

Поглощение микроволновой энергии композитами на основе магнитных коллоидовС. А. Боженко^{1,*}, С. Д. Туркин², А. Р. Закиян², Л. М. Кульгина²¹Северо-Кавказский федеральный университет,
физико-технический факультет, кафедра экспериментальной физики²Северо-Кавказский федеральный университет,
физико-технический факультет,
кафедра теоретической и математической физики
Россия 355017, Ставрополь, Пушкина, д. 1

(Поступила в редакцию 10.06.2025; подписана в печать 30.10.2025)

Экспериментально исследованы спектры поглощения и отражения композитов, синтезированных на основе магнитных жидкостей с добавлением проводящих немагнитных частиц, при воздействии постоянного магнитного поля. Измерения проводились на основной моде ТЕМ коаксиального волновода в частотном диапазоне 10–18 ГГц. Для интерпретации полученных результатов проведено численное моделирование исследуемой системы в приближении эффективной среды методом конечных элементов.

PACS: 75.75.-c, 75.50.Mm, 52.25.Os УДК: 538.9

Ключевые слова: электромагнитное излучение, композиционные материалы, проводящий наполнитель, спектр поглощения.

ВВЕДЕНИЕ

В области радиофизики значительный интерес представляют функциональные материалы, обладающие высоким коэффициентом поглощения электромагнитного излучения. К таким материалам относятся, например, твердотельные композиционные материалы на основе углеродных абсорбентов (графит, углеродные нанотрубки, графен и др.) [1–3]. Однако, наличие высоких диэлектрических свойств приводит к повышению коэффициента отражения, что негативно сказывается на поглощающих свойствах материала. Исключение указанного недостатка достигается путем синтеза материалов с выраженной субволновой структурой, приводящей к снижению отражающих свойств абсорбера [4–9]. Альтернативным способом снижения коэффициента отражения является варьирование волнового сопротивления методом балансировки магнитных и диэлектрических свойств исследуемого материала [10, 11]. Вышесказанное относится по большей части к твердотельным и порошкообразным материалам. Жидкие абсорберы электромагнитного излучения в практической радиофизике и технике применяются значительно реже. Однако, в последнее время в микроволновой области привлекают внимание жидкие композиционные материалы на основе феррожидкостей и воды — магнитодиэлектрические эмульсии [12]. Такие среды сочетают в себе сразу несколько свойств присущих отдельным твердотельным материалам. С другой стороны, в магнитных эмульсиях феррожидкость является управляющей средой по контролю микрогеометрии образца, что позволяет в реальном времени управлять параметрами структуры при помощи внешних силовых полей. Помимо магнитодиэлек-

трических эмульсий в коллоидной гидродинамике распространены композиты феррожидкости и твердотельного немагнитного проводящего наполнителя (микрочастицы бронзы, алюминия, графита и др.). Такие среды в низкочастотной области переносных электромагнитных полей демонстрируют уникальные магнитодиэлектрические свойства, обусловленные образованием цепочек из структур немагнитных частиц под воздействием внешнего магнитного поля [13–15]. Данные композиты, содержащие в себе проводящие микрочастицы, могут представлять интерес и в микроволновой области исследований. В связи с вышесказанным, в данной работе проведены исследования коэффициента поглощения микроволнового излучения композиционными средами на основе феррожидкостей с немагнитным проводящим наполнителем. Исследования проведены при воздействии постоянного внешнего магнитного поля.

1. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В данной работе на основе магнитного коллоида с концентрацией дисперсной фазы 7% и плотностью 1225 кг/м³ получен композит путем добавления микрочастиц алюминиевой пудры со средним диаметром 60 мкм (рис. 1, а). При добавлении немагнитных проводящих частиц микронного размера в магнитную жидкость образуются так называемые магнитные дырки, средний диаметр которых на несколько порядков превышает диаметр частиц магнетита (около 10 нм). Таким образом магнитный коллоид можно рассматривать как сплошную среду с эффективными параметрами ввиду малости частиц твердой фазы относительно частиц наполнителя.

Структурная организация магнитного композита сильно подвержена воздействию внешнего магнитного

* s.semyonovaa@yandex.ru

поля (рис. 1, б). При этом частицы проводящего наполнителя начинают выстраиваться в цепочечные структуры, направление которых совпадает с силовыми линиями приложенного поля. На рис. 2 изображена схе-

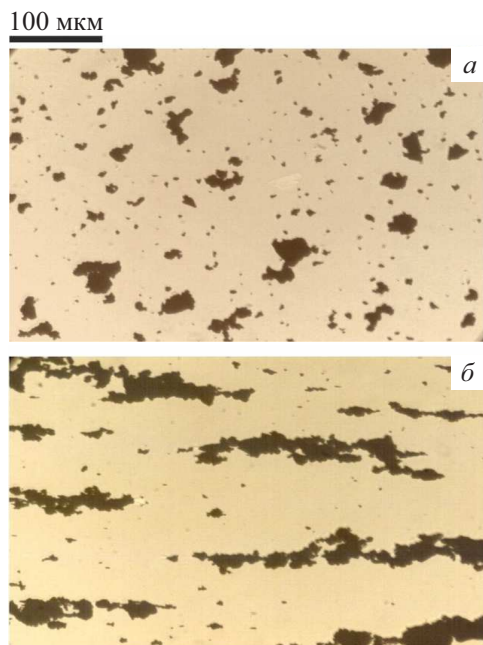


Рис. 1. Фотография исследуемого образца (*а* — внешнее магнитное поле отсутствует, *б* — во внешнем магнитном поле напряженностью 24 кА/м)

ма измерительной ячейки, которая представляет собой отрезок коаксиального волновода, заполненного исследуемым образцом. Образец ограничен с двух сторон фторопластовыми вставками, препятствующими растеканию жидкости и фиксирующими центральный проводник. Ячейка находилась в однородном магнитном поле напряженностью \mathbf{H}_0 , создаваемом системой катушек Гельмгольца. Намагничивающая система расположена так, что вектор \mathbf{H}_0 перпендикулярен центральному проводнику ячейки и, соответственно, направлению распространения электромагнитных волн. Исследования проводились на основной моде ТЕМ (Transverse Electromagnetic) коаксиального волновода в диапазоне частот 10–18 ГГц. Возбуждение электромагнитных волн и измерение S -параметров матрицы рассеяния осуществлялось при помощи векторного анализатора цепей (ВАЦ) «Микран Р4226/5». Расчет коэффициента поглощения осуществлялся на основании матрицы диссипативных потерь \mathbf{Q} , связанной с матрицей рассеяния \mathbf{S} следующим соотношением [16]:

$$\mathbf{Q} = \mathbf{I} - \mathbf{S}^{\mathbf{T}*} \mathbf{S}, \quad (1)$$

где $\mathbf{S}^{\mathbf{T}*}$ — эрмитово-сопряженная матрица, \mathbf{I} — единичная матрица. Таким образом, экспериментальное исследование сводится к измерению S -параметров матрицы рассеяния четырехполюсника. Так как при измерении ВАЦ возбуждает цепь только со стороны одной

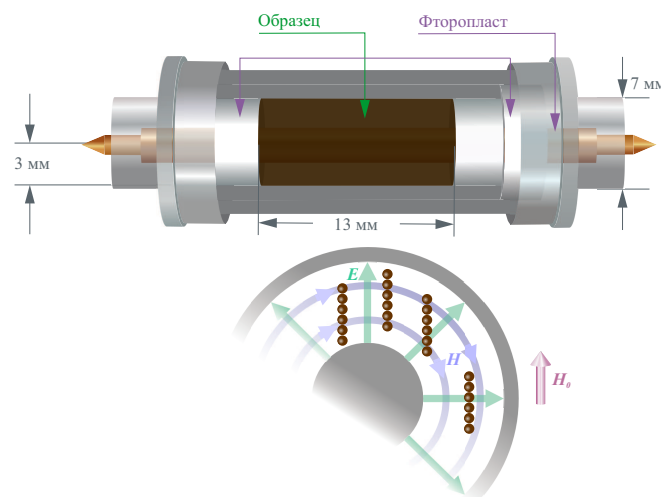


Рис. 2. Схема измерительной ячейки

пары полюсов, то на основании уравнения (1) потери в системе для прямой волны однозначно определяются величиной Q_{11} :

$$Q_{11} = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2 \quad (2)$$

и, соответственно, для обратной волны:

$$Q_{22} = 1 - |S_{22}|^2 - |S_{12}|^2. \quad (3)$$

С физической точки зрения Q_{11} и Q_{22} представляют собой коэффициенты поглощения по мощности. Полное заполнение образцом поперечного сечения волноводной линии передачи исключает проявление невязимных гиротропных эффектов и измерительную систему можно считать симметричной, $Q_{11} = Q_{22}$. Соответственно и коэффициент поглощения в дальнейшем обозначен Q .

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Установлено, что формирование цепочечной структуры из проводящих частиц под воздействием внешнего магнитного поля увеличивает коэффициент поглощения микроволновой энергии. На рис. 3 представлены зависимости коэффициента поглощения от частоты электромагнитного излучения при различных значениях напряженности внешнего магнитного поля. Объемная доля проводящих частиц — 3.2%. Из рисунка видно, что магнитное поле приводит к увеличению поглощательной способности материала на всем спектре частот. Можно заметить, что на экспериментальных кривых 1–3 наблюдаются ярко выраженные максимумы, обусловленные интерференцией при отражении электромагнитных волн от слоистой системы измерительной ячейки. При дальнейшем увеличении напряженности магнитного поля наблюдается иной ха-

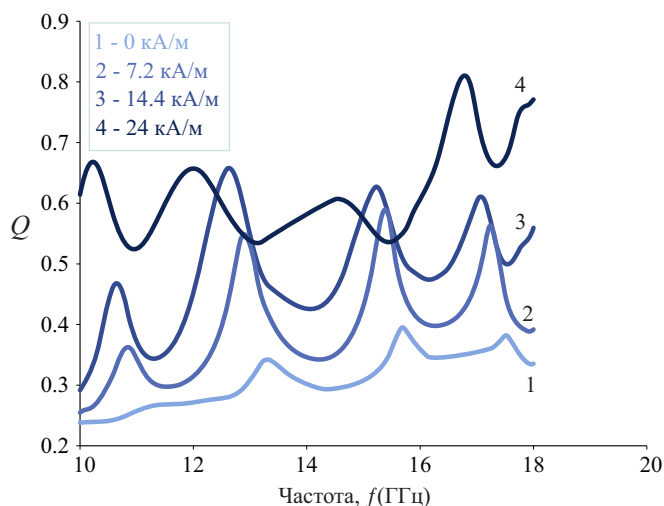


Рис. 3. Экспериментальные зависимости коэффициента поглощения от частоты излучения при разном значении напряженности внешнего магнитного поля. Объемная доля проводящих частиц — 3.2%

рактер зависимости (кривая 4), не имеющей интерференционных максимумов. Для интерпретации данных результатов ниже проведено математическое моделирование измерительной ячейки, содержащей феррокомпозит. Наиболее интересным является экспериментальное исследование зависимостей коэффициента поглощения от частоты электромагнитного излучения при фиксированной напряженности внешнего магнитного поля — 14.4 кА/м (рис. 4, а). Увеличение концентрации проводящего наполнителя повышает эффективную проводимость всего материала и, как следствие, — поглощательную способность. При исследовании спектра отражения данного образца (с концентрацией проводящего наполнителя 9.1%), можно сказать, что он обладает, также более низкими отражательными свойствами (рис. 4, б). Для более детального анализа наблюдаемых закономерностей проведено экспериментальное исследование коэффициента поглощения от напряженности внешнего магнитного поля при различных концентрациях проводящего наполнителя. Частота электромагнитного излучения — 10 ГГц (рис. 5). Из рисунка видно, что для образцов №1 и №2 наблюдается монотонное увеличение коэффициента поглощения, в то время как для образцов №3 и №4 — максимум. Влияние магнитного поля на композиты приводит к формированию более высоких цепочечных структур, высота которых также зависит от концентрации проводящего наполнителя (чем больше объемная доля проводящих частиц, тем более высокие образуются цепочки). Однако, в окрестности напряженности внешнего магнитного поля 14.4 кА/м, коэффициент поглощения для образцов с концентрациями 9.1% и 6.3% меньше, чем для образцов с более низкими концентрациями. Магнитное поле напряженностью больше 14 кА/м формирует цепочки, длина которых соизмерима с поперечным

сечением измерительной ячейки. Следовательно, снижение поглощающей способности высококонцентрированных композитов есть результат проявления ограниченной геометрии измерительной системы. Это обстоятельство проявляет себя аналогичным образом, как и случае экспериментальной кривой 4 на рис. 1.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ и интерпретация полученных экспериментальных результатов проведены на основе численного решения волнового уравнения (4) электромагнитного поля в частотной области (10–18 ГГц) методом конечных элементов. Физические свойства исследуемого образца описываются в приближении эффективной среды. Корректное моделирование в реальных масштабах измерительной системы не представляется возможным вследствие огромного количества микрочастиц алюминиевого порошка. Еще одним обстоятельством, связанным с невозможностью моделирования реальных наблюдаемых процессов, является быстрая седиментация частиц под действием силы тяжести. В отсутствие магнитного поля частицы практически сразу оседают на стенку коаксиального волновода, занимая при этом малый объем. Воздействие магнитного поля на композиты приводит к выстраиванию частиц в цепочки, в результате чего наблюдается поднятие первоначально осевшего слоя на некоторую высоту. Исследование данного слоя в приближении модели среды с эффективными параметрами позволило объяснить наблюдаемые закономерности на качественном уровне. Так как во внешнем магнитном поле в слое композита формируется структура с выделенной осью анизотропии, то соответственно в волновом уравнении

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu_0 \mu} (\nabla \times \mathbf{E}) \right) - \omega^2 \varepsilon_0 \varepsilon \mathbf{E} = 0 \quad (4)$$

магнитную и диэлектрическую проницаемости можно представить в виде диагональных тензоров:

$$\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{zz} \end{pmatrix}; \quad (5)$$

$$\mu = \begin{pmatrix} \mu_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \mu_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{zz} \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Здесь μ и ε — диэлектрическая и магнитная проницаемости вакуума; ω — циклическая частота колебаний электромагнитного поля. Эффективные параметры сплошной среды определяются в соответствии с формулами Вагнера [17]:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_e \left(1 + \frac{(\varepsilon_i - \varepsilon_e)\theta}{\varepsilon_e + N_{ij}(\varepsilon_i - \varepsilon_e)(1 - \theta)} \right) \quad (7)$$

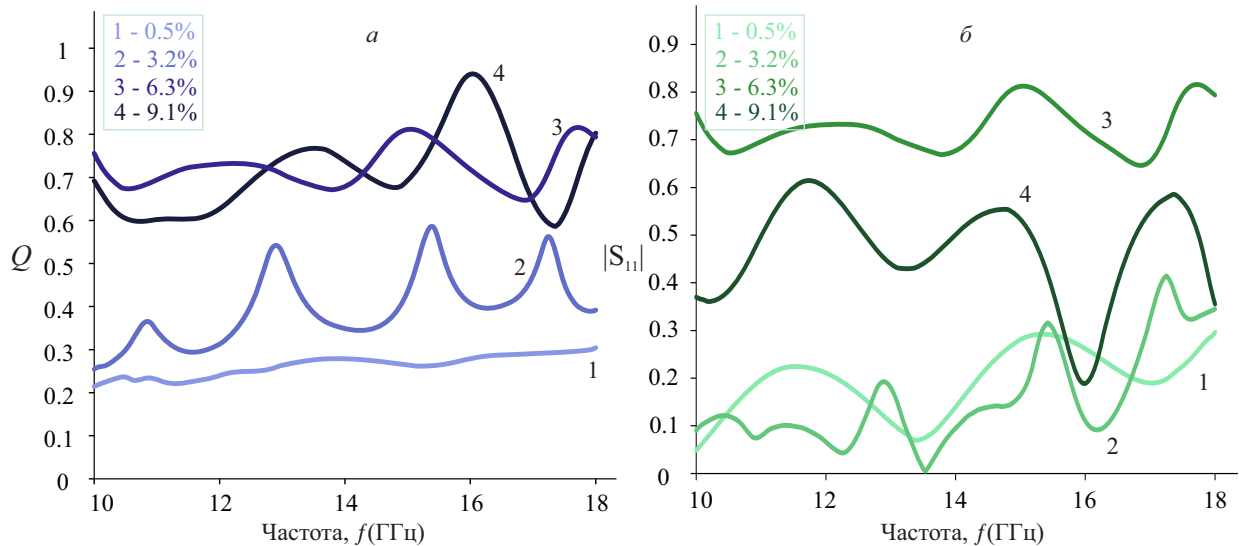


Рис. 4. *a* — экспериментальные зависимости коэффициента поглощения от частоты излучения при разных концентрациях проводящего наполнителя; *b* — экспериментальные зависимости коэффициента отражения от частоты излучения при различных концентрациях проводящего наполнителя. Напряженность внешнего магнитного поля — 14.4 кА/м

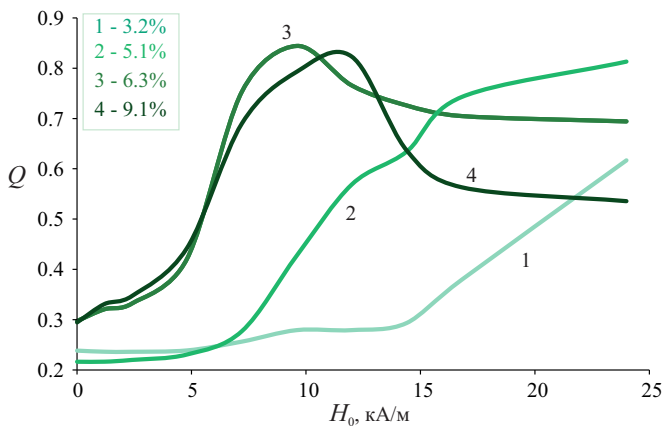


Рис. 5. Экспериментальные зависимости коэффициента поглощения от напряженности внешнего магнитного поля при разных концентрациях проводящего наполнителя. Частота электромагнитного излучения — 10 ГГц

$$\mu_{ij} = \mu_e \left(1 + \frac{(\mu_i - \mu_e)\theta}{\mu_e + N_{ij}(\mu_i - \mu_e)(1 - \theta)} \right) \quad (8)$$

где θ — объемная концентрация дисперсной фазы; ε_i и μ_i — диэлектрическая и магнитная проницаемости дисперсной фазы; ε_e — диэлектрическая проницаемость дисперсной среды; μ_e — магнитная проницаемость дисперсной среды; N_{ij} — фактор формы вытянутого эллипсоида в различных направлениях; индекс ij в установленной системе координат принимает значения — xx , yy , zz .

Стоит отметить, что уравнения (7) и (8) используются для определения эффективных параметров магнитных эмульсий с малым межфазным натяжением. В отличие от формирования цепочечных структур из твердых

частиц, капли эмульсии с малым межфазным натяжением образуют форму вытянутого эллипсоида вращения вдоль направления внешнего магнитного поля. Соответственно, для применимости формул (7) и (8) в данном случае, цепочечные структуры аппроксимируются эллипсоидом вращения как показано на рис. 6.

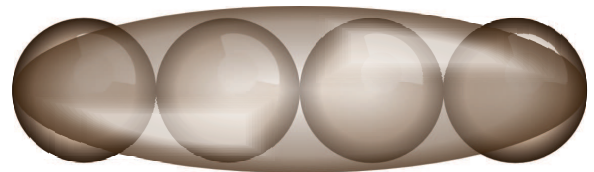


Рис. 6. Аппроксимация цепочечной структуры вытянутым эллипсоидом

Фактор формы эллипсоида вращения вдоль его большой полуоси в таком случае можно выразить через число сферических частиц n :

$$N_{ij} = \frac{1 - e^2}{2e^3} \left(\ln \left(\frac{1 + e}{1 - e} \right) - 2e \right), \quad (9)$$

где e — эксцентриситет эллипсоида. Диэлектрическая проницаемость алюминиевого порошка рассчитывалась по известной формуле:

$$\varepsilon_i = \varepsilon_a - i \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0}, \quad (10)$$

где $\varepsilon_a = 1.7$, а $\sigma = 37.7 \times 10^6$ См/м.

Высокочастотная магнитная восприимчивость рассчитывалась в приближении ансамбля невзаимодей-

ствующих изотропных частиц [18]:

$$\chi = \frac{\varphi M_s L(\delta)}{H_0} \frac{\omega_H^2(1 + \eta) + i\eta\omega\omega_H}{\omega_H^2(1 + \eta^2) - \omega^2 + 2i\eta\omega\omega_H}, \quad (11)$$

где φ — объемная концентрация твердой фазы ферромагнитности; $M_s = 477$ кА/м — намагниченность насыщения твердого магнетика; $\omega_H = gH$ — приведенная частота; g — гиромагнитное отношение электрона; $L(\delta)$ — функция Ланжевена; δ — параметр функции Ланжевена:

$$\delta = \frac{\mu_0 M_s V}{kT} H_0; \quad (12)$$

k — постоянная Больцмана; T — температура; V — объем магнитной частицы ферромагнитности;

$$\eta = \xi \left(\frac{1}{L(\delta)} - \frac{1}{\delta} \right); \quad (13)$$

$\xi = 0.01$ — параметр затухания [18]. Для повышения оптимизации рассматриваемой модели металлические стенки измерительной ячейки заменяются бесконечно тонкими при соблюдении специальных граничных условий [19]:

$$\sqrt{\frac{\mu_0 \mu}{\varepsilon_0 \varepsilon - \frac{ic}{\omega}}} \mathbf{n} \times \mathbf{H} + \mathbf{E} - (\mathbf{n} \cdot \mathbf{E}) \mathbf{n} = (\mathbf{n} \cdot \mathbf{E}_s) \mathbf{n} - \mathbf{E}_s. \quad (14)$$

На рис. 7 представлены экспериментальные и теоретические зависимости коэффициента поглощения от частоты электромагнитного излучения. Теоретические зависимости (кривые 1,3) показаны при различном значении числа частиц в цепочке. Экспериментальные зависимости (кривые 2,4) показаны при различном значении напряженности магнитного поля. Во-первых, сравнивается эксперимент при отсутствии магнитного поля и теоретический расчет при отсутствии цепочек. Во-вторых, эксперимент с напряженностью магнитного поля 24 кА/м сравнивается с теоретическим расчетом с 30 частицами в цепочке. Выбор значений 0 и 24 кА/м обусловлен невозможностью определения зависимости среднего числа частиц в цепочке от напряженности внешнего магнитного поля, поэтому сначала рассматривается одиночная частица, затем очень длинная цепочка, состоящая из 30 частиц. Из рисун-

ка видно, что эффекты, которые проявляются при исследовании поглощения микроволновой энергии композициями на основе магнитных коллоидов, качественно описываются моделью сплошной среды. Расхождение экспериментальных и теоретических зависимостей связано с тем, что модель эффективной среды не учитывает взаимное влияние проводящих частиц друг на друга. Такая модель также не учитывает рассеяние электромагнитной энергии на цепочечных структурах, что вносит определенный вклад в изменение спектра поглощения. Объяснение более низкого коэффициента поглощения и коэффициента отражения связано с изменением эффективной геометрии линии передачи и соответствующей геометрией силовых линий электромагнитного поля.

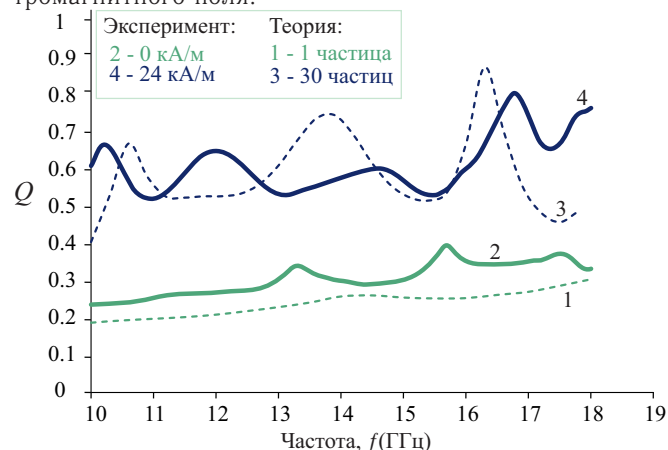


Рис. 7. Зависимость коэффициента поглощения от частоты излучения. Кривые 1, 3 — теоретический расчет для 1 и 30 частиц в цепочке соответственно. Кривые 2, 4 — экспериментальные данные, полученные при напряженности внешнего магнитного поля 0 и 24 кА/м соответственно

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных экспериментальных и теоретических исследований коэффициентов поглощения и отражения, установлено, что в качестве высокопоглощающих материалов в диапазоне СВЧ могут быть использованы композиционные материалы с добавлением микрочастиц алюминиевой пудры. Моделирование волнового электромагнитного поля в приближении модели эффективной среды позволило описать некоторые наблюдаемые особенности формирования спектра поглощения композиционного материала.

- [1] Pang H., Duan Y., Huang L. et al. // *Composites Part B: Engineering*. **224**. 109173 (2021).
- [2] Chen C., Xi J., Zhou E. et al. // *Nano-Micro Letters*. **10**. 26 (2018).
- [3] Zhong J., Jia K., Pu Z., Liu X. // *J. Electron. Mater.* **45**, N 11. 5921 (2016).

- [4] Chen Z., Xu C., Ma C. et al. // *Adv. Mater.* **25**. 1296 (2013).
- [5] Zhang Y., Huang Y., Zhang T. et al. // *Adv. Mater.* **27**. 2049 (2015).
- [6] Liu J., Wang Z., Rehman S., Bi H. // *RSC Adv.* **7**. 53104 (2017).

- [7] Zuo Y., Yao Z., Lin H. et al. // *J. Mater. Sci.* **54**. 11827 (2019).
[8] Tayebi P.A., Masoudpanah S.M., Adeli M., Jazirehpour M. // *Journal of Materials Research and Technology*. **13**. 548 (2021).
[9] Panigrahi R., Srivastava S.K. // *Sci. Rep.* **5**. 7638 (2015).
[10] Liu L., Duan Y., Liu S. et al. // *J. Magn. Magn. Mater.* **322**. 1736 (2010).
[11] Yan L., Wang J., Ye Y. et al. // *J. Alloys Compounds*. **487**. 708 (2009).
[12] Turkin S.D., Zakinyan A.R., Bozhenko S.A. // *Physica Scripta*. **99**. 045507 (2024).
[13] Meakin P., Skjeltorp A.T. // *Adv. Phys.* **42**. 1 (1993).
[14] Zhao W., Cheng R., Miller J.R. Mao L. // *Adv. Func. Mater.* **26**. 3916 (2016).
[15] Li X., Niu X.-D., Li Y., Chen M.-F. // *Phys. Fluids*. **30**. 040905 (2018).
[16] Хелзайн Дж. // Пассивные и активные цепи СВЧ. Москва: Радио и связь, 1981.
[17] Fricke H. // *J. Phys. Chem.* **57**. 934 (1953).
[18] Gekht R.S., Ignatchenko V.A., Raikher Yu.L., Shliomis M.I. // *J. Exp. Theor. Phys.* **43**. 677 (1976).
[19] COMSOL Multiphysics Reference Manual © 1998-2018 COMSOL.

Absorption of microwave energy by composites based on magnetic colloids

S. A. Bozhenko^{1,a}, S. D. Turkin², A. R. Zakinyan², L. M. Kulgina²

¹Department of Experimental Physics, Faculty of Physics and Technology, North Caucasus Federal University

²Department of Theoretical and Mathematical Physics, Faculty of Physics and Technology, North Caucasus Federal University
Stavropol 355017, Russia
E-mail: ^as.semyonovaa@yandex.ru

The absorption and reflection spectra of composites synthesized on the basis of magnetic liquids with the addition of conductive nonmagnetic particles under the influence of a constant magnetic field have been experimentally studied. The measurements were carried out on the main TEM mode of a coaxial waveguide in the frequency range of 10-18 GHz. To interpret the results obtained, numerical modeling of the system under study was carried out in the approximation of an effective medium using the finite element method.

PACS: 75.75.-c, 75.50.Mm, 52.25.Os.

Keywords: electromagnetic radiation, composite materials, conductive filler, absorption spectrum.

Received 10 June 2025.

Сведения об авторах

1. Боженко Софья Александровна — преподаватель; e-mail: s.semyonovaa@yandex.ru.
2. Туркин Сергей Дмитриевич — канд. физ.-мат. наук, доцент; e-mail: turkinsd@gmail.com.
3. Закинян Артур Робертович — доктор физ.-мат. наук, доцент, зав. кафедрой; e-mail: zakinyan.a.r@mail.ru.
4. Кульгина Людмила Михайловна — канд. тех. наук, доцент; e-mail: kulginakofe@mail.ru.