания согласно условию (1) частицы металла будут распределяться в промежутках между частицами диэлектрика. При этом картина распределения металлических частиц, при которой произойдет замыкание обкладок, зависит от плотности металлических частиц. Например, если металлические частицы изготовлены из металла высокой плотности, то при перемешивании под действием силы тяжести они стремятся распределиться так, чтобы потенциальная энергия была минимальной. А это будет соответствовать неравномерному распределению частиц в объеме, и они могут образовать

непрерывную цепочку, даже при низкой объемной концентрации, меньшей по сравнению с концентрацией металлических частиц из металла с низкой плотностью, как это показано на рис. 1, 2.

Рассчитаем минимальное количество металлических частиц относительно большой плотности, при котором образуется непрерывная цепочка  $F'mF$ , как это показано на рис. 3.

Пусть минимальное значение концентрации металлических частиц, когда с высокой достоверностью замыкается обкладка конденсатора, равна  $Q_{KP.M}$ , тогда длина цепочки из этих частиц

$$l_{KP} = d_M \cdot N_{M,KP} \quad (2)$$

где  $N_{M,KP}$  - количество металлических частиц в цепочке, которое определяется из выражения

$$\frac{\pi \cdot d_M}{4} \cdot N_{M,KP} = Q_{M,KP} \quad (3)$$

Решив (3) относительно  $N_{M,KP}$  и подставив результат в (2), найдем

$$l_{KP} = \frac{4Q_{M,KP}}{\pi \cdot d_M} \quad (4)$$

Всевозможные комбинации случаев, когда цепочка металлических частиц длиной  $l_{KP}$  замыкает обкладки конденсатора в точках  $F, F'$ , лежит внутри эллипса, изображенного на рис. 3, где  $r_1 + r_2 = l_{KP}$ , а точки  $F$  и  $F'$  являются фокальными. Будем считать, что металлические частицы равномерно распределены по объему смеси. При этом условии площадь эллипса должна быть такой, чтобы внутри него оказалось столько металлических частиц, сколько нужно для образования цепочки, минимальная длина которой равна отрезку  $FF'$ . Если учесть, что расстояние между отрезками принято равным  $l$ , то минимальное количество металлических частиц

$$N_{M,МИН} = 1/d_M \quad (5)$$

а потому

$$L \cdot S = N_{M,МИН} \quad (6)$$

где  $L$  – количество металлических частиц в единице площади;  $S$  – площадь части эллипса, заключенного между фокальными плоскостями 1 и 2.

Очевидно, что

$$L = (4 \cdot Q_{M,KP}) / \pi \cdot d_M; \quad (7)$$

$$S = \frac{4b}{a} \int_0^{OF} \sqrt{d^2 - x^2} dx, \quad (8)$$

где  $2a$  и  $2b$ , соответственно, большая и малая ось эллипса;  $OF$  – фокальное расстояние. По условию задачи:  $2 \cdot OF = 1$ .

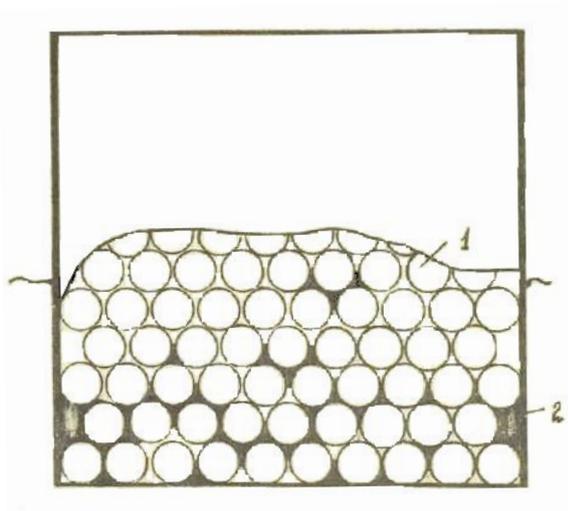


Рис.1.

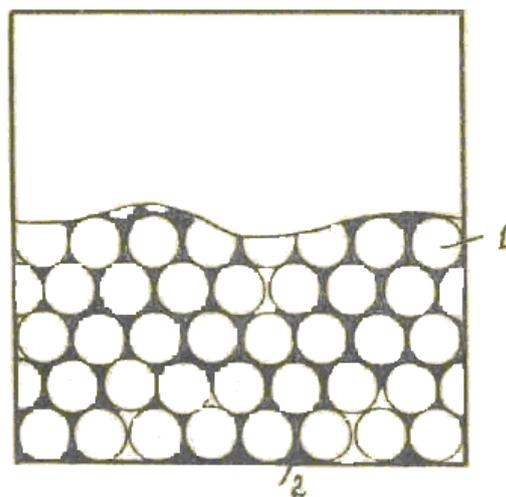


Рис. 2.

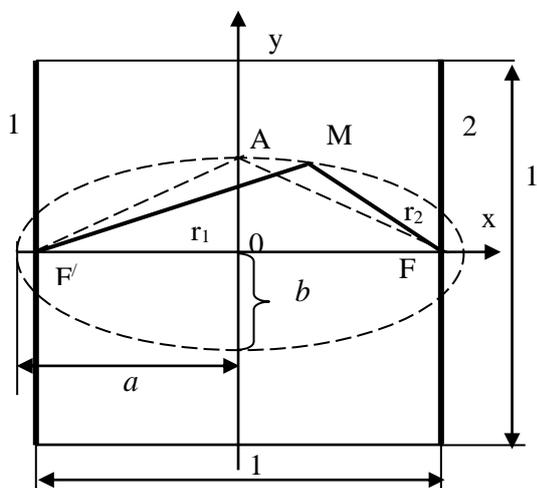


Рис.3.

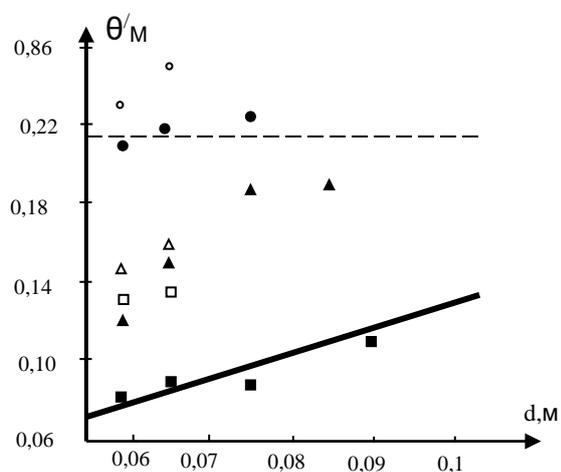


Рис.4.

● – полистирен-алюминий; ○ – полихлорвинил-алюминий; ■ – полистирен - латунь;  
□ – полихлорвинил - латунь; ▲ – полистирен - графит; △ – полихлорвинил-графит.

Уравнение, связывающее  $a$  и  $b$  по [4] найдем из условий, что для эллипса

$$h = \sqrt{1 - b^2 / a^2} \quad (9)$$

$$OF = a \cdot h, \quad (10)$$

где  $h$  - эксцентриситет.

Тогда, подставляя (9) в (10), получаем

$$\sqrt{a^2 - b^2} = 1/2. \quad (11)$$

Из треугольника  $AOF$  определим значение  $b$

$$b = \sqrt{l_{KP}^2 - 1/2} . \quad (12)$$

Решив совместно (11) и (12), находим

$$a = l_{KP} / 2 , \quad (13)$$

Подставив в (8) значение  $a$  и  $b$  из (12) и (13), вычислим.

$$S = 4\sqrt{l_{KP}^2 - 1} / l_{KP} \left[ \frac{\sqrt{l_{KP}^2 - 1}}{8} + \frac{l_{KP}^2}{8} \arcsin(1/l_{KP}) \right]. \quad (14)$$

Используя выражения (4), (5), (6), (7) и (14), получим уравнение

$$\frac{l_{KP}^2 - 1}{2} + \frac{l_{KP}^2}{8} \cdot \arcsin\left(\frac{1}{l_{KP}}\right) = 1,$$

из которого следует, что  $l_{KP} \approx 1,61$ .

Подставив найденное значение  $l_{KP}$  в (4), получим выражение, из которого можно рассчитать критическую концентрацию  $Q_{M,KP}$  для металлических частиц из тяжелых металлов:

$$Q_{M,KP} = \frac{1,61 \cdot \pi \cdot d_M}{4} \quad (15)$$

Для частиц из металлов и диэлектриков, у которых отношения плотностей малы, уравнение (15) возможно несправедливо, т. к. на распределении таких металлических частиц в объеме смеси сила тяжести оказывает меньшее влияние, а поэтому они распределены более равномерно, чем частицы из тяжелых металлов. Поэтому можно полагать, что частицы из металла заполняют промежутки между частицами диэлектрика, так как это показано на рис.2. В этом случае

$$Q_{M,KP} = 1 - \sum_1^N S_i , \quad (16)$$

где  $S_i$  - площадь поверхности  $i$ -ой частицы диэлектрика.

Обозначив через  $N$  количество частиц в единице площади, получим

$N = 1/d_D^2$ . Учитывая, что все частицы диэлектрика имеют одинаковый диаметр, можно написать;

$$\sum_1^N S_i = \frac{\pi \cdot d_D^2}{4} \cdot \frac{1}{d_D^2} = \frac{\pi}{4}. \quad (17)$$

Подставляя (16) в (15), получим

$$Q_{M,KP} = \frac{4 - \pi}{4} \approx 0,214, \quad (18)$$

где  $Q_{M,KP}$  – значение пороговой концентрации проводящих частиц относительно малой плотности.

Наибольшее совпадение наблюдается для системы полистирол-латунь, что связывается нами с отношением плотности латуни ( $\rho_l = 6,50 \text{ г/см}^3$ ) и полистирола ( $\rho_n = 1,045 \text{ г/см}^3$ ), равным  $K = 6,22$ , т.е. максимальным для всех рассмотренных пар материалов, очевидно, что распределение частичек латуни в смеси здесь наиболее неравномерное, это увеличивает вероятность образования цепочек минимальной длины, поэтому на рис.4 экспериментальные точки для смесей с малым  $K$  ложатся выше прямой, полученной по формуле (15), и сосредотачиваются около 0.214, что подтверждает наш результат (18). Как видно из рис. 4, рассмотренной выше закономерности не подчиняется система диэлектрик – графит. Действительно, графит имеет меньшую плотность ( $\rho_g = 2,25 \text{ г/см}^3$ ), чем алюминий ( $\rho_a = 2,7 \text{ г/см}^3$ ), а тогда пороговая концентрация графита при фиксированном диаметре проводящих частиц должна быть больше чем пороговая концентрация частиц из алюминия, однако, по экспериментальным данным получен противоположный результат. Такое отклонение можно объяснить тем, что частицы диэлектрика при перемешивании могут покрыться тонким слоем графита, что эквивалентно увеличению концентрации проводящих частиц.

### Литература

1. Скороход В.В. ИФЖ, N13. 1979.
2. Шкловский Б.И., Эфрос А.Л. УФН, 117, В. 3. 1975
3. Заричняк Ю. П., Новиков В. В. Эффективная проводимость гетерогенных систем с хаотической структурой. ИФЖ, 34, N 4. 1978.
4. Корн Г. К., Корн Т. К. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука», 1970.
5. Lelbier. Arch. elektrotechniku, 1959, т. 8, №1.
6. Асанов М.С., Сатаркулов К.А. К оценке нижней границы концентрации проводящих частиц в системе диэлектрик-проводник, при которой возможно образование проводящих цепочек./ Расчеты и оптимизация параметров элементов электротехнических устройств Сб. науч. трудов. Бишкек, 1994. 55 с.