

ФИЗИКА

УДК 537.8.029.6:621.37.029.6

DOI 10.52928/2070-1624-2022-39-11-47-52

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБЪЕМНОГО РАДИОПОГЛОЩАЮЩЕГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ НАНОУГЛЕРОДА

д-р физ.-мат. наук, проф. В. А. БОГУШ, канд. физ.-мат. наук В. Н. РОДИОНОВА
(Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск);
О. В. ТАНАНА
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

Представлена методика экспериментального исследования электродинамических характеристик радиопоглощающего материала. Приведены результаты экспериментального исследования коэффициента отражения и коэффициента ослабления образцов объемных материалов электромагнитной защиты на основе нанουглерода в диапазоне частот 8–12 ГГц. Даны рекомендации по практическому применению исследуемых материалов: СВЧ-поглотители могут применяться внутри рабочих полостей узлов и аппаратуры для предотвращения многократных переотражений СВЧ-волн и позволяют решить проблему экранирования на высоких частотах посредством поглощения рассеянного излучения.

Ключевые слова: *сверхвысокие частоты, объемные поглощающие материалы, поглощение и отражение электромагнитного излучения, электромагнитная защита, углеродные наноматериалы.*

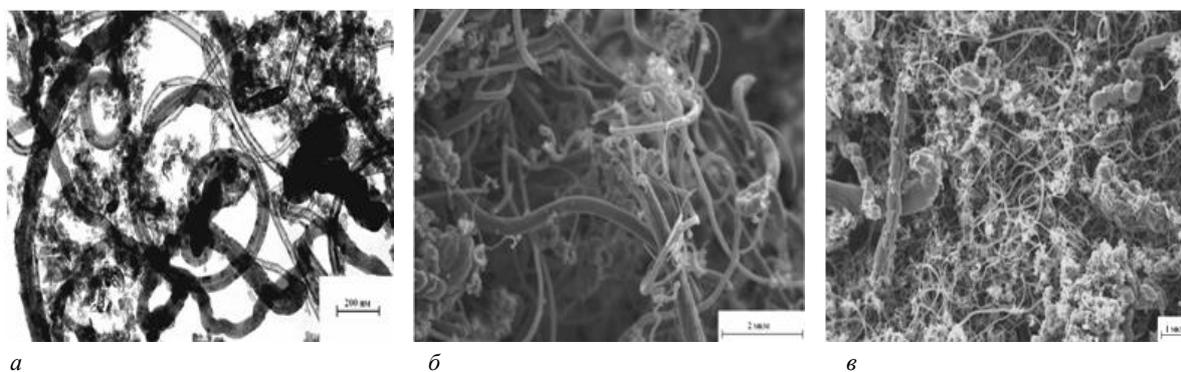
Введение. Разработка новых материалов для решения проблемы уменьшения помех и электромагнитной совместимости устройств становится весьма актуальной в связи с развитием и увеличением мощности устройств СВЧ-радиоэлектроники. Это приводит к тому, что возникающее при их работе электромагнитное излучение на частотах высших типов гармоник создает значительные помехи радиоэлектронной аппаратуре. Важную роль приобретают материалы, эффективно поглощающие сверхвысокочастотные электромагнитные излучения [1–6]. Радиопоглощающие материалы (РПМ) СВЧ-диапазона являются также незаменимыми в радиолокации и специальной технике [7]. Существенное снижение взаимных помех в передающих и приемных трактах устройств возможно за счет применения при создании РПМ на основе углеродных наноматериалов нового поколения, обеспечивающих расширение функциональных и тактико-технических возможностей электронных средств специальной техники.

Кроме того, развитие экспериментальной радиофизики в значительной мере связано с освоением коротковолновой части сантиметрового и миллиметрового диапазонов радиоволн. Важным аспектом освоения данных диапазонов также является создание новых типов материалов с улучшенными электрическими и эксплуатационными характеристиками. Развитие современных технологий (наноструктуры, метаматериалы) открыло ряд новых возможностей для СВЧ-материаловедения. Особое место занимают здесь материалы на основе различных форм нанουглерода (графен, материалы на основе фуллеренов и нанотрубок и т. д.). Интерес к ним обусловлен различными факторами. Эти материалы, в частности, характеризуются небольшой массой, низкой стоимостью, простотой получения и относительно высокой электропроводностью [8–11]. Они перспективны для создания высокоэффективных отражающих и поглощающих [12–16] покрытий. Кроме того, данные материалы обладают уникальными механическими характеристиками, такими как высокая прочность.

Развитие СВЧ-устройств различного назначения определяет актуальность поиска путей управления частотной дисперсией комплексной диэлектрической проницаемости с помощью полимерных композитов, наполненных полидисперсными углеродными нанопорошками. С этой целью активно проводятся теоретические и экспериментальные исследования полимерных композиционных материалов для аппаратуры СВЧ-диапазона, устанавливаются закономерности изменения свойств радиопоглощающих композитов в магнитных и электрических полях, что позволяет разрабатывать теоретические положения и рекомендации в области создания и применения композиционных материалов для систем СВЧ-техники, обеспечения электромагнитной совместимости и помехозащищенности радиоэлектронной аппаратуры.

Объемные радиопоглощающие материалы. Для создания композиционных РПМ использовались углеродные наноматериалы, полученные путем разложения углеводородов в плазме высоковольтного разряда атмосферного давления и формирования углеродных нанотрубок и нановолокон из продуктов реакций на металлической стенке реактора (этот способ является модификацией известного CVD-метода) [17]. Конечный продукт представляет собой порошок черного цвета со средней насыпной плотностью 0,2 г/см³. Содержание углеродных наноструктур в продукте определялось с использованием просвечивающей и сканирующей электронной микроскопии (ПЭМ и СЭМ). Исследуемый материал содержит совокупность образований из углерода, состоящую из углеродных нановолокон диаметром

50–80 нм (около 50%), аморфного углерода (около 30%), многостенных углеродных нанотрубок (около 15%) и соединений металла (3–5%) (СТБ 1873-2008). На рисунке 1 представлены фотографии материала, на которых видно, что часть углеродных структур представляет собой волокна различной длины и формы с характерными диаметрами 100–200 нм и выше. Кроме того, материал содержит структуры меньших диаметров 50–70 нм, длина которых достигает 1 мкм. По мнению производителя, данные структуры следует отнести к многостенным углеродным нанотрубкам.



а – полученные посредством ПЭМ; *б, в* – полученные посредством СЭМ

Рисунок 1. – Фотографии углеродного наноматериала, образующегося на металлической поверхности камеры осаждения

В таблице приведены физические свойства синтезированного углеродного наноматериала [18].

Таблица. – Физические свойства углеродного наноматериала

Объемная плотность, г/см ³	0,2
Удельная поверхность, м ² /г	750–870
Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)	1000–1500
Температура начала окисления, °С	500
Удельное сопротивление, Ом/см	0,42

Из данного углеродного наноматериала были изготовлены объемные поглотители электромагнитного излучения. Объемные материалы электромагнитной защиты представляют собой многокомпонентные композиционные материалы, в состав которых входят неметаллическая матрица и мелкодисперсные порошкообразные или дискретные проводящие наполнители или их сочетание (углеродосодержащие составляющие, ферромагнитные наночастицы, наночастицы металлов и др.). При взаимодействии электромагнитного излучения с радиопоглощающим материалом происходят одновременные процессы поглощения, рассеяния и интерференции радиоволн. Путем подбора состава и свойств наполнителя и матрицы (связующего), их соотношения, ориентации наполнителя можно получить материалы с требуемыми эксплуатационными характеристиками. В качестве полимерного связующего практически всегда используют различные низковязкие реактопласты невысокой молекулярной массы (эпоксидные, фенолформальдегидные, кремнийорганические, полиэфирные и др.), которые после формования изделия отверждаются химическим путем. Таким образом, технологический процесс получения объемных материалов электромагнитной защиты на основе композиционных полимерных материалов делится на два этапа: получение заготовки заданной конфигурации и ее формование. Полимерные композиционные материалы после отверждения являются твердыми телами. Характеристики готового изделия (такие как габаритные размеры, форма, объемы выпуска) обуславливают выбор состава композиции, способа ее получения и формования.

Исследуемые в данной работе образцы объемных материалов электромагнитной защиты изготовлены на основе эпоксидной смолы ЭД-20 (ГОСТ 10587-84), отвердителя Этал-45М (ТУ 2257-045-18826195-01), углерода наноструктурированного технического (СТБ 1873-2008), ацетона технического (ГОСТ 2768-84); диаметр образца 82 мм, толщина 8 мм, вес 49 г, содержание углеродного наноматериала 7% (рисунок 2).



Рисунок 2 – Внешний вид экспериментального образца объемного радиопоглощающего материала

Экспериментальные исследования. Для широкого практического внедрения новых наноматериалов, необходимо исследование комплекса электрофизических параметров: отражения и поглощения электромагнитных волн в материале, диэлектрической постоянной, тангенса угла диэлектрических потерь, нелинейных восприимчивостей второго и третьего порядка. Первоначальными электрофизическими параметрами, характеризующими радиоматериалы, с точки зрения практического использования их в сверхвысокочастотном диапазоне являются коэффициент отражения и величина ослабления.

Экспериментальные исследования образцов объемных материалов электромагнитной защиты проводились на 4-портовом векторном анализаторе электрических цепей Agilent 5071C с рабочим диапазоном от 10 МГц до 40 ГГц.

Векторный анализатор электрических цепей – это прибор, который измеряет характеристики прохождения сигнала через тестируемое устройство и характеристики отражения сигнала от его портов. Эти характеристики называются S -параметрами. Для четырехпортовых устройств характеристики отражения от первого и третьего портов называются S_{11} и S_{33} , характеристики передачи в прямом направлении – S_{21} и S_{34} , характеристики передачи в обратном направлении – S_{12} и S_{43} , характеристика отражения от второго порта – S_{22} , а от четвертого – S_{44} . Каждый S -параметр содержит амплитудно-частотную и фазо-частотную характеристики тестируемого устройства в соответствующем направлении. Существует много стандартных способов отображения измеренных S -параметров на экране векторного анализатора электрических цепей: в виде графика коэффициента стоячей волны или обратной потерь от частоты, диаграммы Смита, амплитуды, фазы, вносимого затухания или усиления, групповой задержки и др.

Измеренная с помощью векторного анализатора матрица S -параметров позволяет однозначно определить параметры распространения электромагнитных волн в среде. При этом для многих практических применений, например в случае разработки радиопоглощающих покрытий и электромагнитных экранов, достаточно измерять только модуль коэффициента отражения (либо коэффициент стоячей волны по напряжению).

Эффективность поглощения электромагнитного излучения радиопоглощающими материалами определяется характеристиками отражения этих материалов: частотной зависимостью коэффициента отражения и угловой зависимостью коэффициента отражения, показывающими какая доля электромагнитного излучения, падающего на радиопоглощающий материал, отражается в обратном направлении, а какая рассеивается в заданном направлении.

На рисунках 3, 4 представлены результаты экспериментального исследования коэффициента отражения и коэффициента ослабления образцов объемных материалов электромагнитной защиты в диапазоне частот 8–12 ГГц. На рисунке 3 приведены характеристики коэффициента отражения одного из экспериментальных образцов РПМ (остальные образцы имеют идентичные характеристики). Ось абсцисс – частота (ГГц), ось ординат – коэффициент отражения S_{33} .

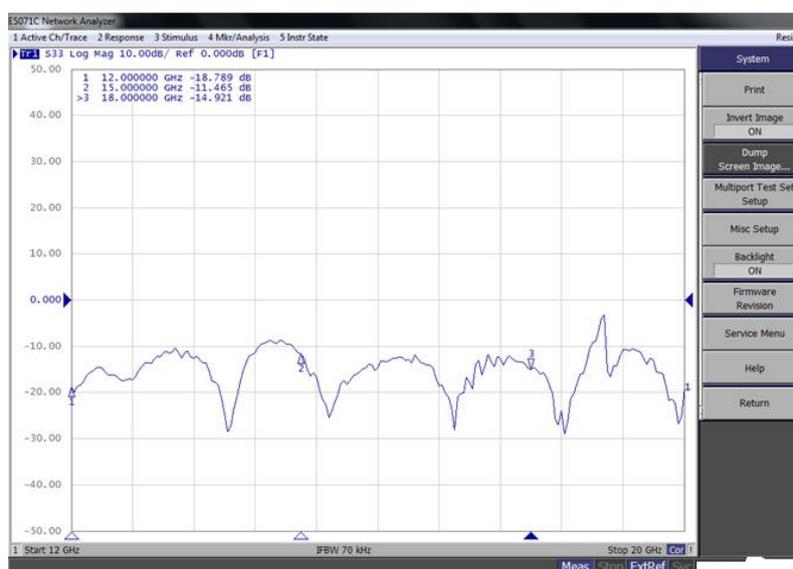


Рисунок 3. – Результаты экспериментального исследования коэффициента отражения объемного радиопоглощающего материала в диапазоне частот 8–12 ГГц

На рисунке 4 приведены характеристики коэффициента ослабления одного из экспериментальных образцов РПМ (остальные образцы имеют идентичные характеристики). Ось абсцисс – частота (ГГц), ось ординат – коэффициент ослабления S_{34} .

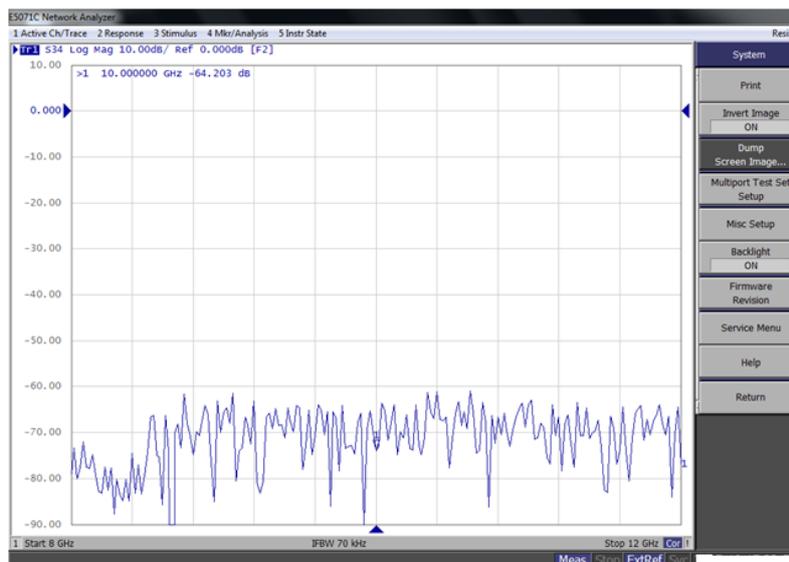


Рисунок 4. – Результаты экспериментального исследования коэффициента ослабления объемного радиопоглощающего материала в диапазоне частот 8–12 ГГц

Коэффициент отражения электромагнитного излучения экспериментальных образцов объемного радиопоглощающего материала в диапазоне частот 8,0–12,05 ГГц не превышает $-10,0$ дБ (минимальное значение $-10,1$ дБ, максимальное значение $-11,2$ дБ). Ослабление электромагнитного излучения экспериментальных образцов объемного радиопоглощающего материала в диапазоне частот 8,0–12,05 ГГц превышает $20,0$ дБ (минимальное значение $22,1$ дБ, максимальное значение $25,9$ дБ).

Электромагнитные волны диффузионно рассеиваются в объеме РПМ. При этом наряду с процессами поглощения электромагнитных волн, обусловленными потерями в диэлектрическом слое РПМ, имеют место процессы многократного отражения и переотражения падающих волн от хаотично расположенных многостенных углеродных нанотрубок (УНТ), из которых и состоит РПМ, сопровождающиеся дополнительным поглощением энергии электромагнитных волн. Высокое поглощение электромагнитного излучения РПМ также возможно, когда на УНТ падает электромагнитная волна, электрический вектор которой параллелен оси УНТ. Эффективный диаметр УНТ в этом случае может в несколько сотен раз превышать ее геометрический диаметр. Это размерный эффект, природа которого, возможно, связана с возбуждением токов при определенных соотношениях между эффективным диаметром УНТ и длиной волны электромагнитного излучения.

Заключение. Вновь созданные радиопоглощающие наноуглеродные композитные материалы представляют собой новый класс дешевых объемных радиопоглощающих материалов с высокими техническими параметрами. Результаты экспериментальных исследований образцов объемных материалов электромагнитной защиты показали перспективу применения данных материалов для техники сверхвысоких частот:

- для поглотителей электромагнитных волн: защита информации, то есть предупреждение несанкционированного съема по электромагнитному каналу; решение проблем электромагнитной совместимости радиоэлектронной аппаратуры; решение проблем медико-биологической электромагнитной безопасности (защита от вредного воздействия побочных излучений электронных приборов);
- для поглотителей электромагнитных излучений в волноводных и антенно-фидерных системах, высокочастотных блоках приборов и безэховых камерах (в них проверяют радиоаппаратуру на уровень излучения, когда требуется избежать отражения волн). В безэховых камерах с недавнего времени проверяют излучение автомобильной электроники. Это связано с тем, что машин появилось слишком много и их системы зажигания и другие электроприборы в сумме оказывают серьезное влияние на окружающую среду, хотя, казалось бы, металлический капот должен надежно экранировать излучение);
- для обеспечения электромагнитной совместимости на авиационных, аэрокосмических и морских объектах с высокой плотностью размещения радиоэлектронной аппаратуры, работающей в различных диапазонах частот.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ковнеристый, Ю. К. Материалы, поглощающие СВЧ-излучение / Ю. К. Ковнеристый, И. Ю. Лазарева, А. А. Раваев. – М. : Наука, 1982. – 165 с.
2. Власенко, Е. А. Композиционный радиопоглощающий материал на основе наполненной резины и модифицированного нетканого полотна / Е. А. Власенко, Е. С. Бокова, А. В. Дедов // Материаловедение. – 2016. – № 2. – С. 41–43.

3. Радиопоглощающие свойства содержащих карбонильное железо композитов на СВЧ и КВЧ / В. А. Журавлев [и др.] // Исследовано в России. – 2010. – № 35. – С. 404–411.
4. Голубева, Н. С. Основы радиоэлектроники сверхвысоких частот / Н. С. Голубева, В. Н. Митрохин. – М. : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. – 486 с.
5. Побочные колебания в электронных приборах СВЧ / под ред. М. Б. Цейтлина. – М. : Радио и связь, 2004. – 152 с.
6. Латыпова, А. Ф. Анализ перспективных радиопоглощающих материалов / А. Ф. Латыпова, Ю. Е. Калинин // Вестн. Воронеж. гос. техн. ун-та. – 2012. – Т. 8, № 6. – С. 70–76.
7. Обзор композиционных материалов, сочетающих звукозащитные и радиозащитные свойства / И. Д. Краев, Е. М. Шульдешов, М. М. Платонов, Г. Ю. Юрков // Авиационные материалы и технологии. – 2016. – № 4(45). – С. 61–67.
8. Николайчук, Г. А. Радиопоглощающие материалы на основе наноструктур / Г. А. Николайчук, В. П. Иванов, С. В. Яковлев // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2010. – № 1. – С. 92–95.
9. Chung, D. D. L. Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon materials / D. D. L. Chung // Carbon. – 2001. – Vol. 39. – P. 279–285.
10. Банний, В. А. Модифицированные углеродным наполнителем радиопоглощающие композиционные материалы на основе полиэтилена / В. А. Банний, И. В. Царенко, С. И. Красюк // Современные проблемы машиноведения : материалы XII Междунар. науч.-техн. конф. (науч. чтения, посвящ. П. О. Сухому), Гомель, 22–23 нояб. 2018 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого, Филиал ПАО «Компания «Сухой» ОКБ «Сухого»; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2018. – С. 129–130.
11. Конструкционные материалы радиотехнического назначения, модифицированные углеродными нанотрубками / И. Д. Краев [и др.] // Пластические массы. – 2020. – № 9–10. – С. 62–66.
12. Фальковский, О. И. Техническая электродинамика : учеб. / О. И. Фальковский. – 2-е изд., стер. – СПб. : Лань, 2009. – 432 с.
13. Development and simulation of microwave artificial magnetic composites utilizing nonmagnetic inclusions / A. N. Lagarkov [et al.] // J. Magn. Magn. Mater. – 2003. – Vol. 258–259. – P. 161–166.
14. Физико-механические свойства композиционных радиопоглощающих материалов на основе ферритов / С. В. Серебрянников [и др.] // Радиолокация и радиосвязь : сб. науч. тр. XVI междунар. конф. / Моск. энергет. ин-т. – М., 2008. – С. 579–587.
15. Advances in complex electromagnetic materials / A. Priou [et al.] // NATO ASI Series. 3. High Technology, Kluwer Academic Publishers. – The Netherlands, 1997. – Vol. 28. – P. 396.
16. Новые материалы для экранов электромагнитного излучения / Л. М. Лыньков [и др.] // Доклады БГУИР. – 2004. – № 3. – С. 152–167.
17. Образование углеродных наноструктур при разложении метана в плазме высоковольтного разряда атмосферного давления / С. А. Жданок [и др.] // Инженерно-физический журнал. – 2008. – Т. 81, № 4. – С. 617–620.
18. Радиопоглощающие свойства углеродных наноматериалов / С. А. Жданок [и др.] // Нанотехника. – 2011. – № 2. – С. 72–75.

REFERENCES

1. Kovneristyj, Ju. K., Lazareva, I. Ju., & Ravaev, A. A. (1982). *Materialy, pogloshchayushchie SVCh-izluchenie [Materials that absorb microwave radiation]*. Moscow: Science. (In Russ).
2. Vlasenko, E. A., Bokova, E. S., & Dedov, A. V. (2016). Kompozicionnyj radiopogloshhajushhij material na osnove napolnennoj reziny i modifitsirovannogo netkanogo polotna [Composite radio-absorbing material based on bone rubber and modified non-woven fabric]. *Materialovedenie [Materials Science]*, (2), 41–43. (In Russ).
3. Zhuravlev, V. A., Susljaev, V. I., Korovin, E. Ju., & Docenko, O. A. (2010). Radiopogloshhajushhie svoystva soderzhashih karbonil'noe zhelezo kompozitov na SVCh i KVCh [Radio absorbing properties of composites containing carbonyl iron at microwave and EHF]. *Issledovano v Rossii [Investigated in Russia]*, (35), 404–411.
4. Golubeva, N. S., & Mitrohin, V. N. (2006). *Osnovy radiojelektroniki sverhvysokih chastot [Fundamentals of microwave radio electronics]*. Moscow: Publishing house of MSTU named after N. E. Bauman. (In Russ).
5. Cejtlin, M. B. (2004). *Pobochnye kolebanija v jelektronnyh priborah SVCh [Side oscillations in microwave electronic devices]*. Moscow: Radio and Communications. (In Russ).
6. Latypova, A. F., & Kalinin, Ju. E. (2012). Analiz perspektivnyh radiopogloshhajushhij materialov [Analysis of promising radio-absorbing materials]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta [Bulletin of the Voronezh State Technical University]*, 8(6), 70–76. (In Russ).
7. Kraev, I. D., Shul'deshov, E. M., Platonov, M. M., & Jurkov, G. Ju. (2016). Obzor kompozicionnyh materialov, sochetajushhij zvukozashhitnye i radiozashhitnye svoystva [Review of composite materials combining soundproof and radio-protective properties]. *Aviacionnye materialy i tehnologii [Aviation materials and technologies]*, 4(45), 61–67. (In Russ).
8. Nikolajchuk, G. A., Ivanov, V. P., & Jakovlev, S. V. (2010). Radiopogloshhajushhie materialy na osnove nanostruktur [Radar absorbing materials based on nanostructures]. *Jelektronika: nauka, tehnologija, biznes [Electronics: science, technology, business]*, (1), 92–95. (In Russ).
9. Chung, D. D. L. (2001). Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon materials. *Carbon*, (39), 279–285.
10. Bannyj, V. A., Careno, I. V., & Krasjuk, S. I. (2018). Modifitsirovannye uglerodnym napolnitelem radiopogloshhajushhie kompozicionnye materialy na osnove polijetilena [Radar-absorbing composite materials based on polyethylene modified with carbon filler]. In *Sovremennye problemy mashinovedenija [Modern problems of mechanical engineering]* (129–130). Gomel: GSTU im. P. O. Sukhoi. (In Russ).
11. Kraev, I. D., Sorokin, A. E., Olihova, Ju. V., & Titkova, Ju. M. (2020). Konstrukcionnye materialy radiotehničeskogo naznachenija, modifitsirovannye uglerodnymi nanotrubkami [Structural materials for radio engineering, modified with carbon nanotubes]. *Plasticheskie massy [Plastic masses]*, (9–10), 62–66. (In Russ).

12. Fal'kovskij, O. I. (2009). *Tehnicheskaja jelectrodinamika [Technical electrodynamics]*. St. Petersburg: Publ. Lan. (In Russ).
13. Lagarkov, A. N., Semenenko, V. N., Kisel, V. N. & Chistyayev, V. A. (2003). Development and simulation of microwave artificial magnetic composites utilizing nonmagnetic inclusions. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, (258–259), 161–166.
14. Serebrjannikov, S. V., Borodulin, V. N., Cheparin, V. P., Smirnov, D. O., & Konkin, D. N. (2008). Fiziko-mehanicheskie svojstva kompozicionnyh radiopogloshhajushih materialov na osnove ferritov [Physical and mechanical properties of composite radio-absorbing materials based on ferrites]. In *Radiolokacija i radiosvjaz' [Radar and Radio Communications]* (579–587). Moscow: MPEI. (In Russ).
15. Priou, A., Sihvola, A., Tretyakov, S., & Vinogradov, A. (1997). Advances in complex electromagnetic materials. *NATO ASI Series. 3. High Technology, Kluwer Academic Publishers*, (28), 396.
16. Lyn'kov, L. M., Bogush, V. A., Borbot'ko, T. V., Ukraineec, E. A., & Kolbun, N. V. (2004). Novye materialy dlja jekranov jelektromagnitnogo izluchenija [New materials for screens of electromagnetic radiation]. *Doklady BGUIR [Reports of BSUIR]*, (3), 152–167. (In Russ).
17. Zhdanok, S. A., Krauklis, A. V., Bujakov, I. F., Volzhankin, V. M., Borisevich, K. O., & Samcov, P. P. (2008). Obrazovanie uglerodnyh nanostruktur pri razlozhenii metana v plazme vysokovol'nogo razrjada atmosfernogo davlenija [Formation of Carbon Nanostructures during the Decomposition of Methane in High-Voltage Discharge Plasma at Atmospheric Pressure]. *Inzhenerno-fizicheskij zhurnal [Engineering Physics Journal]*, 81(4), 617–620. (In Russ).
18. Zhdanok, S. A., Krauklis, A. V., Bujakov, I. F., Karpovich, V. A., Rodionova, V. N., & Tanana, O. V. (2011). Radiopogloshhajushhie svojstva uglerodnyh nanomaterialov [Radio absorbing properties of carbon nanomaterials]. *Nanotehnika [Nanotechnology]*, (2), 72–75. (In Russ).

Поступила 31.10.2022

ELECTRODYNAMIC CHARACTERISTICS OF A VOLUME RADIO-ABSORBING MATERIAL BASED ON NANOCARBON

V. BOGUSH, V. RODIONOVA

(Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk)

O. TANANA

(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)

The paper presents a technique for experimental study of the electrodynamic characteristics of radio-absorbing material. The results of an experimental study of the reflection coefficient and the attenuation coefficient of samples of bulk materials of electromagnetic protection based on nanocarbon in the frequency range of 8–12 GHz are presented. Recommendations are given for the practical application of the materials under study: microwave absorbers can be used inside the working cavities of units and equipment to prevent multiple reflections of microwave waves, and allow solving the problem of shielding at high frequencies by absorbing scattered radiation.

Keywords: *microwaves, bulk absorbing materials, absorption and reflection of electromagnetic radiation, electromagnetic shielding, carbon nanomaterials.*