

К. ф.-м. н. М. В. ДМИТРИЕВ

Украина, г. Одесса

Дата поступления в редакцию
21.04 1997 г.

Оппонент к. х. н. В. Н. ВОЛКОВ

ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ КОМПОНЕНТОВ И ПОР НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ В СТЕКЛОКЕРАМИКЕ

Приводятся подтвержденные экспериментом расчеты диэлектрических потерь в стеклокерамике и в ее компонентах для широкого диапазона соотношений «стекло : наполнитель : поры».

The confirmed by experiments calculations of dielectric losses in glass ceramic and its components for a wide range of relationship "glass : filler : pores" are adduced.

Стеклокерамические композиционные материалы (СКМ), благодаря их экономическим, технологическим и в ряде случаев техническим преимуществам, успешно заменяют керамику в электронике и в электротехнике. Однако широкому применению СКМ препятствует недостаток сведений о влиянии различных факторов на физические свойства СКМ и об использовании теоретических методов, ускоряющих поиск материала с нужными параметрами.

Известны теории, позволяющие определить параметры многокомпонентных композитов [1–7], однако трудность осуществления подобных расчетов состоит в отсутствии сведений о параметрах отдельных компонентов композиционного материала, образцы которых невозможно изготовить для исследования.

Целью данной работы является проверка применимости теорий [5–7] для расчета диэлектрических потерь в СКМ и оценка влияния на них концентрации компонентов и пор. Для проведения такого исследования применен тот же подход, что и в [8], сочетающий экспериментальные и теоретические разработки.

Для исследований использован простейший модельный СКМ на основе одного стекла в качестве матрицы и одного функционального наполнителя при широких диапазонах температуры спекания и концентрации пор. Для этой цели применялись промышленное стекло С51-1 (СТП ПАЩ.027.015.78) и глинозем ГН-1 (ГОСТ 6912–87), содержащий 95% $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$.

Методики изготовления образцов и измерений приведены в [8]. Тангенс угла диэлектрических потерь определялся с помощью измерителя Е7-12 на частоте 1 МГц.

Результаты экспериментов. На рис. 1 приведены графики экспериментальной зависимости тангенса угла диэлектрических потерь в СКМ ($\text{tg}\delta$) и линейной усадки при спекании (Δl_0) от величины температуры спекания $t_{\text{сп}}^0$ для одного состава: массовая доля стекла $m_c=0,8$, наполнителя — $m_n=0,2$. При температуре спекания, превышающей 800°C , нарушалась форма образцов из-за их оплавления.

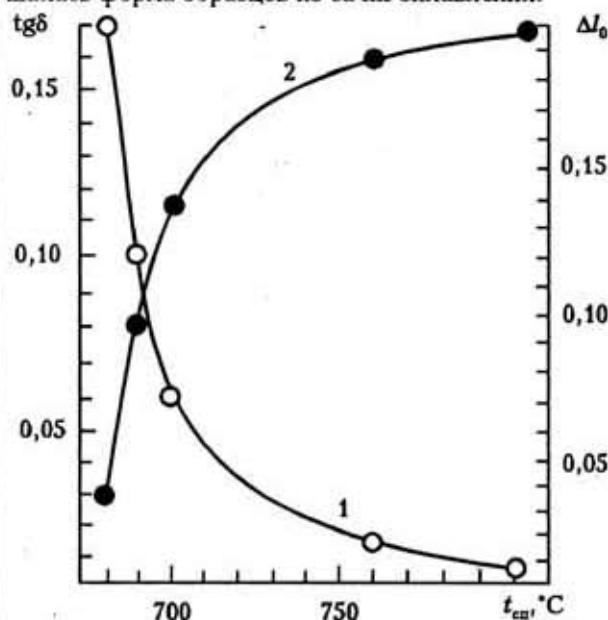


Рис. 1. Экспериментальная зависимость $\text{tg}\delta$ (1) и линейной усадки (2) от температуры спекания для СКМ с $m_c=0,8$

На рис. 2 приведены графики экспериментальной зависимости диэлектрических потерь от линейной усадки СКМ постоянного состава (1) и от массового содержания стекла при одинаковой линейной усадке (2). Наблюдаемый разброс величин $\text{tg}\delta$ (зависимость 2) обусловлен разбросом величины Δl_0 и погрешностью измерительного прибора, проявляющейся острее при малых значениях $\text{tg}\delta$.

Результаты расчетов. Приведенные экспериментальные данные не достаточны для определения $\text{tg}\delta$ по существующим теориям. Это видно из формул для многокомпонентных композитов, записанных для трехкомпонентного СКМ по теориям: Ландау и Лифшица [5, с. 69]

$$\text{tg}\delta^{1/3} = y_n \text{tg}\delta_n^{1/3} + y_c \text{tg}\delta_c^{1/3} + y_p \text{tg}\delta_p^{1/3}; \quad (1)$$

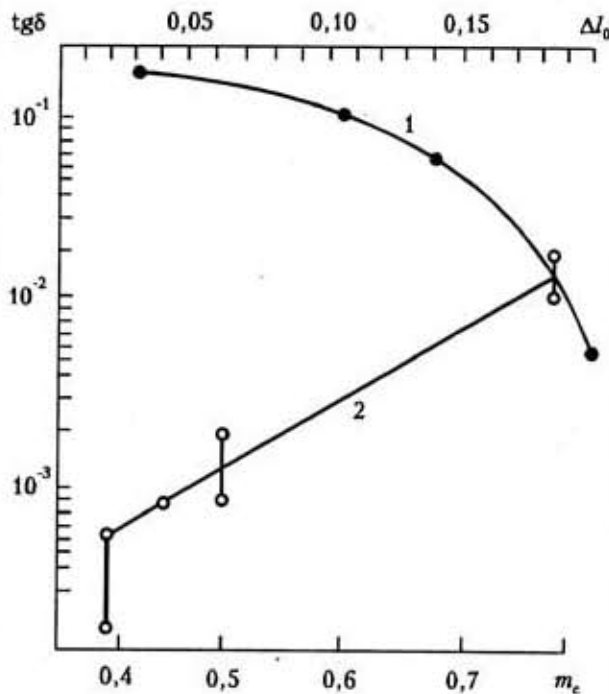


Рис. 2. Экспериментальная зависимость $\text{tg}\delta$ от линейной усадки для СКМ с $m_c=0,8$ (1) и от массового содержания стекла при $\Delta I_0=0,188\pm 0,002$ (2)

Баера [6, с. 174]

$$\text{tg}\delta^{1/2} = y_n \text{tg}\delta_n^{1/2} + y_c \text{tg}\delta_c^{1/2} + y_p \text{tg}\delta_p^{1/2}; \quad (2)$$

Лихтенеккера и Ротера [7]

$$\ln \text{tg}\delta = y_n \ln \text{tg}\delta_n + y_c \ln \text{tg}\delta_c + y_p \ln \text{tg}\delta_p, \quad (3)$$

где y — объемная концентрация соответствующего компонента; индексы n, c, p — наполнитель, стекло и поры, соответственно.

Объемные концентрации компонентов СКМ определяются по формулам (8), (12) и (13) работы [8]. Полученные результаты сведены в табл. 1.

Таблица 1
Расчетные значения объемной концентрации компонентов СКМ при различной массовой доле стекла

y_n	$m_c=0,40$		$m_c=0,45$		$m_c=0,50$		$m_c=0,80$	
	y_n	y_c	y_n	y_c	y_n	y_c	y_n	y_c
0,420	0,300	0,280	0,271	0,309	0,242	0,338	0,088	0,492
0,287	0,369	0,344	0,333	0,380	0,297	0,416	0,108	0,605
0,182	0,423	0,395	0,382	0,436	0,342	0,476	0,123	0,685
0,028	0,503	0,469	0,453	0,519	0,406	0,566	0,148	0,824
0	0,518	0,482	0,467	0,533	0,418	0,582	0,152	0,848

Для нахождения величин $\text{tg}\delta_n$, $\text{tg}\delta_c$ и $\text{tg}\delta_p$ воспользуемся методикой и формулами для расчета диэлектрической проницаемости ϵ [8, (17)–(25)]*.

Используя экспериментальные значения величин $\text{tg}\delta$ (рис. 2, кривая 2) для СКМ двух составов одинаковой пористости и соответствующие этим составам y_c и y_n (табл. 1), из формул [8, (17)–(19)] получим значение $\text{tg}\delta_n=10^{-5}$.

* В дальнейшем при использовании методики определения диэлектрической проницаемости [8] в формулы для расчета вместо ϵ подставляем $\text{tg}\delta$.

Таблица 2
Расчетные значения $\text{tg}\delta_{\text{см}}$ в пористом стекле с $\text{tg}\delta_n=10^{-5}$ и $m_c=0,8$ при различной объемной концентрации пор

ΔI_0	y_n	$\text{tg}\delta_{\text{экс}}$	$\text{tg}\delta_{\text{см}}$ по формулам (см. [8])		
			(20)	(21)	(22)
0,036	0,420	0,17	0,221	0,205	0,435
0,100	0,287	0,103	0,144	0,129	0,316
0,140	0,182	0,060	0,087	0,078	0,203
0,188	0,028	0,013	0,023	0,018	0,045
0,196	0	0,007	0,011	0,010	0,022

Таблица 3
Диэлектрические потери в СКМ с $y_n=0,028$ при различной массовой доле стекла

m_c	$\text{tg}\delta_{\text{экс}}$	$\text{tg}\delta_{\text{рас}}$ по формулам (см. [8])		
		(23)	(24)	(25)
0,40	0,00065	0,0035	0,0040	0,00065
0,45	0,0010	0,0045	0,0055	0,0010
0,50	0,0014	0,0059	0,0066	0,0015
0,80	0,013	0,015	0,015	0,013

Эта величина для измельченного глинозема ГН-1 согласуется с рядом известных значений $\text{tg}\delta$ для алюмооксидной керамики с разным содержанием добавок и пор, ухудшающих диэлектрические потери: у керамики ВК94 (22ХС) — $5 \cdot 10^{-4}$, у поликора — $1 \cdot 10^{-4}$, у ГВ-7 — $1 \cdot 10^{-4}$, у миналунда — $2 \cdot 10^{-4}$ [9, с. 116].

Заметим, что попытка определения $\text{tg}\delta_n$ на основе теорий [5, 6] не увенчалась успехом.

Используя найденное значение $\text{tg}\delta_n$ и экспериментальные значения $\text{tg}\delta$, определим величины диэлектрических потерь в пористом стекле $\text{tg}\delta_{\text{см}}$ по формулам [8, (20)–(22)]. Результаты этих вычислений приведены в табл. 2. На рис. 3 изображена зависимость $\text{tg}\delta_{\text{см}}(y_n)$, рассчитанная по формуле [8, (22)].

Из табл. 2 следует, что величины $\text{tg}\delta_{\text{см}}$, найденные с помощью [8, (20) и (21)], близки по величине и ощутимо отличаются от значений $\text{tg}\delta_{\text{см}}$, полученных с помощью [8, (22)].

Теперь определим диэлектрические потери в СКМ по формулам [8, (23)–(25)], используя найденные значения $\text{tg}\delta_n$ и $\text{tg}\delta_{\text{см}}$.

Результаты расчета для случая, когда $y_n=0,028$, сведены в табл. 3, где для сравнения приведены соответствующие экспериментальные данные.

Для определения диэлектрических потерь отдельно в стекле и в порах учтем, что в зависимости $\text{tg}\delta(y_c)$ при фиксированных $t_{\text{см}}^0$, ΔI_0 и y_n одинаковыми при всех y_c являются величины $\text{tg}\delta_n$, а также $\text{tg}\delta_c$. Это обусловлено одинаковыми температурными условиями формирования пор и стекла при всех значениях y_c .

Величину $\text{tg}\delta_n$ определим, используя экспериментальные или рассчитанные значения $\text{tg}\delta_1$ и $\text{tg}\delta_2$ для СКМ двух составов (табл. 3), а также соответ-

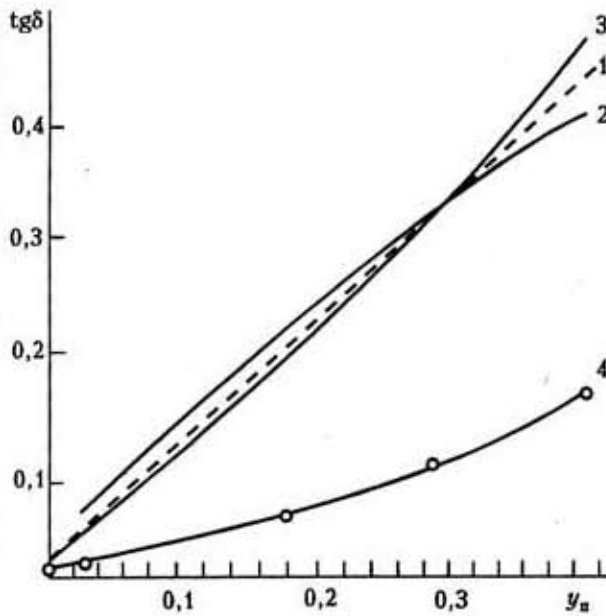


Рис. 3. Расчетная зависимость $\text{tg}\delta$ от концентрации пор в пористом стекле (1), порах (2), стекле (3) и экспериментальная в СКМ (4) для $m_c=0,8$

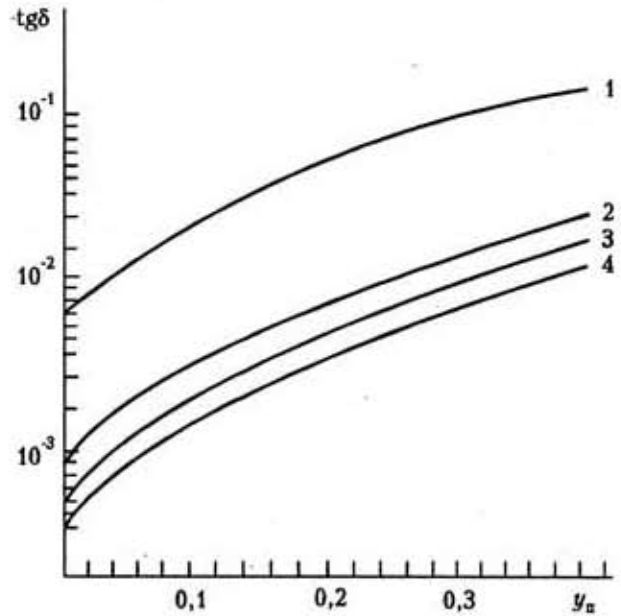


Рис. 4. Расчетная зависимость $\text{tg}\delta$ от концентрации пор в СКМ при разных значениях m_c : 0,8 (1); 0,5 (2); 0,45 (3); 0,4 (4)

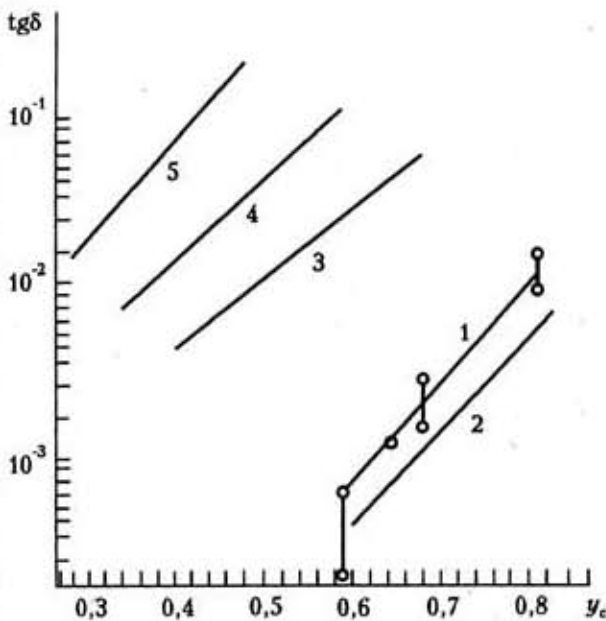


Рис. 5. Расчетная зависимость $\text{tg}\delta$ от объемного содержания стекла при разной объемной доле пор: 0,028 (1; точки – эксперимент); 0 (2); 0,182 (3); 0,287 (4); 0,420 (5)

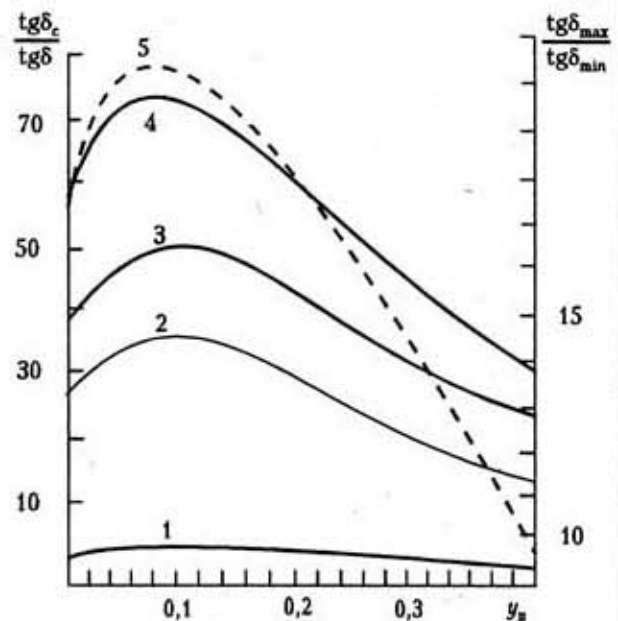


Рис. 6. Расчетная зависимость отношения $\text{tg}\delta_c/\text{tg}\delta$ от объемной концентрации пор для $y_c/y_n=5,6$ (1); 1,4 (2); 1,14 (3); 0,93 (4); $\text{tg}\delta_{\text{max}}/\text{tg}\delta_{\text{min}}$ (5)

ствующие им объемные концентрации y_{c1} , y_{c2} , y_{n1} и y_{n2} (табл. 1).

Таким образом, с учетом вышесказанного получим из (3) систему уравнений

$$\begin{cases} y_{c1} \ln \operatorname{tg} \delta_c = \ln \operatorname{tg} \delta_1 - y_{n1} \ln \operatorname{tg} \delta_n - y_n \ln \operatorname{tg} \delta_n; & (4) \\ y_{c1} \ln \operatorname{tg} \delta_c = \ln \operatorname{tg} \delta_2 - y_{n2} \ln \operatorname{tg} \delta_n - y_n \ln \operatorname{tg} \delta_n. & (5) \end{cases}$$

Решим систему относительно $\operatorname{tg} \delta_n$. Опустив промежуточные преобразования, получим:

$$\ln \operatorname{tg} \delta_n = \frac{y_{c1} \ln \operatorname{tg} \delta_2 - y_{c2} \ln \operatorname{tg} \delta_1 + (y_{c2} y_{n1} - y_{c1} y_{n2}) \ln \operatorname{tg} \delta_n}{y_n (y_{c1} - y_{c2})} \quad (6)$$

Используя найденные значения $\operatorname{tg} \delta_n$, определим величины $\operatorname{tg} \delta_c$ по формуле

$$\ln \operatorname{tg} \delta_c = \frac{(y_c + y_n) \ln \operatorname{tg} \delta_c - y_n \ln \operatorname{tg} \delta_n}{y_c} \quad (7)$$

Результаты расчета $\operatorname{tg} \delta_n$ и $\operatorname{tg} \delta_c$ приведены на рис. 3 и в табл. 4.

Расчитанные значения $\operatorname{tg} \delta_c$ и $\operatorname{tg} \delta_n$ позволяют определить величины $\operatorname{tg} \delta$ в СКМ при разных объемных концентрациях стекла, наполнителя и пор по формуле (3). Результаты этих расчетов представлены в табл. 4 и на рис. 4 и 5. Такие же результаты получаются и при расчете $\operatorname{tg} \delta$ в СКМ по формуле [8, (25)].

Выводы. Существенное расхождение между экспериментом и расчетами $\operatorname{tg} \delta_{\text{рас}}$ в СКМ по формулам [8, (23) и (24)] исключает использование теории Ландау и Лифшица [5] и теории Баера [6] для определения диэлектрических потерь в СКМ. Критерием применимости этих теорий является условие о не слишком больших отличиях величин параметров компонентов [6], что для $\operatorname{tg} \delta$ в СКМ оказалось невыполнимым.

Наблюдаемое совпадение с экспериментом результатов расчета величин $\operatorname{tg} \delta_{\text{рас}}$ по формуле [8, (25)] (табл. 3, рис. 5) позволяет использовать теорию Лихтенеккера и Ротера [7] для определения $\operatorname{tg} \delta$ в СКМ и дает основание считать достоверными расчеты по предложенному способу целого семейства зависимостей $\operatorname{tg} \delta_{\text{рас}}(y_c)$ при разных значениях y_n (табл. 4, рис. 4 и 5).

Из рис. 4 и табл. 4 следует, что поры при $y_n > 0,2$ увеличивают диэлектрические потери в СКМ более чем на порядок. Различие значений $\operatorname{tg} \delta$ для различных составов объясняется увеличением объемной доли наполнителя при снижении концентра-

ции стекла и, как следствие, — большим влиянием наполнителя на величину $\operatorname{tg} \delta$ в СКМ.

Из рис. 3 видно, что при $y_n \approx 0,29$ $\operatorname{tg} \delta_c = \operatorname{tg} \delta_n = \operatorname{tg} \delta_{\text{см}}$, при $y_n > 0,29$ $\operatorname{tg} \delta_c > \operatorname{tg} \delta_{\text{см}} > \operatorname{tg} \delta_n$ и при $y_n < 0,29$ $\operatorname{tg} \delta_c < \operatorname{tg} \delta_{\text{см}} < \operatorname{tg} \delta_n$.

Такое соотношение диэлектрических потерь, по-видимому, связано с переходом одной фазы спекания в другую: при $y_n > 0,29$ усадка СКМ происходит, в основном, за счет исключения крупных незамкнутых пор, а при $y_n < 0,29$ — за счет формирования и ухода из СКМ замкнутых пор. Во второй фазе спекания ($y_n < 0,29$) величина $\operatorname{tg} \delta_n$ в большей степени определяется диэлектрическими потерями на границе «газ — стекло», чем потерями в газе, заключенном в порах. На первой фазе спекания ($y_n > 0,29$) поры граничат не только со стеклом, но и с наполнителем (стеклянная матрица еще не сформировалась), который снижает $\operatorname{tg} \delta_n$ благодаря низкому значению $\operatorname{tg} \delta_n$ по сравнению со стеклом.

На рис. 3 для сопоставления с расчетными зависимостями приведена зависимость $\operatorname{tg} \delta(y_n)$ для случая, когда $m_c = 0,8$ и $m_n = 0,2$. Влияние наполнителя на диэлектрические потери в СКМ (рис. 3) проявляется в существенно меньших потерях в композиции, чем в стекле и порах за счет низкого $\operatorname{tg} \delta_n$. Мерой проявления такого влияния может служить отношение $\operatorname{tg} \delta_c / \operatorname{tg} \delta$. Большей величине этого отношения соответствует большее влияние наполнителя на величину диэлектрических потерь в СКМ.

Для оценки эффективности введения в СКМ функционального наполнителя необходимо найти отношение $\operatorname{tg} \delta_c / \operatorname{tg} \delta$ для разных объемных концентраций компонентов по данным табл. 4. Результаты такого расчета приведены на рис. 6. С увеличением доли стекла большим становится отношение y_c / y_n и меньше проявляется эффективность от введения наполнителя из-за уменьшения его доли. Поэтому становится меньше отношение $\operatorname{tg} \delta_c / \operatorname{tg} \delta$.

Сложный характер изменения концентрации и диэлектрических потерь в компонентах приводит к появлению экстремума в приведенных зависимостях. Уменьшение диэлектрических потерь в СКМ за счет наполнителя максимально проявляется в области экстремума.

Аналогичный характер носит и зависимость от y_n отношений $\operatorname{tg} \delta_{\text{max}} / \operatorname{tg} \delta_{\text{min}}$ (рис. 6), вычисленных из концентрационных зависимостей на рис. 5 для разных значений y_n . Это объясняется тем, что слож-

Таблица 4
Диэлектрические потери в порах, стекле и СКМ различного состава при разной объемной концентрации пор

y_n	$\operatorname{tg} \delta_n$	$\operatorname{tg} \delta_c$	$\operatorname{tg} \delta$			
			$m_c = 0,40$	$m_c = 0,45$	$m_c = 0,50$	$m_c = 0,80$
0,420	0,413	0,467	0,0176	0,0243	0,0327	0,172
0,287	0,318	0,315	0,0069	0,010	0,0146	0,104
0,182	0,217	0,197	0,0031	0,0047	0,0068	0,0595
0,028	0,0677	0,0441	0,00065	0,00099	0,0015	0,0129
0	—	0,022	0,00041	0,00060	0,00088	0,0069

ный характер изменения объемных концентраций и диэлектрических потерь в компонентах проявляется в разной степени для $\text{tg}\delta_{\text{max}}$ и $\text{tg}\delta_{\text{min}}$.

Из табл. 1 и 4 видно, что при $y_n > 0,2$ диэлектрические потери благодаря наполнителю уменьшаются на один и более порядков. В важном для практики случае, когда $y_n = 0$ и объемная концентрация y_n высока (в нашем случае $y_c / y_n = 0,93$), снижение диэлектрических потерь в СКМ по сравнению с диэлектрическими потерями в стекле С51-1 происходит в 54 раза (рис. 6, табл. 4). Кроме влияния наполнителя, этот эффект достигается за счет отсутствия пор, в которых диэлектрические потери намного выше, чем в наполнителе.

В заключение отметим, что полученные результаты могут быть полезными для выполнения расчетов в случае СКМ с большим количеством компонентов, а также с учетом структурных параметров.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Привалко В. П., Новиков В. В., Яновский Ю. Г. Основы теплофизики и реофизики полимерных материалов. — Киев. : Наукова думка, 1991.

2. Дульнев Г. Н., Новиков В. В. Процессы переноса в неоднородных средах. — Л. : Энергоатомиздат, 1991.
3. Новиков В. В., Тартаковская Л. Н., Тризна Ю. П., Дмитриев М. В., Мищенко Т. Н. Диэлектрические свойства наполненного стеклокерамического материала // Инж.-физ. журнал. — 1990. — Т. 29, № 6. — С. 962–968.

4. Новиков В. В., Дмитриев М. В., Шаповалов И. П., Тартаковская Л. Н. Определение эффективных диэлектрических свойств стеклокерамики с учетом структурных параметров // Техника средств связи. Сер. Технология производства и оборудование. — 1987. — Вып. 3. — С. 48–59.

5. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Электродинамика сплошных сред. — М. : ГИТТЛ, 1957.

6. Тареев Б. М. Физика диэлектрических материалов. — М. : Энергоиздат, 1982.

7. Lichtenecker K., Rother K. Die herleitung des logarithmischen mischungsgesetzes des allgemeinen prinzipien der stationaren strömung. // Physikalische Zeitschrift. — 1931. — N 6. — S. 3255–3267.

8. Дмитриев М. В. Влияние концентрации компонентов и пор на диэлектрическую проницаемость стеклокерамики // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 1997. — № 4. — С. 34–38.

ПРЕДЛАГАЕТСЯ К СЕРИЙНОМУ ПРОИЗВОДСТВУ

Система двухсторонней радиосвязи для грузовых автомобилей в диапазоне СВ

Связь обеспечивается на частоте радиовещательной станции без нарушения качества вещания

Противоугонная автоматическая радиосистема с радиусом действия 500 м на частоте МВД около 35 МГц

Закодированная информация о марке машины, цвете, государственном номере посылается в виде пакетов радиоимпульсов

(Подобное устройство выпускается в Москве с 1992 г. и реализуется через МВД; очередь на установку таких устройств — 1 год.)

Высоковольтный прибор (до 4,5 кВ) испытание электрической прочности изоляции кабелей связи и определение расстояния до места повреждения

Всдиапазонные телевизионные антенны индивидуального и коллективного пользования

Прибор для измерения основных параметров одномодовых и многомодовых оптических кабелей

Приборы контроля состояния коммуникаций обнаружение и контроль всех типов подземных кабелей (в т. ч. и оптических), трубопроводов, измерение глубины залегания этих коммуникаций с цифровым отсчетом, определение ряда повреждений в кабелях; определение любой проводки в стенах здания, в т. ч. бетонных

Украина, 270026, г. Одесса,

ул. Бунина 31. УНИИРТ. Тел. (0482) 222 868, 229 041. Факс (0482) 224 583