



Строительные материалы и изделия
Construction Materials and Products

ISSN
2618-7183

journal homepage: <https://bstu-journals.ru>

DOI: 10.58224/2618-7183-2023-6-4-30-41



Радиопоглощающие материалы на основе герметика «Абрис»

Черкасов В.Д.*¹ , Щербак Ю.П.², Черкасов Д.В.¹

¹ Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, Россия,

² Саровский физико-технический институт

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Россия

**Ответственный автор E-mail: vd-cherkasov@yandex.ru*

Аннотация: в статье рассматривается создание эластичных самоклеящихся радиопоглощающих материалов для диапазона частот 4,5 – 6,0 ГГц. В последние десятилетия бурное развитие получили технологии, связанные с излучением электромагнитной энергии в окружающую среду. В 1996 году Всемирная организация здравоохранения впервые ввела понятие «Электромагнитное загрязнение окружающей среды». Электромагнитное поле является биологически активным, биотропным фактором, в определенных условиях способным вызвать патологические изменения в функционировании организма человека. Эффективный способ, позволяющий обеспечить требования электромагнитной экологии и безопасности – это снижение до приемлемого уровня электромагнитного излучения за счет применения защитных материалов. Анализируя состав существующих защитных материалов, очевидно, что экранирующие (отражающие) свойства доминируют над поглощающими. В условиях современной магнитной обстановки потребность именно в поглощающих материалах велика, что объясняется необходимостью исключить влияние переотражений на усложнение структуры электромагнитного поля, приводящего к росту суммарного поверхностного облучения объекта. В связи с этим на основе этиленпропиленового герметика «Абрис» выпускаемого ООО «Завод герметизирующих материалов» г. Дзержинск Нижегородской области разработан радиопоглощающий материал. Для поглощения электромагнитного излучения в него вводится углеродное волокно UFM-4HD и металлическая окалина. Показано, что введение их в состав композита приводит к поглощению электромагнитного излучения 75-78%. Материал предназначен для защиты помещений и оборудования от электромагнитного излучения.

Ключевые слова: электромагнитное излучение, СВЧ-диапазон, углеродное волокно, металлическая окалина, радиопоглощающий материал, исследования

Для цитирования: Черкасов В.Д., Щербак Ю.П., Черкасов Д.В. Радиопоглощающие материалы на основе герметика «Абрис» // Строительные материалы и изделия. 2023. Том 6. № 4. С. 30 – 41. DOI: 10.58224/2618-7183-2023-6-4-30-41

Radar absorbing materials based on sealant "Abris"

Cherkasov V.D.* , Shcherbak Yu.P.², Cherkasov D.V.¹

¹ National Research Ogarev Mordovia State University, Russia,

² Sarov Institute of Physics and Technology
National Research Nuclear University MEPhI, Russia

*Corresponding author E-mail: vd-cherkasov@yandex.ru

Abstract: the article discusses the creation of elastic self-adhesive radio absorbing materials for the frequency range of 4.5 – 6.0 GHz. In recent decades, technologies related to the emission of electromagnetic energy into the environment have been rapidly developed. In 1996, the World Health Organization first introduced the concept of "Electromagnetic environmental pollution". The electromagnetic field is a biologically active, biotropic factor that, under certain conditions, can cause pathological changes in the functioning of the human body. An effective way to meet the requirements of electromagnetic ecology and safety is to reduce electromagnetic radiation to an acceptable level through the use of protective materials. Analyzing the composition of existing protective materials, it is obvious that the shielding (reflecting) properties dominate over the absorbing ones. Under the conditions of the modern magnetic environment, the need for absorbing materials is great, which is explained by the need to exclude the influence of re-reflections on the complication of the structure of the electromagnetic field, which leads to an increase in the total surface irradiation of the object. In this regard, based on the ethylene-propylene sealant "Abris" produced by LLC "Plant of sealing materials", Dzerzhinsk, Nizhny Novgorod region, a radio-absorbing material was developed. To absorb electromagnetic radiation, UFM-4HD carbon fiber and metal scale are introduced into it. It is shown that their introduction into the composition of the composite leads to the absorption of electromagnetic radiation by 75-78%. The material is designed to protect premises and equipment from electromagnetic radiation.

Keywords: electromagnetic radiation, microwave range, carbon fiber, metal scale, radio absorbing material, research

Please cite this article as: Cherkasov V.D., Shcherbak Yu.P., Cherkasov D.V. Radar absorbing materials based on sealant "Abris". Construction Materials and Products. 2023. 6 (4.) P. 30 – 41. DOI: 10.58224/2618-7183-2023-6-4-30-41

ВВЕДЕНИЕ

За прошедшие 20 лет отечественными и зарубежными организациями разработано значительное количество новых экранирующих материалов, учитывающих современные технологические возможности производства и потребности в применении.

Кроме задачи обеспечения электромагнитной безопасности человека, значительное количество разработок радиоэкранирующих и радиопоглощающих материалов ведётся в интересах задач радиомаскировки и обеспечения электромагнитной совместимости. В настоящее время изучается возможность создания принципиально нового класса всенаправленных бестоковых радиопоглощающих материалов и покрытий на основе применения механизма локального энергетического (квантового) взаимодействия электромагнитного поля с гиромангнитной средой, разработана технология получения пористых радиопоглощающих покрытий с ферритовыми наполнителями. Изучается отличие свойств резистивных радиопоглощающих материалов, в которых за поглощение ЭМ энергии ответственен механизм непрерывной во времени и пространстве работы силы Лоренца, от свойств бестоковых (спиновых) радиопоглощающих мате-

риалов (CRAM), в которых за поглощение ЭМ энергии ответственен спиновый механизм дискретного поглощения энергии [27].

Для решения задач ЭМС и построения маловесящих радиопоглощающих объемов разработаны материалы из вспененного стекла, специализированных пластмасс, композитные металло-содержащие волокнистые материалы [1, 2, 3, 4, 7, 8, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 28, 29, 30].

Используются разработки в области нанотехнологий. На основе гранулированных пленок были разработаны покрытия, поглощающие электромагнитные волны в широком СВЧ диапазоне. Радиопоглощающие покрытия состоят из нескольких слоёв с разной концентрацией ферромагнитных металлических наночастиц. Слои представляют собой кевларовую ткань с напыленной структурой гидрогенизированного углерода с наночастицами Co и Ni. Толщина напыленной структуры и концентрации Co и Ni для каждого слоя подбираются таким образом, чтобы увеличить поглощение в каждом слое и использовать резонансные условия между слоями покрытия. Они предназначены для использования в диапазоне частот 8-80 ГГц и обеспечивают поглощение не менее 10 дБ [31, 32].

Анализ отечественных радиопоглощающих материалов показал, что все они сложны в изготовлении, имеют высокую массу, цену на уровне импортных аналогов, трудно монтируются на защищаемой поверхности. В связи с этим требуется разработка недорогих радиопоглощающих материалов, которые легко монтируются и демонтируются. Такими материалами являются самоклеящиеся невысыхающие герметики. В статье рассматривается создание радиопоглощающих материалов на основе не высыхающих герметиков.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

В связи с этим 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 металлическая окалина.

Согласно результатам элементного анализа, методом растровой электронной микроскопии металлическая окалина представляет собой материал на основе железа, содержащий множество примесей, предположительно, в виде сульфата бария, алюминия и/или оксида алюминия, кремния и/или оксида кремния, алюмосиликатов, цинка и/или оксида цинка, марганца и/или оксида марганца, титана и/или оксида титана, оксида кальция (также встречается фторид кальция), оксиды натрия, калия и железа. В составе образца также присутствует углерод. Элементный состав металлической окалины приведен в табл. 1.

Таблица 1. Элементный состав в металлической окалине
Table 1. Elemental composition in metal scale

Наименование элемента	Усреднённое содержание, масс. %
C	23.5
O	11.1
Na	0.3
Al	0.6
Si	2.0
S	0.6
Ca	0.3
Ti	0.8
Mn	0.6
Fe	57.4
Zn	0.4
Ba	2.6

Основными радиофизическими характеристиками радиопоглощающих материалов являются коэффициенты отражения, прохождения и поглощения электромагнитного излучения [25].

Определение радиофизических характеристик проводили по ГОСТ 50011-92 (ГОСТ 30381-95) [6]. 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.

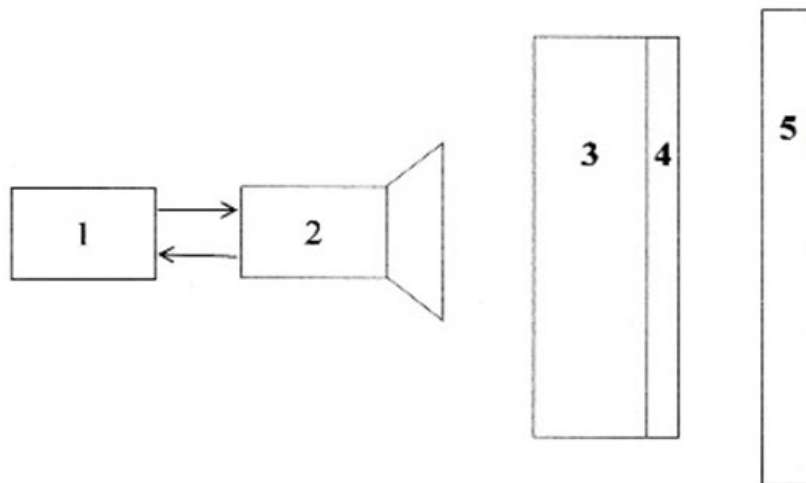


Рис. 1. Структурная схема измерений коэффициента отражения: 1 – скалярный анализатор цепей серии P2M; 2 – рупорная антенна; 3 – образец РПМ; 4 – металлическая пластина; 5 – ПЭВ (поглотитель ЭМИ)

Fig. 1. Block diagram of reflection coefficient measurements: 1 – scalar network analyzer of R2M series; 2 – horn antenna; 3 – RPM sample; 4 – metal plate; 5 – SEW (EMP absorber)

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 [26].

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.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Результаты исследований представлены на рис. 2 и 3.

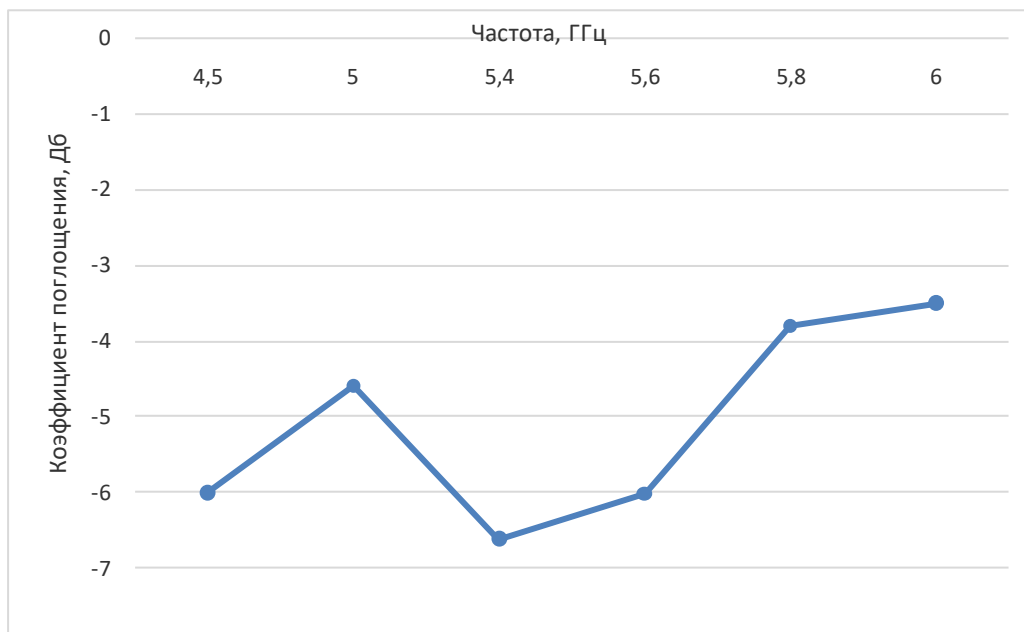


Рис. 2. Частотная зависимость коэффициента поглощения РПМ (толщина 2 мм)
Fig. 2. Frequency dependence of the RPM absorption coefficient (thickness 2 mm)

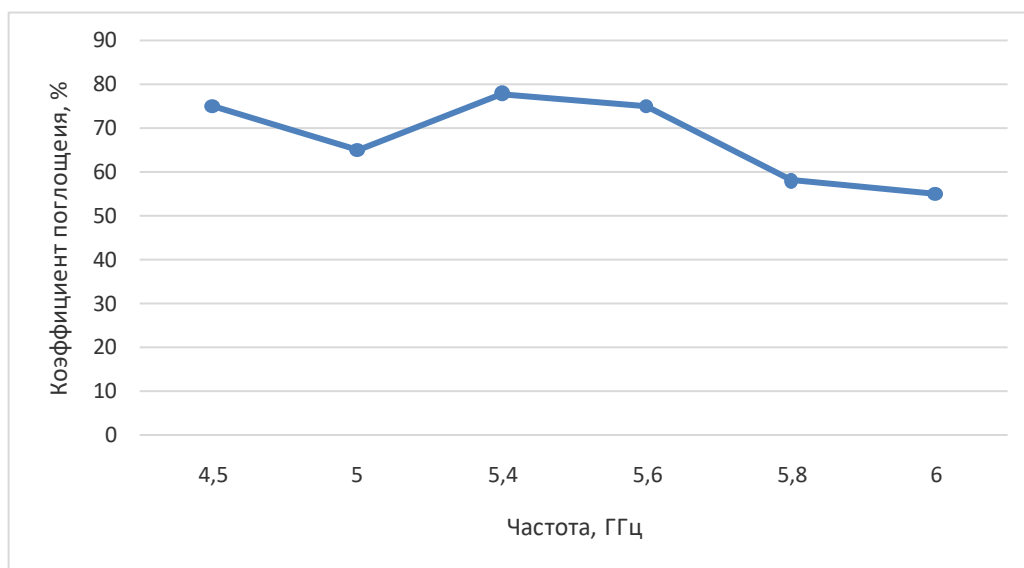


Рис. 3. Частотная зависимость коэффициента поглощения РПМ (толщина 2мм)
Fig. 3. Frequency dependence of the RPM absorption coefficient (thickness 2 mm)

Проведенные исследования поглощающих свойств радиопоглощающего материала показали, что они обладают хорошими поглощающими свойствами (рис. 1 и 2). В диапазоне частот 4,5-5,5 ГГц коэффициент поглощения находится в пределах 75-78 %. Максимальное поглощение электромагнитного излучения наблюдается на частоте 5,6 ГГц и составляет 78%. На частотах 5,8 и 6,0 ГГц поглощение составляет соответственно 58% и 55%. Установлено, что такое высокое поглощение наблюдается при следующем соотношении наполнителей: 5% углеродное волокно и 45% металлическая окалина. По характеру поглощения (рис. 2 и 3) его можно отнести к широкополосному радиопоглощающему материалу.

Исследовано влияние толщины радиопоглощающего материала на поглощение электромагнитного излучения. Толщина материала принималась 1 и 2 мм. В ходе проведенных исследова-

ний установлено, что тонкие материалы (толщина 1 мм) эффективно работают на частотах выше 6,0 ГГц, а при толщине материала 2 мм максимум поглощения 78% наблюдается на частоте 5,6 ГГц.

Радиопоглощающие материалы нашли широкое применение в качестве защитных покрытий. Существующие полимерные покрытия закрепляются на поверхности с помощью силиконового клея. Это во-первых трудоёмкий процесс. Твердение клея происходит в течении 12 часов при повышенной температуре. Во-вторых непрочность приводит к тому, что всё покрытие не осуществляет защитные функции. В связи с этим разработанный радиопоглощающий материал создан самоклеющимся, эластичным, способным наноситься на поверхность сложной формы. Важным свойством такого покрытия является адгезионная прочность (прочность связи с металлом при отслаивании и адгезия к бетону и другим материалам). Основные физико-механические свойства радиопоглощающего материала приведены в табл. 2.

Как видно из табл. 2 радиопоглощающий материал имеет высокую адгезионную прочность с металлом и бетоном. При необходимости его можно снять с поверхности защищаемой конструкции без повреждения покрытия.

При нанесении радиопоглощающего покрытия на поверхность сложной формы в них не должно образовываться трещин, т.к. это приведет к потере защитных свойств. В связи с этим радиопоглощающий материал испытывают на гибкость. Испытания на гибкость показали, что в нем не образуется трещин (табл. 2).

Перед нанесением радиопоглощающего покрытия на рабочую поверхность зачищают от ржавчины. Материал планируется выпускаться в виде листов и рулонов. Листы и рулоны с двух сторон покрыты антиадгезионным материалом. Для нанесения покрытия на защищаемую поверхность с него с одной стороны снимается антиадгезионный материал. Затем надо прижать его к рабочей поверхности и прикатать роликом. После этого снимается антиадгезионный материал с другой стороны. Таким образом защита от электромагнитного излучения готова к эксплуатации.

Таблица 2. Физико-механические свойства радиопоглощающего материала
Table 2. Physical and mechanical properties of the radio absorbing material

№ п.п.	Наименование показателя	Показатель
1	Плотность, г/см ³	2,0
2	Прочность связи с металлом при отслаивании, Н/М	518
3	Характер разрушения	адгезионный
4	Адгезия к бетону, МПа	0,14
5	Предел прочности при максимальной нагрузке, МПа	0,066
6	Относительное удлинение при разрыве, %	95
7	Гибкость, при (20±5)°С, радиус закругления бруса 15 мм	Отсутствие трещин и разрывов

ВЫВОДЫ

Для защиты от воздействия электромагнитного излучения на основе этиленпропиленового герметика «разработан радиопоглощающий материал. В качестве наполнителя в нем использовано углеродное волокно и металлическая окалина. Поглощение электромагнитного излучения в нем на частотах 4,5-5,6 ГГц составляет 75-78%. Толщина материала 2 мм. Материал эластичный, самоклеющийся.

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] Анализ перспективных радиопоглощающих материалов // Вестник ВГТУ. 2012 № 6. С. 70 – 76.
- [2] Гульбин В.Н., Михеев В.А., Колпаков Н.С., Александров Ю.К., Поливкин В.В. Материалы для защиты среды обитания человека от влияния электромагнитных излучений // Технологии ЭМС. 2013. № 2 (45). С. 18 – 25.
- [3] Елсуков Е.П., Розанов К.Н. и др. Влияние формы, химического и фазового состава частиц на основе Fe на СВЧ-характеристики композитов с диэлектрической матрице // Журнал технической физики. 2009. Т. 79, вып. 4. С. 125 – 130.
- [4] Колесов В.В., Петрова Н.Г., Фионов Л.С. Радиопоглощающие материалы на основе наполненных полимеров // 16-я международная крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь, 2006. С. 594 – 595.
- [5] Черкасов В.Д., Юркин Ю.В., Черкасов Д.В. Самоклеящийся радиопоглощающий материал // Патент РФ на изобретение № 2798073. 2023.
- [6] ГОСТ 30381-95 / ГОСТ Р 50011-92 Совместимость технических средств электромагнитная. Поглотители электромагнитных волн для экранированных камер. Общие технические условия
- [7] Серебрянников С.В., Черкасов А.П., Долгов А.В., Еремцова Л.Л., Румянцев П.А. // Широкополосные композиционные радиопоглощающие покрытия на основе ультрадисперсных гексаферритовых наполнителей // Электричество. 2015. № 6. С. 55 – 60.
- [8] Журавлев В.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.
- [9] Лукьянова С.Н., Карпикова Н.И., Григорьев Ю.Г., Веселовский И.А. Изучение реакций мозга человека на электро-магнитные поля нетепловой интенсивности. Гигиена и санитария. 2017. № 96 (9). С. 848 – 854. DOI: <http://dx.doi.org/10.18821/0016-9900-2017-96-9-848-854>
- [10] Шилкова Т.В., Шибкова Д.З., Ефимова Н.В., Полевик Н.Д. Оценка биологических эффектов электромагнитного поля радиочастотного диапазона низкой интенсивности на систему крови экспериментальных животных // Вестник ЮУрГУ. 2011. № 7. С. 10 – 15.
- [11] Городецкий Б.Н., Каляда Т.В., Петров С.В. Опыт разработки специализированной медико-технической лаборатории для исследований влияния мощного электромагнитного излучения на биологические объекты // Медицина труда и промышленная экология. 2015. № 2. С. 44 – 47.
- [12] 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. Т. 11. № 2. С. 189 – 199.
- [13] 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). С. 335 – 340. DOI: 10.17725/rensit.2020.12.335

- [14] Саенко Н.С., Зиятдинов А.М. Ферромагнитные нанокompозиты на основе многослойных углеродных нанотрубок, полученные каталитическим пиролизом метана // Химия и химическая технология. 2015. Т. 58, вып. 5. С. 10 – 13.
- [15] Колесов В.В., Фионов А.С., Горшенев В.Н. Моделирование радиопоглощающих сред на основе композиционных материалов из поливинилхлоридных пластизолой // Радиоэлектроника, Наносистемы, Информационные технологии. 2010. № 1-2. Т. 2. С. 138 – 161.
- [16] Yuchang Qing, Wancheng Zhou, Fa Luo, Dongmei Zhu, Optimization of electromagnetic matching of carbonyl iron/BaTiO₃ composites for microwave absorption // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2011. Vol. 323. Issue 5. P. 600 – 606. ISSN 0304-8853, <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2010.10.021>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304885310007481>)
- [17] Nina Joseph, Mailadil Thomas Sebastian, Electromagnetic interference shielding nature of PVDF-carbonyl iron composites // Materials Letters. 2013. Vol. 90. P. 64 – 67. ISSN 0167-577X, <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2012.09.014>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167577X12012943>)
- [18] Nina Joseph, Chameswary Janardhanan, Mailadil Thomas Sebastian, Electromagnetic interference shielding properties of butyl rubber-single walled carbon nanotube composites // Composites Science and Technology. 2014. Vol. 101. P. 139 – 144. ISSN 0266-3538, <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2014.07.002>
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266353814002322>)
- [19] Lidong Liu, Yuping Duan, Shunhua Liu, Liyang Chen, Jingbo Guo, Microwave absorption properties of one thin sheet employing carbonyl-iron powder and chlorinated polyethylene // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2010. Vol. 322. Issue 13. P. 1736 – 1740. ISSN 0304-8853, <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2009.12.017>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304885309011627>)
- [20] Xiangyu Zheng, Haiwei Zhang, Zhihao Liu, Rijia Jiang, Xing Zhou, Functional composite electromagnetic shielding materials for aerospace, electronics and wearable fields // Materials Today Communications. 2022. Vol. 33. P. 104498. ISSN 2352-4928, <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.104498>
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352492822013393>)
- [21] Retaillieu C., Alaa Eddine J., Ndagijimana F., Haddad F., Bayard B., Sauviac B., Alcouffe P., Fumagalli M., Bounor-Legaré V., Serghei A. Universal behavior for electromagnetic interference shielding effectiveness 2022. of polymer based composite materials // Composites Science and Technology. Vol. 221. P. 109351. ISSN 0266-3538, <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2022.109351>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266353822000938>)
- [22] Mauro A. Soto-Oviedo, Olacir A. Araújo, Roselena Faez, Mirabel C. Rezende, Marco-A. De Paoli, Antistatic coating and electromagnetic shielding properties of a hybrid material based on polyaniline/organoclay nanocomposite and EPDM rubber // Synthetic Metals. 2006. Vol. 156. Issues 18-20. P. 1249 – 1255. ISSN 0379-6779, <https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2006.09.003>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037967790600213X>)
- [23] Jean-Michel Thomassin, Christine Jérôme, Thomas Pardoën, Christian Bailly, Isabelle Huynen, Christophe Detrembleur, Polymer/carbon based composites as electromagnetic interference (EMI) shielding materials // Materials Science and Engineering: R: Reports, 2013. Vol. 74. Issue 7. P. 211 – 232. ISSN 0927-796X, <https://doi.org/10.1016/j.mser.2013.06.001>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927796X1300048X>)

- [24] 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*. 2023. Vol. 260. P. 110766. ISSN 1359-8368, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2023.110766>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135983682300269X>)
- [25] 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.
- [26] Пенской А.С. Волны в волноводах при наличии тонких пленок полярных диэлектриков: дис. ... канд. физико-математ. Наук / Место защиты: Волгоградский государственный технический университет. Волгоград, 2016. 111 с.
- [27] Михайловский Л.К. Радиопоглощающие бестоковые среды, материалы и покрытия (электромагнитные свойства и практические применения) // *Зарубежная радиоэлектроника. Успехи соврем. радиоэлектроники*. 2000. № 9. С. 21 – 30.
- [28] Богущ В.А. Композитные металлсодержащие волокнистые материалы для гибких экранов электромагнитного излучения: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники. Минск, 2000. 19 с.
- [29] Криваткин А.М., Сакуненко Ю.Т. Специальные пластмассы для экранирования электромагнитных излучений // *Полимерные и композиционные материалы: технологии, оборудование, применение: тез. докл. науч.-практ. конф. 7 междунар. специализир. выставки "Индустрия пластмасс'2006"*, Москва, 14 марта 2006 г. М.: Максима, 2006. С. 28 – 30.
- [30] Казанцева Н.Е., Рывкина Н.Г., Чмутин И.А. Перспективные материалы для поглотителей электромагнитных волн сверхвысокочастотного диапазона // *Радиотехника и электроника*. 2003. Т. 48. № 2. С. 196 – 209.
- [31] Луцев Л.В., Николайчук Г.А., Петров В.В., Яковлев С.В. Многоцелевые радиопоглощающие материалы на основе магнитных наноструктур: получение, свойства и применение // *Нанотехника*, 2008. № 2 (14). С. 36 – 43.
- [32] Николайчук Г., Иванов В., Яковлев С. Радиопоглощающие материалы на основе наноструктур // *Электроника: наука, технология, бизнес*. 2010. № 1. С. 92 – 95. Библиогр.: 6 назв.

REFERENCES

- [1] Analysis of promising radio-absorbing materials. *Bulletin of VSTU*. 2012 6. P. 70 – 76. (rus.)
- [2] Gulbin V.N., Mikheev V.A., Kolpakov N.S., Aleksandrov Yu.K., Polivkin V.V. Materials for protecting the human habitat from the influence of electromagnetic radiation. *Technologies of EMS*. 2013. 2 (45). P. 18 – 25. (rus.)
- [3] Elsukov E.P., Rozanov K.N. et al. The influence of the shape, chemical and phase composition of Fe-based particles on the microwave characteristics of composites with a dielectric matrix. *Journal of Technical Physics*. 2009. 79 (4). P. 125 – 130. (rus.)
- [4] Kolesov V.V., Petrova N.G., Fionov L.S. Radio-absorbing materials based on filled polymers. 16th International Crimean Conference “Microwave equipment and telecommunication technologies”. Sevastopol, 2006. P. 594 – 595. (rus.)
- [5] Cherkasov V.D., Yurkin Yu.V., Cherkasov D.V. Self-adhesive radio-absorbing material. RF Patent for invention 2798073. 2023. (rus.)
- [6] GOST 30381-95. GOST R 50011-92 Electromagnetic compatibility of technical means. Electromagnetic wave absorbers for shielded cameras. General technical conditions (rus.)
- [7] Serebryannikov S.V., Cherkasov A.P., Dolgov A.V., Eremtsova L.L., Rummyantsev P.A. Broadband composite radio-absorbing coatings based on ultrafine hexaferrite fillers. *Electricity*. 2015. 6. P. 55 – 60. (rus.)

- [8] Zhuravlev V.A., Babinovich A.N. Composite radio material based on carbonyl iron for the millimeter wavelength range. Proceedings of higher educational institutions. Physics. 2010. 8. P. 96 – 97. (rus.)
- [9] Lukyanova S.N., Karpikova N.I., Grigoriev Yu.G., Veselovsky I.A. Study of human brain reactions to electro-magnetic fields of non-thermal intensity. Hygiene and sanitation. 2017. 96 (9). P. 848 – 854. DOI: <http://dx.doi.org/10.18821/0016-9900-2017-96-9-848-854> (rus.)
- [10] Shilkova T.V., Shibkova D.Z., Efimova N.V., Polevik N.D. Evaluation of biological effects of the electromagnetic field of the low-frequency range of the low-intensity range on the blood system of experimental animals. Bulletin of SUSU. 2011. 7. P. 10 – 15. (rus.)
- [11] Gorodetsky B.N., Kalyada T.V., Petrov S.V. Experience in the development of a specialized medical and technical laboratory for the study of the effect of powerful electromagnetic radiation on biological objects. Occupational medicine and industrial ecology. 2015. 2. P. 44 – 47. (rus.)
- [12] 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. 11 (2). P. 189 – 199. (rus.)
- [13] Kryukov A.V., Ereemeev 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). P. 335 – 340. DOI: 10.17725/rensit.2020.12.335(rus.)
- [14] Saenko N.S., Ziatdinov A.M. Ferromagnetic nanocomposites based on multilayer carbon nanotubes obtained by catalytic pyrolysis of methane. Chemistry and chemical technology. 2015. 58 (5). P. 10 – 13. (rus.)
- [15] Kolesov V.V., Fionov A.S., Gorshenev V.N. Modeling of radio-absorbing media based on composite materials from polyvinyl chloride plastisols. Radioelectronics, Nanosystems, Information technologies. 2010. 1-2 (2). P. 138 – 161. (rus.)
- [16] Yuchang Qing, Wancheng Zhou, Fa Luo, Dongmei Zhu, Optimization of electromagnetic matching of carbonyl iron/BaTiO₃ composites for microwave absorption. Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2011. 323 (5). P. 600 – 606. ISSN 0304-8853, <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2010.10.021>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304885310007481>)
- [17] Nina Joseph, Mailadil Thomas Sebastian, Electromagnetic interference shielding nature of PVDF-carbonyl iron composites. Materials Letters. 2013. 90. P. 64 – 67. ISSN 0167-577X, <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2012.09.014>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167577X12012943>)
- [18] Nina Joseph, Chameswary Janardhanan, Mailadil Thomas Sebastian, Electromagnetic interference shielding properties of butyl rubber-single walled carbon nanotube composites. Composites Science and Technology. 2014. 101. P. 139 – 144. ISSN 0266-3538, <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2014.07.002>
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266353814002322>)
- [19] Lidong Liu, Yuping Duan, Shunhua Liu, Liyang Chen, Jingbo Guo, Microwave absorption properties of one thin sheet employing carbonyl-iron powder and chlorinated polyethylene. Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2010. 322 (13). P. 1736 – 1740. ISSN 0304-8853, <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2009.12.017>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304885309011627>)
- [20] Xiangyu Zheng, Haiwei Zhang, Zhihao Liu, Rijia Jiang, Xing Zhou, Functional composite electromagnetic shielding materials for aerospace, electronics and wearable fields. Materials Today Communications. 2022. 33. P. 104498. ISSN 2352-4928, <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.104498>
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352492822013393>)

- [21] Retailleau C., Alaa Eddine J., Ndagijimana F., Haddad F., Bayard B., Sauviac B., Alcouffe P., Fumagalli M., Bounor-Legaré V., Serghei A. Universal behavior for electromagnetic interference shielding effectiveness 2022. of polymer based composite materials. *Composites Science and Technology*. 221. P. 109351. ISSN 0266-3538, <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2022.109351>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266353822000938>)
- [22] Mauro A. Soto-Oviedo, Olacir A. Araújo, Roselena Faez, Mirabel C. Rezende, Marco-A. De Paoli, Antistatic coating and electromagnetic shielding properties of a hybrid material based on polyaniline/organoclay nanocomposite and EPDM rubber. *Synthetic Metals*. 2006. 156 (18-20). P. 1249 – 1255. ISSN 0379-6779, <https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2006.09.003>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037967790600213X>)
- [23] Jean-Michel Thomassin, Christine Jérôme, Thomas Pardoën, Christian Bailly, Isabelle Huynen, Christophe Detrembleur, Polymer/carbon based composites as electromagnetic interference (EMI) shielding materials. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 2013. 74 (7). P. 211 – 232. ISSN 0927-796X, <https://doi.org/10.1016/j.mser.2013.06.001>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927796X1300048X>)
- [24] 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*. 2023. 260. P. 110766. ISSN 1359-8368, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2023.110766>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135983682300269X>)
- [25] Modern problems of radio electronics: collection of scientific works. [Electronic resource]. scientific ed. V.N. Bondarenko; rel. for issue A.A. Levitsky. *Electron. dan.* (31 MB). Krasnoyarsk: Sib. feder. university, 2016. (rus.)
- [26] Penskoj A.S. Waves in waveguides in the presence of thin films of polar dielectrics: dis. ... cand. physico-mathematical Sciences. Place of defence: Volgograd State Technical University. Volgograd, 2016. 111 p. (rus.)
- [27] Mikhailovsky L.K. Radio-absorbing shockless media, materials and coatings (electromagnetic properties and practical applications). *Foreign radio electronics. Success of modern radio electronics*. 2000. № 9. S. 21 – 30. (rus.)
- [28] Bogush V.A. Composite metal-containing fibrous materials for flexible electromagnetic radiation screens: abstract of the dissertation of the Candidate of Engineering Sciences. Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. Minsk, 2000. 19 p. (rus.)
- [29] Krivatkin A.M., Sakunenko Yu.T. Special plastics for shielding electromagnetic radiation. *Polymer and composite materials: technologies, equipment, application: thes. reports of scientific-practical conf. 7 international specialization exhibitions "Plastics Industry'2006"*, Moscow, March 14, 2006, Moscow: Maxima, 2006. P. 28 – 30. (rus.)
- [30] Kazantseva N.E., Ryvkina N.G., Chmutin I.A. Promising materials for electromagnetic wave absorbers of the ultrahigh frequency range. *Radio Engineering and Electronics*. 2003. 48. № 2. P. 196 – 209. (rus.)
- [31] Lutsev L.V., Nikolaichuk G.A., Petrov V.V., Yakovlev S.V. Multipurpose radio-absorbing materials based on magnetic nanostructures: preparation, properties and application. *Nanotech*, 2008. № 2 (14). P. 36 – 43. (rus.)
- [32] Nikolaychuk G., Ivanov V., Yakovlev S. Radio-absorbing materials based on nanostructures. *Electronics: science, technology, business*. 2010. № 1. P. 92 – 95. Bibliogr.: 6 titles. (rus.)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ/ INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Черкасов В.Д., e-mail: vd-cherkasov@yandex.ru, тел. +7-927-276-40-35, ORCID ID: 0000-0002-0662-6595, SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=54386498100>, Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, кафедра «Прикладная механика», доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой

Щербак Ю.П., e-mail: ypscherbak@gmail.com, тел. +7-987-553-12-60, SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57220074264>, Саровский физико-технический институт Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, советник руководителя, кандидат технических наук, доцент

Черкасов Д.В., e-mail: vd-cherkasov@yandex.ru, тел. +7-929-747-02-82, Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, кафедра «Прикладная механика», кандидат технических наук, доцент

Поступила в редакцию 2 апреля 2023 г.
Принята в доработанном виде 14 июня 2023 г.
Одобрена для публикации 3 августа 2023 г.

Cherkasov V.D., e-mail: vd-cherkasov@yandex.ru, tel. +7-927-276-40-35, ORCID ID: 0000-0002-0662-6595, SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=54386498100>, National Research Ogarev Mordovia State University, Department of Applied Mechanics, Doctor of Engineering Sciences (Advanced Doctor), Professor, Head of the Department

Shcherbak Yu.P., e-mail: ypscherbak@gmail.com, tel. +7-987-553-12-60, SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57220074264>, Sarov Institute of Physics and Technology National Research Nuclear University MEPHI, Advisor to the Head, Candidate of Engineering Sciences (Ph.D.), Associate Professor

Cherkasov D.V., e-mail: vd-cherkasov@yandex.ru, tel. +7-929-747-02-82, National Research Ogarev Mordovia State University, Department of Applied Mechanics, Candidate of Engineering Sciences (Ph.D.), Associate Professor

Received: April 2, 2023.
Revised: June 14, 2023.
Accepted: August 3, 2023