

**Способы управления дисперсией электромагнитных волн,  
распространяющихся в 3D-решетках ориентированных  
углеродных нанотрубок с магнитными наночастицами,  
в микроволновом диапазоне**

Г.С. Макеева<sup>1</sup>, О.А. Голованов<sup>2</sup>, Д.Н. Ширшиков<sup>2</sup>, Г.Г. Горлов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Пензенский государственный университет  
440026, Российская Федерация, г. Пенза  
ул. Красная, 40

<sup>2</sup> Филиал военной академии материально-технического обеспечения (г. Пенза)  
440005, Российская Федерация, г. Пенза-5  
ФВАМТО

Методом автономных блоков с каналами Флоке рассчитана управляемая магнитным полем частотная дисперсия электромагнитных волн, распространяющихся в анизотропных наноструктурных материалах на основе 3D-решеток углеродных нанотрубок с магнитными  $\text{Co}_{80}\text{Ni}_{20}$ -наночастицами (при различном числе инкапсулированных в углеродные нанотрубки магнитных наночастиц). Определены способы и эффективность управления дисперсией действием внешнего магнитного поля при изменении направления и величины вектора поля подмагничивания, взаимной ориентации постоянного и высокочастотного магнитных полей и их ориентации к оси углеродных нанотрубок, а также геометрии и периода решеток в микроволновом диапазоне.

*Ключевые слова:* углеродные нанотрубки, магнитные наночастицы, дисперсия, электромагнитные волны, автономные блоки, анизотропные наноструктурные материалы.

## Введение

Наноструктурные материалы на основе углеродных нанотрубок (УНТ) благодаря электронным свойствам УНТ играют важную роль в создании материалов для поглощения и экранирования электромагнитного излучения СВЧ [1; 2]. УНТ характеризуются высокими значениями удельной поверхностной проводимости и аспектного отношения размеров (длины и диаметра УНТ  $l/d$ ), они сильно анизотропны, и их характеристики (включая и электродинамические) отличаются в продольном и поперечном направлении УНТ [1]. Эти наноматериалы имеют достаточно высокую электропроводность при небольшом содержании УНТ (низкие пороги перколяции), кроме того, можно управлять пространственным распределением УНТ в матрице и тем самым регулировать электродинамические характеристики таких анизотропных наноматериалов, которые зависят от ориентации УНТ по отношению к направлению распространения волны.

В последние годы резко возрос интерес к получению и исследованию заполненных УНТ,

особенно перспективным представляется инкапсулирование ферромагнитных материалов [3; 4]. Магнитные фазы, инкапсулированные в УНТ, обладают высокой анизотропией, что позволяет стабилизировать магнитное упорядочение при воздействии термических флуктуаций в системах чрезвычайно уменьшенных размеров. Кроме того, заполненные магнитными металлами УНТ могут проявлять чрезвычайно высокую коэрцитивную силу.

В [3] представлены результаты исследований структурных и магнитных свойств ориентированных УНТ, заполненных магнитными наночастицами Fe. Комплексное изучение взаимодействия электромагнитного излучения СВЧ-диапазона с массивами вертикально ориентированных магнитнофункционализированных УНТ на подложке Si проведено в [4]. Показано, что исследуемые образцы обладают высокой эффективностью ослабления электромагнитного излучения в СМВ- и ММВ-диапазонах, что обусловлено их особыми свойствами, обеспечивающими высокую степень отражения излучения от электропроводящих (УНТ) и магнитных (железосодержащих фаз наполнителя) структурных элементов.

Для изучения микроволновых свойств и анализа характеристик анизотропных наноструктурных материалов, содержащих УНТ с магнитными наночастицами, необходимо использовать математическое моделирование электродинамического уровня строгости, базирующееся на решении уравнений Максвелла совместно с уравнениями движения в материальной среде.

## 1. Математическая модель

Формулировка краевой задачи электродинамики для структур, содержащих УНТ и системы магнитных наночастиц, состоит в следующем. Необходимо решить систему уравнений Максвелла:

$$\operatorname{rot} H(t) = \varepsilon_0 \varepsilon \frac{\partial \vec{E}(t)}{\partial t} + \sigma \vec{E}(t); \quad (1)$$

$$\operatorname{rot} E(t) = -\frac{\partial \vec{B}(t)}{\partial t}; \quad (2)$$

$$\vec{B}(t) = \vec{M}(t) + \mu_0 \vec{H}(t), \quad (3)$$

с соответствующими электродинамическими граничными условиями, дополненную уравнением движения вектора намагниченности в ферромагнетике с учетом обменного взаимодействия в форме Ландау-Лифшица [5]:

$$\frac{d\vec{M}(t)}{dt} = -\gamma(\vec{M}(t) \times \vec{H}_{\text{эф}}(t)) + \omega_r(\chi_0 \vec{H}(t) - \vec{M}(t)); \quad (4)$$

$$\vec{H}_{\text{эф}}(t) = \vec{H}(t) + \vec{H}_q(t); \quad (5)$$

$$\vec{H}_q(t) = q \nabla^2 \vec{M}(t). \quad (6)$$

Здесь  $\vec{E}(t)$ ,  $\vec{H}(t)$  – векторы напряженности электрического и магнитного полей;  $\vec{M}(t)$  – вектор намагниченности среды;  $\vec{B}(t)$  – вектор магнитной индукции;  $\vec{H}_{\text{эф}}(t)$  – суммарное эффективное поле, включающее  $\vec{H}_q(t)$  – поле обменного взаимодействия;  $\nabla$  – оператор Лапласа;  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость среды;  $\sigma$  – электропроводность среды;  $\varepsilon_0$ ,  $\mu_0$  – электрическая и магнитная постоянные;  $\gamma$  – гиромагнитное отношение;  $\omega_r$  – частота релаксации;  $\chi_0$  – статическая восприимчивость;  $q$  – константа обменного взаимодействия.

Электродинамическая модель волновых процессов в магнитных 3D-наноконкомпозитах строится на основе декомпозиционного подхода [6].

Геометрия задачи – направление распространения волнового процесса и модель анизотропного наноструктурного материала на основе

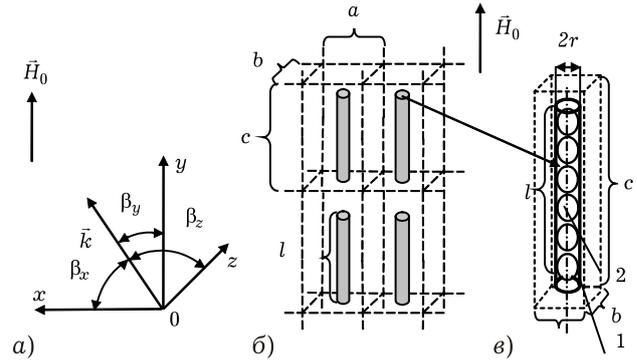


Рис. 1. Модель анизотропного наноструктурного материала на основе периодической 3D-решетки ориентированных углеродных нанотрубок с магнитными наночастицами: а) направление распространения волнового процесса с волновым вектором  $k$ ; б) периодическая 3D-наноструктура и ориентация внешнего постоянного магнитного поля  $H_0$ ; в) моделирование ячейки периодической 3D-наноструктуры автономным блоком с каналами Флоке (ФАБ): 1 – углеродные нанотрубки; 2 – магнитные наночастицы; а, б, с – геометрические размеры ячейки ФАБ

3D-решеток УНТ с магнитными наночастицами, который рассматриваем как квазипериодическую 3D-наноструктуру с геометрическими размерами ячейки а, б, с – показана на рис. 1.

Область анизотропного наноструктурного материала на основе периодической 3D-решетки ориентированных УНТ с магнитными наночастицами (рис. 1, б) расчленяется условными границами на подобласти – автономные блоки с каналами Флоке (ФАБ) [7], содержащие УНТ и магнитные наночастицы, инкапсулированные в УНТ (рис. 1, в). Сложная структура анизотропного наноструктурного материала требует определения дескриптора ФАБ (рис. 1, в), содержащего УНТ и магнитные наночастицы, инкапсулированные в УНТ (с различным числом наночастиц). Дескриптор (в линейном приближении в виде матрицы рассеяния  $\mathbf{R}$  или проводимости  $\mathbf{Y}$  [7]) ФАБ, содержащих УНТ и магнитные наночастицы, определяем из решения краевой задачи дифракции проекционным методом Галеркина [7].

Разработана математическая модель распространения электромагнитных волн в анизотропных наноструктурных материалах на основе периодических 3D-решеток ориентированных УНТ с магнитными наночастицами, базирующаяся на решении характеристического уравнения для определения постоянных распространения волн, включающего матрицу проводимости (дескриптор) ФАБ – элементарной ячейки периодической 3D-наноструктуры.

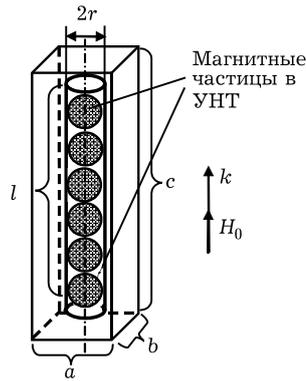
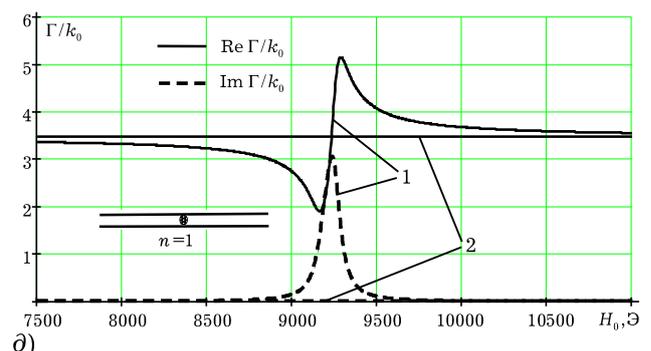
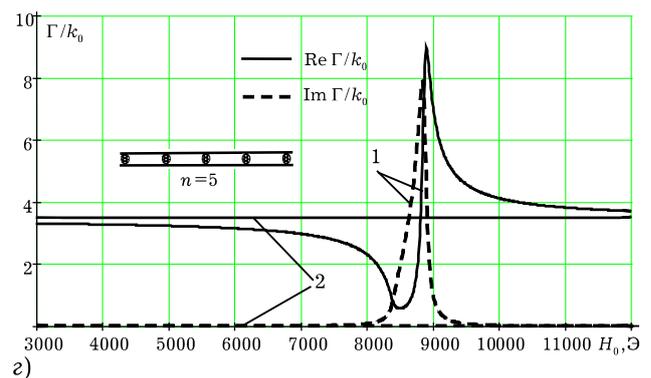
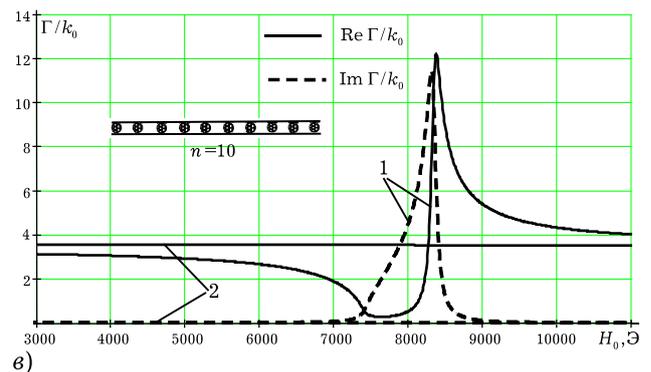
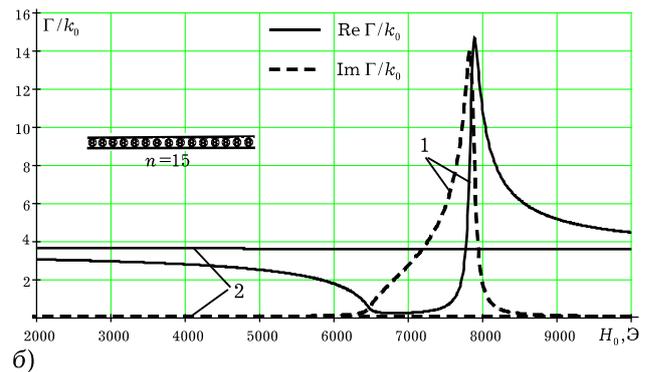
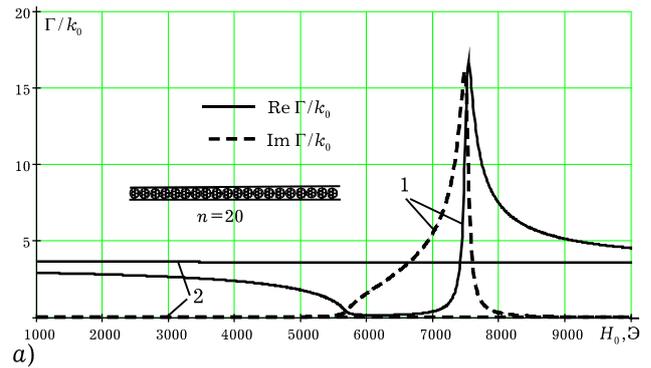


Рис. 2. Продольные волны: моделирование элементарной ячейки периодической 3D-наноструктуры автономным блоком с каналами Флоке (ФАБ);  $k$  – волновой вектор продольной волны основного типа;  $H_0$  – внешнее постоянное магнитное поле

## 2. Управление дисперсией волн в 3D-решетках УНТ с магнитными наночастицами изменением направления и величины вектора напряженности внешнего постоянного магнитного поля

На основе характеристического уравнения [8] с использованием разработанного вычислительного алгоритма расчета матрицы проводимости ФАБ получены результаты электродинамического расчета действительной и мнимой частей комплексных коэффициентов распространения продольных (правополяризованной и левополяризованной) и поперечных (обыкновенной и необыкновенной) волн, распространяющихся в периодических 3D-решетках ориентированных УНТ с магнитными наночастицами (вектор поля подмагничивания направлен вдоль оси УНТ), в зависимости от величины внешнего постоянного магнитного поля при различном числе  $n$  ( $n = 20-1$ ) учитываемых в элементарной ячейке модели (ФАБ) магнитных наночастиц сферической геометрии, расположенных равномерно вдоль оси УНТ, на частоте  $f = 26$  ГГц.

Рис. 3. Зависимости действительной и мнимой частей комплексных коэффициентов распространения  $\Gamma_0$  правополяризованной и левополяризованной волн в периодических 3D-решетках ориентированных УНТ с различным числом  $n$  магнитных наночастиц от величины внешнего постоянного магнитного поля  $H_0$ : магнитные наночастицы  $\text{Co}_{80}\text{Ni}_{20}$  ( $2R = 19$  нм,  $4\pi M_s = 15356$  Гс,  $\alpha = 0,005$ ,  $\sigma = 1,0 \cdot 10^7$  Ом $^{-1} \cdot$  м $^{-1}$ ,  $A = 1,5 \cdot 10^{-9}$  Э); УНТ ( $\sigma = 2,5$  Ом $^{-1} \cdot$  м $^{-1}$ ,  $\epsilon = 62$ ,  $2r = 25$  нм,  $l = 500$  нм,  $\Delta = 3$  нм – толщина стенки);  $a = b = 76$  нм,  $c = 525$  нм;  $f = 26$  ГГц: а)  $n = 20$ , б)  $n = 15$ , в)  $n = 10$ , г)  $n = 5$ , д)  $n = 1$ ; кривые 1 – правополяризованная волна, кривые 2 – левополяризованная волна,  $n$  – количество магнитных наночастиц в УНТ,  $f = 26$  ГГц



### 2.1. Дисперсия продольных волн в 3D-решетках УНТ с магнитными наночастицами при изменении величины поля подмагничивания

Результаты электродинамического расчета действительной и мнимой частей комплексных коэффициентов распространения  $\Gamma_{\Sigma}^+$ ,  $\Gamma_{\Sigma}^-$  правополяризованной и левополяризованной волн (нулевой пространственной гармоники), распространяющихся в периодических 3D-решетках ориентированных УНТ с магнитными наночастицами с продольным подмагничиванием (рис. 2), в зависимости от величины напряженности внешнего постоянного магнитного поля  $H_0$  на частоте  $f = 26$  ГГц для решеток с различным числом  $n$  магнитных наночастиц в УНТ, учитываемых в элементарной ячейке модели – ФАБ (рис. 2), показаны на рис. 3,  $a-d$  для  $n = 20$ ,  $n = 10$ ,  $n = 5$ ,  $n = 1$ .

Магнитный 3D-наноконкомпозит (рис. 1) состоит из 3D-решетки УНТ (радиус УНТ  $2r = 25$  нм, длина УНТ  $l = 500$  нм) ( $\sigma = 2.5 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ ,  $\epsilon = 62$ ,  $\Delta = 3$  нм – толщина стенки; материал наночастиц  $\text{Co}_{80}\text{Ni}_{20}$  ( $4\pi M_s = 15356$  Гс,  $\alpha = 0,005$ ,  $\sigma = 1,0 \cdot 10^7 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ ,  $A = 1,5 \cdot 10^{-9}$  Э); период решетки  $a = b = 76$  нм,  $c = 550$  нм).

Как следует из результатов моделирования (рис. 3,  $a-d$ ), положение резонансного пика мнимой части комплексного коэффициента распространения (максимум резонансного поглощения) правополяризованной волны определяется значениями напряженности внешнего постоянного магнитного поля, отличающимися от ФМР в гиромагнитной среде, соответствующими собственной частоте ФМР однородного типа прецессии намагниченности решетки УНТ с магнитными наночастицами, и которая изменяется при изменении числа  $n$  капсулированных магнитных наночастиц и формы магнитных нановключений в УНТ.

### 2.2. Дисперсия поперечных волн в 3D-решетках УНТ с магнитными наночастицами при изменении величины поля подмагничивания

Результаты электродинамического расчета действительной и мнимой частей комплексного коэффициента распространения  $\Gamma_0$  поперечной (квазинеобыкновенной) волны (нулевой пространственной гармоники  $n = 0$ ), распространяющейся в периодических 3D-решетках ориентированных УНТ с магнитными наночастицами с поперечным подмагничиванием (рис. 4), в зави-

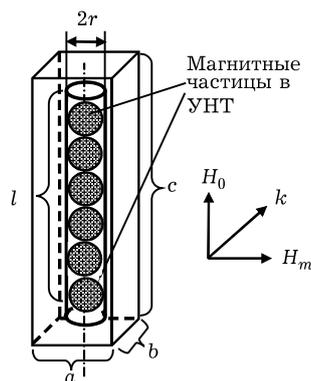
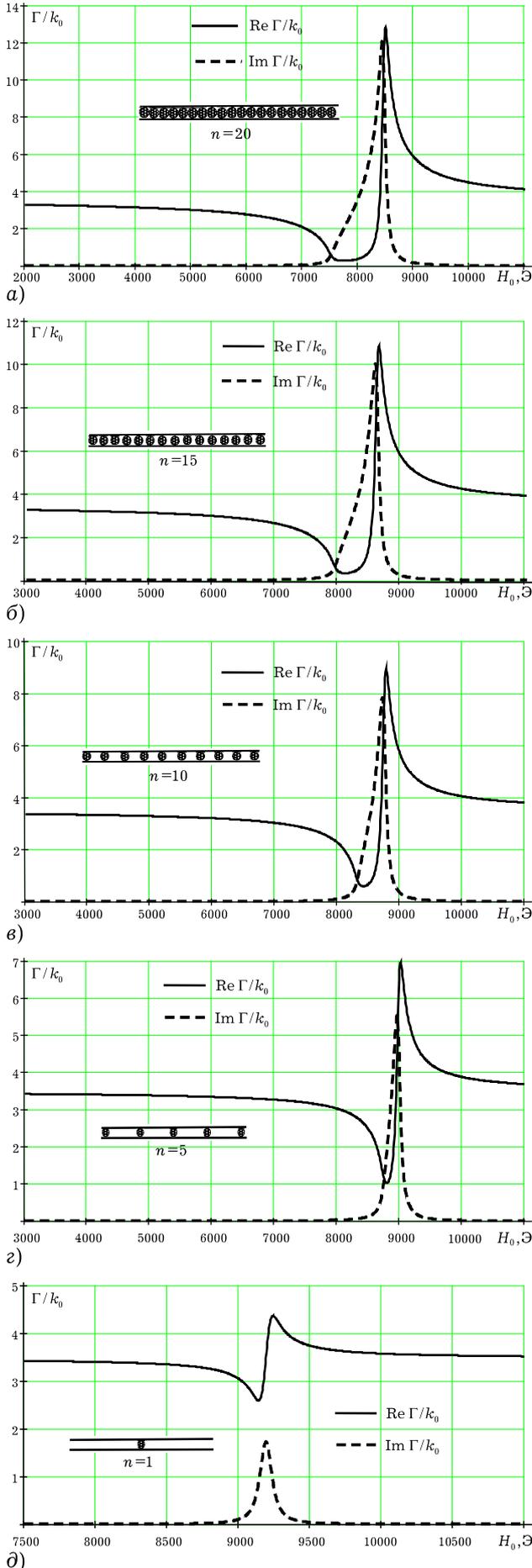


Рис. 4. Поперечные волны: моделирование элементарной ячейки периодической 3D-наноструктуры автономным блоком с каналами Флоке (ФАБ);  $k$  – волновой вектор поперечной волны основного типа;  $H_0$  – вектор напряженности внешнего постоянного магнитного поля;  $H_m$  – вектор напряженности магнитного поля волны

симости от величины напряженности внешнего постоянного магнитного поля  $H_0$  на частоте  $f = 26$  ГГц для решеток с различным числом  $n$  магнитных наночастиц в УНТ, учитываемых в элементарной ячейке модели – ФАБ (рис. 4), показаны на рис. 5,  $a-d$  для  $n = 20$ ,  $n = 15$ ,  $n = 10$ ,  $n = 5$ ,  $n = 1$ .

Как следует из результатов моделирования (рис. 5,  $a-d$ ), положение резонансного пика мнимой части комплексного коэффициента распространения (максимум резонансного поглощения) квазинеобыкновенной волны определяется значениями напряженности внешнего постоянного магнитного поля, отличающимися от поперечного ФМР в гиромагнитной среде и соответствующими собственной частоте ФМР однородного типа прецессии намагниченности решетки УНТ с магнитными наночастицами, и которая изменяется при изменении числа капсулированных магнитных наночастиц и формы магнитных нановключений в УНТ.

Развитый метод численного моделирования впервые позволяет установить закономерности изменения частотной дисперсии электромагнитных волн при изменении числа магнитных наночастиц в УНТ (учитываемых в элементарной ячейке модели) при сокращении расстояния между ними до длины обменного взаимодействия. Результаты численного моделирования показывают, что магнитные взаимодействия при изменении числа капсулированных магнитных наночастиц и формы магнитных нановключений в УНТ могут быть способом изменения (модуляции) комплексной эффективной магнитной проницаемости 3D-наноконкомпозитов.



### 3. Управление собственными частотами ферромагнитного резонанса прецессии намагниченности 3D-решеток УНТ с магнитными наночастицами изменением геометрии нанорешеток

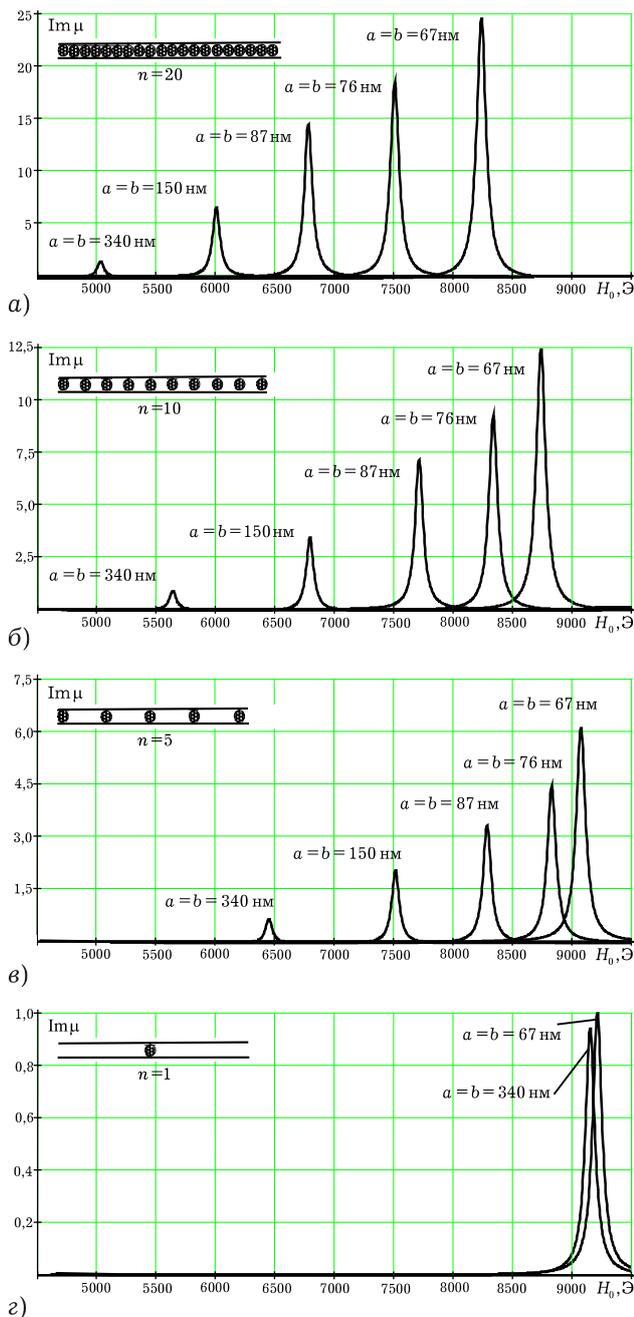
Расчетные зависимости мнимой части  $\text{Im}$  комплексной диагональной  $\mu^\Sigma$  компоненты тензора эффективной магнитной проницаемости магнитного 3D-нанокompозита (на основе периодических 3D-решеток ориентированных УНТ с магнитными наночастицами) с продольным подмагничиванием от величины постоянного магнитного поля  $H_0$  на частоте  $f = 26$  ГГц показаны на рис. 6, а-г для  $n = 20$ ,  $n = 10$ ,  $n = 5$ ,  $n = 1$ .

Расчетные зависимости мнимой части  $\text{Im}\mu_\perp$  комплексной поперечной эффективной магнитной проницаемости  $\mu_\perp$  магнитного 3D-нанокompозита (на основе периодической 3D-решетки ориентированных УНТ с магнитными наночастицами) с поперечным подмагничиванием от величины постоянного магнитного поля  $H_0$  на частоте  $f = 26$  ГГц показаны на рис. 7, а-г.

Кривые 1-5 на рис. 6, 7, а-г получены для решеток с различным периодом: кривые 1 -  $a = b = 340$  нм; 2 -  $a = b = 150$  нм, 3 -  $a = b = 87$  нм, 4 -  $a = b = 76$  нм, 5 -  $a = b = 67$  нм,  $c = 525$  нм - и иллюстрируют изменение собственной частоты ферромагнитного резонанса (ФМР) однородного типа прецессии намагниченности 3D-решеток УНТ с различным числом  $n$  магнитных наночастиц в УНТ (для  $n = 20$ ,  $n = 10$ ,  $n = 5$ ,  $n = 1$ ) в зависимости от периодичности (плотности упаковки) решетки.

Из результатов моделирования следует, что при изменении числа магнитных наночастиц  $n$  в УНТ ( $n = 20-1$ ) собственная резонансная частота ФМР однородного типа прецессии намагниченности решетки УНТ с высокой плотностью упаковки (при ориентации вектора поля подмагничивания вдоль оси УНТ) изменяется в пределах от резонансной частоты решетки магнитных нанопроволок [9] (при  $N = 20$  рис. 6, 7, а) до резо-

**Рис. 5.** Зависимости действительной и мнимой частей комплексного коэффициента распространения  $\Gamma_0$  квазиобыкновенной волны в периодических 3D-решетках ориентированных УНТ с различным числом  $n$  магнитных наночастиц от величины внешнего постоянного магнитного поля  $H_0$ : магнитные наночастицы  $\text{Co}_{80}\text{Ni}_{20}$  ( $2R = 19$  нм,  $4\pi M_s = 15356$  Гс,  $\alpha = 0,005$ ,  $\sigma = 1,0 \cdot 10^7$  Ом $^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ ,  $A = 1,5 \cdot 10^{-9}$  Э); УНТ ( $\sigma = 2,5$  Ом $^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ ,  $\epsilon = 62$ ,  $2r = 25$  нм,  $l = 500$  нм,  $\Delta = 3$  нм - толщина стенки);  $a = b = 76$  нм,  $c = 525$  нм;  $f = 26$  ГГц: а)  $n = 20$ , б)  $n = 15$ , в)  $n = 10$ , г)  $n = 5$ , д)  $n = 1$

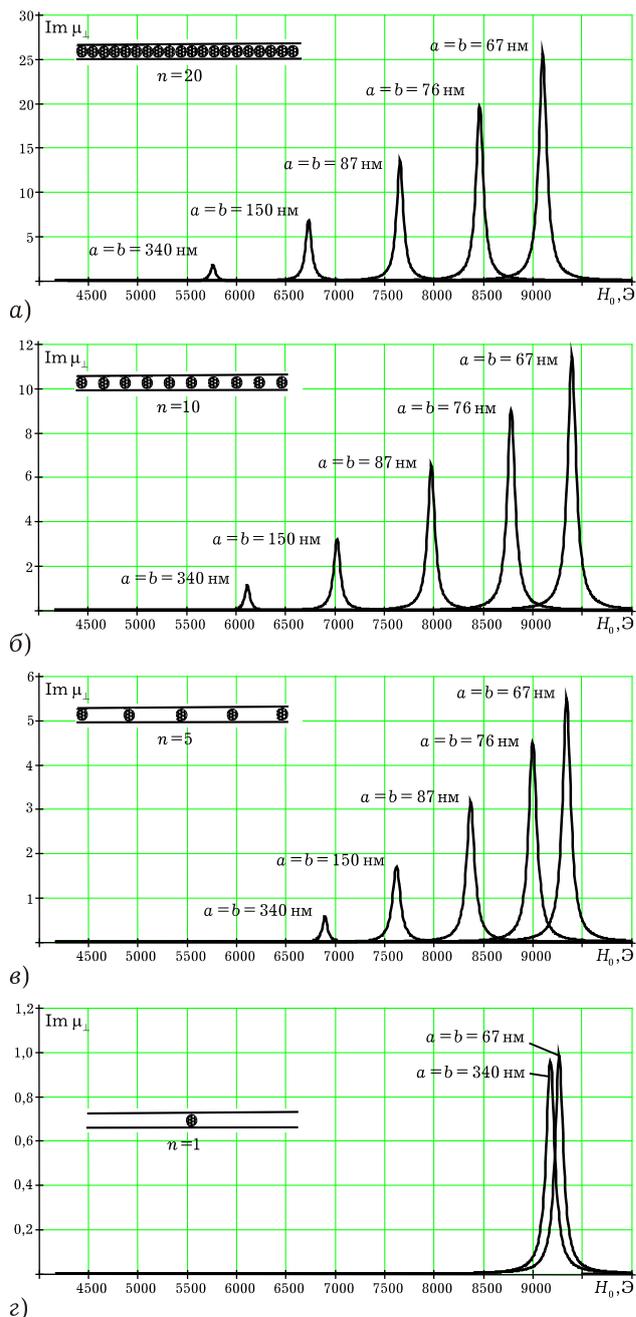


**Рис. 6.** Зависимости мнимой части  $\text{Im } \mu$  комплексной диагональной компоненты  $\mu$  тензора эффективной магнитной проницаемости магнитного 3D-нанокompозита (на основе периодической 3D-решетки ориентированных УНТ с магнитными наночастицами с продольным подмагничиванием) от величины постоянного магнитного поля  $H_0$  при изменении периодичности (плотности упаковки) решетки:  $f = 26$  ГГц: а)  $n = 20$ , б)  $n = 10$ , в)  $n = 5$ , г)  $n = 1$

нансной частоты магнитной наносферы [5] (при  $N = 1$  рис. 6, 7, г), равной частоте ФМР в сплошной ферромагнитной среде (при распространении как поперечных, так и продольных волн).

## Заключение

Впервые рассчитана управляемая магнитным полем частотная дисперсия и определены способы и эффективность управления дисперсией



**Рис. 7.** Зависимости мнимой части  $\text{Im } \mu_{\perp}$  комплексной поперечной эффективной магнитной проницаемости  $\mu_{\perp}$  магнитного 3D-нанокompозита (на основе периодической 3D-решетки ориентированных УНТ с различным числом  $n$  магнитных наночастиц с поперечным подмагничиванием) от величины постоянного магнитного поля  $H_0$  при изменении периодичности (плотности упаковки) решетки:  $f = 26$  ГГц: а)  $n = 20$ , б)  $n = 10$ , в)  $n = 5$ , г)  $n = 1$

электромагнитных волн, распространяющихся в анизотропных наноструктурных материалах на основе 3D-решеток ориентированных УНТ с наполнением магнитными наночастицами, действием внешнего магнитного поля (при изменении направления и величины вектора поля подмагничивания, взаимной ориентации постоянного и высокочастотного магнитных полей), а также при изменении формы магнитных нановключе-

ний при различном числе инкапсулированных в УНТ магнитных наночастиц, геометрии и периода решеток в миллиметровом диапазоне.

*Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, грант № 12-02-97025-р\_поволжье\_.*

### Список литературы

1. Дьячков П.Н. Углеродные нанотрубки: строение, свойства, применения. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006.
2. Carbon nanotubes for electromagnetic compatibility applications. electromagnetic compatibility (EMC) / E. Decrossas [et al.] // IEEE International Symposium. 6–10 Aug. 2012. Pittsburgh, PA. P. 428–433.
3. Резонансный характер взаимодействия многослойных углеродных нанотрубок с излучением миллиметрового диапазона волн / Л.Л. Вовченко [и др.] // Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии. Nanosystems, Nanomaterials, Nanotechnologies. 2011. Т. 9. № 4. С. 759–769.
4. Microwave absorption in nanocomposite material of magnetically functionalized carbon nanotubes / V.A. Labunov [et al.] // J. Appl. Phys. 2012. № 112. 024302.
5. Гуревич А.Г., Мелков Г.А. Магнитные колебания и волны. М.: Наука, 1994. 407 с.
6. Никольский В.В. Декомпозиционный подход к задачам электродинамики. М.: Наука, 1983. 297 с.
7. Голованов О.А., Макеева Г.С. Метод автономных блоков с магнитными нановключениями и каналами Флоке для математического моделирования магнитных наноструктур с учетом обмена и граничных условий // Радиотехника и электроника. 2009. Т. 54. № 11. С. 1421–1428.
8. Макеева Г.С., Голованов О.А. Математическое моделирование распространения электромагнитных волн в наноструктурированных гиромангнитных средах методом автономных блоков с магнитными нановключениями и каналами Флоке // Радиотехника и электроника. 2009. Т. 54. № 12. С. 1455–1459.
9. Макеева Г.С., Голованов О.А. Дифракция электромагнитных волн на решетках магнитных нанопроволок и геометрические, размерные эффекты в терагерцовом диапазоне // Радиотехника и электроника. 2010. Т. 55. № 2. С. 168–174.

---

## The control methods of tuning of dispersion of electromagnetic waves propagating in 3D-arrays of carbon nanotubes with magnetic nanoparticles at microwave frequencies

*G.S. Makeeva, O.A. Golovanov, D.N. Shirshikov, G.G. Gorlov*

By using numerical method of autonomous blocks with Floquet channels (FAB) the frequency dispersion of electromagnetic waves propagating in anisotropic nanostructured materials based on 3D-arrays of carbon nanotubes with magnetic  $\text{Co}_{80}\text{Ni}_{20}$  nanoparticles for several values of the filling factor of encapsulated magnetic nanoparticles, tuned by magnetic field, was calculated. The control methods and the efficiency of tuning of dispersion by external bias magnetic field (changing of the direction and the value of the DC bias magnetic field at different orientation with respect to CNT axis and *rf* magnetic field), depending on the geometry and the period of arrays at microwave frequencies.

*Keywords:* carbon nanotubes, magnetic nanoparticles, dispersion, electromagnetic waves, autonomous blocks, anisotropic nanostructured materials.

---