

PACS numbers: 07.57.Kp, 42.70.Qs, 77.22.Ch, 78.67.Pt, 78.70.Gq, 84.40.-x

Структуры для поглощения электромагнитного поля в сантиметровом диапазоне

А. Т. Пономаренко, В. Г. Шевченко

*Институт синтетических полимерных материалов им. Н.С.Ениколопова РАН,
ул. Профсоюзная, 70,
117393 Москва, Россия*

В работе исследовались электродинамические свойства различных модельных структур, представляющих собой слой полярной жидкости на металлической подложке или полимерный каркас со взаимно перпендикулярными каналами трапециевидной формы и рассчитанных высоты и величины основания, заполненными жидкостью (этиловый спирт, вода, водно-спиртовые смеси, растворы неорганических солей и полисахаридов), с различной формой и площадью поперечного сечения. Для измерений применялись рупорные антенны соответствующих размеров.

У роботі досліджувалися електродинамічні властивості різних модельних структур, що представляють собою шар полярної рідини на металевому підложжі або полімерний каркас із взаємно перпендикулярними каналами трапецієподібної форми та розрахованих висоти й величини основи, заповненими рідиною (етилловий спирт, вода, водно-спиртові суміші, розчини неорганічних солей і полісахаридів), з різною формою й площею поперечного перерізу. Для мірянь застосовувалися рупорні антени відповідних розмірів.

We investigate electromagnetic properties of different model structures representing the polar liquid layer on a metal substrate or polymeric framework with mutually perpendicular trapezoidal channels of the calculated height and base, filled with liquid (ethyl alcohol, water, water-alcohol mixtures, and solutions of inorganic salts and polysaccharides), with different shape and cross-sectional area. The measurements are performed using horn antennas of appropriate sizes.

Ключевые слова: СВЧ-поле, поглощающие структуры, электродинамические свойства, жидкости, рупорные антенны.

(Получено 4 марта 2015 г.)

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в научно-технической литературе интенсивно обсуждаются вопросы, связанные с физико-химией заполненных жидкостью пористых сред, а также возможности их применения в науке и технике [1–3]. Значительная часть работ с такими объектами исследований посвящена установлению взаимосвязи между их составом и комплексом физических свойств. Исследование физических и физико-химических свойств таких систем позволяет получать информацию об их структурных особенностях. Так, например, адсорбция пористыми телами жидкостей и их паров используется для определения удельной пористости и распределения пор по размерам [3].

Диэлектрические характеристики указанных сред зависят от содержания и свойств удерживаемой ими жидкости. Поэтому электрические методы измерения применяются в строительстве для неразрушающего контроля качества цемента, а также в геологоразведке для определения содержания углеводородов в геологических породах.

Исследованию диэлектрических свойств заполненных жидкостью пористых сред посвящено большое количество работ. Однако практически все они ограничиваются областью частот $0-10^8$ Гц. Кроме того, в подавляющем их большинстве исследуются немагнитные среды. Это ограничивает возможности практического применения таких перспективных материалов, какими являются заполненные жидкостью пористые магнитные среды. Поэтому одной из целей настоящей работы является изучение диэлектрических и магнитных свойств пористых ферритовых сред, заполненных полярными и неполярными жидкостями. В работе также исследуются проблемы, возникающие при разработке широкодиапазонных управляемых СВЧ-поглощающих структур на основе жидких сред, как выбор перспективных жидкостей и расчёт электродинамических характеристик указанных структур. Рассматриваются поглощающие структуры, расположенные на металлической поверхности. В этом случае их поглощающие свойства можно характеризовать таким параметром, как коэффициент отражения.

2. ИССЛЕДУЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЯ

В настоящей работе исследовались диэлектрические и магнитные свойства каналов различной формы, заполненные жидкостями, а также пористых магнитных сред, как заполненных, так и не заполненных жидкостями.

В качестве магнитных сред использовались порошки следующих ферритов:

1. $\text{Ba}_3\text{Co}_2\text{Ti}_{0,8}\text{Fe}_{23,2}\text{O}_{41}$ (Co_2Z , диапазон ЕФМР 4–10 ГГц) различной дисперсности;
2. $\text{Ba}_3\text{Co}_2\text{Fe}_{12}\text{O}_{22}$ (Co_2Y , диапазон ЕФМР 1–4 ГГц) с размером частиц 0,5–2 мкм;
3. $\text{Ni}_2\text{BaSc}_{0,6}\text{Fe}_{14,4}\text{O}_{27}$ (диапазон ЕФМР 18–22 ГГц) с размером частиц 100–160 мкм;
4. $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ (диапазон ЕФМР 38–41 ГГц) с размером частиц 100–160 мкм.

В качестве жидкостей использовались этиловый спирт, вода, водно-спиртовые смеси, гептан. При определении комплексных магнитной и диэлектрической проницаемостей феррит засыпался в тонкостенные трубки из стекла или ПЭ с внутренним диаметром 0,5–1,5 мм. Измерение ε^* и μ^* проводилось по резонаторной методике. Равномерность заполнения трубок ферритом и жидкостью контролировалась измерением ε^* с двух концов трубки. Образцы, для которых разница результатов этих двух измерений превышала 15%, отбраковывались.

3. ВЫБОР ЖИДКОГО КОМПОНЕНТА

Можно показать, какими электрическими и магнитными свойствами должен обладать материал, чтобы эффективно поглощать электромагнитное излучение в широком диапазоне частот. Уравнение для входного сопротивления участка цепи с распределёнными параметрами, записывается в виде [4]:

$$Z = Z_1 \frac{Z_2 + Z_1 \text{th}(ikh)}{Z_1 + Z_2 \text{th}(ikh)},$$

а условие, необходимое для малости коэффициента отражения, — в виде: $Z = Z_0$. Здесь Z_0 — волновое сопротивление свободного пространства; Z_1 — волновое сопротивление материала; Z_2 — входное сопротивление металла. В результате математических преобразований можно получить условия, когда электрические и магнитные свойства материала обеспечат наиболее эффективное поглощение электромагнитных волн.

Для немагнитных материалов, когда $\mu' = 1$, $\mu'' = 0$, уравнения принимают вид:

$$\varepsilon' = (\lambda/4d)^2 \sim \lambda^2, \quad \varepsilon'' = \lambda/(\pi d) \sim \lambda.$$

Такие частотные зависимости действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости характерны, в частности, для ориентационного механизма релаксации полярных молекул в жидкости, которые описываются уравнением Дебая [5]:

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty}{1 + i\lambda_r / \lambda}.$$

Действительную и мнимую части этого выражения можно записать в следующем виде:

$$\varepsilon' = \varepsilon_\infty + (\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty) \frac{(\lambda/\lambda_r)^2}{1 + (\lambda/\lambda_r)^2}, \quad \varepsilon'' = (\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty) \frac{(\lambda/\lambda_r)}{1 + (\lambda/\lambda_r)^2}.$$

Асимптотики уравнений Дебая при $\lambda \ll \lambda_r$ удовлетворяют условиям эффективного поглощения. Следовательно, характер частотных зависимостей действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости полярных жидкостей таков, что они могут использоваться как поглощающий компонент для широкодиапазонных СВЧ-поглощающих покрытий в диапазоне длин волн $\lambda \ll \lambda_r$.

Так как потери в неполярных жидкостях малы, целесообразно рассматривать только полярные жидкости, их смеси с неполярными, а также бинарные смеси полярных жидкостей. Применение последних позволяет в широких пределах варьировать такие диэлектрические свойства поглощающей среды, как λ_r и другие параметры уравнения Дебая.

Недостатками практически всех жидких диэлектриков является то, что асимптотика $\lambda \ll \lambda_r$ не охватывает весь СВЧ-диапазон. Кроме того, свойства большинства реальных жидких диэлектриков описываются не уравнением Дебая, а уравнением Дэвидсона–Коула [6]:

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty}{(1 + i\lambda_r/\lambda)^\beta},$$

или более общим уравнением [4]:

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty}{(1 + (i\lambda_r/\lambda)^{1-\alpha})^\beta},$$

асимптотика $\lambda \ll \lambda_r$ которых, в отличие от уравнения Дебая, не удовлетворяет условиям эффективного поглощения.

Из всего сказанного выше следует, что жидкий компонент структуры должен обладать: высоким значением ε'' , определяющего его поглощающие свойства; иметь резонансную длину волны λ_r , лежащую значительно выше рабочего диапазона длин волн, а также удовлетворять дисперсионным зависимостям.

Доступным, а также обладающим высокими значениями мнимой части диэлектрической проницаемости и теплоёмкости является такой жидкий диэлектрик, как вода. Однако вода имеет низкое значение λ_r . Если при низких температурах λ_r находится в санти-

ТАБЛИЦА. Параметры уравнения Дэвидсона–Коула для водно-спиртовых смесей различного состава) ($\tau = \lambda_r / 2\pi c$).

| Концентрация воды (мольн.) | τ , пс | $1 - \beta$ | ϵ_0 | ϵ_∞ |
|----------------------------|-------------|-------------|--------------|-------------------|
| 0,1 | 100,7 | 1 | 27,99 | 4,20 |
| 0,3 | 87,10 | 1 | 29,76 | 4,34 |
| 0,5 | 63,10 | 1 | 37,18 | 4,57 |
| 0,7 | 42,66 | 1 | 50,48 | 5,51 |
| 0,9 | 20,89 | 1 | 71,65 | 5,26 |

метровом диапазоне длин волн, то по мере нагрева она смещается в область миллиметровых волн. Из-за этого воду в качестве поглощающего компонента можно использовать только в составе смесей с жидкостями, имеющими более высокие значения λ_r . Такими жидкостями являются, например, спирты и их смеси [7, 8].

В таблице приведены параметры уравнения Дэвидсона–Коула для ряда водно-спиртовых смесей различного состава. Таким образом, подбором соответствующих пар жидкостей и изменением их концентрации можно в достаточно широких пределах изменять величины ϵ' и ϵ'' таких бинарных смесей. Как следует из таблицы, для смесей воды и этилового спирта коэффициент β в уравнении Дэвидсона–Коула равен 1 во всем диапазоне концентраций. Следовательно, вода и этиловый спирт, смешанные в произвольной пропорции, удовлетворяют уравнениям эффективного поглощения.

Таким образом, смеси этилового спирта и воды удовлетворяют всем приведённым выше требованиям к жидкому компоненту СВЧ-поглощающих структур, и в настоящей работе исследуются электрофизические свойства структур на их основе.

4. МЕТОД РАСЧЁТА ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТРУКТУР С ЖИДКИМИ КОМПОНЕНТАМИ

В основе предлагаемого нами метода расчёта электродинамических характеристик рассматриваемых структур лежит следующий факт: неоднородная среда, характерный размер неоднородностей которой много меньше длины волны, может быть представлена как бесструктурная среда, характеризующаяся эффективной комплексной диэлектрической проницаемостью. Это свойство неоднородных сред широко используется в теории композиционных материалов при расчёте их механических и электрических характеристик. В настоящей работе мы применяем эту аппроксимацию к структурам с малым относительно длины волны структурным элементом. Это позволяет нам использовать для расчёта электродинамических свойств данных структур арсенал формул, выработанный теорией

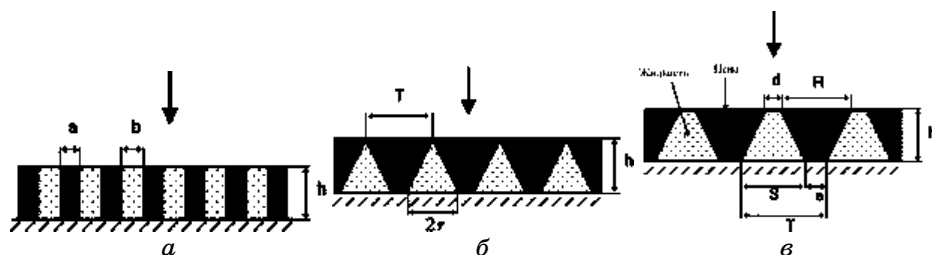


Рис. 1. Типы исследуемых структур: а) щелевая структура; б) структура с каналами треугольного сечения; в) структура с каналами трапецидального сечения.

композиционных материалов. Таким образом, метод, используемый нами для расчёта электродинамических параметров структур с жидкими компонентами, может быть назван методом композитной аппроксимации. Как будет показано ниже, он позволяет получить выражения для эффективной диэлектрической проницаемости в аналитическом виде, что удобно для анализа результатов и использования в дальнейших расчётах, например, коэффициентов отражения электромагнитных волн от рассматриваемых структур, находящихся на подложке.

Структуры, рассматриваемые в настоящей работе, изображены на рис. 1. Они состоят из слоя полимерного диэлектрика, в котором прорезана система каналов. Изображённые на рис. 1 структуры различаются формой сечения каналов. Были рассмотрены: щелевая структура, являющаяся простейшей структурой данного типа и более сложные структуры с каналами треугольного и трапецидального сечения.

При расчёте эффективной диэлектрической проницаемости рассматриваемые структуры были представлены системой n плоскопараллельных слоёв с соответствующим содержанием жидкости и полимера. Каждый из этих слоёв был в свою очередь аппроксимирован слоистым композитом (см. рис. 2). Эффективная диэлектрическая проницаемость i -го слоя рассчитывалась по правилу смеси, описывающей свойства плоскослоистых композитов со слоями, параллельными направлению движения волны [9]:

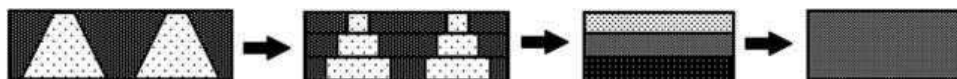


Рис. 2. Схема, иллюстрирующая последовательные аппроксимации трапецидальной структуры, используемые при выводе аналитических формул для её эффективной диэлектрической проницаемости.

$$\varepsilon_i = v_{1,i}\varepsilon_1 + v_{2,i}\varepsilon_2;$$

здесь $v_{1,i}$, ε_1 и $v_{2,i}$, ε_2 — объёмные доли и диэлектрические проницаемости жидкости и полимера.

Эффективная диэлектрическая проницаемость рассматриваемой структуры в целом рассчитывалась по формуле для плоскостойких композитов со слоями, перпендикулярными направлению движения волны [9]:

$$\frac{1}{\varepsilon} = \sum_i \frac{v_i}{\varepsilon_i},$$

где v_i , ε_i — объёмные доли и диэлектрические проницаемости слоёв.

В пределе $v \rightarrow \infty$ и после замены суммирования интегрированием, были получены следующие формулы для эффективной комплексной диэлектрической проницаемости указанных выше типов структур.

Для щелевой структуры

$$\varepsilon = (b/(a+b))\varepsilon_1 + (a/(a+b))\varepsilon_2,$$

где ε_1 — диэлектрическая проницаемость жидкого компонента; ε_2 — диэлектрическая проницаемость твёрдого компонента.

Для слоя с взаимно перпендикулярными каналами треугольного сечения

$$\varepsilon = \frac{\beta\sqrt{\varepsilon_1(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}}{\operatorname{arth}\left(\frac{\beta\sqrt{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}/\sqrt{\varepsilon_1}}{1 - (1 - \beta)\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_1}}\right)},$$

где $\beta = 2\tau/T$, ε_1 — диэлектрическая проницаемость жидкого компонента; ε_2 — диэлектрическая проницаемость твёрдого компонента.

Для слоя с взаимно перпендикулярными каналами трапецидального сечения

$$\varepsilon = \frac{\alpha\sqrt{\varepsilon_1\Delta\varepsilon}}{\operatorname{arth}\left(\frac{\beta\zeta\sqrt{\Delta\varepsilon/\varepsilon_1}}{1 - (1 - \beta)(\Delta\varepsilon/\varepsilon_1)\zeta^2}\right)},$$

где $\alpha = (S - d)/T$, $\beta = (S - d)/R$, $\zeta = R/T$, $\Delta\varepsilon = \varepsilon_1 - \varepsilon_2$; ε_1 — диэлектрическая проницаемость жидкого компонента; ε_2 — диэлектрическая проницаемость твёрдого компонента (толщину полимерного слоя

над каналами считали пренебрежимо малой).

5. ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТРУКТУР С ЖИДКИМИ КОМПОНЕНТАМИ

Экспериментальное исследование электрофизических свойств структур с жидкими компонентами проводилось с использованием структуры с системой взаимно перпендикулярных каналов трапециевидального сечения. Каналы прорезали в пластине пенополиуретана с низкими значениями действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости ($\varepsilon' = 1,4$, $\varepsilon'' = 0,05$). Геометрические параметры системы каналов были следующими: $\alpha = 0,10$, $\beta = 0,11$, $\zeta = 0,9$.

Каналы заполнялись смесью этилового спирта и воды. Содержание спирта в смеси варьировалось от 0 до 100% об.

Были проведены измерения коэффициента отражения электромагнитных волн от указанной структуры, размещённой на металлической пластине. Измерения проводились с использованием ру-

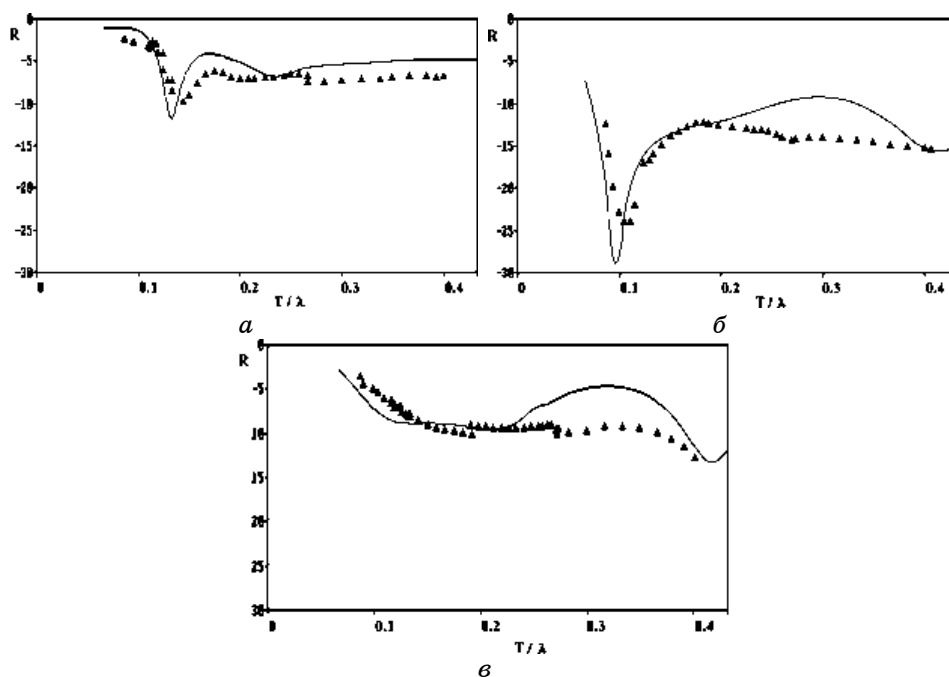


Рис. 3. Коэффициенты отражения для структуры с взаимно перпендикулярными каналами трапециевидального сечения, заполненной смесью воды с этанолом: а) 0% этанола; б) 66% этанола; в) 100% этанола. Сплошные кривые — результаты теоретических расчётов; экспериментальные данные изображены треугольниками.

порной антенны в диапазоне 2–13 ГГц. Результаты измерений представлены на рис. 3.

С использованием модели предлагаемой в настоящей работе были проведены расчёты коэффициента отражения от структуры, описанной в предыдущем пункте. Структура рассматривалась как двухслойная, где первый со стороны падающей волны слой представляет собой слой полимера толщиной $H - h$. Второй слой — слой с каналами трапецеидального сечения с h .

Расчёт коэффициента отражения проводился с использованием формулы Френеля [10] для коэффициентов прохождения и отражения на границе двух сред. Результаты расчётов для различных содержаний этилового спирта в водно-спиртовой смеси приведены на рис. 3. Как следует из рисунка, изменяя состав жидкого компонента можно менять электродинамические свойства рассматриваемых структур с жидким компонентом в широких пределах.

Сопоставление теоретических и экспериментальных данных проведено на рис. 3. Как видно из рисунка предложенный в настоящей работе метод расчёта эффективной диэлектрической проницаемости позволяет с хорошей точностью рассчитывать электродинамические свойства структур, даже при относительно большом размере структурных неоднородностей, вплоть до $T/\lambda \sim 0,4$.

Проведено теоретическое исследование зависимости электродинамических свойств указанных структур от формы сечения каналов при их одинаковой объёмной доле. Для щелевой структуры и структур с трапецеидальным и треугольным сечением каналов, заполненных водно-спиртовыми смесями различных составов, рассчитаны коэффициенты отражения. Результаты расчётов показывают, что зависимость коэффициента отражения от формы сечения каналов наблюдается даже для относительно тонких структур ($h/\lambda < 0,5$), в которых этот эффект не связан с влиянием формы сечения на плавность входа волны. Таким образом, при расчётах эффективных диэлектрических проницаемостей указанных структур методом композитной аппроксимации недостаточно учитывать только объёмную долю жидкости в структуре.

6. МАГНИТНАЯ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТИ ПОРИСТЫХ ФЕРРИТОВЫХ СРЕД КАК ЗАПОЛНЕННЫХ, ТАК И НЕ ЗАПОЛНЕННЫХ ЖИДКОСТЬЮ И ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА МОДЕЛИ И МЕТОДОВ РАСЧЁТА

6.1. Исследование диэлектрической проницаемости пористых ферритовых сред, не заполненных жидкостью

Проведены исследования комплексной диэлектрической проницаемости пористых ферритовых сред, её зависимости от частоты элек-

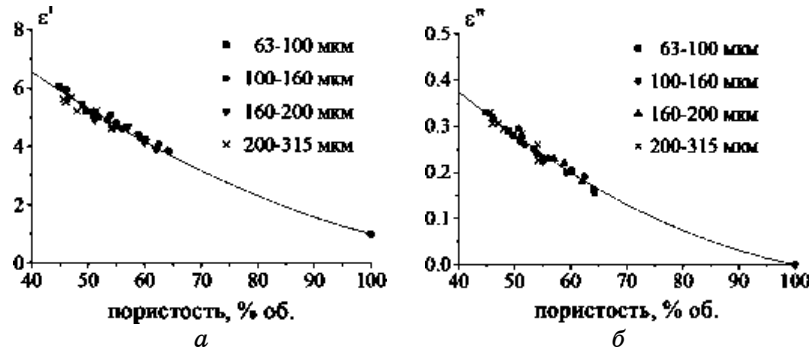


Рис. 4. Зависимости ε' (а) и ε'' (б) от пористости на частоте 4,8 ГГц, измеренные для четырёх фракций феррита $\text{Ba}_3\text{Co}_2\text{Ti}_{0.8}\text{Fe}_{23.2}\text{O}_{41}$ (Co_2Z). Размеры частиц для каждой из фракций обозначены на рисунке.

тромагнитной волны, пористости ферритовой среды, дисперсности и типа феррита.

На рисунке 4 приведены зависимости ε' и ε'' от пористости, измеренные для четырёх фракций феррита Co_2Z , различающихся размерами частиц. Как следует из рисунка, результаты измерений как ε' , так и ε'' для всех фракций с хорошей точностью ложатся на одну кривую. Таким образом, зависимости диэлектрических свойств пористой ферритовой среды от размера частиц феррита не наблюдаются.

Для выбора методов расчёта комплексной диэлектрической проницаемости была изучена применимость к исследуемым системам различных моделей композитной аппроксимации. Рассматривались формулы:

$$\text{Максвелла–Гарнетта [9, 11]} \quad \varepsilon^* = \varepsilon_1^* \frac{2\varepsilon_1^* + \varepsilon_2^* - 2c(\varepsilon_1^* - \varepsilon_2^*)}{2\varepsilon_1^* + \varepsilon_2^* - c(\varepsilon_1^* - \varepsilon_2^*)}, \quad (1)$$

$$\text{модели эффективной среды [12]} \quad (1 - c) \frac{\varepsilon^* - \varepsilon_2^*}{\varepsilon^* + 2\varepsilon_2^*} = c \frac{\varepsilon^* - \varepsilon_1^*}{\varepsilon^* + 2\varepsilon_1^*}, \quad (2)$$

$$\text{Брауна [13]} \quad \varepsilon^* = \left(c\sqrt{\varepsilon_2^*} + (1 - c)\sqrt{\varepsilon_1^*} \right)^2, \quad (3)$$

$$\text{Лихтенекера [14]} \quad \varepsilon^* = \exp\left((1 - c)\ln(\varepsilon_1^*) + c\ln(\varepsilon_2^*)\right), \quad (4)$$

где c — пористость.

На рисунке 5 приведены результаты сопоставления расчётов, проведённых по формулам (1)–(4), с экспериментальными значениями диэлектрической проницаемости пористых ферритовых сред на основе ферритов Co_2Z и Co_2Y . Как следует из рисунка, зависи-

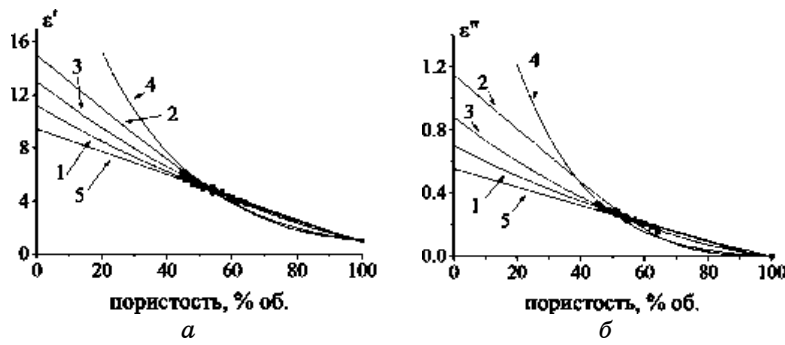


Рис. 5. Сопоставление экспериментальных и теоретических (кривая 1 — формула (1), кривая 2 — формула (2), кривая 3 — формула (3), кривая 4 — формула (4), кривая 5 — линейная аппроксимация) значений ε' (а) и ε'' (б) для пористых ферритовых сред на основе феррита $\text{Ba}_3\text{Co}_2\text{Ti}_{0,8}\text{Fe}_{23,2}\text{O}_{41}$ (Co_2Z). Частота 4,8 ГГц.

мость от пористости комплексной диэлектрической проницаемости пористой среды на основе указанных ферритов лучше всего описывается формулой Брауна (3). Аппроксимация по формуле Максвелла–Гарнетта (1) также даёт хорошие результаты. Аналогичные результаты получены и для других исследуемых ферритов.

В формуле (3) зависимость от типа феррита выражается через диэлектрическую проницаемость беспористого феррита ε_2^* , которая может быть получена из экспериментальных данных, приведённых на рис. 6 и аналогичных данных, полученных для других ферритов, путём аппроксимации к нулевой пористости.

6.2. Исследование диэлектрических свойств пористых ферритовых сред, заполненных различными жидкостями

а) Зависимость диэлектрических свойств от пористости ферритовой среды и дисперсности феррита

Проведено исследование частотных зависимостей и зависимостей от пористости диэлектрических свойств пористых ферритовых сред, заполненных этиловым спиртом.

Исследованы зависимости от пористости ε' , ε'' среды феррит-спирт для четырёх фракций порошка феррита Co_2Z на различных частотах. На рисунке 6 приведены данные для частоты 4,8 ГГц.

Как показал Винер [14, 15], диэлектрические свойства дисперсной системы любой структуры лежат между предельными значениями:

$$(c_1 / \varepsilon_1 + c_2 / \varepsilon_2)^{-1} < \varepsilon < (c_1 \varepsilon_1 + c_2 \varepsilon_2). \quad (5)$$

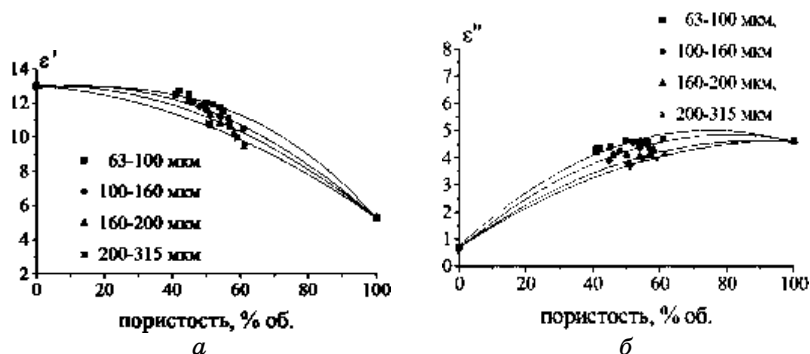


Рис. 6. Зависимости ε' (а) и ε'' (б) от пористости заполненной этанолом ферритовой среды на основе феррита $\text{Ba}_3\text{Co}_2\text{Ti}_{0,8}\text{Fe}_{23,2}\text{O}_{41}$ (Co_2Z) на частоте 4,8 ГГц, измеренные для четырёх фракций. Размеры частиц для каждой из фракций обозначены на рисунке.

Как следует из рис. 4, и действительная и мнимая части комплексной диэлектрической проницаемости рассматриваемых систем выше верхней границы Винера. Превышение над верхней границей Винера зависит от частоты, пористости и дисперсности феррита и составляет величину порядка нескольких десятков процентов. Для фракций 63–100 и 100–160 мкм значения ε'' иногда превышают значение ε'' для спирта. Таким образом, диэлектрические свойства рассматриваемых систем не могут быть описаны в рамках композитной аппроксимации. Возможно, это явление связано с тем, что на поверхности частиц феррита образуется слой жидкости, диэлектрические свойства которого, в силу взаимодействия жидкости и феррита, отличаются от диэлектрических свойств самой жидкости. Подобного рода явления на частотах менее 1 МГц наблюдал ряд авторов [16, 17], исследовавших диэлектрические свойства стеклянных и кварцевых пористых сред, заполненных водой. Вторым объяснением указанного эффекта может быть возможная вытянутость пор внутри ферритовых частиц. Как известно [17], в случае вытянутых включений диэлектрические свойства гетерогенных систем выше, чем в случае включений с близкими размерами по всем осям.

В пользу соображений о влиянии поверхности раздела фаз на диэлектрические свойства указанных систем свидетельствует отчетливо выраженная зависимость диэлектрической проницаемости от размера частиц феррита, и, как следствие, от площади суммарной поверхности феррита. С увеличением размера частиц (с уменьшением суммарной поверхности) диэлектрическая проницаемость смеси уменьшается. Необходимо, однако, отметить, что изменение диэлектрической проницаемости системы непропорционально увеличению суммарной площади поверхности частиц феррита.

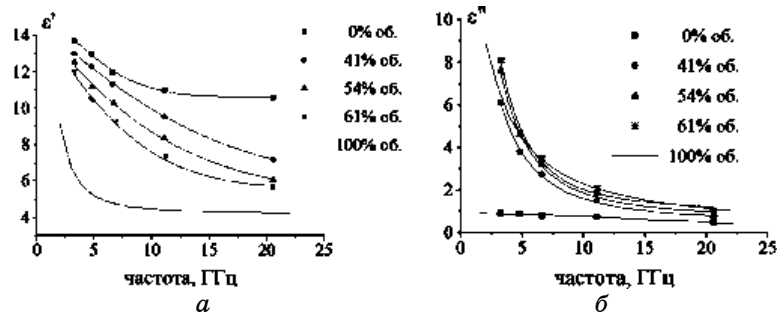


Рис. 7. Сопоставление спектров ϵ' (а) и ϵ'' (б) заполненных этиловым спиртом пористых сред на основе феррита $\text{Ba}_3\text{Co}_2\text{Ti}_{0,8}\text{Fe}_{23,2}\text{O}_{41}$ (Co_2Z) с одинаковыми размерами частиц феррита (фракция 100–160 мкм) и различной пористостью. Пористость исследуемых сред обозначена на рисунке.

Эффект превышения ϵ^* над верхней границей Винера и зависимость диэлектрических свойств от дисперсности феррита уменьшаются с увеличением частоты электромагнитного поля. Значения ϵ' на частоте 20,6 ГГц находятся ниже верхней границы Винера и зависимость от размера частиц феррита не наблюдается. Для ϵ'' превышение над границей Винера и зависимость от размера частиц имеет место, однако оба эти эффекта не столь ярко выражены, как при более низких частотах.

На рисунке 7 приведены спектры ϵ' и ϵ'' заполненных спиртом ферритовых сред с одинаковым размером частиц и различной пористостью, а также частотные зависимости ϵ' и ϵ'' феррита и спирта. Как следует из рисунка, ϵ' и ϵ'' заполненной спиртом пористой ферритовой среды имеют более резкие частотные зависимости, чем у компонентов. Это связано с тем, что превышение диэлектрической проницаемости над верхней границей Винера уменьшается с ростом частоты. Частотные зависимости ϵ'' для пористостей выше 50% близки к частотным зависимостям ϵ'' для спирта.

б) Зависимость диэлектрических свойств от типа жидкости

Исследование зависимости диэлектрических свойств заполненных жидкостью пористых ферритовых сред проводилось как с использованием полярных (этиловый спирт, вода, водно-спиртовые смеси), так и неполярных (гептан) жидкостей.

Проведено исследование частотных зависимостей и зависимостей от пористости диэлектрических свойств пористых ферритовых сред на основе феррита $\text{Ba}_3\text{Co}_2\text{Ti}_{0,8}\text{Fe}_{23,2}\text{O}_{41}$ (Co_2Z), заполненных водой.

На рисунке 8 показаны зависимости диэлектрических свойств указанных сред от пористости. Как следует из рисунка, значения

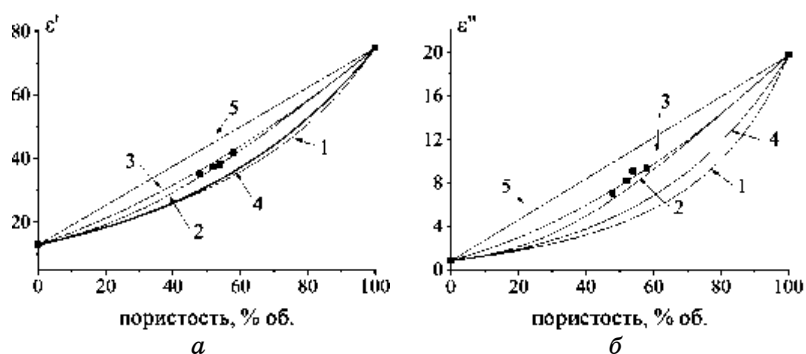


Рис. 8. Сопоставление экспериментальных и теоретических (кривая 1 — формула (1), кривая 2 — формула (2), кривая 3 — формула (3), кривая 4 — формула (4), кривая 5 — верхняя граница Винера значений ϵ' (а) и ϵ'' (б) для заполненных водой пористых сред на основе феррита $\text{Ba}_3\text{Co}_2\text{Ti}_{0,8}\text{Fe}_{23,2}\text{O}_{41}(\text{Co}_2\text{Z})$. Частота 4,8 ГГц.

как действительной, так и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости пористых ферритовых сред в отличие от случая, когда они заполнены спиртом, лежат ниже верхней границы Винера. На рисунке 8 приведены также теоретические кривые, полученные расчётом по формулам (1)–(4). В расчётах использовались значения диэлектрических свойств феррита, приведённые выше, а также значения диэлектрических свойств воды, рассчитанные по формуле Дебая с параметрами $\lambda = 1,75$ см; $\epsilon_0 = 80,4$; $\epsilon_\infty = 4,2$. Как и для ненаполненных жидкостью пористых ферритовых сред с экспериментальными кривыми наилучшим образом совпадают кривые, полученные по формуле Брауна (3), которая успешно использовалась для расчёта диэлектрических свойств в СВЧ-области увлажнённых горных пород в работе [13]. Расчёты, проведённые по ЕМТ (2), также дают хорошие результаты. Необходимо отметить, что эту модель успешно использовал ряд авторов [16, 17] для описания диэлектрических свойств пористых стеклянных сред, заполненных жидкостью, однако, при более низких частотах в диапазоне $10\text{--}10^6$ Гц.

Проведённые исследования диэлектрических свойств наполненных водой приведённых выше пористых сред не привели к обнаружению их зависимости от размера частиц феррита.

Зависимости диэлектрических свойств от пористости для случая заполнения смесями вода–этиловый спирт, как и в случае заполнения спиртом, расположены выше верхней границы Винера. Поскольку в случае заполнения водой такого эффекта не наблюдается, он, по-видимому, связан с наличием этилового спирта в составе заполняющей среды. Проведено сопоставление эффектов превыше-

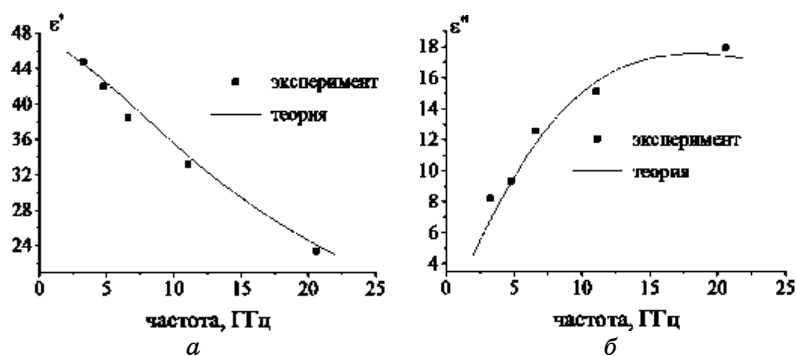


Рис. 9. Сопоставление экспериментальных и теоретических (кривая 1 — формула (1), кривая 2 — формула (2), кривая 3 — формула (3), кривая 4 — формула (4), кривая 5 — верхняя граница Винера значений ϵ' (а) и ϵ'' (б) для заполненных гептаном пористых сред на основе феррита $\text{Ba}_3\text{Co}_2\text{Ti}_{0,8}\text{Fe}_{23,2}\text{O}_{41}(\text{Co}_2\text{Z})$. Частота 4,8 ГГц.

ния диэлектрических свойств ферритовых сред над верхней границей Винера в случае заполнения спиртом и водно-спиртовой смесью. В случае заполнения спиртом эффект выражен гораздо сильнее, чем в случае заполнения водно-спиртовой смесью.

Зависимости от пористости диэлектрических свойств пористых сред на основе феррита $\text{Ba}_3\text{Co}_2\text{Ti}_{0,8}\text{Fe}_{23,2}\text{O}_{41}(\text{Co}_2\text{Z})$ наполненных гептаном приведены на рис. 9. На этом рисунке также приведены расчётные кривые, полученные по формулам (1)–(4). Как и в случае наполнения водой, наилучшее совпадение с экспериментом даёт расчёт по формуле Брауна (3). Расчёты, проведённые по ЕМТ, дают удовлетворительное согласие теории и эксперимента.

7. ВЫВОДЫ

Исследованы диэлектрические свойства пористых сред на основе различных типов ферритов, не заполненных жидкостями. Показано, что их диэлектрические свойства зависят от типа феррита, пористости и лучше всего описываются в рамках композитной аппроксимации формулой Брауна. Расчёты по формуле Максвелла–Гарнетта также даёт хорошие результаты и сходимость с экспериментом. Не обнаружено зависимости диэлектрических свойств пористых ферритовых сред от размера частиц феррита.

Диэлектрические свойства пористых ферритовых сред, заполненных водой и гептаном, описываются в рамках композитной аппроксимации формулой Брауна. Расчёты, проводимые по методу эффективной среды, также дают удовлетворительные результаты.

При исследовании диэлектрических свойств пористых феррито-

вых сред, заполненных этиловым спиртом и смесями вода–этиловый спирт, обнаружен эффект превышения действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости над верхней границей Винера, что делает невозможным описание диэлектрических свойств таких систем в рамках композитной аппроксимации. Величина указанного превышения зависит от типа феррита и жидкости, пористости, размера частиц феррита и частоты электромагнитной волны. Высказано предположение, что рассматриваемый эффект связан с тем, что на поверхности частиц феррита образуется слой жидкости, диэлектрические свойства которого, в силу взаимодействия жидкости и феррита, отличаются от диэлектрических свойств самой жидкости. Ещё одним объяснением указанного эффекта может быть возможная вытянутость пор внутри ферритовых частиц. В пользу соображений о влиянии поверхности раздела фаз на диэлектрические свойства указанных систем свидетельствует отчётливо выраженная зависимость диэлектрической проницаемости от размера частиц феррита, и, как следствие, от площади суммарной поверхности феррита.

В рассматриваемом диапазоне пористостей (40–60% об.) зависимость действительной и мнимой частей магнитной проницаемости от пористости линейна. Не обнаружено зависимости магнитных свойств от наличия и типа жидкости, заполняющей пористую среду.

Варианты дальнейшего развития этих исследований изложены в превосходной книге [19].

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. B. Nettelblad and G. A. Niklasson, *J. Phys.*, **8**: 2781 (1996).
2. R. Hilfer, *Adv. Chem. Phys.*, **92**, No. 2: 299 (1996).
3. П. Я. Рогов, С. В. Некрутман, Г. В. Лысов, *Техника сверхвысокочастотного нагрева пищевых продуктов* (Москва: Легкая промышленность: 1981).
4. *Адсорбция и пористость* (Ред. М. М. Дубинин, В. В. Серпинский) (Москва: Наука: 1976).
5. Л. М. Бреховских, *Волны в слоистых средах* (Москва: Издательство АН СССР: 1957).
6. P. Debye, *Polar Molecules* (New York: Chem. Catalogue Co., Inc.: 1929).
7. D. W. Davidson and R. H. Cole, *J. Chem. Phys.*, **19**, No. 12: 1484 (1951).
8. C. Brot, *C. R. Acad. Sci.*, **240**, No. 20: 1989 (1955).
9. W. M. Heston, A. D. Franklin, E. J. Hennelly, and C. P. Smyth, *J. Amer. Chem. Soc.*, **72**, No. 8: 3443 (1950).
10. J. C. Maxwell, *A Treatise in Electricity and Magnetism*, **1**: 440 (1954).
11. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц, *Теоретическая физика. Т. 8. Электродинамика сплошных сред* (Москва: Наука: 1982).
12. R. Landauer, *AIP Conference Proceedings* (Eds. J. C. Garland and D. B. Tanner) (New York: AIP: 1978), No. 40, p. 2.
13. D. S. McLachlan, M. Blaszkiewicz, and R. E. Newnham, *J. Am. Ceram. Soc.*, **73**,

- No. 8: 2187 (1990).
14. W. E. Kenyon, *J. Appl. Phys.*, **55**, No. 8: 3153 (1984).
 15. O. Wiener, *Physik. Z.*, **В.5**: S.332 (1904).
 16. O. Wiener, *Abd. d. Liepz. Akad.*, **В.32**: S.53 (1912).
 17. Т. Л. Челидзе, В. Н. Шилов, *Электроповерхностные явления в дисперсных системах* (Москва: Наука: 1972).
 18. Т. Л. Челидзе, А. И. Деревянко, О. Д. Куриленко, *Электрическая спектроскопия гетерогенных систем* (Киев: Наукова думка: 1977).
 19. *Chemistry under Extreme and Non-Classical Conditions?* (Eds. R. van Eldic and C. D. Hubbard) (New York–Weinheim: Wiley: 1997).

REFERENCES

1. B. Nettelblad and G. A. Niklasson, *J. Phys.*, **8**: 2781 (1996).
2. R. Hilfer, *Adv. Chem. Phys.*, **92**, No. 2: 299 (1996).
3. P. Ja. Rogov, S. V. Nekrutman, and G. V. Lysov, *Tekhnika Sverkhvysokochastotnogo Nagreva Pishchevykh Produktov* (Moscow: Legkaya Promyshlennost': 1981).
4. *Adsorbtsiya i Poristost'* (Eds. M. M. Dubinin and V. V. Serpinskiy) (Moscow: Nauka: 1976).
5. L. M. Brekhovskikh, *Volny v Sloistykh Sredakh* (Moscow: Izdatel'stvo AN SSSR: 1957).
6. P. Debye, *Polar Molecules* (New York: Chem. Catalogue Co., Inc.: 1929).
7. D. W. Davidson and R. H. Cole, *J. Chem. Phys.*, **19**, No. 12: 1484 (1951).
8. C. Brot, *C. R. Acad. Sci.*, **240**, No. 20: 1989 (1955).
9. W. M. Heston, A. D. Franklin, E. J. Hennelly, and C. P. Smyth, *J. Amer. Chem. Soc.*, **72**, No. 8: 3443 (1950).
10. J. C. Maxwell, *A Treatise in Electricity and Magnetism*, **1**: 440 (1954).
11. L. D. Landau and E. M. Lifshitz, *Teoreticheskaya Fizika. Vol. 8. Elektrodinamika Sploshnykh Sred* (Moscow: Nauka: 1982).
12. R. Landauer, *AIP Conference Proceedings* (Eds. J. C. Garland and D. B. Tanner) (New York: AIP: 1978), No. 40, p. 2.
13. D. S. McLachlan, M. Blaszkiewicz, and R. E. Newnham, *J. Am. Ceram. Soc.*, **73**, No. 8: 2187 (1990).
14. W. E. Kenyon, *J. Appl. Phys.*, **55**, No. 8: 3153 (1984).
15. O. Wiener, *Physik. Z.*, **В.5**: S.332 (1904).
16. O. Wiener, *Abd. d. Liepz. Akad.*, **В.32**: S.53 (1912).
17. Т. Л. Челидзе, В. Н. Шилов, *Электроповерхностные явления в дисперсных системах* (Москва: Наука: 1972).
18. Т. Л. Челидзе, А. И. Деревянко, и О. Д. Куриленко, *Электрическая спектроскопия гетерогенных систем* (Киев: Наукова думка: 1977).
19. *Chemistry under Extreme and Non-Classical Conditions?* (Eds. R. van Eldic and C. D. Hubbard) (New York–Weinheim: Wiley: 1997).