

В.Д. ЧЕРКАСОВ¹, Ю.П. ЩЕРБАК², Д.В. ЧЕРКАСОВ¹¹Национальный исследовательский Мордовский государственный университет
им. Н.П. Огарева, г. Саранск, Россия²Саровский физико-технический институт Национальный исследовательский
ядерный университет МИФИ, г. Саров, Россия

ЭЛАСТИЧНЫЕ САМОКЛЕЯЩИЕСЯ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ

Аннотация. В статье рассматривается создание эластичных самоклеящихся радиопоглощающих материалов для защиты от СВЧ излучения. В производстве радиопоглощающих материалов широко используют карбонильное железо. Материалы с этим наполнителем имеют низкое поглощение электромагнитного излучения, а в большей степени отражают его. Основное достоинство этого наполнителя в том, что он выпускается отечественными производителями в промышленных объёмах. Другой наполнитель, используемый для производства радиопоглощающих материалов – углеродное волокно. Материалы на этом наполнителе имеют высокий коэффициент поглощения электромагнитного излучения, но работают в очень узком диапазоне частот. В связи с этим для повышения поглощения электромагнитного излучения и расширения диапазона частот в состав радиопоглощающего материала, содержащего карбонильное железо, вводится определённое количество углеродного волокна. Показано, что при этом поглощение электромагнитного излучения достигает 80 %, а частотный диапазон работы составляет 6,2 – 7,7 ГГц. Материал предназначен для защиты помещений и оборудования от электромагнитного излучения.

Ключевые слова: электромагнитное излучение, СВЧ-диапазон, каучук, углеродное волокно, карбонильное железо, радиопоглощающий материал, исследования.

V.D. CHERKASOV¹, Y.P. SHCHERBAK², D.V. CHERKASOV¹¹National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia²Sarov Institute of Physics and Technology National Research
Nuclear University MEPhI, Sarov, Russia

ELASTIC SELF-ADHESIVE RADIOABSORBING MATERIALS

Abstract. The article considers creation of elastic self-adhesive radio absorbing materials for frequency range of 2-7 GHz. Carbonyl iron is widely used in the production of radioabsorbing materials. Materials with this filler have a low absorption of electromagnetic radiation, and more reflect it. The main advantage of this filler is that it is produced by domestic manufacturers in industrial volumes. Another filler used for the production of radioabsorbing materials is carbon fibre. Materials on this filler have a high absorption coefficient of electromagnetic radiation, but operate in a very narrow frequency range. Therefore, in order to increase electromagnetic absorption and extend the frequency range, a certain amount of carbon fibre is introduced into the composition of the radioabsorbing material containing carbonyl iron. It is shown that in this case absorption of electromagnetic radiation reaches 93%. The material is intended for protection of premises and equipment against electromagnetic radiation.

Keywords: electromagnetic radiation, microwave range, rubber, carbon fiber, carbonyl iron, radio absorbing material, research.

Введение

Для защиты людей и радиотехнических устройств от вредного воздействия электромагнитного излучения используются композиционные радиопоглощающие материалы различного функционального назначения: радиопоглощающие покрытия, защитные экраны, радиопоглощающие системы [1-7]. Наиболее широкое применение из них нашли радиопоглощающие покрытия, которые представляют собой композиционные материалы, состоящие из полимерной матрицы и наполнителей [8-18]. В качестве наполнителей обычно используют оксиды металлов, углеродные компоненты, ферриты, аморфные металлы и др. [19-25]. Главной задачей в создании эффективных радиопоглощающих материалов является составление рецептуры для получения композиции, которая могла бы легко перерабатываться в изделие с необходимым комплексом свойств.

В настоящее время в композиционных радиопоглощающих материалах в качестве наполнителя широко используют карбонильное железо [9,26]. Анализ работы радиопоглощающих материалов с таким наполнителем показал, что они работают в узком диапазоне частот. Кроме этого, они имеют низкие поглощающие и высокие отражающие свойства. В связи с этим требуется повышение поглощающих свойств и расширение диапазона частот эффективной работы материала. В статье рассматривается создание радиопоглощающего материала с высокими поглощающими свойствами и более широким частотным диапазоном работы на основе смеси карбонильного железа и углеродного волокна.

Модели и методы

Разработан радиопоглощающий материал, у которого в качестве связующего использовали неотверждаемый герметик на основе этиленпропиленового каучука. Функциональным наполнителем в этом материале являлась смесь рубленного углеродного волокна UFM-4HD и карбонильного железа марки Р-20.

Основными радиофизическими характеристиками радиопоглощающих материалов являются коэффициенты отражения, прохождения и поглощения электромагнитного излучения [27].

Определение радиофизических характеристик проводили по ГОСТ 50011-92 (ГОСТ 30381-95) [28]. Структурная схема измерений представлена на рис.1.

Для определения коэффициента отражения из радиопоглощающего материала изготавливались образцы размером 300×300 мм и толщиной 1 и 2 мм. Измерения проводились следующим образом: сначала металлическая подложка, а затем радиопоглощающий материал на металлической подложке устанавливаются вплотную к раскрытию приемопередающей рупорной антенны.

Антенна перемещается вдоль своей оси и фиксируются первые минимальные и максимальные показания прибора. После этого определяются коэффициенты отражения. Для определения коэффициента поглощения электромагнитного излучения в радиопоглощающем материале производится сравнение коэффициентов отражения электромагнитного излучения от металлической подложки с коэффициентом отражения электромагнитного излучения от радиопоглощающего материала на металлической подложке.

Разница коэффициентов отражения электромагнитного излучения несет информацию о поглощенной в радиопоглощающем материале мощности сигнала. Чем больше разница между коэффициентами отражения, тем больше уровень поглощения электромагнитного излучения в радиопоглощающем материале.

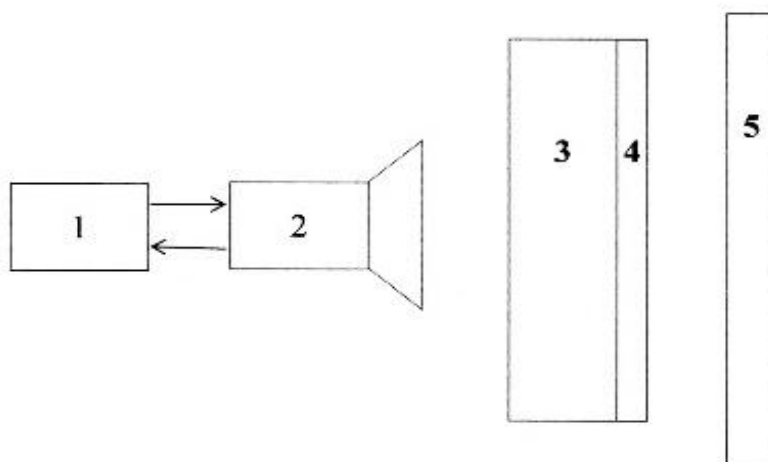


Рисунок 1 - Структурная схема измерений коэффициента отражения:

1 – скалярный анализатор цепей серии P2M; 2 – рупорная антенна; 3 – образец РПМ; 4 – металлическая пластина; 5 – ПЭВ (поглотитель ЭМИ)

Результаты исследования и их анализ

Экспериментальные исследования радиопоглощающих материалов с различным содержанием карбонильного железа показали, что они имеют коэффициент поглощения не более 10 % (табл. 1,2,3,4).

Таблица 1 - Коэффициент поглощения радиопоглощающего материала с содержанием карбонильного железа 10%.

Частота, ГГц	4,5	5,0	5,5	6,0
K поглощения, %	0	5	10	5

Таблица 2 - Коэффициент поглощения радиопоглощающего материала с содержанием карбонильного железа 15%.

Частота, ГГц	4,5	5,0	5,5	6,0
K поглощения, %	2	4	8	2

Таблица 3 - Коэффициент поглощения радиопоглощающего материала с содержанием карбонильного железа 20%.

Частота, ГГц	4,5	5,0	5,5	6,0
K поглощения, %	2	3	10	5

Таблица 4 - Коэффициент поглощения радиопоглощающего материала с содержанием карбонильного железа 84%.

Частота, ГГц	4,5	5,0	5,5	6,0
K поглощения, %	8	10	3	4

С увеличением содержания карбонильного железа в композите не происходит повышения поглощающих свойств. С таким видом наполнителя в материале преобладают отражающие свойства.

Радиопоглощающие материалы с содержанием только углеродного волокна имеют коэффициент поглощения 50-76 % в диапазоне частот 5,6 – 6 ГГц (рис. 2). Максимальное поглощение электромагнитного излучения в материале с углеродным волокном наблюдается на частоте 6 ГГц и составляет 76%. При этом содержание углеродного волокна в композиции составляло 7 %. Дальнейшее увеличение углеродного волокна приводит к снижению поглощающих свойств.

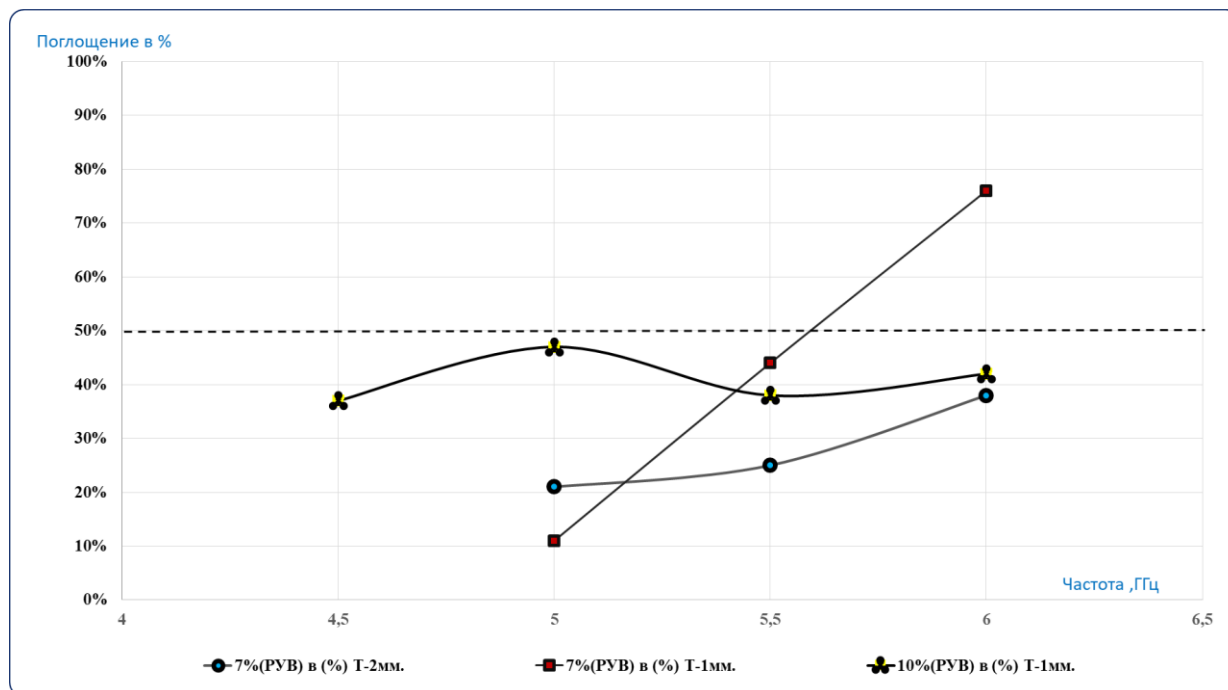


Рисунок 2 - Влияние углеродного волокна на поглощение электромагнитного излучения

Для увеличения поглощения электромагнитного излучения и расширения частотного диапазона эффективной работы материала в его состав вводили смесь углеродного волокна и карбонильного железа. Проведенные исследования показали, что наибольшее поглощение электромагнитного излучения происходит при содержании углеродного волокна 5 % и карбонильного железа 50 % (рис. 3). При этом максимальное поглощение электромагнитного излучения составляет 80 % в частотном диапазоне 6,2 – 7,7 ГГц (рис. 3). Частотный диапазон, в котором поглощение составляет более 50 % находится в пределах 5,6 – 8 ГГц (рис. 3). Состав, содержащий 5 % углеродного волокна и 45 % карбонильного железа обладает большим поглощением (87 %), но на частоте 5,9 ГГц. Частотный диапазон работы его гораздо уже, чем у материала с содержанием карбонильного железа 50 % (рис. 3). В связи с этим радиопоглощающий материал с содержанием 5 % углеродного волокна и 50 % карбонильного железа представляет большую ценность, т.к. он имеет более широкий диапазон работы с поглощением 80 %. Радиопоглощающий материал, содержащий 45 % карбонильного железа и 5 % углеродного волокна будет эффективен для поглощения электромагнитного излучения на частоте 5,9 ГГц. Таким образом введение в состав радиопоглощающего материала на карбонильном железе углеродного волокна увеличило коэффициент поглощения электромагнитного излучения и расширило частотный диапазон его работы.

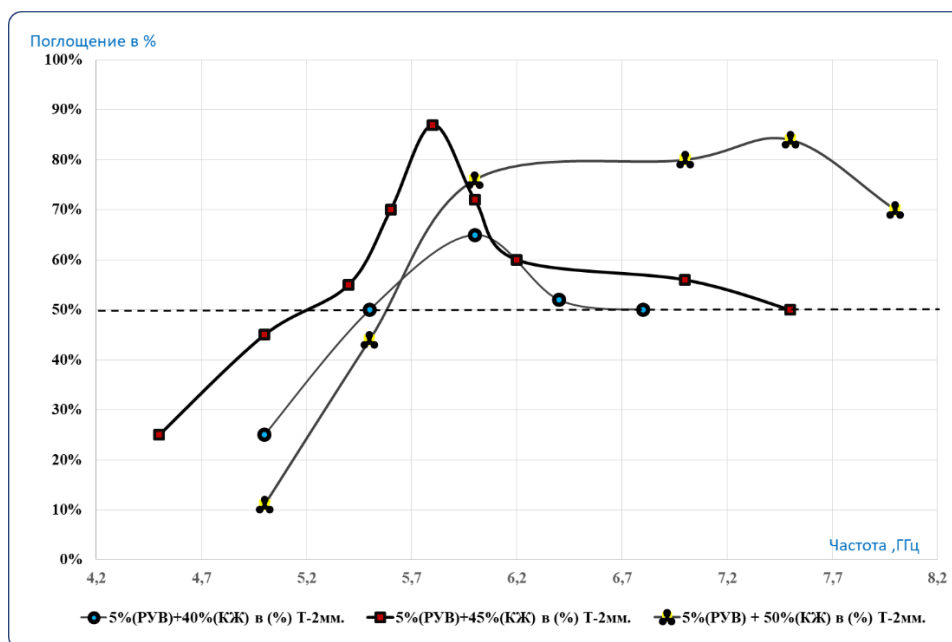


Рисунок 3 - Влияние количества карбонильного железа на коэффициент поглощения радиопоглощающего материала

Выводы

Разработан радиопоглощающий материал на основе этиленпропиленового каучука с содержанием 50 % карбонильного железа марки Р-20 и 5 % углеродного волокна. Максимальное поглощение электромагнитного излучения составляет 80 % на частоте 6,2 – 7,7 ГГц. Частотный диапазон, в котором поглощение составляет более 50 % находится в пределах 5,6 – 8,0 ГГц. Введение в полимер смеси карбонильного железа и углеродного волокна позволило существенно увеличить поглощение ЭМИ и расширить частотный диапазон работы радиопоглощающего материала.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по теме «Организация импортозамещающего производства самоклеящихся радиопоглощающих материалов с повышенными защитными свойствами» в рамках Государственного контракта №075-11-2022-008 от 6 апреля 2022 г., идентификатор государственного контракта 000000S407522QMX0002.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алимин Б.Ф. Современные разработки поглотителей электромагнитных волн и радиопоглощающих материалов. – Зарубежная радиоэлектроника, 1989, №2, с. 75 – 82.
2. Ковалева Т.Ю., Безъязыкова Т.Г., Шафпанский В.С. Магнитодиэлектрики для СВЧ – поглощающих экранов. – Радиоэлектроника и связь, 1991, №2, с. 84 – 86.
3. Казанцева Н. Е., Рыбкина Н.Г., Чмутин И.А. Перспективные материалы для поглотителей электромагнитных волн сверхвысокочастотного диапазона. – Радиотехника и электроника, 2003, т. 1, с. 161 – 163.
4. Островский О.С., Одаренко Е.Н., Шматько А.А. Защитные экраны и поглотители электромагнитных волн - Физическая инженерия поверхности, 2003, т. 1, с. 161 – 163.
5. Лыньков Л.М., Богут В.Н., Боротько Т.В., Украинец Е.А., Колбун Н.В. Новые материалы для экранов электромагнитного излучения. Доклады Бгуйр. - №3 – 2004, с. 152 – 167.
6. Abdolali Ali, Oraizi Homaeoon, Tavakoli Ahad. Ultra Wide Band Radar Absorbing Materials. Elektromagnetics Research Symposium Proceedings, Moscow, Russia, August 18–21, 2009, 351 с.
7. Wallace J.L. Broadband Magnetic Microwave Absorbers: Fundamental Limitations // IEEE Trans. Magn. - 1993. - 29, №6, Pt 3. - P. 4209-4214.

8. Лопатин А.В., Казанцев Ю. Н. и др. Радиопоглотители на основе магнитных полимерных композитов и частотно-селективных поверхностей – Радиотехника и электроника, 2008, т.53, № 9, с. 1176-1184.
9. Антонов А.С., Панина Л.В., Сарычев А.К. Высокочастотная магнитная проницаемость композитных материалов, содержащих карбонильное железо. – Журнал технической физики, 1989, т. 59, №6, с. 88 – 94.
10. Михайлин Ю.А. Специальные полимерные композиционные материалы. СПб.: Научные основы и технологии, 2008. 660.
11. Колесов В.В., Петрова Н.Г., Фионов А.С. Радиопоглощающие материалы на основе наполненных полимеров // 16-я международная крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь. Украина. 2006. с. 594 – 595.
12. Лопатин А.В., Казанцева Е.Н., Казанцев Ю.Н. Эффективность использования магнитных полимерных композитов в качестве радиопоглощающих материалов. Радиотехника и электроника – 2008 – т. 53, №5, с. 517 – 526.
13. Петров В.М., Гагулин В.В. Радиопоглощающие материалы. – Неорганические материалы, 2001, т.37, №2, с. 135 – 141.
14. Хачатуров А.А., Фионов А.С., Колесов В.В., Потапов Е.Э., Ильин Е.М. Функциональные эластомерные композиционные материалы на основе бутадиен-стирольного каучука и магнетита. РЭНСИТ, 2019, том 11, №2., с.189-199.
15. Крюков А.В., Еремеев А.С. Новые радиопоглощающие гибкие материалы на основе углеродной матрицы с различными синтетическими наполнителями и оценка их поглощающих свойств в СВЧ диапазоне. РЭНСИТ, 2020, 12(3):335-340. DOI: 10.17725/rensit.2020.12.335.
16. Xiangyu Zheng, Haiwei Zhang, Zhihao Liu, Rijia Jiang, Xing Zhou, Functional composite electromagnetic shielding materials for aerospace, electronics and wearable fields, Materials Today Communications, Volume 33, 2022, 104498, ISSN 2352-4928, <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.104498>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352492822013393>)
17. C. Retailliau, J. Alaa Eddine, F. Ndagijimana, F. Haddad, B. Bayard, B. Sauviac, P. Alcouffe, M. Fumagalli, V. Bounor-Legaré, A. Serghei, Universal behavior for electromagnetic interference shielding effectiveness of polymer based composite materials, Composites Science and Technology, Volume 221, 2022, 109351, ISSN 0266-3538, <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2022.109351>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266353822000938>)
18. Yingjie Chang, Ruixing Hao, Yaqi Yang, Guizhe Zhao, Yaqing Liu, Hongji Duan, Progressive conductivity modular assembled fiber reinforced polymer composites for absorption dominated ultraefficient electromagnetic interference shielding, Composites Part B: Engineering, Volume 260, 2023, 110766, ISSN 1359-8368, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2023.110766>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135983682300269X>)
19. . Влияние формы, химического и фазового состава частиц на основе Fe на СВЧ-характеристики композитов с диэлектрической матрицей / Елсуков Е.П., Розанов К.Н. и др. // Журнал технической физики – 2009 – т.79, вып. 4 – с. 125-130.
20. Петров В., Николайчук Г. и др. Многоцелевые радиопоглощающие материалы на основе магнитных нано структур: получение, свойства, применение. – Компоненты и технологии, 2008, №10, с. 147 – 150.
21. Журавлев В.А., Сусяев В.И. и др. Радиопоглощающие свойства содержащих карбонильное железо композитов на СВЧ и КВЧ – Исследовано в России, 2010, 035/100608, с. 404 – 411.
22. Серебрянников С.П., Чепарин В.П., Румянцев П.А., Еремцова Л.Л. Электродинамические свойства диспергированных гексаферритовых наполнителей и радиопоглощающих покрытий. – Электричество, 2013, №5, с. 37 – 40.
23. Серебрянников С.П., Чепарин В.П., Китайцев А.А., Смирнов Д.О. Влияние толщины покрытия с наполнителем в виде высокоанизотропного феррита на величину поглощения электромагнитного излучения. Магнетизм, дальнее и ближнее спин-спиновое взаимодействие. – Сб. трудов XVII Междунар. Конф., (Москва – Фирсановка, 20 -22 ноября 2009 г.), с. 223 – 229.
24. Серебрянников С.В., Чепарин В.П., Смирнов Д.О., Румянцев П.А., Китайцев А.А., Еремцов Л.Л. Свойства композиционных материалов на основе ультрадисперсных ферритмагнитных наполнителей. – Электричество, 2011, №3, с. 78 – 80.
25. Taleghani H.G., Aleahmad M., Eisazadeh H. Preparation and Characterization of Polyaniline Nanoparticles Using Various Solutions. – World Applied Sciences Journal, 2009, No. 6 (12), pp. 1607–1611.
26. Журавлев В.А., Сусяев В.И., Доценко О.А., Бабинович А.Н. Композиционный радиоматериал на основе карбонильного железа для миллиметрового диапазона длин волн // Известия высших учебных заведений. Физика. 2010, №8, с. 96 – 97.
27. Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч.тр. [Электронный ресурс] / науч. ред. В.Н. Бондаренко; отв. за вып. А.А. Левицкий. Электрон. дан. (31 мб). Красноярск: Сиб. федер.ун-т, 2016.

28. ГОСТ 30381-95 / ГОСТ Р 50011-92. Совместимость технических средств электромагнитная. Поглотители электромагнитных волн для экранированных камер. Общие технические условия.

REFERENCES

1. Alimin B.F. Modern development of electromagnetic wave scavengers and radio absorption materials. - Foreign radio electronics, 1989, 2, p. 75 - 82.
2. Kovaleva T.Y., Besyazykova T.G., Shafpansky V.S. Magnetodielectric for microwave - absorbing screens. - Radioelectronics and communication, 1991, 2, p. 84 - 86.
3. Kazantseva N. Y., Rybkina N.G., Chmutin I.A. Perspective materials for electromagnetic wave absorbers of ultra-high frequency range. - Radio and Electronics, 2003, t. 1, p. 161 - 163.
4. Ostrovsky O.S., Odarenko E.N., Shmatko A.A.. Protective shields and absorbers of electromagnetic waves - Physical Surface Engineering, 2003, t. 1, p. 161 - 163.
5. Lynkov L.M., Bogut V.N., Borotko T.V., Ukrainian E.A., Kolbun N.V. New materials for screens of electromagnetic radiation. Bhuir Reports. - 3 - 2004, p. 152 - 167.
6. Abdolali Ali, Oraizi Homaeoon, Tavakoli Ahad. Ultra Wide Band Radar Absorbing Materials. Elektromagnetics Research Symposium Proceedings, Moscow, Russia, August 18-21, 2009, 351 c.
7. Wallace J.L. Broadband Magnetic Microwave Absorbers: Fundamental Limitations // IEEE Trans. Magn. - 1993. - 29, №6, Pt 3. - P. 4209-4214.
8. Lopatin A.V., Kazantsev Y. N. etc. Radioadsorbents based on magnetic polymer composites and frequency-selective surfaces - Radioengineering and electronics, 2008, vol. 53, 9, pp. 1176-1184.
9. Antonov A.S., Panina L.V., Sarychev A.K. High-frequency magnetic permeability of composite materials containing carbonyl iron. - Journal of Technical Physics, 1989, vol. 59, 6, p. 88 - 94.
10. Mikhailin Y.A. Special polymer composite materials. SPb.: Scientific bases and technologies, 2008. 660.
11. Wheels V.V., Petrova N.G., Fionov A.S. Radio absorbing materials based on filled polymers // 16th International Crimean conference «VHF-technology and telecommunications technologies». Sevastopol. Ukraine. 2006. p. 594 - 595.
12. Lopatin A.V., Kazantseva E.N., Kazantsev Y.N. Efficiency of use of magnetic polymer composites as radio absorbing materials. Radio and Electronics - 2008 - t. 53, 5, p. 517 - 526.
13. Petrov V.M., Gagulin V.V. Radio absorbing materials. - Inorganic materials, 2001, vol. 37, 2, pp. 135 - 141.
14. Khachaturov A.A., Fionov A.S., Kolesov V.V., Potapov E.E., Ilyin E.M. Functional elastomeric composite materials based on styrene-butadiene rubber and magnetite. RENSIT, 2019, volume 11, no. 2., pp. 189-199.
15. Kryukov A.V., Eremeev A.S. New radio-absorbing flexible materials based on a carbon matrix with various synthetic fillers and evaluation of their absorbing properties in the microwave range. RENSIT, 2020, 12(3):335-340. DOI: 10.17725/rensit.2020.12.335.
16. Xiangyu Zheng, Haiwei Zhang, Zhihao Liu, Rijia Jiang, Xing Zhou, Functional composite electromagnetic shielding materials for aerospace, electronics and wearable fields, Materials Today Communications, Volume 33, 2022, 104498, ISSN 2352-4928, <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.104498>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352492822013393>)
17. C. Retaileau, J. Alaa Eddine, F. Ndagijimana, F. Haddad, B. Bayard, B. Sauviac, P. Alcouffe, M. Fumagalli, V. Bounor-Legaré, A. Serghei, Universal behavior for electromagnetic interference shielding effectiveness of polymer based composite materials, Composites Science and Technology, Volume 221, 2022, 109351, ISSN 0266-3538, <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2022.109351>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266353822000938>)
18. Yingjie Chang, Ruixing Hao, Yaqi Yang, Guizhe Zhao, Yaqing Liu, Hongji Duan, Progressive conductivity modular assembled fiber reinforced polymer composites for absorption dominated ultraefficient electromagnetic interference shielding, Composites Part B: Engineering, Volume 260, 2023, 110766, ISSN 1359-8368, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2023.110766>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135983682300269X>)
19. The influence of the form, chemical and phase composition of Fe-based particles on the VHF characteristic of composites with dielectric matrix / Elsukov H.P., Rozanov K.N. etc. // Journal of Technical Physics - 2009 - vol. 79, vol. - pp. 125-130.
20. Petrov V., Nikolaychuk G. et al. Multi-purpose radio absorbing materials based on magnetic nano structures: receiving, properties, applications. - Components and Technologies, 2008, 10, p. 147 - 150.
21. Zhuravlev V.A., Suslyaev V.I. etc. Radio absorbing properties of carbonyl iron-containing composites on microwave and microwave surface - Studied in Russia, 2010, 035/100608, p. 404 - 411.
22. Serebrennikov S.P., Cheparin V.P., Rumyantsev P.A., Eremsova L.L. Electrodynamics properties of dispersed hexaferrite fillers and radio-absorbing coatings. - Electricity, 2013, 5, p. 37 - 40.
23. Serebrennikov S.P., Cheparin V.P., Chinese A.A., Smirnov D.O. Influence of thickness of coating with filler in the form of high anisotropic ferrite on the amount of absorption of electromagnetic radiation. Magnetism,

distant and near spin-spin interaction. - Sat. works of XVII Mezhdunar. Conf., (Moscow - Firsanovka, 20 - 22 November 2009), pp. 223 - 229.

24. Serebrennikov S.V., Cheparin V.P., Smirnov D.O., Rumyantsev P.A., Chinese A.A., Eremsov L.L. Properties of compositions based on ultradispersed ferrymagnetic fillers. - Electricity, 2011, 3, p. 78 - 80.

25. Taleghani H.G., Aleahmad M., Eisazadeh H. Preparation and Characterization of Polyaniline Nanoparticles Using Various Solutions. – World Applied Sciences Journal, 2009, No. 6 (12), pp. 1607–1611.

26. Zhuravlev V.A., Suslyaev V.I., Dotsenko O.A., Babinovich A.N. Carbonyl iron composite radio material for millimeter wavelength range // Izvestia of higher educational institutions. Physics. 2010, 8, p. 96 - 97.

27. Modern problems of radio electronics: collection of scientific tr. [Electronic resource] /scientific ed. V.N. Bondarenko; rev. for issue A.A. Levitsky. Electron. dan. (31 MB). Krasnoyarsk: Sib. feder.Univ., 2016.

28. GOST 30381-95 / GOST R 50011-92. Electromagnetic compatibility of technical means. Electromagnetic wave absorbers for shielded cameras. General technical conditions.

Информация об авторах:

Черкасов Василий Дмитриевич

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск, Россия,

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Прикладная механика»

E-mail: vd-cherkasov@yandex.ru

Шербак Юрий Петрович

Саровский физико-технический институт Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, г. Саров, Россия,

кандидат технических наук, доцент, советник руководителя Саровского физико-технического института Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ.

E-mail: ypscherbak@gmail.com

Черкасов Дмитрий Васильевич

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск, Россия,

кандидат технических наук, доцент кафедры «Прикладная механика».

E-mail: dv-cherkasov@yandex.ru

Information about authors:

Cherkasov Vasilii D.

National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department «Applied Mechanics».

E-mail: vd-cherkasov@yandex.ru

Shcherbak Yuri P.

Sarov Institute of Physics and Technology National Research Nuclear University MEPhI, Advisor to the Head, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor.

E-mail: ypscherbak@gmail.com

Cherkasov Dmitry V.

National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor «Applied Mechanics».

E-mail: dv-cherkasov@yandex.ru