

УПРАВЛЕНИЕ ЗАЩИТНЫМИ СВОЙСТВАМИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЭКРАНОВ НА ОСНОВЕ МЕТАЛЛОСИЛИКАТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

*Клапченко В.И., Краснянский Г.Е., Азнаурян И.А.
Киевский национальный университет строительства и архитектуры*

При защите человека от вредного биологического воздействия электромагнитных (ЭМ) полей важную роль наряду с организационным и санитарно-профилактическим обеспечением играют инженерно-технические мероприятия. Последние в большинстве случаев основываются на использовании явления экранирования излучения.

Эффективными широко применяемыми защитными средствами являются металлические экраны. Их недостаток состоит в том, что в силу высокой электропроводности металлов они работают на отражение, что не всегда допустимо. Поглощающие экраны обычно проектируются на основе гетерогенных материалов, свойства которых могут изменяться в широких пределах путем варьирования состава и технологии изготовления [1, 2].

Способность материала экранировать ЭМ излучение определяется соотношением его диэлектрических и магнитных характеристик. При этом в случае немагнитных материалов механизм поглощения связан, в основном, с потерями на проводимость и релаксационными потерями в неоднородном диэлектрике, которые должны быть максимизированы за счет состава оптимального выбора структуры и состава композиции.

В работе представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований поведения электропроводности и диэлектрической проницаемости спрессованных смесей гидросиликат кальция – гранулированная медь в области концентраций, соответствующих порогу протекания в диапазоне частот от 100 Гц до 15 кГц. В указанном диапазоне находится ЭМ излучение промышленных частот, которое и является одним из наиболее опасных для организма человека.

Обнаруженный эффект резкого возрастания диэлектрической проницаемости наряду со скачкообразным увеличением проводимости вблизи порога протекания показал возможность использования металлосиликатных материалов в качестве эффективных поглотителей ЭМ излучения. Это было подтверждено экспериментальными исследованиями экранирующих свойств указанных материалов в диапазоне СВЧ.

Металлосиликатные материалы, обладающие наряду с необходимыми конструктивными характеристиками заданными электрическими свойствами, реализуются в результате проявления эффекта контактно – конденсационного взаимодействия металлических порошков и гидратных силикатных фаз нестабильной структуры [3].

Электропроводность смесей дисперсных диэлектриков с

гранулярными металлами и, в частности, металлосиликатных материалов, исследовалась на постоянном токе как на модельных системах [4], так и на реальных объектах [5, 6]. Было показано, что фазовый переход металл-диэлектрик, происходящий при приближении объемной доли металлического компонента к некоторому критическому значению (порогу протекания), вызывает резкое изменение электрических свойств дисперсной системы. В то же время, явления, связанные с электропереносом в указанных системах в переменных полях изучались в основном теоретически на основании аналогии с теорией фазовых переходов (гипотеза подобия) [4, 7], либо с использованием теории эффективной среды [8]. При этом наиболее интересным результатом явилось предсказание аномального роста диэлектрической проницаемости смеси (поляризационной катастрофы) вблизи порога протекания, подтвержденное затем посредством численного эксперимента [9].

Цель работы – получение данных об экранирующих свойствах металлосиликатных материалов и теоретических соотношений, позволяющих назначать концентрации проводящего компонента, которые обеспечивают заданные защитные характеристики материала.

Методика эксперимента. Основным фактором, лимитирующим развитие экспериментальных исследований смесей металл-диэлектрик на переменном токе, является отсутствие серийной аппаратуры, позволяющей производить измерения диэлектрической проницаемости систем с большими диэлектрическими потерями ($\text{tg}\delta > 10$). В связи с этим, была разработана специальная мостовая измерительная

схема, позволяющая получать отдельно значение емкости (в пределах 10 пФ – 100 мкФ) и активной составляющей полного сопротивления образца (10 Ом – 10 МОм) в диапазоне частот 20 Гц – 20 кГц при $\text{tg}\delta \leq 1000$.

Использовавшиеся образцы изготавливались прессованием смесей медного порошка (основная фракция радиуса 30 мкм) и гидросиликата кальция **C-S-H(1)** с различным массовым содержанием металлического компонента под давлением 500 МПа. Объемная доля металла рассчитывалась по известным значениям объемной массы сформированных образцов с точностью $\pm 0,001$. Принимались специальные меры для обеспечения равномерного распределения металлических частиц в исходной смеси.

Образцы представляли собой диски диаметром 32 мм и толщиной 3 мм с дополнительно напрессованными та торцевые поверхности тонкими слоями меди, которые использовались в качестве электродов. Для уменьшения влияния флуктуаций локальных параметров смеси на результаты измерений изготавливались серии образцов с одинаковым содержанием металла и соответствующие результаты измерений, затем усреднялись.

Результаты и их обсуждение. На рисунках 1 – 3 представлены экспериментальные зависимости проводимости σ и диэлектрической проницаемости ϵ от объемной доли металлического компонента Θ в образце и частоты приложенного электрического поля ν . Попытка интерпретации указанных зависимостей путем их сопоставления с теоретическими выражениями, полученными в работах [4, 7] в рамках гипотезы подобия, не дает удовлетворительных результатов.

Действительно, согласно [4, 7] при $\Theta > \Theta_c$ (Θ_c – критическая объемная доля металла, при которой происходит резкое изменение σ системы – порог протекания) зависимость $\sigma(\omega, \Theta)$ диэлектрика с металлическими включениями должна иметь вид:

$$\sigma(\omega, \Theta) \sim (\Theta - \Theta_c)^t. \quad (1)$$

При $\Theta < \Theta_c$:

$$\sigma(\omega, \Theta) \sim \omega^2 (\Theta_c - \Theta)^{-p}, \quad (2)$$

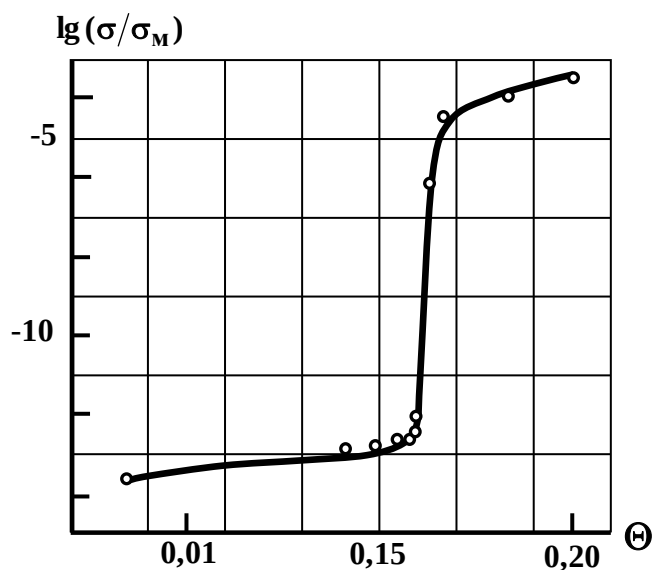


Рис. 1. Электропроводность системы «гидросиликат кальция – гранулярная медь» в области порога протекания. Точки – эксперимент (при $\Theta \leq 0,163$ $V=100$ Гц, при $\Theta > 0,163$ – постоянный ток); сплошная линия – аппроксимация на основании зависимостей теоретических

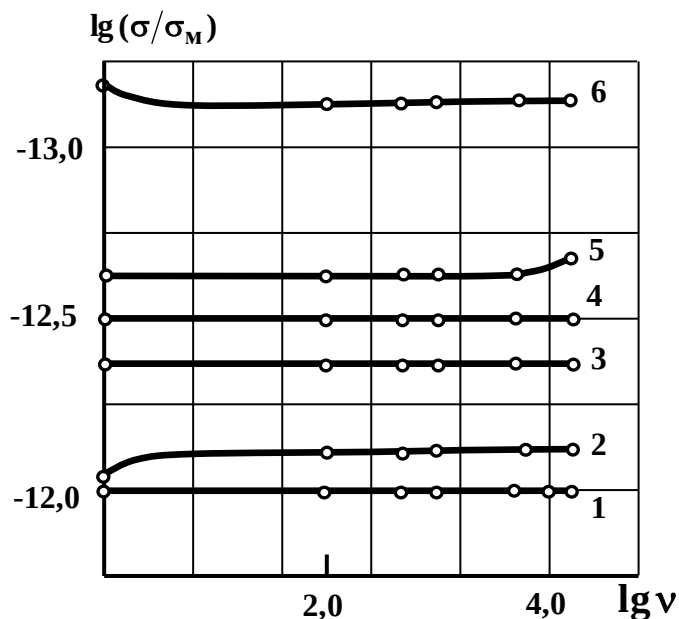


Рис. 2. Дисперсия электропроводности системы «гидросиликат кальция – гранулярная медь» при различном содержании металла Θ : 1 – 0,143; 2 – 0,151; 3 – 0,155; 4 – 0,158; 5 – 0,160; 6 – 0,1615. Точки – эксперимент; сплошная линия – аппроксимация на основании зависимостей теоретических

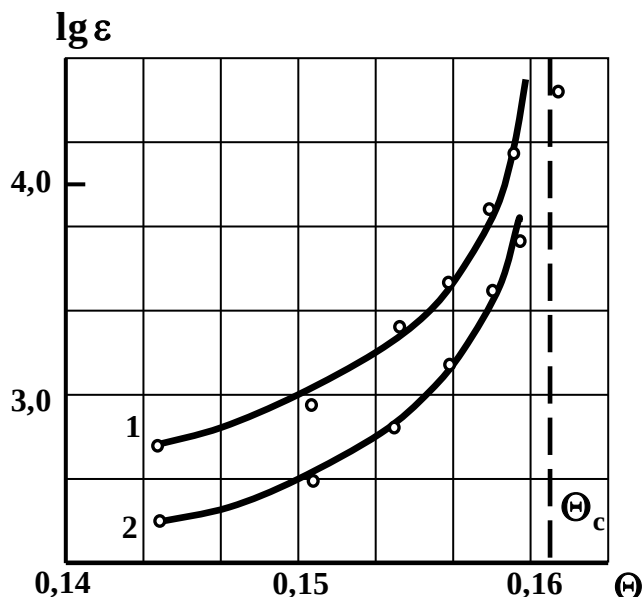


Рис. 3. Диэлектрическая проницаемость системы «гидросиликат кальция – гранулярная медь» в области порога протекания на частотах: $V=100$ Гц (1); $V=10$ кГц (2). Точки – эксперимент; сплошная линия – аппроксимация на основании зависимостей теоретических

а диэлектрическая проницаемость должна изменяться по закону:

$$\varepsilon(\omega, \Theta) \sim (\Theta_c - \Theta)^{-q}. \quad (3)$$

Зависимости (1) – (3) справедливы

при: $|\Theta_c - \Theta| \ll \Delta$,

где

$$\Delta = \left(\frac{\omega \varepsilon_d}{4\pi \sigma_m} \right)^{s/t} - \quad (4)$$

размер области размазки – интервала Θ вблизи порога протекания, где происходит плавный переход от (1) к (2). Входящие в формулы (1) – (4) величины t , q , s , p являются параметрами выбранной модели электропереноса (критические индексы теории протекания). Сравнивая зависимости (1) – (3) с соответствующими

экспериментальными кривыми, легко обнаружить, что дисперсия измеренных на опыте величин σ и ε не соответствует законам (2) и (3), предсказываемым теорией. И, если наличие обнаруженных частотных изменений ε , не соответствующих теории, можно попытаться объяснить методическими погрешностями эксперимента (эквивалентная схема образца может быть сложнее используемой параллельной схемы замещения), то отсутствие дисперсии σ не поддается разумной трактовке в рамках рассматриваемой теории. Ниже показано, что адекватная интерпретация полученных экспериментальных зависимостей может быть проведена на основании обобщения теории [4, 7] на

случай неидеального диэлектрика с $\sigma_d \neq 0$.

Следуя [7], представим комплексную проводимость $\hat{\sigma}$ рассматриваемой системы (считаем, что приложенное поле является квазистационарным):

$$\hat{\sigma}(\omega, \Theta) = \sigma(\omega, \Theta) - i \frac{\omega}{4\pi} \varepsilon(\omega, \Theta) \quad (5)$$

в виде (используем единицы СГС):

$$\hat{\sigma} = \sigma_m f(\Theta, z), \quad (6)$$

где

$$z(\omega) = \frac{\hat{\sigma}_d(\omega)}{\hat{\sigma}_m(\omega)}, \quad (7)$$

$$\hat{\sigma}_d(\omega) = \sigma_d - i \frac{\omega}{4\pi} \varepsilon_d \quad (8)$$

и на достаточно низких частотах, при которых

$$\sigma_m \gg \frac{\omega \varepsilon_m}{4\pi}, \quad \hat{\sigma}_m(\omega) = \sigma_m. \quad (9)$$

В (8), (9) $\sigma_d, \varepsilon_d, \sigma_m$ – статические значения соответствующих величин.

С учетом (8), (9):

$$z(\omega) = h - i \frac{\omega \varepsilon_d}{4\pi \sigma_m}, \quad (10)$$

где

$$h = \frac{\sigma_d}{\sigma_m}. \quad (11)$$

В критической области Θ , где $|\Theta - \Theta_c| \ll 1$ (в дальнейшем вводим обозначение $\Theta - \Theta_c = \tau$), функция f согласно гипотезе подобия имеет вид:

$$f = \tau^t \left\{ A_0 + A_1 \left(\frac{z}{\tau^{t/s}} \right) + \dots \right\}, \quad \tau > 0, \quad \tau \gg \Delta, \quad (12)$$

$$f = z^s \left\{ a_0 + a_1 \left(\frac{\tau}{z^{s/t}} \right) + \dots \right\}, \quad |\tau| \ll \Delta, \quad (13)$$

$$f = \frac{z}{(-\tau)^q} \left\{ B_0 + B_1 \left(\frac{z}{(-\tau)^{t/s}} \right) + \dots \right\}, \quad \tau < 0, \quad |\tau| \gg \Delta, \quad (14)$$

где $A_0, B_0, a_0, A_1, a_1 > 0, B_1 < 0$ – константы;

$$q = \frac{t(1-s)}{s}. \quad (16)$$

$$\Delta = |z|^{s/t}, \quad (15)$$

а критические индексы t, q и s связаны выражением, получающимся из соотношения Крамерса – Кронига:

Раскладывая функцию f в ряд по степеням z при $z \rightarrow 0$ и, ограничиваясь первыми тремя членами разложения, из (5) и (6) для $\sigma(\omega, \Theta)$ и $\varepsilon(\omega, \Theta)$ получаем:

$$\sigma(\omega, \Theta) = \sigma_m \left\{ f(\Theta, 0) + h \frac{\partial f(\Theta, z)}{\partial z} \Big|_{z=0} + \frac{1}{2} \left[h^2 - \left(\frac{\omega \varepsilon_d}{4\pi\sigma_m} \right)^2 \right] \cdot \frac{\partial^2 f(\Theta, z)}{\partial z^2} \Big|_{z=0} \right\}, \quad (17)$$

$$\varepsilon(\omega, \Theta) = \varepsilon_d \left(\frac{\partial f(\Theta, z)}{\partial z} \Big|_{z=0} + h \frac{\partial^2 f(\Theta, z)}{\partial z^2} \Big|_{z=0} \right), \quad (18)$$

Используя далее соотношения (12) – (14), на основании (17), (18), находим окончательные выражения для проводимости и диэлектрической проницаемости неидеального диэлектрика с металлическими включениями в различных интервалах концентраций металла:

1) $\tau > 0, \tau \gg \Delta$:

$$\sigma(\omega, \Theta) = A_0 \sigma_m \tau^t; \quad (19)$$

$$\varepsilon(\omega, \Theta) = A_1 \varepsilon_d \tau^{-q}. \quad (20)$$

2) $\tau < 0, |\tau| \gg \Delta$:

$$\sigma(\omega, \Theta) = \sigma_m \left\{ B_0 h (-\tau)^{-q} + B_1 \left[h^2 - \left(\frac{\omega \varepsilon_d}{4\pi\sigma_m} \right)^2 \right] (-\tau)^{-p} \right\}, \quad (21)$$

$$\varepsilon(\omega, \Theta) = B_0 \varepsilon_d (-\tau)^{-q}; \quad (22)$$

где p – еще один критический индекс:

$$p = t \left(\frac{2}{s} - 1 \right). \quad (23)$$

3) $|\tau| \ll \Delta$:

$$\sigma(\omega, \Theta) = a_0 \sigma_m \left[\left[h^2 + \left(\frac{\omega \varepsilon_d}{4\pi\sigma_m} \right)^2 \right]^{s/2} \right] \cos \left[s \cdot \arctg \left(\frac{\omega \varepsilon_d}{4\pi\sigma_d} \right) \right], \quad (24)$$

$$\varepsilon(\omega, \Theta) = a_0 \frac{4\pi\sigma_m}{\omega} \left[h^2 + \left(\frac{\omega \varepsilon_d}{4\pi\sigma_m} \right)^2 \right]^{s/2} \sin \left[s \cdot \arctg \left(\frac{\omega \varepsilon_d}{4\pi\sigma_d} \right) \right]. \quad (25)$$

Если в формулах (19) – (25) положить $\hbar=0$, то они преобразуются в соответствующие выражения из [4, 7] для частного случая $\sigma_d = 0$.

Используем полученные соотношения для описания экспериментальных зависимостей рис. 1 – 3.

При содержании металлического компонента, превышающего порог протекания ($\tau > 0$), зависимость $\sigma(\Theta)$ (рис. 1) должна описываться выражением (19). Варьируя величину Θ_c до достижения максимального значения коэффициента линейной корреляционной связи ρ массивов

$\lg \frac{\sigma}{\sigma_m}$ и $\lg(\Theta - \Theta_c)$, по методу наименьших квадратов (МНК) находим $\rho = 0,98$; $\Theta_c = 0,162 \pm 0,001$; $t = 1,5 \pm 0,1$; $A_0 \approx 6,6 \cdot 10^{-4}$.

Приведенные значения пороговой концентрации Θ_c и критического индекса t находятся в хорошем соответствии с полученными для модели протекания по узлам решетки [4].

Прежде, чем перейти к сопоставлению экспериментальных зависимостей $\sigma(\omega, \Theta)$ при $\tau < 0$ (рис. 1, 2) с соответствующим теоретическим выражением (21), отметим, что при любых частотах из диапазона $\nu \leq 15$ кГц, в котором проводились измерения, выполняется неравенство:

$$\frac{\omega \epsilon_d}{4\pi \sigma_d} \ll \hbar. \quad (26)$$

При этом (21) преобразуется к виду:

$$\sigma(\omega, \Theta) = B_0 \sigma_m (-\tau)^{-q}. \quad (27)$$

Отсюда следует, что в указанном интервале частот дисперсия σ не

должна наблюдаться. Это подтверждается результатами наших измерений (рис. 2). Отсутствие зависимости $\sigma(\omega)$ указывает на то, что на данных частотах не происходит диссипации энергии электрического поля, обусловленной поляризацией изолированных металлических кластеров, и основной вклад в диэлектрические потери вносит сквозная проводимость.

Сравнение экспериментальной кривой $\sigma(\Theta)$ при $\tau < 0$ (рис. 1) с зависимостью (27), проведенное при помощи МНК, дает:

$$\rho = 0,98; \quad \Theta_c = 0,162 \pm 0,01; \\ t = 1,00 \pm 0,05; \quad B_0 \approx 0,14.$$

Согласно (20) и (22) диэлектрическая проницаемость рассматриваемой гетерогенной системы должна резко возрастать при приближении к порогу протекания (как при $\tau > 0$, так и при $\tau < 0$), стремясь к конечному пределу в узком интервале Θ вблизи Θ_c . Предельное значение ϵ для нашего диапазона частот ($\nu \gg \frac{2\sigma_d}{\epsilon_d}$) в соответствии с (25)

определяется выражением:

$$\epsilon(\omega, \Theta_c) = a_0 \epsilon_d \left(\frac{4\pi \sigma_m}{\omega \epsilon_d} \right)^{1-s} \sin \left(s \cdot \frac{\pi}{2} \right). \quad (28)$$

В действительности же максимально достижимое значение ϵ должно быть существенно меньше вследствие конечности размеров системы.

Анализ показывает, что экспериментальная зависимость $\epsilon(\Theta)$ (рис. 3) находится с хорошим соответствием с выводами теории. Действительно, ее сопоставление с (20) при помощи МНК дает коэффициент

корреляции $\rho = 0,98$; при $q = 1,05 \pm 0,05$ и $B_0 \approx 0,71$.

Указанное значение q совпадает (в пределах погрешностей) с полученным из зависимости $\sigma(\Theta)$ при $\tau < 0$.

Соотношение (28) описывает поведение ε не только при $\Theta = \Theta_c$, но и при любых Θ , находящихся в пределах области размазки. На высоких частотах размер области размазки Δ может быть достаточно большим (10), (15) и предсказываемая (28) дисперсия ε может быть зафиксирована на опыте. В нашем же случае $\Delta \sim 10^{-6} \dots 10^{-5}$, что исключает возможность наблюдения зависимости $\varepsilon(\omega)$. Поэтому, как уже отмечалось, обнаруженные изменения ε с частотой должны быть, по-видимому, отнесены за счет методических погрешностей эксперимента.

Итак, на основании сопоставления полученных экспериментальных и теоретических зависимостей проводимости и диэлектрической

гидросиликат кальция – гранулярная медь от концентрации металла и частоты приложенного электрического поля показано, что процесс электропереноса в подобных системах может быть адекватно описан на основании гипотезы подобия в рамках решеточной модели узлов при учете ненулевой проводимости диэлектрической матрицы.

Экспериментально экранирующие свойства металлосиликатных материалов исследовались в диапазоне частот 17 – 26 ГГц. Было установлено, что при приближении объемной доли металлического компонента к порогу протекания происходит резкое увеличение коэффициента поглощения радиоизлучения металлосиликатным материалом. При этом до определенных значений концентрации металла коэффициент отражения растет значительно медленнее, что позволяет получить материал с оптимальными радиопоглощающими свойствами.

В таблице представлены физико-

Физико-механические и электрофизические характеристики радиопоглощающих облицовочных материалов

Показатель	Диапазон значений
Плотность	1700 – 2700 кг/м ³
Пористость	10 – 16 %
Предел прочности: при сжатии при изгибе	50 – 200 МПа 9 – 30 МПа
Теплопроводность	0,4 – 4,0 Вт/м·К
Теплоемкость	0,4 – 0,8 кДж/кг·К
Удельное электрическое сопротивление	до 10 ⁴ Ом·м
Диэлектрическая проницаемость	до 17000
Коэффициент отражения по мощности в диапазоне 17 – 26 ГГц	не более 0,5 дБ
Коэффициент поглощения по мощности в диапазоне 17 – 26 ГГц (толщина плитки 5	не менее 40 дБ

проницаемости спрессованных смесей механические и электрофизические

характеристики металлосиликатных материалов, полученных прессованием

Предлагаемые облицовочные радиопоглощающие материалы, по сравнению с известными (металлические покрытия; материалы со специальным профилем поверхности; материалы, армированные металлическими волокнами), обладают следующими преимуществами: универсальность за счет широкого рабочего диапазона частот; низкоэнергетическая технология

при давлениях 100 – 500 МПа.

получения, связанная с исключением высокотемпературной обработки за счет использования аморфизированных силикатов; низкая стоимость за счет экономии металла (содержание металла – не более 20%), возможности применения стандартного оборудования и использования промышленных отходов.

Выводы

1. Получены экспериментальные зависимости электропроводности и диэлектрической проницаемости металлосиликатных материалов на основе гидросиликата кальция и гранулированной меди от содержания металлического компонента и частоты электрического поля в диапазоне 100 Гц – 15 кГц.
2. Обнаружено резкое возрастание диэлектрической проницаемости и скачок электропроводности исследованных материалов в области концентраций, соответствующих порогу протекания.
3. Показано, что адекватная интерпретация экспериментальных результатов может быть проведена на основании гипотезы подобия в рамках решеточной модели узлов теории протекания при учете ненулевой проводимости диэлектрической матрицы.
4. Приведенные теоретические выражения позволяют назначать оптимальные концентрации проводящего компонента, при которых получаются значения электропроводности и диэлектрической проницаемости материала, обеспечивающие его заданные экранирующие характеристики.
5. Экспериментально установлено, что при приближении к области пороговых концентраций металла наблюдается резкий рост коэффициента поглощения ЭМ излучения материала в диапазоне частот 17 – 26 ГГц.
6. Исследованные металлосиликатные композиции при учете их высоких физико-механических характеристик могут быть рекомендованы в качестве эффективных облицовочных защитных материалов, поглощающих ЭМ излучение в широком диапазоне частот.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ковнеристый Ю.К., Лазарева И.Ю., Раваев А.А. Материалы, поглощающие СВЧ-излучение. – М.: Наука, - 1982. – 15 с.
2. Лыньков Л.М., Богуш В.А., Борботько Т.В. и др. Новые материалы для экранов электромагнитного излучения // Доклады БГУИР. – 2004. - № 3 – с. 152-167.

3. Глуховский В.Д., Рунова Р.Ф., Максунев С.Е. Вяжущие и композиционные материалы контактного твердения. – Киев: Вища школа, - 1991. – 242с.
4. Efros A.L., Shklovskii B.I. Critical behaviors of conductivity and dielectric constant near the metal-nonmetal transition. – Pphys. Status solidi B., - 1976, - v.76, - №2, - p.475.
5. Глуховский В.Д., Казанский В.М., Краснянский Г.Е. и др. Электропроводность металлосиликатных материалов при контактном твердении. - Известия АН СССР. Неорган. материалы, - 1988, - т.24, - №5, - с.824-827.
6. Клапченко В.И., Краснянский Г.Е., Азнаурян И.А. Электрофизические исследования строительных материалов: Монография. – Киев, - 2002. – 84 с.
7. Балагуров Б.Я. К теории дисперсии проводимости двухкомпонентных сред. – ЖЭТФ, - 1985, - т.88, - №5, - с.1664-1675.
8. Дубров В.Е., Левинштейн М.С., Шур М.С. Аномалия диэлектрической проницаемости при переходе металл-диэлектрик. Теория и моделирование. – ЖЭТФ, - 1976, - т.70, - №5, - с.2014-2024.
9. Виноградов А.П., Каримов А.М., Кунавин А.Т. и др. Исследование критического поведения диэлектрической проницаемости гетерогенных смесей. – ДАН СССР, - 1984, - т.275, - №3, - с.590-592.

УПРАВЛІННЯ ЗАХИСНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЕКРАНІВ НА ОСНОВІ МЕТАЛО СИЛІКАТНИХ МАТЕРІАЛІВ

Резюме. Показано, що металосилікатні композиції можуть бути рекомендовані в якості ефективних оздоблювальних захисних матеріалів, що поглинають електромагнітне випромінювання. Отримані теоретичні співвідношення, які дозволяють призначати оптимальні концентрації металевої компоненти, що забезпечують задані екрануючі характеристики матеріалу.

MANAGEMENT OF DEFENSIVE PROPERTIES OF ELECTROMAGNETIC SHIELDS ON THE BASIS OF METAL-SILICATE MATERIALS

Summary. It is shown that metal-silicate compositions may be recommended as effective facing shielding materials, absorbing electromagnetic radiation. Theoretical relations, that allows to fix the optimal concentrations of metallic component, providing specified shielding characteristics of material, are obtained