

В. И. ДЕМИДЧИК, В. С. КУРИЛО, П. Д. КУХАРЧИК, С. В. МАЛЫЙ, В. Г. СЕМЕНЧИК

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН С ИСКУССТВЕННЫМИ СРЕДАМИ

### ВВЕДЕНИЕ

Взаимодействие электромагнитного излучения с композиционными материалами и структурно-неоднородными средами является одной из фундаментальных проблем современной физики. Характер взаимодействия существенно зависит от соотношения размеров неоднородностей и длины волны. Именно пространственная и структурная неоднородность обеспечивает разнообразие электродинамических свойств материалов естественного и искусственного происхождения.

Среди структурно неоднородных материалов и сред в настоящее время большой теоретической и прикладной интерес представляют искусственные композиционные материалы. В общем случае это — однородные и неоднородные диэлектрические матрицы, в которых диспергированы произвольные по геометрии, внутренней структуре и материалному составу частицы. Электродинамические свойства таких композиционных материалов могут варьироваться в широких пределах за счет изменения их внутренней структуры и соотношения между характеристическими размерами неоднородностей и длиной волны. На практике широко используются два типа структур. У первого типа длина волны взаимодействующего с композитом электромагнитного излучения много больше размеров структурных неоднородностей. Подобные мелкодисперсные композиты используются в качестве искусственных диэлектриков или магнетиков, электродинамические параметры которых стабильны или слабо меняются в широком частотном диапазоне. У второго типа структур неоднородности имеют резонансные размеры. К примеру, это — фотонные и электромагнитные кристаллы.

В связи с использованием в последнее время электродинамических устройств в более высокочастотной области происходит перераспределение функциональной нагрузки с дискретных элементов на материалы, обладающие специальными свойствами. Развитие высоких технологий привело к созданию композитов с наноразмерными частицами, детерминировано распределенными в диэлектрической матрице или на подложке. К числу таких структур можно отнести композиты, в состав которых входят фуллерены и углеродные трубки.

Электродинамические характеристики композиционных материалов находятся в сложной многопараметрической зависимости от их внутренней структуры и материалного состава. Разработка и исследование электродинамических свойств композиционных материалов возможны при использовании комплексного подхода, сочетающего средства натурального и вычислительного экспериментов. Это обусловлено рядом причин. С одной стороны, в рамках натурального эксперимента воз-

можно измерение усредненных электромагнитных параметров образцов композитов, имеющих макроскопические размеры. К этим параметрам относятся характеристики рассеяния, резонансные частоты нагруженных резонаторов и т. д. С другой стороны, при построении аналитических и вычислительных моделей композитов необходима информация о реальной микро- и макроструктуре материалов, об электродинамических свойствах микроскопических объемов материала, о нелинейных эффектах, о физико-химических процессах, протекающих под воздействием электромагнитного излучения. Натурный эксперимент может и должен использоваться на этапе тестирования вычислительных и аналитических моделей, а также на этапе проведения испытаний новых типов композиционных материалов. В свою очередь, вычислительные методы и программные средства используются при определении параметров композитов на базе результатов натурального эксперимента в рамках решения обратной задачи.

Основные потенциальные возможности создания искусственных материалов с новыми электродинамическими свойствами базируются на использовании в качестве дисперсной фазы частиц сложной формы и состава. Объемные плотности распределения частиц могут быть большими, что приводит к их кластеризации и образованию сложных детерминированных или стохастических многочастичных агрегатов.

Весьма перспективным направлением является разработка и исследование материалов, структурные неоднородности которых имеют резонансные размеры. Анализ современного состояния методов и средств аналитического и численного исследования электродинамических характеристик композиционных материалов показывает, что они ориентированы на расчет эффективных значений диэлектрической и магнитной проницаемостей композитов с простой формой частиц и малыми их объемными концентрациями.

Экспериментальное исследование процессов взаимодействия электромагнитного излучения с композиционными материалами и структурно неоднородными средами предполагает разработку специальных измерительных комплексов, методик и программных средств для обработки результатов.

Поэтому разработка методов и средств теоретического и экспериментального исследования композиционных материалов и структурно неоднородных сред представляет собой важную и актуальную проблему.

Статья посвящена изложению результатов численного и экспериментального исследования электродинамических свойств различных типов искусственных сред и композиционных материалов.

## 1. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЭФФЕКТИВНЫХ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

В качестве модели композиционного материала будем рассматривать диэлектрическую матрицу, в которой диспергированы произвольные по геометрии и внутренней структуре частицы. Если структурные неоднородности распределены по объему композиционного материала периодически или статистически однородно, а характеристические размеры структурных неоднородностей  $a \ll \lambda$ , где  $\lambda$  — длина волны в среде, то в рамках приближения эффективной среды электро-

динамические свойства композита могут быть описаны усредненными макроскопическими материальными параметрами – эффективными диэлектрической  $\epsilon_{\text{eff}}$  и магнитной  $\mu_{\text{eff}}$  проницаемостями.

В общем случае методика определения эффективных электродинамических параметров композиционных материалов и неоднородных сред включает в себя следующие этапы: выбор ключевой электродинамической задачи; решение задачи с учетом внутренней структуры композита; нахождение эффективных электродинамических параметров в рамках решения обратной задачи.

В качестве ключевой задачи будем рассматривать взаимодействие плоской линейно поляризованной электромагнитной волны с плоским слоем материала. Внутренняя структура композита может быть периодической или статистически однородной. Если размеры структурных неоднородностей композита малы по сравнению с длиной волны, то электродинамические свойства плоского слоя композита по отношению к падающей на него электромагнитной волне могут быть описаны с помощью матрицы рассеяния  $S$ . Для расчета матрицы возможно использование методики, изложенной в [1–3]. Она базируется на методе минимальных автономных блоков [4] и теории периодических структур [5]. Рассмотрим основные положения разработанной методики на примере расчета эффективных электродинамических параметров композиционного материала, представляющего собой однородную диэлектрическую матрицу, в которой периодически распределены сферические частицы. На рис. 1, *a* показан фрагмент плоского слоя композита, соответствующий исходной задаче.

Таким образом, задача сводится к расчету рассеяния плоской электромагнитной волны на двумерно периодической решетке. Пусть волна падает нормально к поверхности решетки. Тогда возможен переход к задаче о дифракции на волно-

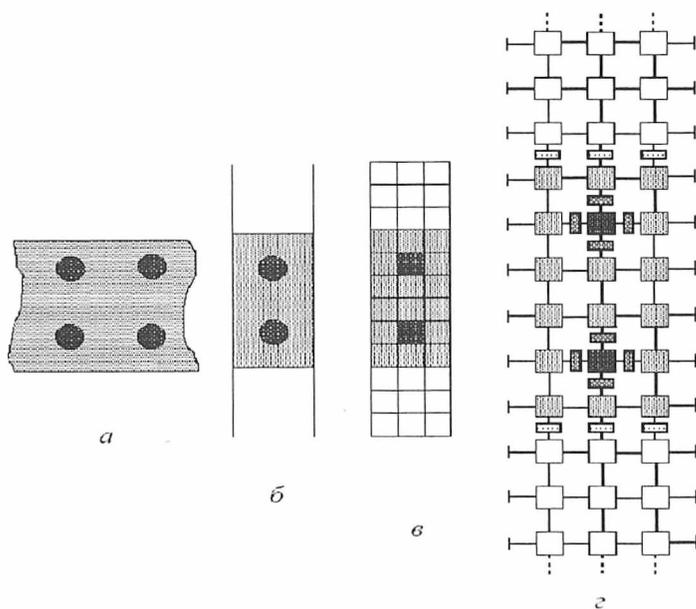


Рис. 1. Модель плоского слоя композиционного материала

водной неоднородности. На рис. 1, б показан эквивалентный пространственный волновод, на стенках которого выполняются условия периодичности. Сечение волновода совпадает с периодом исходной решетки. Матрица рассеяния отрезка пространственного волновода с неоднородностью определяется в рамках метода минимальных автономных блоков (МАБ). Для этого пространственный волновод разбивается на три подобласти: два полубесконечных волновода и центральную область конечных размеров, включающую фрагмент решетки, которая разбивается на систему прямоугольных параллелепипедов, как показано на рис. 1, в. Согласно методу МАБ каждый из этих параллелепипедов рассматривается как автономный блок, электродинамические свойства которого описываются матрицей рассеяния по отношению к волнам, распространяющимся в полубесконечных виртуальных каналах, подключенных к соответствующим граням блоков. Матрица рассеяния для трехмерных блоков имеет двенадцатый порядок, а ее элементы могут быть рассчитаны по соотношениям, приведенным в работе [4]. Совокупность минимальных автономных блоков, а также специальных блоков перехода и граничных блоков представляет собой декомпозиционную схему. Декомпозиционная схема для решаемой задачи представлена на рис. 1, г. После расчета матриц рассеяния для всех блоков, входящих в декомпозиционную схему, осуществляется процесс рекомпозиции. На этом этапе происходит объединение общих каналов для соседних блоков и определяется многоканальная матрица рассеяния всей декомпозиционной области по значениям матриц рассеяния для отдельных блоков. Элементы матрицы рассеяния  $S$  отрезка волновода определяются с использованием элементов многоканальной матрицы рассеяния. Пусть толщина образца композита равна  $d$ . Тогда эффективные электродинамические характеристики композита  $(\epsilon_{eff}, \mu_{eff})$  могут быть рассчитаны по значениям элементов матрицы рассеяния  $S_{11}$  и  $S_{21}$  с использованием следующих соотношений [6, 7]:

$$\epsilon_{eff} = \sqrt{\frac{C_2}{C_1}}, \quad \mu_{eff} = \sqrt{C_1 C_2}, \quad C_1 = \left( \frac{1+\rho}{1-\rho} \right)^2, \quad C_2 = - \left( \frac{\lambda}{2\pi d} \ln \frac{1}{\tau} \right)^2,$$

$$\rho = x \pm \sqrt{x^2 - 1}, \quad |\rho| \leq 1, \quad \tau = (V_1 - \rho) / (1 - V_1 \rho),$$

$$x = \frac{1 - V_1 V_2}{V_1 - V_2}, \quad V_1 = S_{21} + S_{11}; \quad V_2 = S_{21} - S_{11}.$$

Толщина слоя композита в ключевой задаче выбирается из условия сходимости значений эффективных диэлектрической и магнитной проницаемостей. Входящие в декомпозиционную схему блоки могут иметь различные размеры, выбор которых обусловлен точностью геометрического описания структурных неоднородностей и материальными параметрами заполняющих их сред.

Если толщина слоя композиционного материала соизмерима с размерами структурных неоднородностей, как это бывает в случае тонкоплеченных структур и шероховатых границ раздела двух сред, то использование эффективных электродинамических материалов может привести к недопустимым погрешностям. В этом

случае для расчета коэффициентов прохождения и отражения можно непосредственно воспользоваться значениями матрицы рассеяния плоского слоя.

Разработанная методика реализована в виде программного комплекса, который использован для проведения численного исследования электродинамических свойств широкого класса композиционных материалов.

Ниже представлены результаты численного исследования композитов, иллюстрирующие потенциальные возможности разработанных программно-методических средств.

## 2. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С КОМПОЗИЦИОННЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

### 2.1. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПРОВОДЯЩИХ ВОЛОКОН

Важнейшей проблемой прикладной электродинамики является разработка композитов с управляемыми электромагнитными свойствами. Поэтому поиск физических эффектов, которые могли бы быть положены в основу создания искусственных материалов с управляемыми свойствами, представляет важную и актуальную проблему.

Рассмотрим результаты численного исследования эффективной диэлектрической проницаемости композиционного материала, фрагмент которого и обозначения конструктивных параметров представлены на рис. 2.

Модель композиционного материала представляет собой объемную периодическую решетку из идеально проводящих отрезков квадратного сечения с длиной стороны  $\delta$ . Периоды объемной решетки соответственно равны:  $d_x = 7\delta, d_y = 9\delta, d_z = 11\delta$ .

Эффективные электродинамические параметры композита рассчитывались для случая, когда плоская электромагнитная волна распространяется вдоль оси  $Z$ , а электрическая компонента поля  $\vec{E} \parallel \vec{y}$ . Расчеты проводились в предположении, что  $d_{x,y,z} < \lambda$ . На рис. 3 представлены зависимости эффективной диэлектрической проницаемости композита от величины зазора  $\Delta = (d_y - l)$  между торцами вибраторов при различных значениях диэлектрической проницаемости материала, заполняющего этот зазор.

Анализ численных результатов показывает, что при малых расстояниях между торцами отрезков существует сильная зависимость эффективной диэлектриче-

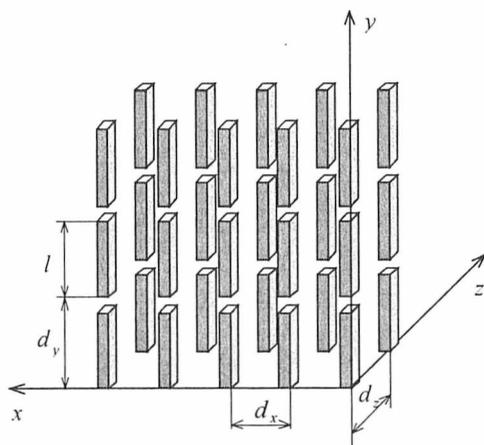


Рис. 2. Объемная решетка из проводящих отрезков

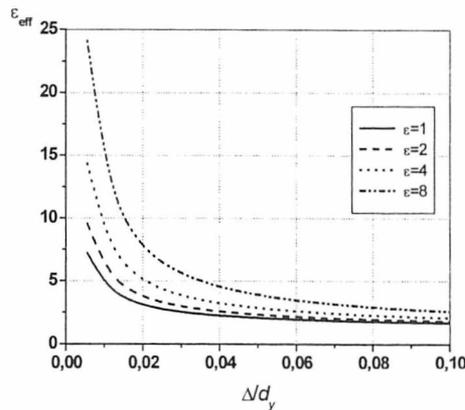


Рис. 3. Зависимость диэлектрической проницаемости от величины зазора между вибраторами

## 2. 2. РАДИОПОГЛОЩАЮЩИЕ СВОЙСТВА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ С ОБЪЕМНОЙ РЕШЕТКОЙ МАЛОВИТКОВЫХ СПИРАЛЕЙ

Рассмотрим взаимодействие плоской электромагнитной волны с системой, представляющей собой плоский идеально проводящий экран, на поверхности которого расположен тонкий плоский диэлектрический слой, в котором параллельно плоскости экрана расположена однослойная двумерно периодическая решетка из маловитковых проводящих спиралей, как показано на рис. 4.

Слой материала на проводящем экране имеет толщину  $h = 4$  мм и характеризуется материальными параметрами  $\epsilon = 1,5 - j0,5$  и  $\mu = 1 - j0$ . В диэлектрическом слое расположена однослойная решетка из 1,5- или 2-витковых спиралей, образованных из прямолинейных проволочных идеально проводящих сегментов длиной  $l = 3$  мм. Толщина сегментов  $d = 0,5$  мм. Спирали имеют квадратное сечение. В состав 1,5-витковой спирали входит 6 проволочных сегментов. Соответственно 2-витковая спираль образована из 8 сегментов. Спирали ориентированы таким образом, что их оси параллельны плоскости экрана и друг другу. Проволочные сегменты, входящие в состав решетки, параллельны или перпендикулярны экрану. Периоды решетки для 1,5-витковых спиралей равны 4 мм, а для решетки из 2-витковых спиралей — 4 мм и 5 мм. Спирали имели левую намотку и шаг, равный 2 мм.

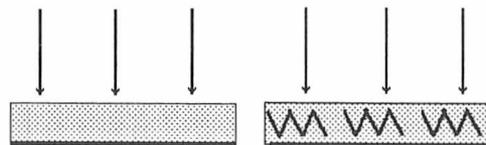


Рис. 4. Диэлектрический слой с решеткой из проводящих спиралей

ской проницаемости  $\epsilon_{eff}$  от величины зазора  $\Delta$ . Изменение диэлектрической проницаемости материала, заполняющего пространство между торцами вибратора, также оказывает влияние на электродинамические свойства композита.

Таким образом, варьирование расстояния между торцами вибраторов, изменение материальных параметров диэлектрических вставок между ними могут использоваться в качестве управляющего воздействия для изменения макроскопических электродинамических свойств композиционных материалов.

Физически указанные эффекты обусловлены сильной концентрацией электромагнитного поля между торцами вибраторов.

Расчеты проводились для случая нормального падения линейно поляризованной плоской электромагнитной волны для двух типов поляризации, когда вектор  $\vec{E}$  параллелен и перпендикулярен осям спиралей.

В силу соотношения между конструктивными параметрами решетки из

спиралей и длиной волны в рассеянном поле будет существовать только нулевая распространяющаяся пространственная гармоника. Поэтому для оценки свойств диэлектрического слоя со спиралью рассчитывалась зависимость коэффициента отражения от частоты.

Для оценки влияния решетки из проводящих спиралей расчеты проводились также для однородного диэлектрического слоя.

Результаты расчетов приведены на рис. 5.

Анализ численных результатов показывает, что введение решетки спиралей в поглощающий слой приводит к снижению уровня отраженного электромагнитного поля от системы экран-покрытие. Этот эффект наиболее сильно проявляется для случая перпендикулярной ориентации электрической компоненты поля по отношению к осям спиралей. Это обусловлено возбуждением спиралей магнитной компонентой поля, величина которой достигает максимума у поверхности проводящего экрана. Индуцированный на спиральях электрический ток является источником электрического поля, которое и поглощается в диэлектрическом слое с электрическим типом потерь.

Другой причиной уменьшения отражения от покрытия является улучшение согласования на границе свободное пространство – диэлектрический слой за счет изменения эффективных электродинамических параметров последнего.

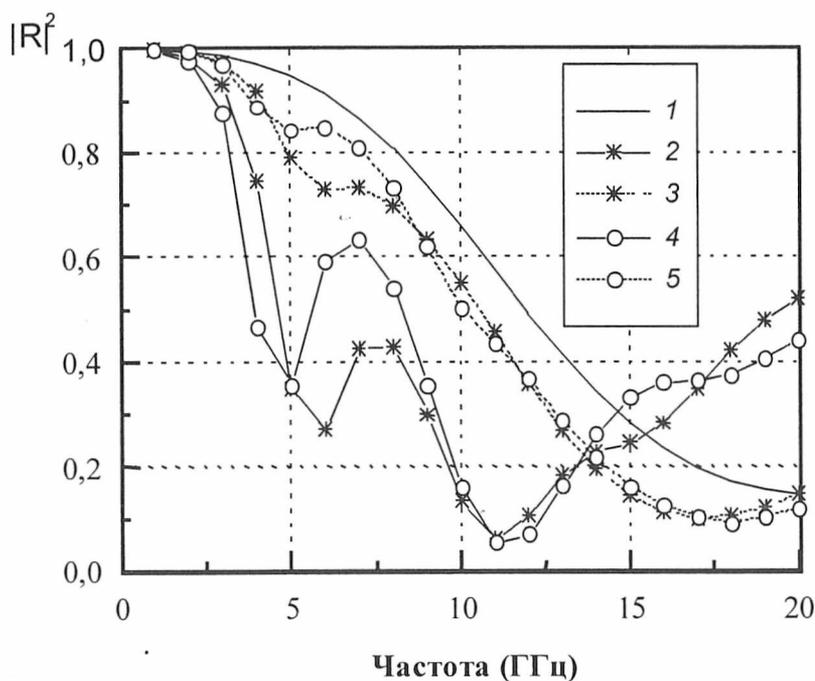


Рис. 5. Зависимость коэффициента отражения от частоты:

- 1 — слой без спиралей; 2 — слой с 1,5-витковыми спиральями ( $E \perp$ );  
 3 — слой с 1,5-витковыми спиральями ( $E \parallel$ ); 4 — слой с 2-витковыми спиральями ( $E \perp$ );  
 5 — слой с 2-витковыми спиральями ( $E \parallel$ )

Таким образом, композиты, содержащие частицы в виде проводящих спиралей, являются перспективными для разработки низкопрофильных антиотражающих покрытий из материалов с электрическим типом поглощения электромагнитной энергии.

### 2.3. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОБЪЕМНЫХ РЕШЕТОК ИЗ ПРОВОДЯЩИХ РАМОК

Одно из основных направлений создания низкопрофильных радиопоглощающих покрытий – это использование материалов с магнитным типом поглощения. Возможной моделью искусственного композита с магнитным типом поглощения, образованной из немагнитных материалов, является объемная периодическая решетка из проводящих колец [8].

Проведем расчет эффективных электродинамических параметров таких материалов с использованием разработанной методики. Для этого рассмотрим объемную решетку из идентичных параллельных рамок квадратного сечения. Материал рамок имеет конечную проводимость  $\sigma$ . Для простоты будем считать, что рамки расположены в свободном пространстве в узлах периодической решетки с периодами  $d_x, d_y, d_z$ . Рамки расположены в плоскости  $OXY$ . Длина стороны рамки равна  $l$ . Рамка образована из проводника с сечением в виде квадрата с длиной стороны, равной  $\Delta$ . Геометрия решетки в двух ортогональных сечениях представлена на рис. 6.

При расчетах использовались следующие конструктивные параметры решетки: рамки образованы из медного проводника квадратного сечения с толщиной  $\Delta = 1$  мкм; периоды решеток соответственно равны:  $d_x = 2$  мкм,  $d_y = d_z = l + 1$  мкм. Предполагалось, что решетка расположена в свободном пространстве. Эффективные электродинамические параметры рассчитывались для случая нормального падения электромагнитной волны на слой материала. Электрическая компонента поля падающей волны параллельна плоскостям, в которых расположены рамки.

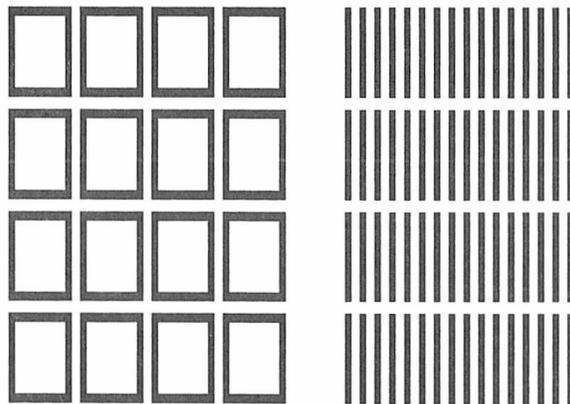


Рис. 6. Объемная периодическая решетка из рамок прямоугольного сечения

Результаты представлены на рис. 7 в виде зависимостей действительной  $\mu'$  и мнимой  $\mu''$  частей эффективной магнитной проницаемости композиционного материала от длины волны для различных значений размеров рамок  $l$  при фиксированных остальных конструктивных параметрах. Анализ полученных результатов подтверждает возможность создания на основе объемных решеток из проводящих рамок композиционных материалов, которые обладают магнитным типом поглощения.

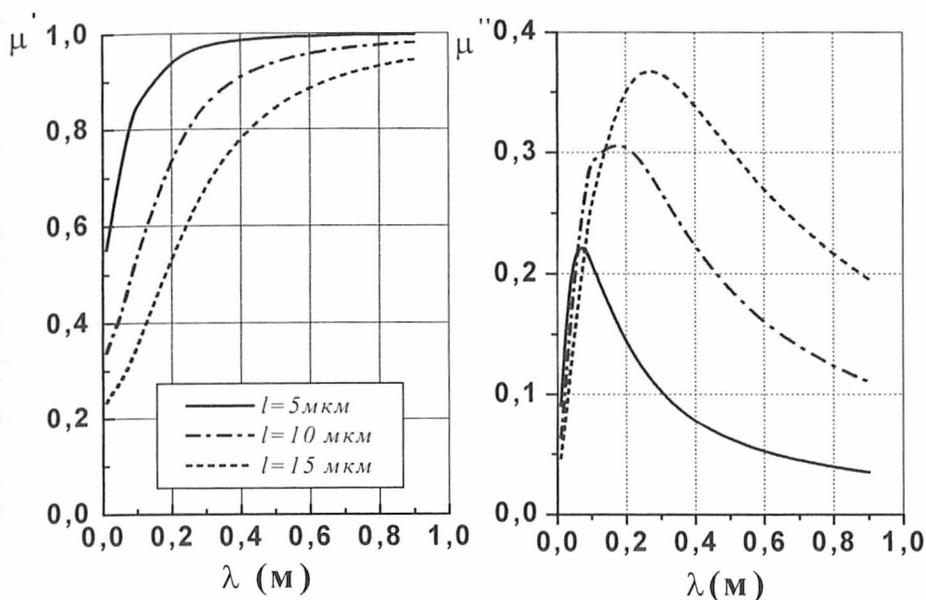


Рис. 7. Зависимость эффективной магнитной проницаемости решеток из проводящих рамок от длины волны

#### 2. 4. РАДИОПОГЛОЩАЮЩИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ СО СЛУЧАЙНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ПРОВОДЯЩИХ НИТЕЙ

В зависимости от технологии изготовления распределение частиц в композиционных материалах может быть периодическим, детерминировано аperiodическим и стохастическим. В последнем случае эти частицы могут образовывать сложные агрегаты и кластеры, электродинамические свойства которых существенно отличаются от свойств одиночных частиц.

Рассмотрим возможность использования разработанной методики для расчета эффективных электродинамических параметров композитов со стохастическим распределением частиц на основе описанной выше методики.

В качестве модели композиционного материала со случайным распределением частиц рассмотрим периодическую решетку, образованную из идентичных параллелепипедов, каждый из которых является фрагментом материала со случайным разбросом частиц. Размеры этих параллелепипедов выбираются из условий обеспечения статистической однородности заполняющего их композиционного материала. Максимальные размеры параллелепипедов, используемых в модели, ограничены уровнем допустимых вычислительных затрат. Периоды решетки должны быть малы для обеспечения одномодового режима рассеяния. Для данной решетки рассчитывается матрица рассеяния  $S$ . По ее элементам находятся эффективные значения электродинамических параметров композита. Конструктивные параметры стохастических композитов моделируются с помощью генераторов случайных чисел. Для повышения точности

оценки электродинамических параметров композитов возможно несколько подходов: проведение серии расчетов при последовательном увеличении размеров фрагментов композиционного материала; усреднение результатов расчетов, полученных для различных реализаций распределения частиц.

В реальных композитах распределение частиц и их конструктивных параметров описывается сложными статистическими законами. Особый интерес представляет случай фрактальной кластеризации. Она проявляется в том, что для разных масштабных уровней распределение частиц и их групп, образованных из них, подчиняется одинаковым статистическим закономерностям. Для адекватного моделирования композитов с фрактальной организацией внутренней структуры необходимо учитывать большое количество частиц. В рамках трехмерных моделей композитов это может привести к чрезмерным вычислительным затратам. Поэтому исследование влияния фрактальной кластеризации на электродинамические свойства композитов проводилось на базе двумерных моделей материала, роль частиц в котором играют бесконечные нити квадратного сечения. Для простоты будем считать, что нити распределены в свободном пространстве и параллельны. Модели исследуемых структур представлены на рис. 8. Для каждого типа композита объемная плотность нитей считалась одинаковой и равной  $\approx 12\%$ .

Рассмотрим особенности распределения нитей в приведенных выше двумерных моделях композитов. В модели, соответствующей рис. 8, *а*, нити распределены периодически. На рис. 8, *б* изображена модель, в которой нити распределены по равномерному случайному закону. Распределение частиц, представленное на рис. 8, *в*, имеет вид стохастического фрактала и формируется в рамках следующего алгоритма:

- на первом масштабном уровне генерируется система квадратных подматриц, распределенных по равномерному случайному закону;
- на втором этапе в каждой из подматриц, выделенных на предшествующем этапе, генерируется распределение нитей по равномерному случайному закону.

Таким образом, для композита с фрактальным распределением частиц наблюдается формирование макрочастиц, распределение которых в композите подчиняется тем же закономерностям, что и распределение нитей в отдельной макрочастице.

Для оценки влияния фрактальной кластеризации на радиопоглощающие свойства композита численно исследована зависимость мнимой части эффективной



Рис. 8. Модели композитов из системы проводящих нитей

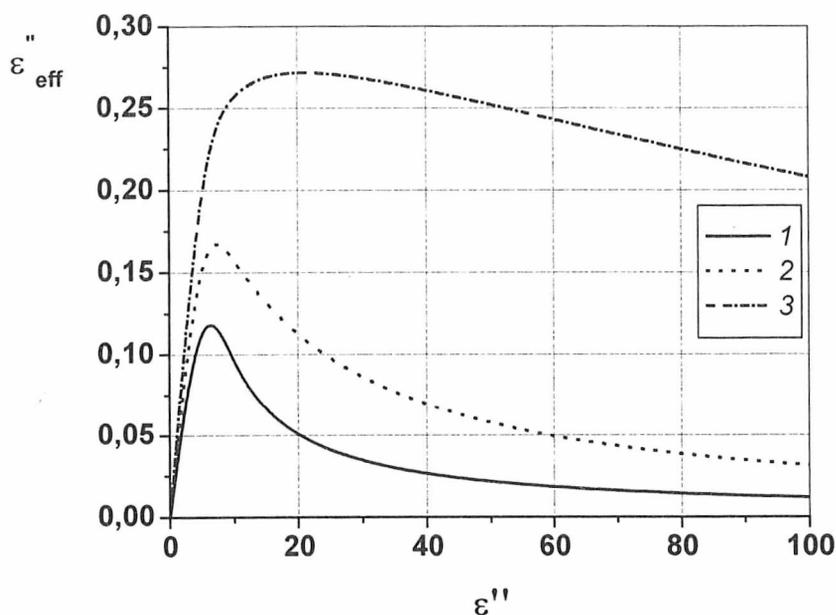


Рис. 9. Зависимость мнимой части эффективной диэлектрической проницаемости композита от мнимой части диэлектрической проницаемости материала нитей

диэлектрической проницаемости  $\epsilon''_{eff}$  от аналогичного параметра материала, образующего нити. Диэлектрическая проницаемость нитей равна  $\epsilon = 1 - j\epsilon''$ . Толщина нити  $\Delta$  и длина волны  $\lambda$  связаны соотношением  $\Delta/\lambda = 0,001$ . Результаты вычислительного эксперимента представлены на рис. 9.

На рис. 9 кривая 1 соответствует периодическому, 2 – равномерному случайному и 3 – фрактальному распределению нитей.

Анализ численных результатов показывает, что фрактальный характер распределения частиц приводит к наиболее существенному увеличению мнимой части диэлектрической проницаемости композиционного материала. Этот эффект обусловлен образованием многочастичных фрактальных кластеров, электродинамические свойства которых существенно отличаются от аналогичных свойств одиночных нитей.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Методика определения эффективных электродинамических параметров композиционных материалов включает в себя два этапа: измерение характеристик взаимодействия электромагнитного излучения с образцами композиционных материалов и определение диэлектрической и магнитной проницаемостей на основе решения обратной задачи.

Относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости в соответствии с [9] определяются как

$$\varepsilon = (1 - [\frac{\lambda_0}{\lambda_{кр}}]^2) \frac{\gamma'}{z'} + \frac{1}{\mu} [\frac{\lambda_0}{\lambda_{кр}}]^2, \quad \mu = \gamma' z',$$

где, к примеру, для волны типа  $H_{10}$  в прямоугольном волноводе:

$$z' = \frac{\mu \sqrt{1 - (\lambda_0/\lambda_{кр})^2}}{\sqrt{\varepsilon\mu - (\lambda_0/\lambda_{кр})^2}}, \quad \gamma' = \frac{\sqrt{\varepsilon\mu - (\lambda_0/\lambda_{кр})^2}}{\sqrt{1 - (\lambda_0/\lambda_{кр})^2}},$$

$\lambda_0$  — длина волны в свободном пространстве,  $\lambda_{кр}$  — критическая длина волны.

Образец, помещенный в волновод, можно трактовать как отрезок линии передачи длины  $d$ , однородно заполненный исследуемым материалом и который описывается входным сопротивлением и коэффициентом отражения [10]:

$$z'_{вх} = \frac{z'_н + z't}{\frac{z'_н}{z'}t + 1}; \quad \Gamma = \frac{1 + \alpha\Gamma_н}{\beta - \Gamma_н},$$

где  $\Gamma_н$  — коэффициент отражения от нагрузки,  $\alpha$  и  $\beta$  — параметры исследуемого образца:

$$\alpha = \frac{2 - \frac{t}{z'} - z't}{z't - \frac{t}{z'}}, \quad \beta = \frac{2 + \frac{t}{z'} + z't}{z't - \frac{t}{z'}}$$

$$z'^2 = \frac{\beta - \alpha + 2}{\beta + \alpha + 2}, \quad t = \frac{\beta - \alpha - 2}{\beta + \alpha} z', \quad t = th\gamma d.$$

В ходе экспериментальных исследований коэффициент отражения  $\Gamma$  измерялся при пяти значениях длины отрезка волновода, в котором находился исследуемый образец композиционного материала. В результате получена переопределенная система уравнений относительно  $\alpha$  и  $\beta$ , которую можно представить в матричном виде:

$$\begin{bmatrix} -\Gamma_{н1} & \Gamma_1 \\ -\Gamma_{н5} & \Gamma_5 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \Gamma_1\Gamma_{н1} \\ \dots \\ 1 + \Gamma_5\Gamma_{н5} \end{bmatrix}$$

Данное уравнение решается методом псевдообратной матрицы. Этот метод обеспечивает минимум среднеквадратичной погрешности результатов измерений

[10]. После определения искоемых переменных  $\alpha$  и  $\beta$  находим комплексные значения диэлектрической и магнитной проницаемостей образца материала путем обратного преобразования переменных.

Исследования проводились на лабораторных установках, состоящих из серийных измерительных приборов и специализированного измерительно-интерфейсного блока, который позволяет повысить общую точность измерений [11, 12]. В блоке реализованы: принцип синхронного детектирования; преобразование постоянного напряжения на выходе детектора в цифровой сигнал; ввод этого сигнала в ЭВМ; возможность автоматического управления переключателем СВЧ канала по сигналу от ЭВМ.

### 3.1. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ВИДЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТРИЦ С ДИСПЕРГИРОВАННЫМИ В НИХ ВОЛОКНАМИ НИКЕЛЯ И КОБАЛЬТА

В современных разработках радиопоглощающих материалов при небольшом удельном весе и объеме считается перспективным использование электропроводящих дисперсных порошков (сажа, графит, металлические частицы), волокнистых (углеродные, металлические и полимерные металлизированные волокна), а также магнитных материалов (порошки ферритов, оксида железа и др.) [13].

При исследовании реакции восстановления металлов подгруппы железа комплексами  $Ti(III)$  установлено, что в процессе синтеза в объеме раствора протекает формирование металлических порошков, состоящих из частиц, агрегированных с образованием цепочечной или волокнистой структуры [14]. Полученные таким образом волокнистые порошки никеля могут представлять интерес для создания радиопоглощающих материалов, поскольку они одновременно являются проводниками, микроволокнами и ферромагнитным материалом.

В настоящей работе приведены результаты исследования влияния морфологии металла-наполнителя и его ориентации в матрице на поглощающие свойства композиционного материала по отношению к СВЧ-излучению.

В качестве основного компонента исследуемого материала выступали порошки никеля, полученные восстановлением в водном растворе комплексами  $Ti(III)$ . Особенность данного процесса заключается в получении чистого металла без примесей фосфора и бора, как в случае использования стандартных водородсодержащих восстановителей. Синтез протекает при комнатной температуре из кислотных комплексов в слабощелочной среде. Осаждение металла в объеме раствора сопровождается каталитической реакцией разложения воды комплексами  $Ti(III)$ .

Электронно-микроскопическое исследование показало, что при синтезе в геомагнитном поле формируются цепочки диаметром 0,2–0,3 мкм и длиной несколько микрометров ( $Ni_{TM1}$ ). Проведение реакции в приложенном постоянном магнитном поле (0,1 Тл) приводит к образованию упорядоченных металлических волокон, длина которых превышает 20 мкм, тогда как диаметр сохраняется в пределах 0,2–0,3 мкм ( $Ni_{TM1}$ ). Большая структурная упорядоченность никеля в последнем случае проявляется также в полуторакратном снижении удельной поверхности (с 6 м<sup>2</sup>/г до 4 м<sup>2</sup>/г). Следует отметить, что частицы, составляющие цепочки, являются агрегатами более мелких частиц с размерами 10–20 нм.

В качестве матрицы для приготовления исследуемых образцов использовалась эпоксидная смола ЭД-20 с отвердителем Z-10. Содержание металлической фазы – 5 вес.%. Преимущественная ориентация микроволокон металла в матрице достигалась путем приложения в процессе приготовления постоянного магнитного поля (с напряженностью 0,1 Тл). Использовались 4 ориентации волокон в образце относительно падающего СВЧ-излучения: хаотично, параллельно направлению распространения падающей на образец электромагнитной волны, параллельно  $E$ -составляющей волны, параллельно  $H$ -составляющей волны, под углом  $45^\circ$  к  $E$ -составляющей в плоскости  $EH$ . Измерения основных электромагнитных параметров проводились на длине волны  $\lambda = 3,2$  см волноводным методом с полным заполнением сечения волновода исследуемым образцом. В волновод помещался образец размером  $23 \times 10 \times 3$  мм<sup>3</sup>. С учетом специфики образцов и возможностей установки разработана методика проведения измерений и расчета эффективных электродинамических параметров: диэлектрической проницаемости  $\epsilon$ , магнитной проницаемости  $\mu$ , тангенса угла диэлектрических потерь  $\operatorname{tg} \delta_\epsilon$ , тангенса угла магнитных потерь  $\operatorname{tg} \delta_\mu$ , потери в коэффициенте отражения  $R$  при оптимальной толщине покрытия  $d$ .

Проведенные исследования, результаты которых представлены в табл. 1, показывают, что поглощающие свойства изучаемого материала зависят от характера распределения и степени упорядоченности волокон никеля в матрице. Установлено, что в присутствии металлического компонента возрастает диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  (от 3 до 4–17, в зависимости от ориентации), в то время как магнитная проницаемость  $\mu$  изменяется незначительно.

Таблица 1

Электромагнитные параметры эпоксидной матрицы  
с наполнением волокнами никеля

Образец	$\epsilon$	$\mu$	$d$ , мм	$R$ , дБ
Без наполнения	$(3,257 \pm 0,025) - (0,197 \pm 0,057)i$	$(0,948 \pm 0,071) - (0,083 \pm 0,044)i$	22,7	-34,89
Ni гмп, неориентированный	$(4,481 \pm 0,069) - (0,238 \pm 0,089)i$	$(0,883 \pm 0,029) - (0,088 \pm 0,051)i$	20,0	-20,53
Ni мп, неориентированный	$(9,316 \pm 0,020) - (0,492 \pm 0,027)i$	$(0,983 \pm 0,017) - (0,176 \pm 0,053)i$	13,1	-8,54
Ni мп, ориентированный по направлению распространения волны	$(13,062 \pm 0,231) - (2,269 \pm 0,415)i$	$(1,015 \pm 0,054) - (0,207 \pm 0,055)i$	2,2	-34,43
Ni мп, ориентированный по направлению $E$ -составляющей	$(9,621 \pm 0,403) - (0,567 \pm 0,054)i$	$(1,008 \pm 0,01) - (0,125 \pm 0,033)i$	7,7	-19,02
Ni мп, ориентированный по направлению $H$ -составляющей	$(12,665 \pm 0,309) - (1,301 \pm 0,033)i$	$(0,997 \pm 0,003) - (0,183 \pm 0,032)i$	2,2	-17,20
Ni мп, ориентированный под углом $45^\circ$ к $E$ -составляющей	$(17,695 \pm 0,089) - (2,919 \pm 0,085)i$	$(0,957 \pm 0,026) - (0,269 \pm 0,01)i$	1,9	-15,44

Для оценки возможностей использования исследуемых материалов в качестве радиопоглощающего покрытия на основании экспериментальных значений диэлектрической и магнитной постоянной рассчитывался коэффициент отражения электромагнитной волны в зависимости от толщины плоского слоя изучаемого материала, нанесенного на металлическую поверхность (в диапазоне 1–30 мм).

В табл. 1 представлена оптимальная толщина покрытия, обеспечивающая минимальное отражение, для каждого из исследованных образцов. Наименьшим коэффициентом отражения при малой толщине слоя обладает образец на основе Ni<sub>1</sub>mp, ориентированного по полю (–34,4 дБ при толщине 2,2 мм). По своим показателям этот образец можно отнести к перспективным материалам для создания тонких ( $d \ll \lambda$ ) радиопоглощающих покрытий (РПП). Известно, что на практике для таких РПП используются материалы, которые обеспечивают уровень коэффициента отражения не больше –20 дБ.

Таким образом, из приведенных экспериментальных результатов видно, что порошки никеля, обладающие микроволокнистой структурой и полученные восстановлением комплексами Ti(III), могут быть использованы в качестве компонентов радиопоглощающих материалов. Степень упорядоченности волокон магнитного наполнителя в диэлектрической матрице и положение волокон относительно падающего излучения влияют на поглощающие свойства материала. При этом, что очень важно, изменяются как диэлектрические, так и магнитные потери.

Таблица 2

## Электродинамические параметры эпоксидной матрицы с волокнами кобальта

Образец	$\epsilon$	$\mu$
Эпоксидная смола + Со гмп, неориентированный	$(3,679 \pm 0,027) - (0,399 \pm 0,06)i$	$(1,059 \pm 0,079) - (0,084 \pm 0,01)i$
Эпоксидная смола + Со мп, неориентированный	$(3,84 \pm 0,02) - (0,366 \pm 0,027)i$	$(1,05 \pm 0,04) - (0,034 \pm 0,032)i$
Эпоксидная смола + Со мп, ориентированный по направлению распространения волны	$(3,517 \pm 0,056) - (0,02 \pm 0,04)i$	$(0,877 \pm 0,087) - (0,119 \pm 0,028)i$
Эпоксидная смола + Со мп, ориентированный по направлению E-составляющей	$(7,181 \pm 0,33) - (0,735 \pm 0,098)i$	$(0,917 \pm 0,083) - (0,295 \pm 0,014)i$
Эпоксидная смола + Со мп, ориентированный по направлению H-составляющей	$(3,39 \pm 0,064) - (0,357 \pm 0,055)i$	$(1,097 \pm 0,046) - (0,065 \pm 0,026)i$
Эпоксидная смола + Со мп, ориентированный под углом 45° к E-составляющей	$(3,94 \pm 0,056) - (0,517 \pm 0,056)i$	$(0,944 \pm 0,088) - (0,098 \pm 0,049)i$

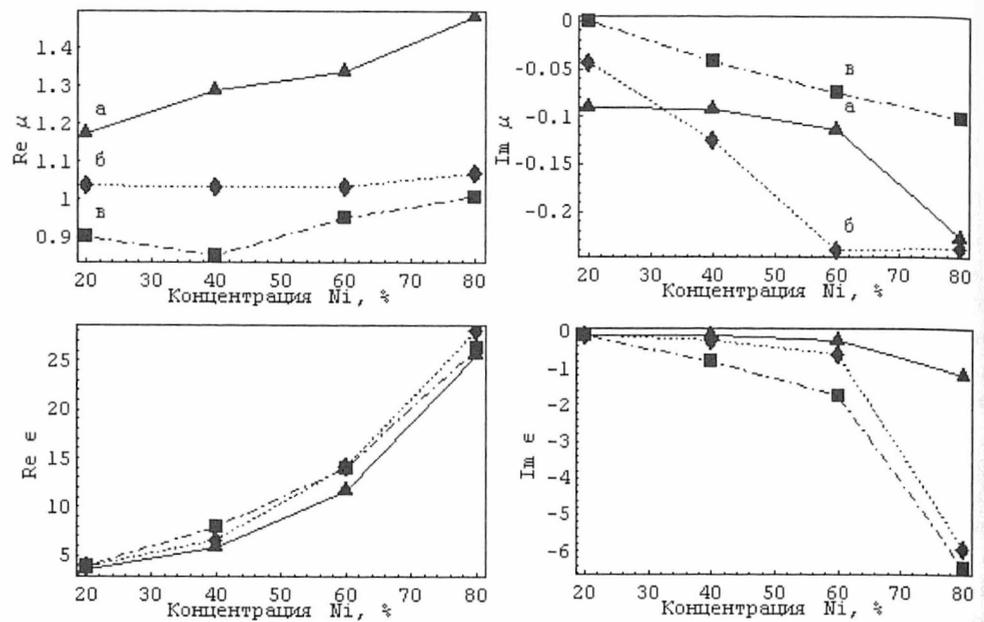


Рис. 10. Зависимость относительной диэлектрической ( $Re \epsilon$  – действительная часть,  $Im \epsilon$  – мнимая часть) и магнитной ( $Re \mu$  – действительная часть,  $Im \mu$  – мнимая часть) проницаемостей полиэтиленового композита от концентрации никеля:  
 а –  $f = 1,8 \text{ ГГц}$ , б –  $f = 5,0 \text{ ГГц}$ , в –  $f = 8,0 \text{ ГГц}$

Исследованы также образцы диэлектрических матриц, в которых были диспергированы волокна кобальта, приготовленные при двух различных условиях: в геомагнитном поле и в магнитном поле с индукцией  $B = 0,1 \text{ Тл}$ . Волокна представляют собой цепочечные агрегаты диаметром  $0,1\text{--}0,3 \text{ мкм}$  и длиной несколько микрометров. Частицы, образующие волокна, состоят в свою очередь из частичек диаметром  $10\text{--}50 \text{ нм}$ . В качестве матрицы использовалась эпоксидная смола ЭД-20. Содержание металлической фазы составляло 5 вес.%. Ориентация волокон в матрице была следующей: хаотичной; параллельно направлению распространения падающей на образец электромагнитной волны; параллельно  $E$ -составляющей волны; параллельно  $H$ -составляющей волны и под углом  $45^\circ$  к  $E$ -составляющей.

Измерения основных электромагнитных параметров проводились на длине волны  $3,2 \text{ см}$  волноводным методом с полным заполнением сечения волновода исследуемым образцом (метод и установка для измерений описаны выше). В волновод помещался образец размером  $20 \times 30 \times 5 \text{ мм}$ . Результаты экспериментов представлены в табл. 2.

Из приведенных экспериментальных результатов видно, что степень упорядоченности волокон магнитного наполнителя в диэлектрической матрице влияет на поглощающие свойства материала, причем изменяются как диэлектрические, так и магнитные потери. Контролируя расположение волокон, можно создавать радиопоглощающие материалы с заданными свойствами. Лучшими поглощающими

способностями среди вышеописанных образцов обладает материал, синтезированный на основе волокнистого никеля, ориентированного в магнитном поле вдоль направления распространения волны.

Таким образом, волокнистые наполнители из сплавов ферромагнитных металлов, полученных непосредственно в процессе химического восстановления, обладают рядом особых свойств, расширяющих возможности оптимизации радиопоглощающих материалов. Дальнейшие исследования в этом направлении позволят предложить новые композиционные материалы – поглотители электромагнитного СВЧ-излучения, в частности РПМ с заданными свойствами.

Были проведены также исследования электромагнитных параметров композиционных материалов на основе полимерной (этиленовой) матрицы. Измерения проводились в частотном диапазоне 1,8 – 8 ГГц. Результаты представлены на рис. 10.

Полученные данные соответствуют результатам работы [15], где показано, что в большинстве случаев подобные зависимости имеют нелинейный характер. Наблюдается резкое увеличение параметров при достижении порога перекалляции. Эта тенденция наиболее ярко выражена для мнимой части диэлектрической проницаемости. Отсюда можно сделать вывод, что описанные композиционные материалы являются перспективными для создания радиопоглощающих покрытий. Особенность этих материалов в том, что при не очень высоком значении диэлектрической проницаемости они имеют значение  $\mu = (1,1-1,25)$ . Такое свойство полезно для лучшего согласования радиопоглощающего покрытия со свободным пространством без использования сложной, сильно неоднородной поверхности поглощающего материала.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований разработаны методы, алгоритмы и программы для расчета эффективных электродинамических параметров композиционных материалов, представляющих собой однородные или неоднородные диэлектрические матрицы, в которых периодически или стохастически диспергированы произвольные по геометрии, внутренней структуре и материалному составу частицы.

Численно исследованы эффективные электродинамические параметры различных композиционных материалов.

Установлена возможность управления электродинамическими свойствами композиционных материалов за счет фокусировки электромагнитного поля в малых пространственных областях между частицами дисперсной фазы композиционного материала.

Изучена физическая природа магнитных и киральных свойств композиционных материалов. Анализ результатов численного исследования микродисперсных композитов с нерегулярным объемным распределением частиц позволил дать физическую интерпретацию эффекта аномально высокого поглощения электромагнитного излучения.

Созданы экспериментальные установки и методики для измерения электродинамических параметров композитов и исследования влияния СВЧ-излучения раз-

личной мощности на протекание физико-химических процессов в композиционных материалах и структурно неоднородных средах.

Экспериментально исследованы электродинамические свойства мелкодисперсных металлосодержащих композитов в виде эпоксидных и полимерных матриц с диспергированными в них волокнами никеля и кобальта.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Maly S. V.* // *Mathematical Methods in Electromagnetic Theory: Proc. of VI International Conf., Lviv, September 10-13, Lviv 1996.* P. 490.
2. *Малый С. В., Кухарчик П. Д.* // *Вестн. Белорус. ун-та. Сер. 1.* 1999. № 3.
3. *Кухарчик П. Д., Малый С. В.* // *Докл. НАН Беларуси.* 2000. Т. 44, № 1. С. 50.
4. *Никольский В. В., Никольская Т. И.* *Декомпозиционный подход к задачам электродинамики.* М., 1983.
5. *Алштейн Н., Галиндо В., Ву Ч.* *Теория и анализ фазированных антенных решеток.* М., 1974.
6. *Nicolson C. N., Ross G. F.* // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement.* 1970. V. IM-19. № 4. P. 377.
7. *Freeman Mark S., Nottenburg Richard N., DuBow Joel B.* // *J. Phys. E: Sci. Instrum.* 1979. V. 12. P. 899.
8. *Костин М. В., Шевченко В. В.* // *Радиотехника и электроника.* 1988. Т. 33. № 7. С. 1526.
9. *Завьялов А. С., Дунаевский Г. Е.* *Измерение параметров материалов на сантиметровых волнах.* Томск, 1985.
10. *Курило В. С., Полицук Н.Н.* // *Сб. науч. тр. Вып 2. Радиофизика и электроника БГУ.* 1996. С. 20.
11. *Кухарчик П. Д., Свиридов В. В., Демидчик В. И. и др.* // *Сб. науч. тр. БГУ: Новые материалы.* БГУ. Мн., 1996. С. 32.
12. *Kukharchik P. D., Maly S. V., Kurilo V. S.* // *Radar and Wireless Communications: XIII Intern. Conf. on Microwaves, MIKON-2000, Invited papers. V. 3, Wroclaw, May 22-24, 2000.* Wroclaw, 2000. P. 156.
13. *Yamamoto T.* // *J. Mater. Sci. Soc. Jap.* 1990. V. 27, № 3. P. 153.
14. *Sviridov V. V., Shevchenko G. P., Susba A. S., Diab N. A.* // *J. Phys. Chem.* 1996. V. 100. P. 632.
15. *Boudida F., Beroual A., Brosseau C.* // *J. Appl. Phys.* 1998. V. 83. № 1. P. 425.