

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

УДК 621.37.029.6

ШИРОКОПОЛОСНЫЙ ПОГЛОТИТЕЛЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2024 г. В. А. Богуш, В. А. Лабунов, А. В. Гусинский, В. А. Карпович, В. Н. Родионова*,
Н. А. Певнева, М. М. Касперович, И. А. Кашко

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР),
ул. Петруся Бровки, 6, Минск, 220013 Республика Беларусь

*E-mail: valent-r@yandex.by

Поступила в редакцию 15.01.2024 г.

После доработки 01.08.2024 г.

Принята к публикации 15.08.2024 г.

Получен поглотитель электромагнитных волн градиентного типа с использованием войлока углеволокнистого «Карбопон-B22M» со следующими характеристиками: коэффициент отражения от -10 до -30 дБ в диапазоне частот от 2 до 18 ГГц, напряжение изгиба и напряжение растяжения ≥ 300 МПа (процент деформации -0.7%); плотность ≤ 2.5 г/см³, толщина ≤ 6 мм. Показаны перспективы применения созданного радиопоглощающего материала для скрытия расположенных под ним крупногабаритных движущихся либо неподвижных объектов от систем радиолокационного обнаружения, а также для защиты радиоэлектронной аппаратуры, носителей информации и биологических объектов от повышенного уровня электромагнитного излучения, локализации электромагнитных излучений.

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

DOI: 10.31857/S0033849424100025, EDN: HQOQIB

ВВЕДЕНИЕ

Радиопоглощающие материалы (РПМ) предназначены для экранирования источников излучений, для защиты объектов от обнаружения, для решения экологических проблем, связанных с электромагнитным излучением. Разработка эффективных систем защиты от широкополосного электромагнитного излучения (ЭМИ) требует совместного решения сложных электрофизических, электродинамических, материаловедческих и конструкторско-технологических задач.

Современные тенденции в области защиты от ЭМИ требуют, чтобы широкополосный РПМ представлял собой композиционный материал и одновременно являлся конструкционным материалом. В таком материале происходят процессы поглощения, рассеяния и интерференции электромагнитных (ЭМ) волн, обеспечивая эффективное поглощение ЭМ-волн за счет активных потерь в объеме материала и малые

отражения от поверхности за счет согласования со средой распространения ЭМ-волн. Технологически задача получения требуемого отражения в широкой полосе частот обеспечивается путем варьирования количества, толщины и электрофизических характеристик слоев композитной структуры.

Эффективность поглощения ЭМИ определяется специфическими для заданного диапазона частот свойствами применяемых материалов, такими как комплексные магнитная и диэлектрическая проницаемости, удельная электропроводность, а также размерами и взаимосвязью структурных элементов в композитных радиопоглощающих материалах. При создании радиопоглощающих материалов часто используют композитные диэлектрические матрицы, содержащие проводящий наполнитель, что позволяет сочетать механические свойства связующего и высокую эффективность поглощения ЭМИ [1–7].

1. ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РПМ

Для широкополосного поглотителя ЭМИ с низким коэффициентом отражения оптимальной конструкцией является градиентная структура. В таком поглотителе реализуется изменение от сопротивления $Z_{\text{св}}$ и проводимости $\sigma_{\text{св}} = 0$ свободного пространства на поверхности падения ЭМ-волны на поглотитель до более низкого сопротивления и более высокой проводимости на противоположной стороне поглотителя. Такое изменение может быть достигнуто либо изменением его геометрической формы, либо изменением свойств материала. Неоднородная внешняя поверхность поглотителя (гофрированная, конусная, игольчатая и т.п.) уменьшает коэффициент отражения ЭМИ. Схожий эффект достигается при неоднородности внутренних слоев градиентной структуры. Простейший вариант — это создание внутренних неоднородных по толщине слоев или формирование неплоской границы раздела сред. Более сложный вариант — создание нескольких внутренних слоев, представляющих собой дифракционные решетки. Такие поглотители обладают большой широкополосностью при малой величине коэффициента отражения и небольшой толщине [8], однако являются сложными с точки зрения практической реализации.

Перспективным направлением создания широкополосного РПМ является реализация градиентной структуры на базе углеродных волокон с волновым сопротивлением, согласованным со средой распространения ЭМ-волн [9, 10].

В настоящее время в конструкциях экранов ЭМИ [11, 12], в композитных экранирующих и радиопоглощающих материалах [13] широко применяются углеродные волокна, обладающие высокой механической прочностью и высокой электропроводностью. Еще одним важным моментом при выборе углеродных волокон в качестве поглотителей ЭМИ является то, что недавно был обнаружен эффект аномально большого поглощения ЭМИ очень тонкими проводящими волокнами [14–16]. Он наблюдается, когда на волокно падает ЭМ-волна, электрический вектор которой параллелен оси волокна. Эффективный диаметр волокна в этом случае может в несколько сотен раз превышать его геометрический диаметр. Это размерный эффект, природа которого, возможно, связана с возбуждением токов при определенных соотношениях между эффективным диаметром волокна и длиной волны ЭМИ.

2. ВОЙЛОК УГЛЕВОЛОКНИСТЫЙ

Углеродные волокна выпускаются в виде нитей, жгутов, тканей и войлоков. Углеродный войлок особенно интересен тем, что волокна в нем раз-

несены друг относительно друга на значительную величину, в десятки раз превышающую диаметр самих волокон (рис. 1).

Как видно из микрофотографий, средний диаметр углеродного волокна лежит в диапазоне 5...7 мкм. Средняя дистанция между волокнами (разреженность) 10...20 мкм. Внутренняя структура волокна при микронном разрешении — плотная, сплошная, без видимых дефектов, включений и полостей. Данный материал характеризуется содержанием углерода до 99.9%; термостойкостью в инертной среде до 3600°C; теплопроводностью в диапазоне 20...2000 °C от 0.07 до 0.5 Вт/(м·К), теплоемкостью 800 Дж/(кг·К); материал электропроводен, обладает радиопоглощающими свойствами. Разнесенные в объеме волокна, отоженные при определенной температуре для получения требуемой проводимости, позволяют получить материал, волновое сопротивление которого согласуется с волновым сопротивлением среды распространения электромагнитных волн.

При создании широкополосного РПМ был использован углеволокнистый войлок на основе карбонизированного вискозного волокна — материал углеродный нетканый «Карбопон В22-М» (рис. 2), производства «Светлогорскимволокно».

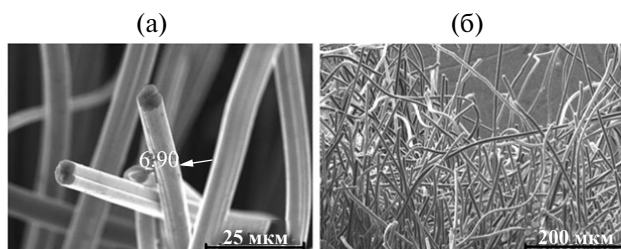


Рис. 1. Структура углеволокнистого войлока (сканирующая электронная микроскопия, увеличение $\times 1500$ (а) и $\times 200$ (б)).



Рис. 2. Фотография углеволокнистого войлока «Карбопон В22-М».

В качестве материала, обеспечивающего высокие механические свойства, использовали модифицированный стеклопластик (обладающий в отличие от серийно выпускаемого материала повышенными механическими характеристиками), разработанный для БГУИР предприятием «Фабрика композитных пластиков». Результаты исследований показали, что такая структура позволяет получить эффективный РПМ, обладающий высокими физико-механическими характеристиками.

Для придания экспериментальным образцам РПМ свойств поглотителя градиентного типа были использованы слои углеволокнистого войлока (толщиной от 2 мм) с различной проводимостью. Проводимость углеволокнистого войлока зависит от температуры повторного отжига. Чем выше температура отжига, тем выше процентное отношение углерода в волокнах и, таким образом, выше проводимость материала. Был разработан температурно-временной технологический профиль высокотемпературного отжига в инертной азотной среде серийно выпускаемого углеродного нетканого материала «Карбопон В22-М» с удельным поверхностным сопротивлением 0.5 Ом. Измерение сопротивления слоя осуществлялось посредством накладных контактов из алюминиевой фольги, размещенных по краям образца.

В табл. 1 приведены параметры отжига трех образцов войлока, указаны удельные поверхностные сопротивления, полученные в результате этой технологической операции, а также приведены результаты исследования взаимодействия СВЧ-излучения с этими образцами в диапазоне 1...4 ГГц. Величина поглощения является расчетной на основе параметров прохождения и отражения.

Из экспериментальных данных, приведенных в табл. 1, видно, что при уменьшении температуры отжига величина отражения ЭМИ образцов резко уменьшается.

3. ОПИСАНИЕ ОБРАЗЦОВ РПМ

Экспериментальный образец широкополосного РПМ состоит из модифицированного радиопрозрачного стеклопластика толщиной 3 мм и поглощающей градиентной структуры (толщина

5.5...6.0 мм), выполненный в виде собранных в пакет трех диэлектрических слоев, изготовленных из углеволокнистого войлока, скрепленных между собой радиопрозрачной клейкой лентой 3М 467МР. Первый диэлектрический слой (толщина 1.8...2.0 мм) с удельным поверхностным электрическим сопротивлением 340...380 Ом является согласующим слоем. Второй и третий диэлектрические слои пропитаны раствором оксида железа Fe_3O_4 , концентрацией которого можно изменять поглощающие свойства диэлектрического слоя, обеспечивая тем самым максимальное поглощение мощности падающей электромагнитной волны при ее минимальном отражении.

Конструкционные свойства композитной структуры обеспечивает стеклопластик, который также защищает пористый углеродный материал с повышенными сорбционными свойствами от воздействия внешней среды. Для эксплуатации в сложных климатических условиях используется еще один лист стеклопластика. Благодаря такой конструкции «сэндвича» возможна герметизация поглощающего материала специальным компаундом по контуру.

Механические прочностные характеристики (H/mm^2) модифицированного стеклопластика, использованного нами при создании экспериментальных образцов широкополосного РПМ, представлены ниже:

- напряжение растяжения 319.1;
- модуль растяжения 11 296.8;
- напряжение изгиба 419.4;
- модуль изгиба 16 731.0.

Измерения характеристик стеклопластика проводилось в БГУИР на универсальной испытательной машине MTS 43 с погрешностью измерений не более 1%. Использовался силоизмерительный датчик на 10 кН при скорости нагружения 2 мм/мин.

Разработанная широкополосная радиопоглощающая градиентная структура работает следующим образом. Наряду с процессами поглощения электромагнитных волн, обусловленными потерями в диэлектрических слоях поглощающей градиентной структуры, имеют место процессы много-

Таблица 1. Параметры экспериментальных образцов углеродных нетканых материалов после различных режимов отжига

Номер образца	Температура отжига, °C	Удельное поверхностное сопротивление, Ом	Отражение, %	Прохождение, %	Поглощение, %
1	720	100–150	40–31	5–6	55–63
2	710	150–200	25	10–8	65–67
3	700	300–400	10–6	30–16	60–78

Примечание. Для всех образцов время отжига 10 мин, диапазон частот 1...4 ГГц.

кратного отражения и переотражения падающих волн от хаотично расположенных углеродных нитей, из которых состоят диэлектрические слои. Эти процессы сопровождаются дополнительным поглощением энергии электромагнитных волн. Изменением концентрации оксида железа Fe_3O_4 в диэлектрических слоях можно оптимизировать свойства поглощающего материала для обеспечения максимального поглощения мощности падающей электромагнитной волны при ее минимальном отражении. Минимальное отражение электромагнитной волны от поверхностного слоя образца РПМ получено при пропитке его 20%-ным раствором оксида железа Fe_3O_4 с диаметром частиц от 1 до 5 мкм. Пропитку РПМ производили следующим образом: перемолотый порошок Fe_3O_4 просеивали через сито с размером ячеек в 60 мкм. Затем на основе просеянного порошка, лимонной кислоты и изопропилового спирта была изготовлена суспензия, которой с помощью ручного пульверизатора при постоянном перемещении равномерно опрыскивали весь образец. Процентное отношение массы порошка Fe_3O_4 к весу обрабатываемого войлока не учитывало вес растворителя. Фотография образца представлена на рис. 3.

Наличие относительно равномерно расположенных в объеме диэлектрического слоя частиц материала наполнителя (в нашем случае это оксид железа Fe_3O_4) приводит к образованию релейских рассеивающих структур, что также способствует расширению рабочего частотного диапазона разработанного РПМ.

4. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для проведения измерений был изготовлен комплект РПМ ЭМИ с размерами 500x500x6 мм (6 шт.) и 300x300x6 мм (6 шт.). Размеры экспериментальных образцов выбирали, исходя из размеров раскрытия рупора измерительных антенн, с помощью которых были выполнены измерения характеристик РПМ (антенна измерительная Пб-23М, антенна измерительная ЕМСО-3115).

Все экспериментальные исследования выполнялись с использованием векторного анализатора электрических цепей Anritsu MS4644В. Измеренная с помощью векторного анализатора матрица S -параметров позволяет однозначно определить параметры распространения ЭМИ 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).

Коэффициент отражения S_{22} экспериментальных образцов РПМ и их составляющих

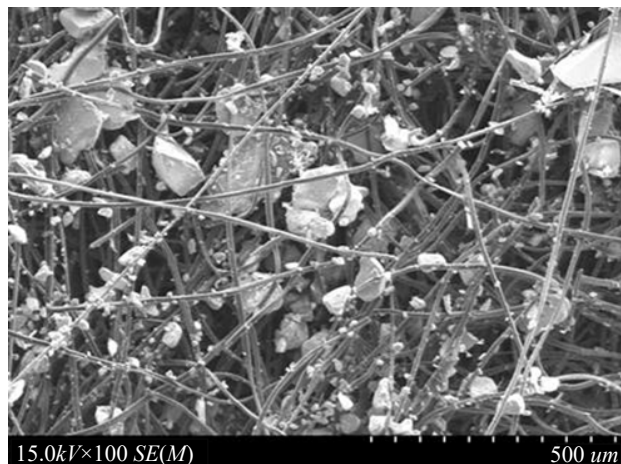


Рис. 3. Фотография диэлектрического слоя, пропитанного 20%-ным раствором оксида железа Fe_3O_4 .

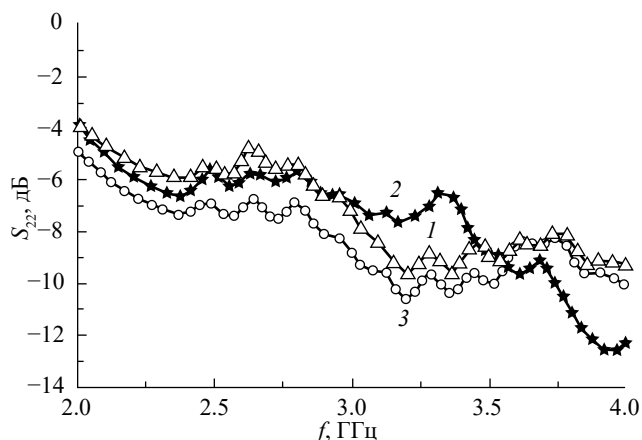


Рис. 4. Характеристики коэффициента отражения экспериментальных образцов 1–3 углеродных нетканых материалов, отожженных при разных температурах, в диапазоне 2...4 ГГц при размещении на металлическом экране.

измеряли на металлическом экране по стандарту GJB2038A-2011.

Первоначально выполняли измерения образцов углеродных нетканых материалов «Карбопон В-22М» после высокотемпературного отжига в инертной среде. На рис. 4 представлены характеристики отражения экспериментальных образцов углеродных нетканых материалов 1–3 в диапазоне 2...4 ГГц при размещении их на металлическом экране. Диапазон 2...4 ГГц был выделен на первоначальном этапе исследований, как наиболее сложный для обеспечения минимального коэффициента отражения S_{22} . Минимальное значение коэффициента отражения соответствует образцу 3, параметры которого: удельное поверхностное сопротивление 300...400 Ом, отражение 6%, прохождение 16%, поглощение 78%.

Таким образом, высокотемпературный отжиг в инертной среде позволяет оптимизировать электрофизические параметры углеродных нетканых материалов «Карбопон В-22М», в нашем случае, для минимизации отражения СВЧ-излучения. Это позволило создать диэлектрический слой с волновым сопротивлением порядка 400 Ом для согласования градиентного РПМ с волновым сопротивлением свободного пространства.

На рис. 5 приведены характеристики отражения S_{22} экспериментального образца углеволокнистого войлока, модифицированного 20%-ным раствором оксида железа Fe_3O_4 с диаметром частиц от 1 до 5 мкм в диапазоне частот 2...4 и 4...18 ГГц.

Введение наполнителя позволило получить импедансную поверхность с высокими поглощающими свойствами, обеспечивающими минимальное отражение падающей ЭМ-волны.

На рис. 6 приведены результаты измерения в диапазоне частот 1...18 ГГц коэффициента отражения S_{22} модифицированного стеклопластика, обеспечивающего высокие механические свойства образцам РПМ.

На рис. 7 приведены характеристики коэффициента отражения S_{22} одного из экспериментальных образцов широкополосного РПМ ЭМИ (остальные образцы имеют идентичные характеристики) в диапазоне частот 0.8...18 ГГц.

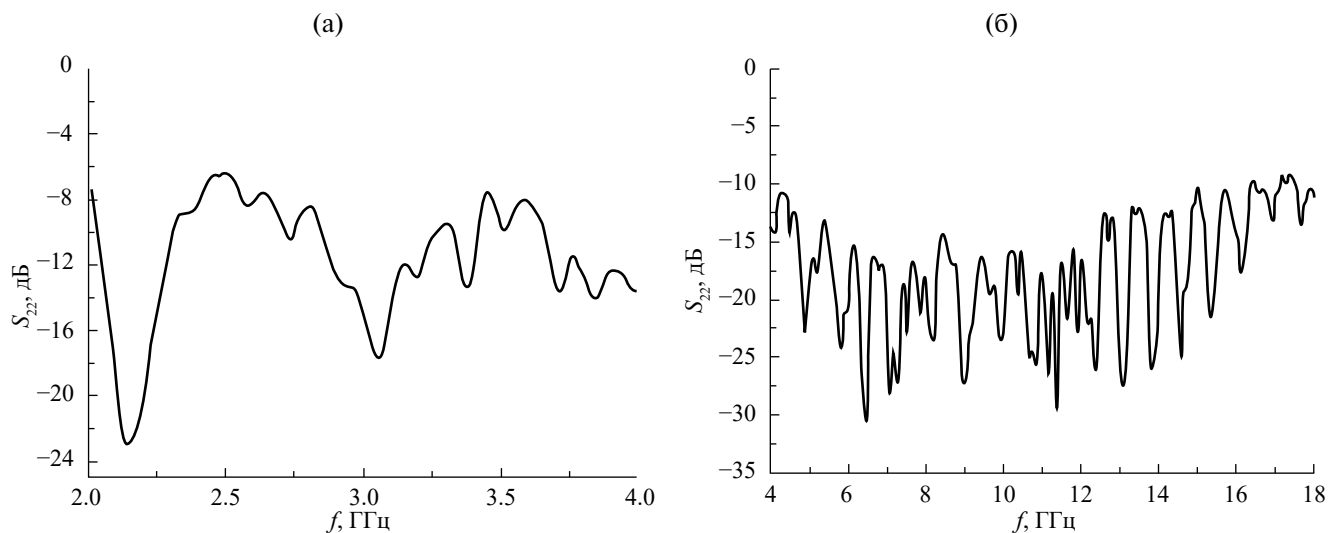


Рис. 5. Характеристики коэффициента отражения экспериментального образца углеволокнистого войлока, модифицированного 20%-ным раствором оксида железа Fe_3O_4 , с диаметром частиц от 1 до 5 мкм в диапазонах частот 2...4 ГГц (а) и 4...18 ГГц (б).

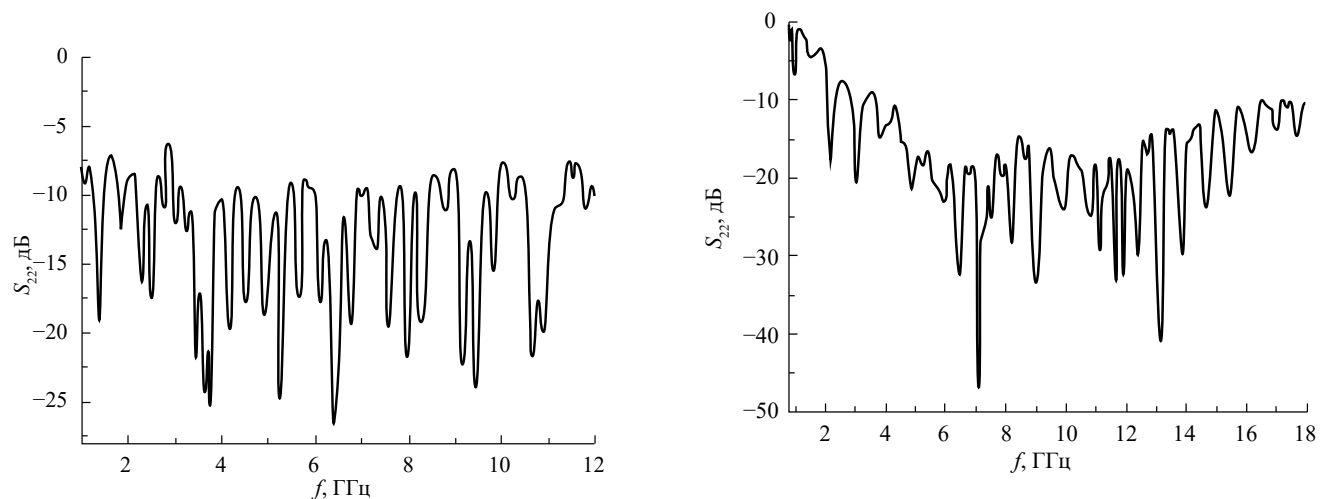


Рис. 6. Характеристика коэффициента отражения модифицированного стеклопластика.

Рис. 7. Характеристика коэффициента отражения экспериментального образца РПМ ЭМИ в диапазоне частот 0.8...18 ГГц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный РПМ ЭМИ градиентного типа с использованием углеволокнутого войлока на основе карбонизированного вискозного волокна — материал углеродный нетканый «Карбопон В22-М» имеет коэффициент отражения от -10 до -30 дБ в диапазоне частот от 2 до 18 ГГц, напряжение изгиба и напряжение растяжения ≥ 300 МПа; процент деформации 0.7%; плотность ≤ 2.5 г/см³ и толщину ≤ 6 мм. Эти характеристики определяются электрофизическими и конструктивными свойствами диэлектрических слоев, концентрацией проводящего наполнителя оксида железа Fe₃O₄, свойствами модифицированного радиопрозрачного стеклопластика. Материал может изготавливаться как в виде плоских панелей заданного размера, так и в виде сложных заказных форм.

Созданный РПМ может быть использован для скрытия расположенных под ним крупногабаритных движущихся либо неподвижных объектов от систем наблюдения радиолокационного обнаружения, защиты радиоэлектронной аппаратуры, носителей информации и биологических объектов от повышенного уровня электромагнитного излучения, а также локализации электромагнитных излучений.

Авторы данной работы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беляев А.А., Кондрашов С.В., Лепешкин В.В., Романов А.М. //Авиационные материалы и технологии. 2012. № 6. С. 348.
2. Лабунюв В.А., Жданок С.А., Карнович В.А. и др. // Фундамент. и прикл. физич. исслед. 2010–2016 гг. Сб. трудов. Минск: Изд. центр БГУ, 2016. С. 348.
3. Беспалова Е.Е. // Труды ВИАМ. 2015. № 3. С. 45.
4. Иванова В.И., Кибец С.Г., Краснолобов И.И. и др. // Журн. радиоэлектроники. 2016. № 7. С. 1.
5. Лыньков Л. М., Богуш, В.А., Глыбин, В. П. и др. Гибкие конструкции экранов электромагнитного излучения. Минск, 2000.
6. Богуш, В. А., Борботько, Т. В., Гусинский, А. В. и др. Электромагнитные излучения. Методы и средства защиты. Минск: Бестпринт, 2003.
7. Bogush, V. // J. Optoelectron. Adv. Mater. 2005. V. 7. № 3. P. 1635.
8. Звездина М.Ю., Карелова Е.С., Касьянов А.О. и др. Композиционные материалы: разработка и применение. Новосибирск: СибАК, 2017.
9. Фитцер Э., Дифендорф Р., Калнин И. и др. Углеродные волокна и углекомпозиты / Пер. с англ. под ред. Э. Фитцера. М.: Мир, 1988.
10. Priou A., Sihvola A., Tretyakov S., Vinogradov A. // NATO ASI Ser. 3. High Technology. Kluwer Akad. Publ. The Netherlands, 1997. V. 28. P. 396.
11. Агафонова А.С., Беляев А.А., Кондрашов Э.К., Романов А.М. // Авиационные материалы и технологии. 2013. № 3. С. 56.
12. Лушина М.В., Паршин С.Г., Ржевский А.А. // Системы управления и обработка информации. 2011. № 22. С. 208.
13. Chung D.D.L. // Carbon. 2001. V. 39. P. 279.
14. Shi He, Shulga S. N., Kokodity N. G. // J. Commun. Technol. Electron. 2011. V. 56. P. 1193.
15. Kuzmichev V. M., Kokodii N. G., Safronov B. V., Balkashin V. P. // J. Commun. Technol. Electron. 2003. V. 48. № 11. P. 1240.
16. Cofer C.G., McCooy D.E. Method Fabrication of Electroconductive Fibers. US Pat. № 3022026. Publ. March 13, 2019.

BROADBAND ABSORBER OF ELECTROMAGNETIC RADIATION

**V. A. Bogush, V. A. Labunov, A. V. Gusinsky, V. A. Karpovich,
V. N. Rodionova*, N. A. Pevneva, M. M. Kasperovich, I. A. Kashko**

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR),
Petrusya Brovki str., 6, Minsk, 220013 Republic of Belarus*

**E-mail: valent-r@yandex.by*

Received January 15, 2024, revised August 01, 2024, accepted August 15, 2024

An absorber of electromagnetic waves of a gradient type has been obtained using carbon fiber felt “Karbopon-V22M” with the following characteristics: reflection coefficient from -10 to -30 dB in the frequency range from 2 to 18 GHz, bending stress and tensile stress ≥ 300 MPa (deformation percentage -0.7%); density ≤ 2.5 g/cm³, thickness ≤ 6 mm. The prospects of using the created radio-absorbing material for concealing large-sized moving or stationary objects located underneath from radar detection systems, as well as for protecting electronic equipment, information carriers and biological objects from increased levels of electromagnetic radiation, localization of electromagnetic radiation are shown.

Keywords: ultra-high frequencies, bulk absorbing materials, absorption and reflection of electromagnetic radiation, electromagnetic protection