Научная статья
УДК 537.86
doi: 10.17223/29491665/8/9

Магнитные жидкости с управляемыми экранирующими характеристиками на основе магнетита и многослойных углеродных нанотрубок

Александра Андреевна Павлова[1], Валентин Иванович Сусляев[2], Евгений Юрьевич Коровин[3], Дмитрий Артурович Мазилов[4]

[1, 2, 3, 4] *Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия*
[1] *sandy.surname@gmail.com*
[2] *susl@mail.tsu.ru*
[3] *korovin_ey@mail.tsu.ru*
[4] *dmitrijmazilov20@gmail.com*

Аннотация. Приведены результаты решения актуальной физической задачи – исследование материалов с управляемыми электромагнитными характеристиками. Методом импедансной спектроскопии измерены спектры комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) магнитных жидкостей следующего состава: керосин + синтетическое масло + оксид железа. В состав добавлялись многослойные углеродные нанотрубки массовая доля которых составляла 1 мас.%. Рассмотрено влияние магнитного поля различной ориентации по отношению к силовым линиям электрической составляющей электромагнитного поля на величины КДП. Показано, что при параллельной ориентации электрического и магнитного полей величины комплексной диэлектрической проницаемости существенно возрастают. Методом математического моделирования [1] рассчитаны спектры коэффициента отражения для различных толщин слоев МЖ в микроволновой области частот. Получены новые результаты, доказывающие перспективность использования относительно тонких слоев магнитных жидкостей для решения задач обеспечения безопасности жизнедеятельности при использовании современных высокочастотных радиоэлектронных устройств.

Ключевые слова: магнитные жидкости, диэлектрическая проницаемость, математическое моделирование, технология обеспечения безопасности жизнедеятельности, электромагнитный отклик, МУНТ

Благодарности: исследование выполнено при поддержке Программы развития ТГУ «Приоритет 2030».

Для цитирования: Павлова А.А., Сусляев В.И., Коровин Е.Ю., Мазилов Д.А. Магнитные жидкости с управляемыми экранирующими характеристиками на основе магнетита и многослойных углеродных нанотрубок // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2024. № 8. С. 67–74. doi: 10.17223/29491665/8/9

Original article
doi: 10.17223/29491665/8/9

Ferrofluids with controlled shielding characteristics based on magnetite and multi-walled carbon nanotubes

Alexandra A. Pavlova[1], Valentine I. Suslyaev[2], Evgeniy Yu. Korovin[3], Dmitriy A. Mazilov[4]

[1, 2, 3, 4] *National research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation*
[1] *sandy.surname@gmail.com*
[2] *susl@mail.tsu.ru*
[3] *korovin_ey@mail.tsu.ru*
[4] *dmitrijmazilov20@gmail.com*

Abstract. Studying materials with controlled electromagnetic characteristics is presented in the article. The complex permittivity spectra of ferrofluids of the following compositions were measured by impedance spectroscopy: kerosene + synthetic oil + iron oxide. Multiwall carbon nanotubes (1 wt. %) were added to composition. The effect of different orientation of a magnetic field with respect to the electric component of the electromagnetic field on the complex permittivity values is considered. It is shown that the values of the complex permittivity increase significantly with parallel orientation of the electric and magnetic fields. The spectra of the reflection coefficient for different thicknesses of ferrofluid layers in the microwave frequency range were calculated using the method of mathematical modeling. New results proving the promise of using relatively thin ferrofluid layers for solving problems of ensuring life safety when using modern high-frequency radio-electronic devices were obtained.

© А.А. Павлова, В.И. Сусляев, Е.Ю. Коровин, Д.А. Мазилов, 2024

Keywords: ferrofluids, permittivity, mathematical modeling, life safety technology, electromagnetic response, MWCNT

Acknowledgements: This study was supported by the Tomsk State University Development Program («Priority-2030»).

For citation: Pavlova, A.A., Suslyaev, V.I., Korovin, E.Yu. & Mazilov, D.A. (2024) Ferrofluids with controlled shielding characteristics based on magnetite and multi-walled carbon nanotubes. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeyatelnosti – Life Safety / Security Technologies*. 8. pp. 67–74. (In Russian). doi: 10.17223/29491665/8/9

Введение

Магнитные жидкости (МЖ) входят в широкий класс гетерогенных веществ, свойства которых определяются наноразмерными частицами магнито-мягких (например, магнетита) [2, 3] или магнито-жестких (например, бариевого феррита) [4] материалов. Магнитные жидкости относятся к разряду «умных» (smart materials) материалов с управляемыми характеристиками, что обусловило широкое применение их в различных областях науки и промышленного производства: в системах регулирования температуры [5], в устройствах герметизации [6, 7], в акустических системах [8], в устройствах водоочистки [9], медицине [10] и других приложениях. Магнитные жидкости являются уникальными материалами, сочетающими текучесть, присущую жидкости, и чувствительность к магнитным полям.

Магнитные жидкости представляют собой коллоидные растворы, состоящие из жидкости-носителя и частиц ферромагнитных веществ. В качестве жидкости-носителя используются вода, керосин, органические основы (в том числе ароматические углеводороды) и эфиры [11]. Для стабилизации МЖ применяют поверхностно-активные вещества (олеиновая кислота). Выбор материала активной фазы определяется величинами электромагнитных параметров и назначением МЖ. Наличие магнитных частиц позволяет управлять электромагнитными характеристиками композита, что отмечается во всех перечисленных публикациях.

В области электроники МЖ используются в качестве модуляторов оптического излучения [12] и микроволновых переключателей [13]. Относительно недавно МЖ стали применять для решения задач обеспечения безопасности жизнедеятельности, важность решения которых обострилась в связи со стремительным развитием высокочастотной радиоэлектроники, которая, кроме повышения качества жизни, подвергла людей вредному воздействию микроволнового излучения. На основе МЖ создаются экранирующие устройства [14] и поглотители [4]. Композиты, к которым относится МЖ, исследуются в том числе и в микроволновом диапазоне [15–17]. Данная сфера применения МЖ в радиоэлектронике освоена слабо [4], хотя и наблюдается рост интереса к этой проблеме. Целью данной работы является математическое моделирование спектров коэффициента отражения в диапазоне сверхвысоких частот от плоских слоев МЖ разной толщины при воздействии магнитного поля. Кроме того, представляет интерес оценка влияния углеродных нанотрубок, которые в настоящее время активно применяются для экранирования электромагнитного излучения в диапазоне частот от 10 МГц до 30 ГГц [8, 18, 19], на электромагнитные свойства магнитных жидкостей.

Материалы и методы исследования

Исследуемая жидкость представляет собой коммерческую МЖ марки МЖК, состав ее приведен в табл. 1.

Для исследования влияния МУНТ на электромагнитные свойства МЖ в неё механическим способом вносили 1 мас.% нанотрубок. В качестве жидкости-носителя использовали технический керосин, полученный путем ректификации нефти и её вторичной переработки.

Таблица 1

Состав и пропорции компонентов МЖК

Керосин	58 мас.% ±
Оксид железа	18 мас.% ±
Масло синтетическое	22 мас.% ±
Стабилизатор полимерный	2 мас.%

Для исследования свойств магнитных жидкостей применяли экспериментальные методы: рентгеновскую дифракционную спектроскопию – для определения состава, импедансную спектроскопию – для измерения частотной зависимости диэлектрической проницаемости, кроме того, использовали и метод математического моделирования [1] электромагнитного отклика от образцов из МЖ.

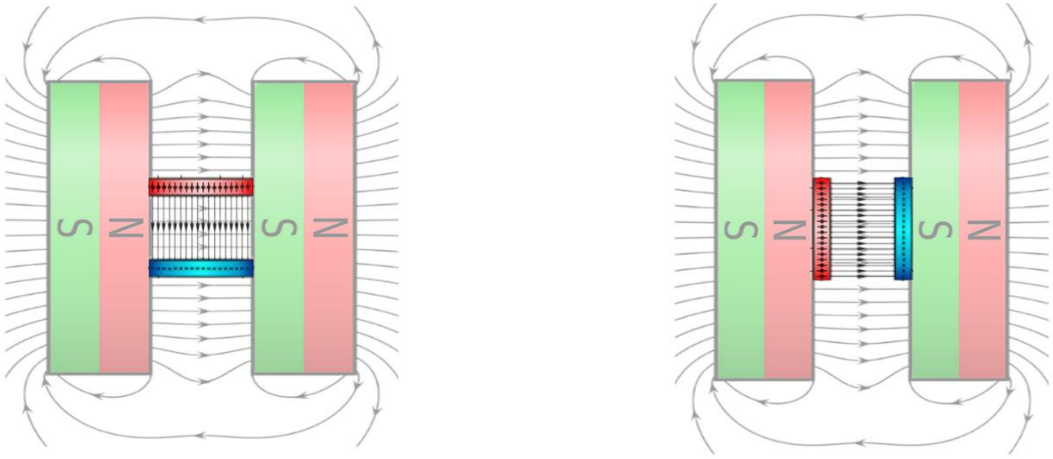
Для получения величин диэлектрической проницаемости использован конденсаторный метод измерения на установке, построенной на основе высокоточного измерителя LCR 4980A фирмы Agilent Technologies.

В [11] описано исследование зависимости диэлектрической проницаемости от ориентации магнитного поля по отношению к силовым линиям электрического поля. Установлено, что магнитное поле привело к росту диэлектрической проницаемости, но

влияние ориентации оказалось различным для разных величин его напряженностей. Приложение магнитного поля формирует определенную конфигурацию расположения магнитных частиц жидкости-носителя, образуя из них цепочки в направлении магнитного поля [20–22]. Этот эффект положен нами в основу гипотезы, что можно использовать такую структуру для формирования структуры проводящих частиц с большим аспектным соотношением (например, для углеродных нанотрубок).

Для исследования влияния магнитного поля на ДП магнитной жидкости измерительная ячейка помещалась в систему магнитов с напряжённостью поля 1 кЭ (рис. 1).

Измерительная ячейка была изготовлена в виде контейнера, в котором расположены пластины плоскопараллельного конденсатора; пространство между ними заполнялось исследуемой МЖ. Было предусмотрено, что размеры данной ячейки позволяли разместить ее в магнитном поле двумя способами: перпендикулярно и параллельно силовым линиям магнитного поля.



a *b*

Рис. 1. Размещение ячейки с образцом в системе магнитов: *a* – перпендикулярное размещение, *b* – параллельное размещение

Fig. 1. The placing of the sample cell into the magnetic system: *a* – perpendicular, *b* – parallel

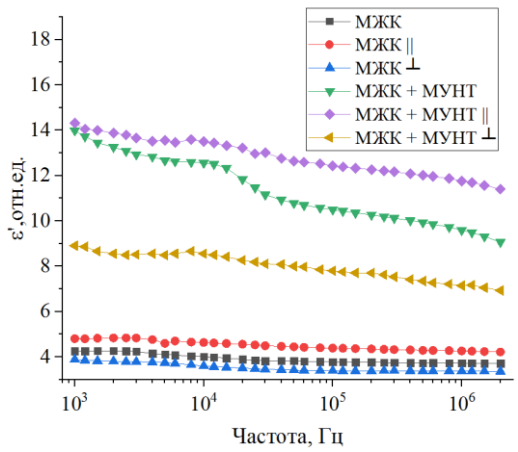


Рис. 2. Частотные зависимости действительной составляющей комплексной диэлектрической проницаемости

Fig. 2. Frequency dependences of the real component of the complex permittivity

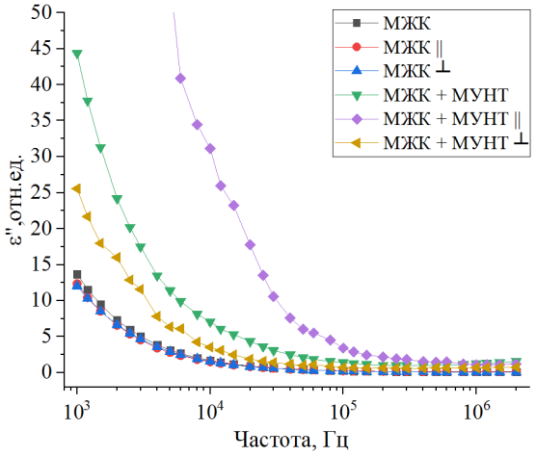


Рис. 3. Частотные зависимости мнимой составляющей комплексной диэлектрической проницаемости

Fig. 3. Frequency dependences of the imaginary component of the complex permittivity

На рис. 2, 3 приведены спектры диэлектрической проницаемости коммерческой МЖ для разных ориентаций магнитного поля. Представленные результаты сравниваются с величинами КДП магнитной жидкости без приложенного поля. Приложение магнитного поля разной ориентации привело к тому же результату, что и в работе [11]: для параллельной ориентации силовых линий электрического и магнитного полей действительная составляющая выросла примерно на 20%, а при перпендикулярной ориентации несколько снизилась. Мнимые составляющие практически не изменились

При наличии в МЖ углеродных нанотрубок обе составляющие КДП заметно выросли, причем влияние взаимной ориентации оказалось более значительным.

В рамках высказанной нами гипотезы это различие можно объяснить тем, что при параллельной ориентации МУНТ образуют цепочки, «замыкающие» пластины конденсатора. Пока результат позволяет лишь зафиксировать эффект. Чтобы материал действительно можно было считать управляемым, требуются дополнительные исследования, направленные на определение связи с интенсивностью напряженности магнитного поля, видом МУНТ, длиной проводящих нитей. Есть и другие проблемы. В ходе проведения эксперимента выяснилось, что электрофизические характеристики жидкости существенно зависят от времени ультразвукового диспергирования нанотрубок в синтетическом масле.

В исследуемой полосе частот для всех рассмотренных ситуаций наблюдается слабая дисперсия диэлектрической проницаемости, которая связана с процессами запаздывания (см. рис. 2) [4].

Результаты и обсуждение

Для решения задач обеспечения безопасности жизнедеятельности наиболее интересен сверхвысокочастотный диапазон электромагнитного излучения, который в настоящее время все более активно используется во всех сферах человеческой деятельности, включая бытовую. Снижение вредного воздействия электромагнитного излучения достигается применением экранирующих устройств, которые характеризуются электромагнитным откликом – коэффициенты отражения, прохождения и поглощения. Математическое моделирование спектров коэффициента отражения от плоских слоев МЖ разной толщины проведено на основе экспериментальных исследований частотных зависимостей комплексной диэлектрической проницаемости при воздействии магнитных полей различной ориентации по отношению к силовым линиям электрического поля. Основанием для правомерности применения метода моделирования для оценки электромагнитного отклика в высокочастотном диапазоне по результатам, полученным на низких частотах, является слабая диэлектрическая дисперсия, характерная для неполярных веществ, к которым относится жидкость-носитель. Эти материалы, кроме того, на высоких частотах имеют малые значения тангенса угла диэлектрических потерь. Диэлектрическая проницаемость частиц активной фазы также существенно снижается в результате размельчения и малого содержания частиц в МЖ. Это позволяет использовать измеренные значения для моделирования электромагнитного отклика в сверхвысокочастотном диапазоне. Коэффициент отражения рассчитывался в плосковолновом приближении для расположения слоя магнитной жидкости на проводящей поверхности. Представляет интерес эффект объемного резонанса, когда в толще образца реализуется режим стоячих волн, при этом в толщина образца кратна длине волны в веществе. В данном случае наблюдаются наиболее эффективное взаимодействие образца материала с электромагнитным излучением и существенное уменьшение коэффициента отражения.

На рис. 4–9 представлены зависимости коэффициента отражения слоя МЖК на металле для различного состава МЖ и ориентации магнитного и электрического полей. В табл. 2 приведены данные, положенные в основу расчета коэффициента отражения.

Результаты, представленные на рис. 4–9, показывают, что существуют области частот, в которых отражение снижается более чем в 100 раз.

Таблица 2

Значения КДП для образцов МЖ

	МЖК	МЖК ‖	МЖК ⊥	МЖК+ МУНТ	МЖК+ МУНТ ‖	МЖК+ МУНТ ⊥
ε'	3,7	4,3	3,36	9,5	11,8	7,3
ε"	0,13	0,16	0,1	1,3	1,2	0,7

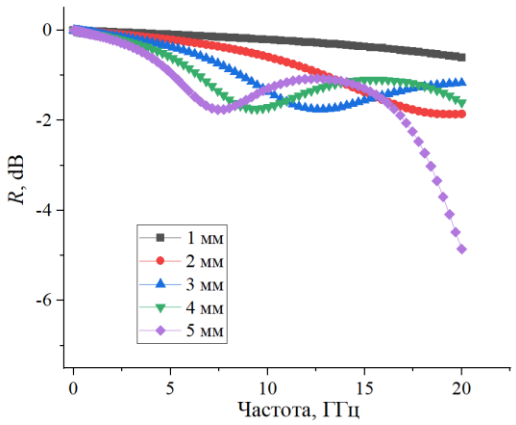


Рис. 4. Частотные зависимости коэффициента отражения МЖК без МУНТ

Fig. 4. Frequency dependences of the reflection coefficient of the ferrofluid without MWCNTs

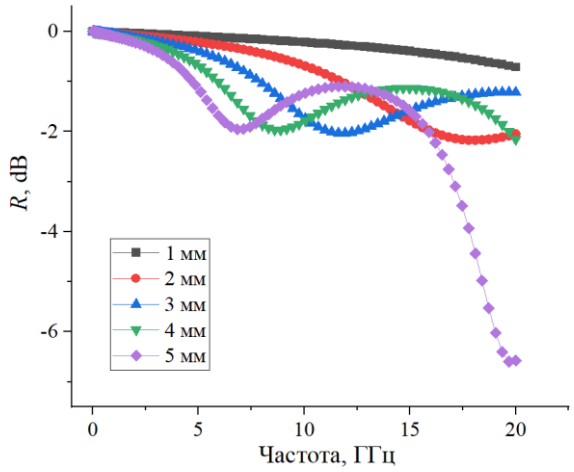


Рис. 5. Частотные зависимости коэффициента отражения МЖК без МУНТ в параллельном поле

Fig. 5. Frequency dependences of the reflection coefficient of the ferrofluid without MWCNTs in a parallel field

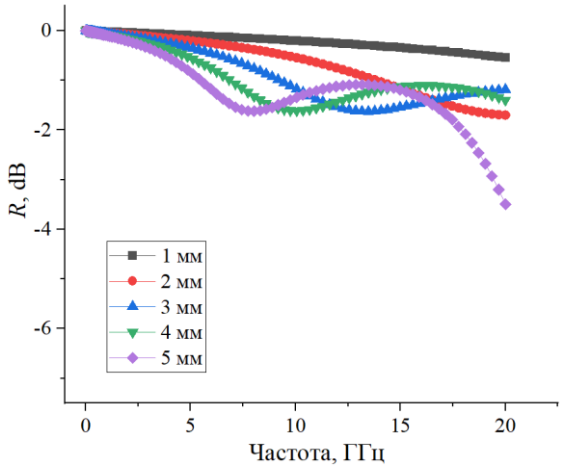


Рис. 6. Частотные зависимости коэффициента отражения МЖК без МУНТ в перпендикулярном поле

Fig. 6. Frequency dependences of the reflection coefficient of the ferrofluid without MWCNTs in a perpendicular field

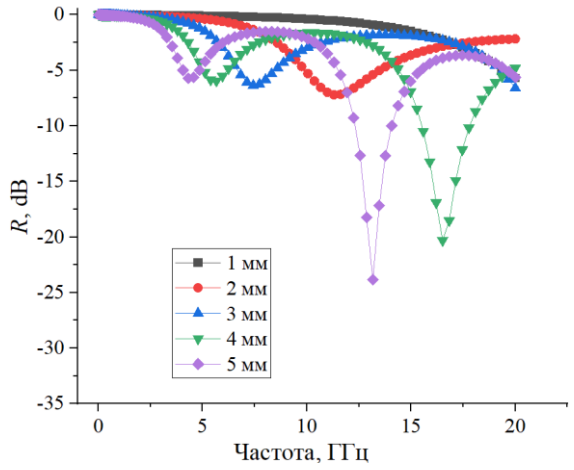


Рис. 7. Частотные зависимости коэффициента отражения МЖК с МУНТ

Fig. 7. Frequency dependences of the reflection coefficient of the ferrofluid with MWCNTs

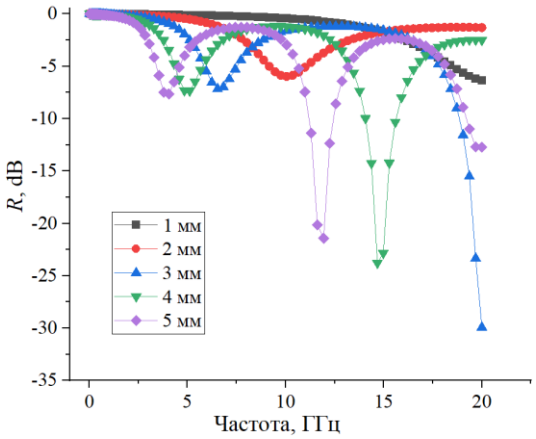


Рис. 8. Частотные зависимости коэффициента отражения МЖК с МУНТ в параллельном поле

Fig. 8. Frequency dependences of the reflection coefficient of the ferrofluid with MWCNT in a parallel field

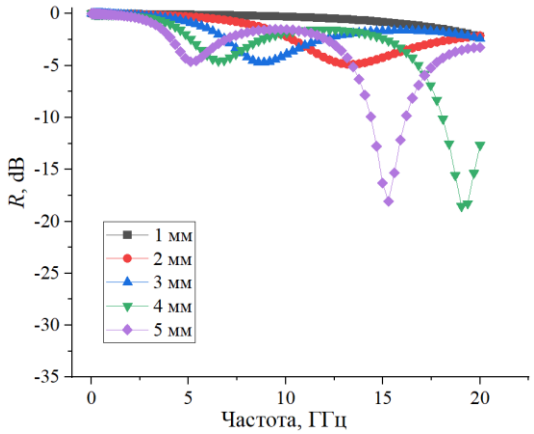


Рис. 9. Частотные зависимости коэффициента отражения МЖК с МУНТ в перпендикулярном поле

Fig. 9. Frequency dependences of the reflection coefficient of the ferrofluid with MWCNT in a perpendicular field

Графики демонстрируют возможность перестройки экранирующего устройства на другую частоту простым изменением толщины покрытия, что для жидких материалов осуществляется наиболее простым методом.

Заключение

Проведенное исследование показало, что магнитные жидкости перспективны для решения задач обеспечения безопасности жизнедеятельности в качестве экранирующих устройств с электромагнитными свойствами, управляемыми приложенными магнитными полями.

Поглотители на основе магнитных жидкостей сочетают свойства текучести и эффективность поглощения электромагнитного излучения на сверхвысоких частотах, что может быть использовано для снижения вредного влияния микроволнового излучения на биологические объекты.

Список источников

1. *Kazakova M.A., Semikolenova N.V., Korovin E.Y., Zhuravlev V.A., Selyutin A.G., Velikanov D.A., Moseenkov S.I., Andreev A.S., Lapina O.B., Suslyaev V.I., Matsko M.A., Zakharov V.A., D'Espinose De Lacaillcrie J.B.* Co/multi-walled carbon nanotubes/polyethylene composites for microwave absorption: Tuning the effectiveness of electromagnetic shielding by varying the components ratio // Composites Science and Technology. 2021. Vol. 207. P. 108731-1–108731-11
2. *Ryapolov P., Vasilyeva A., Kalyuzhnaya D., Churaev A., Sokolov E., Shel'deshova E.* Magnetic Fluids: The Interaction between the Microstructure, Macroscopic Properties, and Dynamics under Different Combinations of External Influences // Nanomaterials. 2024. Vol. 14. P. 222. doi: 10.3390/nano14020222
3. *Dotsenko O.A., Pavlova A.A., Dotsenko V.S.* The effect of external magnetic field on dielectric permeability of multiphase ferrofluids // Russian Physics Journal. 2018. Vol. 60, № 11. P. 955–960. doi: 10.1007/s11182-018-13087
4. *Archana V.N., Manoj M., Jacob J., Vinayasree S., Mohanan P., Garza-Navarro Marco A., Shaji Sadasivan, Anantharaman M. R.* On the microwave absorption of magnetic nanofluids based on barium hexaferrite in the S and X bands prepared by pulsed laser ablation in liquid // AIP Advances. 2019. Vol. 9. P. 035035. doi: 10.1063/1.5088080

5. *Abbas K., Wang X., Rasool G., Sun T., Yin G., Razzaq I.* Recent developments in the application of ferrofluids with an emphasis on thermal performance and energy harvesting // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2023. Vol. 587. P. 171311. doi: 10.1016/j.jmmm.2023.171311
6. *Li D., Li Y., Li Z., Wang Y.* Theory analyses and applications of magnetic fluids in sealing // Friction. 2023. Vol. 11. P. 1771–1793. doi: 10.1007/s40544-022-0676-8
7. *Emmerson J.O., Shateri A., Xie J.* Use of magnetic fluids in process system for pipe isolations // Heliyon. 2024. Vol. 10. P. 35221. doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e35221
8. *Rosensweig R.E., Hirota Y., Tsuda, S., Raj K.* Study of audio speakers containing ferrofluid // Journal of Physics: Condensed Matter. 2008. Vol. 20. P. 204147. doi: 10.1088/0953-8984/20/20/204147
9. *Rajput S., Pittman C.U.Jr., Mohan D.* Magnetic magnetite (Fe3O4) nanoparticle synthesis and applications for lead (Pb2+) and chromium (Cr6+) removal from water // Journal of Colloid and Interface Science. 2016. Vol. 468. P. 334–346. doi: 10.1016/j.jcis.2015.12.008
10. *Герасимчук Н.А., Двадненко М.В., Капустянская Ж.В., Мельник И.А., Чудовский Р.Л.* Магнитные жидкости в современном обществе // Успехи современного естествознания. 2006. № 10. С. 60–66.
11. *Anjitha B., Maria J., Archana V. N., Navya J., Anantharaman M. R.* High Dielectric Constant Liquid Dielectrics Based on Magnetic Nanofluids // Journal of Nanofluids. 2023. Vol. 12. P. 1141–1150. doi: 10.1166/jon.2023.1973
12. *Chieh J.J., Yang S.Y., Horng H.E., Hong C.-Y., Yang H.C.* Magnetic-fluid optical-fiber modulators via magnetic modulation // Applied physics letters. 2007. Vol. 90. P. 133505. doi: 10.1063/1.2716365
13. *Sharma P., Tripathi A.M., Shukla R., Shukla A.* Colloidal Microwave Absorber based on Magnetic Fluid of Iron Oxide Nanoparticles // Research & Development in Material science. 2021. Vol. 15. No. 2. P. 000860. doi: 10.31031/RDMS.2021.15.000860
14. *Dolnik B., Rajnak M., Clmbala R., Kolcunova I. Kurimskv J., Dzmura J., Petras J., Zbojovsky J., Kosterec M., KopCansk P., Timko M.* The Shielding Effectiveness of a Magnetic Fluid in Radio Frequency Range // Acta physica polonica. 2018. Vol. 133, № 3. doi: 10.12693/APliysPolA. 133.585
15. *Xu H., Anlage S.M., Hu L., Gruner G. Pezzagna S., Meijer J.* Microwave shielding of transparent and conducting single-walled carbon nanotube films // Applied physics letters. 2007. Vol. 90. P. 183119. doi: 10.1063/1.2734897
16. *Chahar M., Sharma V., Thakur O.P.* Conductive network structure of MWCNTs-incorporated cobalt-zinc ferrite nanocomposite for enhanced electromagnetic shielding applications // Journal of Nanoparticle Research. 2022. Vol. 24. P. 195 doi: 10.1007/s11051-022-05578-1
17. *Yuan H., Zvonkina I.J., Al-Enizi A.M., Elzatahry A.A., Pyun J., Karim A.* Facile Assembly of Aligned Magnetic Nanoparticle Chains in Polymer Nanocomposite Films by Magnetic Flow Coating // ACS applied materials & interfaces. 2017. Vol. 9. P. 11290–11298. doi: 10.1021/acsami.7b02186
18. *Кужир П.П., Letelier M., Быченок, Д.С., Поддубская О.Г., Сусляев В.И., Коровин Е.Ю., Батуркин С.А., Ferro V., Celzard A.* Электрофизические характеристики углеродного пеноматериала в СВЧ диапазоне // Известия высших учебных заведений. Физика. 2016. Т. 59, № 10. С. 160–166.
19. *Krasnikov D.V., Dorofeev I.O., Smirnova T.E., Suslyaev V.I., Kazakova M.A., Moseenkov S.I., Kuznetsov V.L.* Electromagnetic Interaction Between Spherical Aerogels of Multi-Walled Carbon Nanotubes // Physica Status Solidi B: Basic Research. 2017. Vol. 254. P. 1700256-1–1700256-6.
20. *Мазилов Д.А., Павлова А.А., Сусляев В.И.* Исследование низкочастотных спектров диэлектрической проницаемости магнитных жидкостей при приложении магнитного поля // Современные наука и практика: закономерности, прорывной характер, возможности и перспективы. СПб. : Изд-во СПбЦСА, 2024. С. 107–111.
21. *Pavlova A., Suslyaev V., Mazilov D.* Electrophysical characteristics of magnetic fluids with multiwalled carbon nanotubes // The 8th International Workshop on Electromagnetic Properties of Novel Materials – 2024. Moscow, Russia 26–30 August, 2024.
22. *Sithara V., John P.* Thermal and rheological properties of magnetic nanofluids: Recent advances and future directions // Advances in Colloid and Interface Science. 2022. Vol. 307. P. 102729. doi: 10.1016/j.cis.2022.102729

References

1. Kazakova, M.A., Semikolenova, N.V., Korovin, E.Y., Zhuravlev, V.A., Selyutin, A.G., Velikanov, D.A., Moseenkov, S.I., Andreev, A.S., Lapina, O.B., Suslyaev, V.I., Matsko, M.A., Zakharov, V.A., D'Espinose & De Lacaillcrie, J.B. (2021) Co/multi-walled carbon nanotubes/polyethylene composites for microwave absorption: Tuning the effectiveness of electromagnetic shielding by varying the components ratio. *Composites Science and Technology*. 207. pp. 108731-1-108731-11
2. Ryapolov, P., Vasilyeva, A., Kalyuzhnaya, D., Churaev, A., Sokolov, E. & Shel'deshova, E. (2024) Magnetic Fluids: The Interaction between the Microstructure, Macroscopic Properties, and Dynamics under Different Combinations of External Influences. *Nanomaterials*. 14. pp. 222. doi: 10.3390/nano14020222
3. Dotsenko, O.A., Pavlova, A.A. & Docenko, V.S. (2018) The effect of external magnetic field on dielectric permeability of multiphase ferrofluids: *Russian Physics Journal*. 60. 11. pp. 955–960. doi: 10.1007/s11182-018-13087
4. Archana, V.N., Manoj, M., Jacob, J., Vinayasree, S., Mohanan, P., Garza-Navarro Marco, A., Shaji Sadasivan & Anantharaman, M.R. (2019) On the microwave absorption of magnetic nanofluids based on barium hexaferrite in the S and X bands prepared by pulsed laser ablation in liquid. *AIP Advances*. 9. pp. 035035. doi: 10.1063/1.5088080
5. Abbas, K., Wang, X., Rasool, G., Sun, T., Yin, G. & Razzaq, I. (2023) Recent developments in the application of ferrofluids with an emphasis on thermal performance and energy harvesting. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials.* 587. pp. 171311. doi: 10.1016/j.jmmm.2023.171311
6. Li, D., Li, Y., Li, Z. & Wang, Y. (2023) Theory analyses and applications of magnetic fluids in sealing. *Friction.* 11. pp. 1771–1793. doi: 10.1007/s40544-022-0676-8
7. Emmerson, J.O., Shateri, A. & Xie, J. (2024) Use of magnetic fluids in process system for pipe isolations. *Heliyon.* 10. pp. 35221. doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e35221

8. Rosensweig, R.E., Hirota, Y., Tsuda, S. & Raj, K. (2008) Study of audio speakers containing ferrofluid. *Journal of Physics: Condensed Matter*. 20. pp. 204147. doi: 10.1088/0953-8984/20/20/204147
9. Rajput, S., Pittman, C.U. Jr. & Mohan, D. (2016) Magnetic magnetite (Fe3O4) nanoparticle synthesis and applications for lead (Pb2+) and chromium (Cr6+) removal from water. *Journal of Colloid and Interface Science*. 468. pp. 334–346. doi: 10.1016/j.jcis.2015.12.008
10. Gerasimchuk, N.A., Dvadnenko, M.V., Kapustyanskaya, Zh.V., Mel'nik, I.A. & Chudovskij, R.L. (2006) Magnitnye zhidkosti v sovremennom obshchestve [Magnetic fluids in modern society]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*. 10. pp. 60–66.
11. Anjitha, B., Maria, J., Archana, V.N., Navya, J. & Anantharaman, M.R. (2023) High Dielectric Constant Liquid Dielectrics Based on Magnetic Nanofluids. *Journal of Nanofluids*. 12. pp. 1141–1150. doi:10.1166/jon.2023.1973
12. Chieh, J.J., Yang, S.Y., Horng, H.E., Hong, C.-Y. & Yang, H.C. (2007) Magnetic-fluid optical-fiber modulators via magnetic modulation. *Applied physics letters*. 90. pp. 133505. doi: 10.1063/1.2716365
13. Sharma, P., Tripathi, A.M., Shukla, R. & Shukla, A. (2021) Colloidal Microwave Absorber based on Magnetic Fluid of Iron Oxide Nanoparticles. *Research & Development in Material science*. 15. pp. 000860. doi: 10.31031/RDMS.2021.15.000860
14. Dolnik, B., Rajnak, M., Clmbala, R., Kolcunova, I. Kurimskv, J., Dzmura, J., Petras, J., Zbojovsky, J., Kosterec, M., KopCansk, P. & Timko, M. (2018) The Shielding Effectiveness of a Magnetic Fluid in Radio Frequency Range. *Acta physica polonica*. 133. pp. 3. doi: 10.12693/APliysPolA. 133.585
15. Xu, H., Anlage, S.M., Hu, L., Gruner, G. Pezzagna, S. & Meijer, J. (2007) Microwave shielding of transparent and conducting single-walled carbon nanotube films. *Applied physics letters*. 90. pp. 183119. doi: 10.1063/1.2734897
16. Chahar, M., Sharma, V. & Thakur, O.P. (2022) Conductive network structure of MWCNTs-incorporated cobalt-zinc ferrite nanocomposite for enhanced electromagnetic shielding applications. *Journal of Nanoparticle Research*. 24. pp. 195 doi: 10.1007/s11051-022-05578-1
17. Yuan, H., Zvonkina, I.J., Al-Enizi, A.M., Elzatahry, A.A., Pyun, J. & Karim, A. (2017) Facile Assembly of Aligned Magnetic Nanoparticle Chains in Polymer Nanocomposite Films by Magnetic Flow Coating. *ACS applied materials & interfaces*. 9. pp. 11290–11298. doi: 10.1021/acsami.7b02186
18. Kuzhir, P.P., Letelier, M., Bychenok, D.S., Poddubskaya, O.G., Suslyaev, V.I., Korovin, E. Yu., Baturkin, S.A., Ferro, V. & Celzard, A. (2016) Elektrofizicheskie harakteristiki uglerodnogo penomateriala v SVCh diapazone. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Fizika.* 59. pp. 160–166.
19. Krasnikov, D.V., Dorofeev, I.O., Smirnova, T.E., Suslyaev, V.I., Kazakova, M.A., Moseenkov, S.I. & Kuznetsov, V.L. (2017) Electromagnetic Interaction Between Spherical Aerogels of Multi-Walled Carbon Nanotubes. *Physica Status Solidi B: Basic Research*. 254. pp. 1700256-1-1700256-6.
20. Mazilov, D.A., Pavlova, A.A. & Suslyaev, V.I. (2024) Issledovanie nizkochastotnyh spektrov dielektricheskoj pronicaemosti magnitnyh zhidkostej pri prilozhenii magnitnogo polya. *Sovremennye nauka i praktika: zakonomernosti, proryvnoj harakter, vozmozhnosti i perspektivy.* pp. 107–111.
21. Pavlova, A., Suslyaev, V. & Mazilov, D. (2024) Electrophysical characteristics of magnetic fluids with multiwalled carbon nanotubes. *The 8th International Workshop on Electromagnetic Properties of Novel Materials*
22. Sithara, V. & John, P. (2022) Thermal and rheological properties of magnetic nanofluids: Recent advances and future directions. *Advances in Colloid and Interface Science*. 307. pp. 102729. doi: 10.1016/j.cis.2022.102729

Информация об авторах:
Павлова Александра Андреевна – старший преподаватель кафедры радиоэлектроники Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: sandy.surname@gmail.com
Сусляев Валентин Иванович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры радиоэлектроники Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: susl@mail.tsu.ru. ORCID ID: 0000-0003-0935-975X. Researcher ID: A-4262-2014
Коровин Евгений Юрьевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры радиоэлектроники Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: korovin_ey@mail.tsu.ru
Мазилов Дмитрий Артурович – магистрант радиофизического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: dmitrijmazilov20@gmail.com

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:
Pavlova Alexandra A., Senior lecturer, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: sandy.surname@gmail.com
Suslyaev Valentine I., Cand. Sc. (Physics and Mathematics), associate professor, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: susl@mail.tsu.ru
Korovin Evgeny Yu., Cand. Sc. (Physics and Mathematics), associate professor, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: korovin_ey@mail.tsu.ru
Mazilov Dmitriy A., Master's student, faculty of radiophysics, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: dmitrijmazilov20@gmail.com

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 22.11.2024; одобрена после рецензирования 23.12.2024; принята к публикации 26.12.2024

The article was submitted 22.11.2024; approved after reviewing 23.12.2024; accepted for publication 26.12.2024
ok