

Перспективные слоистые гибкие радиопоглощающие материалы на основе порошкообразного угля

О. В. Бойправ, В. А. Богуш

Разработана методика получения слоистых радиопоглощающих материалов на основе порошкообразного угля. Материалы, полученные по этой методике, характеризуются гибкостью, а также более низкой стоимостью по сравнению с другими углеродсодержащими радиопоглощающими материалами. Для полученных материалов экспериментально определены характеристики отражения и передачи электромагнитного излучения в диапазоне частот 2,0 – 17,0 ГГц. Средние значения коэффициента отражения электромагнитного излучения полученных материалов, на основе порошкообразного неактивированного древесного угля, порошкообразного активированного древесного угля и порошкообразного активированного кокосового угля составляют соответственно –4,5 дБ, –8,5 дБ и –9,0 дБ (при закреплении этих материалов на металлических отражателях), а средние значения коэффициента передачи электромагнитного излучения — –11,5 дБ, –20,0 дБ и –15,5 дБ соответственно. Полученные радиопоглощающие материалы перспективны для использования в целях защиты радиоэлектронного оборудования от внешних электромагнитных помех.

Ключевые слова: коэффициент отражения, коэффициент передачи, радиопоглощающий материал, уголь.

DOI: 10.30791/1028-978X-2023-8-15-26

Введение

Одно из направлений разработки функциональных материалов для приборов электронной техники связано с решением проблемы защиты этих приборов от внешних электромагнитных помех, в том числе с обеспечением электромагнитной совместимости [1 – 3]. Оптимальное решение проблемы — это создание гибких радиопоглощающих материалов. Это связано с тем, что процесс формирования конструкций требуемой формы на основе таких материалов является более простым по сравнению с аналогичным процессом, реализуемым на основе твердых материалов [4, 5].

Гибкие радиопоглощающие материалы изготавливают в виде тканых или нетканых полотен [6 – 8] и композиционных структур, представляющих собой сочетание гибкого связующего — матрицы и магнитного или электропроводящего наполнителя, распределенного по его объему [9 – 11]. Получение радиопоглощающих материалов в виде тканых или

нетканых полотен характеризуется низкой технологичностью в связи с тем, что процесс является многостадийным и некоторые его стадии реализуются вручную, например, стадии, связанные со смешиванием и/или распределением волокон [8]. Такие материалы используют, как правило, только для изготовления спецодежды, предназначенной для защиты человека от воздействия электромагнитного излучения.

Более часто встречаемыми видами радиопоглощающих материалов являются композиционные структуры с магнитными или электропроводящими наполнителями. Процесс получения таких структур по сравнению с процессом получения радиопоглощающих материалов в виде тканых или нетканых полотен характеризуется более высокой технологичностью. Кроме того, для радиопоглощающих материалов в виде композиционных структур представляется возможным обеспечивать требуемые свойства (в частности, характеристики отражения и передачи электромагнитного излу-

ния) путем изменения содержания наполнителя в составе таких материалов. Основное преимущество современных композиционных структур с магнитными наполнителями связано с возможностью управления их свойствами с помощью магнитного поля, что позволяет называть эти материалы “умными материалами” [12, 13]. Однако такие структуры характеризуются узким рабочим диапазоном частот. Из данных, представленных в [12 – 14], следует, что принцип действия обсуждаемых структур основан на явлении ферромагнитного резонанса. Такие структуры можно использовать для снижения уровня электромагнитного излучения ограниченного количества видов приборов электронной техники.

Для получения широкополосных радиопоглощающих композиционных структур используют электропроводящие наполнители такие, как графит [5, 15], графен [16, 17], углеродные волокна [18, 19] и нанотрубки [11, 20]. Иногда состав наполнителей модифицируют в целях повышения эффективности экранирования электромагнитного излучения структур, в состав которых они входят. Модификация состава наполнителей осуществляется, как правило, путем внедрения в их поры наночастиц никеля или меди, в результате чего образуются нанокомпозиты [21 – 24]. Перечисленные наполнители, как с немодифицированным, так и модифицированным составом, отличаются высокой стоимостью [25]. Это обуславливает высокие цены на композиционные структуры, в состав которых входят такие наполнители. Для решения этой проблемы необходимо искать недорогие электропроводящие наполнители для радиопоглощающих материалов в виде композиционных структур. В [25] показано, что порошкообразный уголь является одним из наиболее перспективных наполнителей. Это связано с тем, что порошкообразный уголь характеризуется следующими преимуществами по сравнению с электропроводящими материалами: низкая стоимость [25 – 28] и высокая пористость, обеспечивающая возможность модификации его состава.

Модификация состава порошкообразного угля, предложенная в [25], и методика получения радиопоглощающих материалов, основанная на использовании этого способа, характеризуются низкой технологичностью, обусловленной необходимостью обеспечения и поддержания специальных условий окружающей среды (температура, давление) в ходе их реализации.

Цель настоящей работы — экспериментальное обоснование технологичной методики получения перспективных радиопоглощающих материалов на

основе порошкообразного древесного угля с модифицированным составом, характеризующихся по сравнению с аналогами низкой стоимостью.

Материалы и методы

Разработанная авторами методика получения перспективных радиопоглощающих материалов основана на двух технологиях: 1) введение жидкости в поры частиц порошкообразного материала; 2) клеевое прессование.

С использованием первой технологии обеспечивается улучшение радиопоглощающих свойств порошкообразного древесного угля за счет увеличения его удельной электропроводности. Эта технология модификации состава порошкообразного угля проще с точки зрения реализации по сравнению с технологией, предложенной в работе [25]. Это связано с тем, что в ходе реализации этой технологии нет необходимости создавать и поддерживать специальные условия окружающей среды (температура, давление) для обеспечения внедрения жидкости в поры частиц.

В качестве основного компонента жидкости для введения в поры частиц порошкообразного угля был выбран хлорид кальция, что было обусловлено следующими его свойствами: высокая растворимость в воде [29], гигроскопичность, что является причиной стабильности химических и электрофизических свойств материалов, содержащих хлорид кальция [29], высокое значение удельной электропроводности по сравнению с другими хлоридами щелочноземельных металлов. Перечисленные свойства являются причиной стабильной и высокой удельной электропроводности материала, в состав которого входит водный раствор хлорида кальция.

С использованием второй из технологий, на которых основана разработанная авторами методика, обеспечивается фиксирование частиц порошкообразного угля в объеме матрицы изготавливаемого радиопоглощающего материала. В качестве матрицы предложено использовать самоклеящуюся пленку. Такая пленка характеризуется свойствами гибкости и прочности, что позволяет обеспечить аналогичные свойства для радиопоглощающих материалов, матрицей которых она является.

Изготовление образцов

Методика получения радиопоглощающих материалов на основе порошкообразного угля, включает три технологические операции.

1. Формирование внешнего слоя материала (относительно потенциального фронта распространения электромагнитного излучения). Эта операция включает в себя следующие четыре подэтапа.

1.1. Формирование двух фрагментов самоклеящейся пленки.

1.2. Равномерное распределение частиц порошкообразного древесного угля по поверхности клеевого слоя первого фрагмента самоклеящейся пленки (толщина слоя распределенных частиц ~ 2,0 мм).

1.3. Расположение второго фрагмента самоклеящейся пленки поверх слоя распределенных частиц порошкообразного древесного угля таким образом, что этот фрагмент был ориентирован своим клеевым слоем по отношению к частицам.

1.4. Соединение по краям фрагментов самоклеящейся пленки с помощью клейкой ленты.

1.5. Выдерживание полученной конструкции под механическим прессом.

2. Формирование внутреннего слоя материала (относительно потенциального фронта распространения электромагнитного излучения). Эта операция включает в себя следующие семь подэтапов.

2.1. Формирование двух фрагментов самоклеящейся пленки.

2.2. Приготовление водного раствора хлорида кальция равновесной концентрации.

2.3. Пропитывание частиц порошкообразного угля до насыщения водным раствором хлорида кальция.

2.4. Равномерное распределение частиц порошкообразного угля по поверхности клеевого слоя первого фрагмента самоклеящейся пленки (толщина слоя распределенных частиц ~ 2,0 мм).

2.5. Расположение второго фрагмента самоклеящейся пленки над слоем распределенных частиц порошкообразного угля таким образом, что этот фрагмент был ориентирован своим клеевым слоем по отношению к частицам.

2.6. Соединение по краям фрагментов самоклеящейся пленки с помощью клейкой ленты.

2.7. Выдерживание полученной конструкции под механическим прессом.

3. Склеивание сформированных внешнего и внутреннего слоев материала с помощью клейкой ленты.

Поскольку полученные материалы являются двухслойными, то они характеризуются пониженными значениями коэффициента отражения электромагнитного излучения и повышенной эффективностью экранирования электромагнитного

излучения по сравнению с однослойными материалами [31].

Далее были изготовлены образцы слоистых гибких радиопоглощающих материалов трех типов. Образец типа 1 был изготовлен на основе неактивированного порошкообразного древесного (березового) угля, образцы типов 2 и 3 — на основе активированного порошкообразного древесного (березового) угля и активированного порошкообразного кокосового угля (полученного на основе скорлупы кокоса). Выбор этих углей обусловлен их широкой доступностью [32]. Они отличаются не только сырьем, на основе которого они изготовлены, но и размером частиц, а также содержанием примесей щелочных и щелочноземельных металлов.

На рис. 1 представлен внешний трех типов углей. Как видно, размер частиц порошкообразного неактивированного древесного угля и порошкообразного активированного древесного угля варьируется от 0,5 до 8,0 мм, а размер частиц порошкообразного активированного кокосового угля — от 1,0 до 5,0 мм.

Толщина изготовленных образцов составила ~ 5,0 мм. Длина и ширина изготовленных образцов составила 400,0 мм, что было обусловлено размером апертуры антенн, использованных для измерения значений коэффициентов отражения и прохождения электромагнитного излучения этих образцов.

Коэффициенты отражения и передачи электромагнитного излучения

Были измерены значения коэффициентов отражения и передачи электромагнитного излучения в диапазоне частот 2,0 – 17,0 ГГц изготовленных образцов. При этом использовали скалярный анализатор цепей. На рис. 2 представлены схемы подключения устройств для измерения указанных параметров.

Для обоснования значений коэффициентов отражения и передачи электромагнитного излучения изготовленных образцов использовали следующие характеристики порошкообразных углей, на основе которых были изготовлены образцы: удельную электропроводность, влагосодержание (пропитанных до насыщения водным раствором хлорида кальция), элементный состав изготовленных образцов.

Удельная электропроводимость (σ) порошкообразных углей была оценена методом, представленным в [33]. Этот метод основан на



Рис. 1. Порошкообразные угли, использованных для изготовления образцов: *a* — типа 1; *b* — типа 2; *c* — типа 3.

Fig. 1. The photos of the powdered charcoals, used for the samples fabrication: *a* — type 1; *b* — type 2; *c* — type 3.

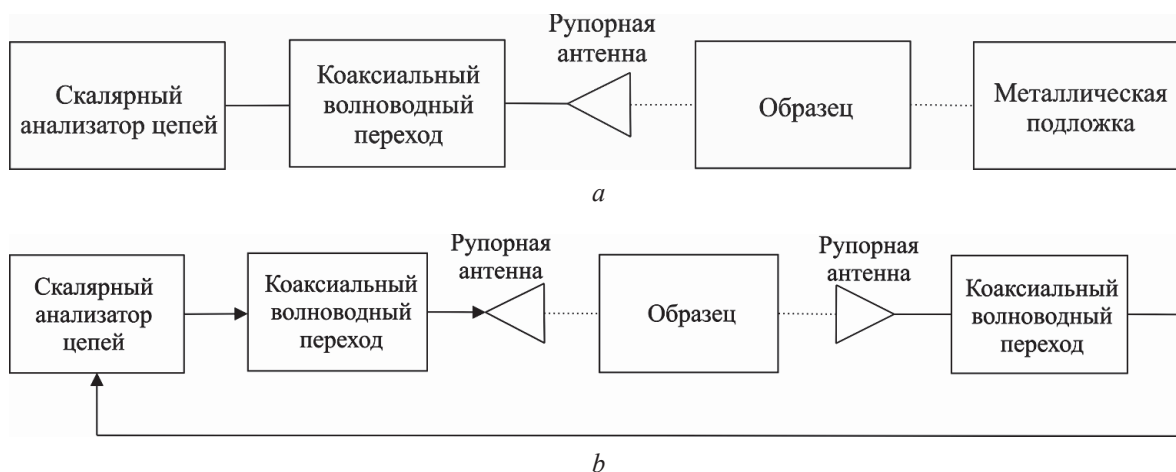


Рис. 2. Схемы подключения устройств скалярного анализатора цепей при измерении значений коэффициентов отражения (*a*) и передачи (*b*) электромагнитного излучения образцов.

Fig. 2. Schemes for connecting the scalar network analyzer devices when measuring the electromagnetic radiation reflection (*a*) and transmission (*b*) coefficient values of the samples.

использовании двухэлектродной измерительной ячейки и включает: заполнение исследуемым материалом двухэлектродной измерительной ячейки; подключение измерителя сопротивления к электродам измерительной ячейки; измерение сопротивления материала и расчет удельной проводимости материала по формуле

$$\sigma = \frac{l}{R \cdot S}, \text{ [См/с]},$$

где l — расстояние между электродами измерительной ячейки, м; S — площадь электродов измерительной ячейки, м²; R — сопротивление ячейки.

Влагосодержание порошкообразных углей, пропитанных до насыщения водным раствором хлорида кальция, оценивали по расчетно-инструментальной методике, включающей: определение массы порошкообразного угля, не пропитанного водным раствором хлорида кальция (m_{ni} , г), с использованием весов, абсолютная погрешность измерения которых составляет $\pm 10^{-4}$ г; пропитывание порошкообразного угля до насыщения водным раствором хлорида кальция; определение массы порошкообразного угля, пропитанного до насыщения водным раствором хлорида кальция (m_p , г), с использованием весов, абсолютная погрешность измерения которых — $\pm 10^{-4}$ г; расчет влагосодержания (MC , масс. %) порошкообразного угля, пропитанного до насыщения водным раствором хлорида кальция по формуле:

$$MC = \frac{m_i - m_{ni}}{m_{ni}} \cdot 100\%.$$

Структуру изготовленных образцов анализировали методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с помощью сканирующего электронного микроскопа Hitachi S-4800. Элементный состав изготовленных образцов исследовали методом энергодисперсионного анализа (Energy-dispersive X-ray spectroscopy — EDX) на анализаторе Bruker QUANTAX 200.

Результаты и их обсуждение

На рис. 3 представлены частотные зависимости коэффициента отражения электромагнитного излучения в диапазоне 2,0 – 17,0 ГГц изготовленных образцов, закрепленных на металлических подложках

Из рис. 3 следует, что значения коэффициента отражения электромагнитного излучения в диапазоне частот 2,0 – 17,0 ГГц образцов типов 1 – 3, полученных по разработанной методике, изменяются соответственно в пределах от –1,0 до –10,0 дБ, от –1,0 до –18,0 дБ, от –3,0 до –18,0 дБ (при условии, что эти образцы закреплены на металлических подложках). Широкие пределы изменения значений коэффициента отражения электромагнитного излучения этих образцов обусловлены совокупностью следующих причин:

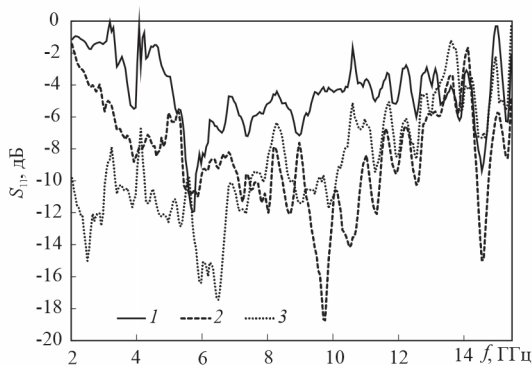


Рис. 3. Частотные зависимости коэффициента отражения электромагнитного излучения в диапазоне 2,0 – 17,0 ГГц образцов: 1 — типа 1, 2 — типа 2, 3 — типа 3, закрепленных на металлических подложках.

Fig. 3. Frequency dependences of electromagnetic radiation reflection coefficient in the range 2.0–17.0 GHz of the samples: 1 — type 1, 2 — type 2, 3 — type 3, fixed on the metal reflectors.

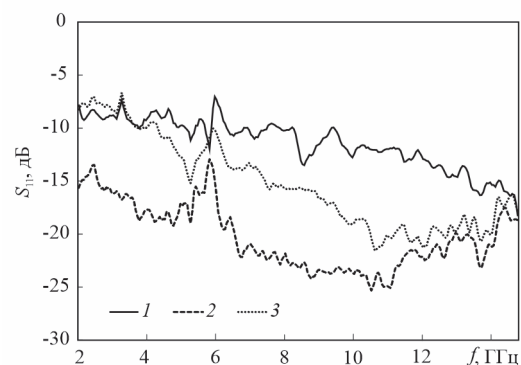


Рис. 4. Частотные зависимости коэффициента передачи электромагнитного излучения в диапазоне 2,0 – 17,0 ГГц образцов: 1 — типа 1, 2 — типа 2, 3 — типа 3.

Fig. 4. Frequency dependences of electromagnetic radiation transmission coefficient in the range 2.0–17.0 GHz of the samples: 1 — type 1, 2 — type 2, 3 — type 3.

1) взаимодействующие друг с другом электромагнитные волны, отражаемые от поверхности каждого из слоев образцов, а также от поверхностей металлических подложек, на которых закреплены такие образцы, характеризуются определенными значениями фаз;

2) значения фаз электромагнитных волн зависят от частоты волн, а также от толщины и состава материалов (слоев материалов), с которыми взаимодействуют эти волны;

3) чем больше разница между значениями фаз электромагнитных волн, тем ниже значения коэффициента отражения электромагнитного излучения материалов, с которыми взаимодействуют эти волны, и наоборот, чем меньше разница между значениями фаз электромагнитных волн, тем выше значения коэффициента отражения электромагнитного излучения материалов, с которыми взаимодействуют эти волны.

Для управляемого изменения точек максимума и минимума, а также максимумов и минимумов частотных зависимостей коэффициента отражения электромагнитного излучения материалов, необходимо изменять либо толщину последних (слоев последних) при неизменности их состава, либо состав при неизменности их толщины.

На рис. 4 представлены частотные зависимости коэффициента передачи электромагнитного излучения в диапазоне 2,0 – 17,0 ГГц изготовленных образцов.

Из рис. 4 следует, что значения коэффициента передачи электромагнитного излучения изготовленных образцов на основе порошкообразных углей типов 1, 2 и 3 изменяются соответственно в пределах от –8,0 до –15,0 дБ, от –12,0 до –25,0 дБ и от –8,0 до –22,0 дБ.

В табл. 1 систематизированы средние значения коэффициентов отражения и передачи электромагнитного излучения в диапазоне 2,0 – 17,0 ГГц исследованных образцов материалов.

Из табл. 1 видно, что наименьшее среднее значение коэффициента отражения электромагнитного излучения в диапазоне частот 2,0 – 17,0 ГГц характерно для материала, полученного на основе порошкообразного активированного кокосового угля. Это связано с совокупностью следующих двух особенностей исследованных материалов:

1. Наибольший вклад в значения коэффициента отражения электромагнитного излучения исследованных материалов вносит их внешний слой, основным компонентом которого является порошкообразный древесный уголь;

2. Удельная электропроводность порошкообразного активированного кокосового угля меньше удельной электропроводности порошкообразного неактивированного древесного угля и порошкообразного активированного древесного угля (табл. 2). Это связано с тем, что в порошкообразном активированном кокосовом угле содержится больше примесей щелочных и щелочноземельных металлов, чем двух других образцах, что было установлено на основе результатов проведенного EDX анализа (табл. 3).

Из табл. 1 также следует, что материал на основе порошкообразного активированного древесного угля характеризуется наименьшим средним значением коэффициента передачи электромагнитного излучения в указанном диапазоне частот. Это связано с сочетанием следующих двух особенностей исследованных материалов.

Наибольший вклад в потери энергии электромагнитного излучения при распространении

Таблица 1

Средние значения коэффициентов отражения и передачи электромагнитного излучения в диапазоне 2,0 – 17,0 ГГц исследованных образцов материалов

Table 1

Average values of electromagnetic radiation reflection and transmission coefficients in the frequency range of 2.0 – 17.0 GHz of the studied samples

Основа образца, тип	Среднее значение коэффициента отражения электромагнитного излучения, дБ	Среднее значение коэффициента передачи электромагнитного излучения, дБ
Порошкообразный неактивированный древесный уголь — тип 1	–4,5	–11,5
Порошкообразный активированный древесный уголь — тип 2	–8,5	–20,0
Порошкообразный кокосовый древесный уголь — тип 3	–9,0	–15,5

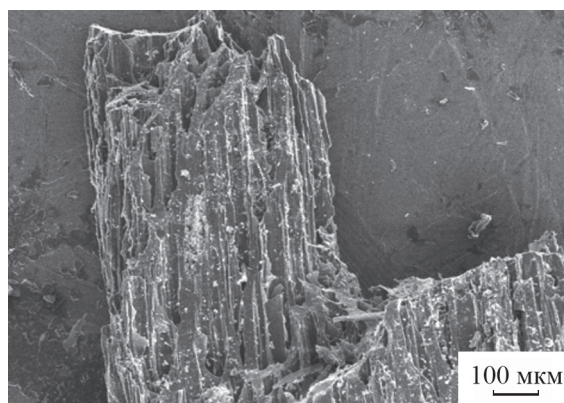
Таблица 2

Измеренные значения удельной электропроводности порошкообразных древесных углей, использованных для изготовления образцов типов 1, 2 и 3

Table 2

The measured values of the specific electrical conductivity of the powdered charcoals, used for manufacturing of the samples of types 1, 2 and 3

Образец	Удельная электропроводность, См/м
Тип 1	10^{-2}
Тип 2	0,5
Тип 3	10^{-4}



a

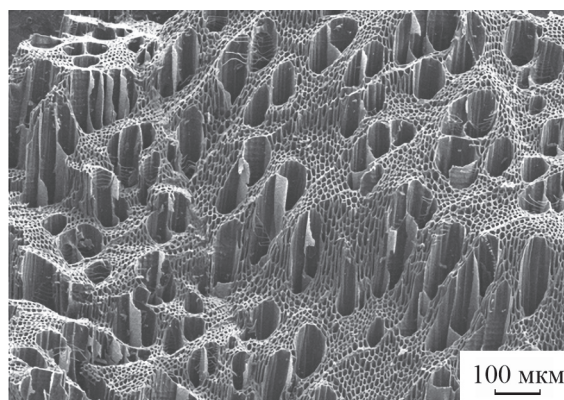
Таблица 3

Результаты EDX анализа порошкообразных углей, использованных для изготовления образцов типов 1, 2 и 3

Table 3

The results of EDX analysis of the powdered charcoals, used for manufacturing of the samples of types 1, 2 and 3

Химический элемент	Содержание, ат. %		
	Тип 1	Тип 2	Тип 3
C	85,74	91,40	83,56
O	13,65	8,46	14,97
K	0,07	0,03	1,13
Na	—	—	0,20
Mg	0,16	0,03	0,08
Cl	0,02	—	0,03
Ca	0,28	0,08	0,02
Mn	0,07	—	—



b

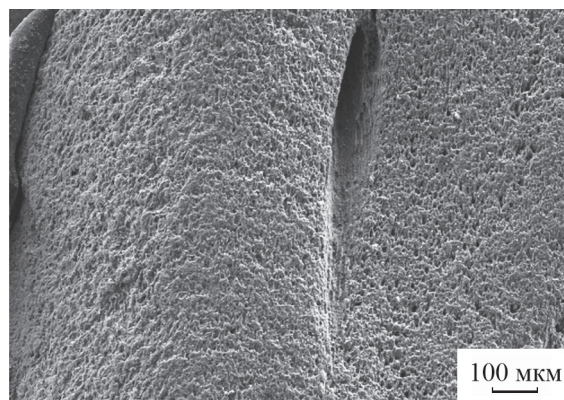
Таблица 4

Измеренные значения удельной электропроводности порошкообразных древесных углей, пропитанных до насыщения водным раствором хлорида кальция и использованных для изготовления образцов типов 1, 2 и 3

Table 4

The evaluated values of the specific electrical conductivity of the powdered charcoals impregnated to saturation with calcium chloride aqueous solution and used for manufacturing of the samples of types 1, 2 and 3

Образец	Удельная электропроводность, См/м
Тип 1	1,00
Тип 2	7,50
Тип 3	2,50



c

Рис. 5. СЭМ-изображения слоев образцов на основе порошкообразных углей: a — тип 1; b — тип 2; c — тип 3.

Fig. 5. The SEM-images of the samples layers based on powdered charcoals: a — type 1; b — type 2; c — type 3.

в толще исследованных материалов вносит их внутренний слой. Основным компонентом внутреннего слоя таких материалов является порошко-

образный уголь, пропитанный до насыщения водным раствором хлорида кальция.

Удельная электропроводность порошкообразного активированного древесного угля, пропитанного до насыщения водным раствором хлорида

кальция, превышает удельную электропроводность порошкообразного неактивированного древесного угля и порошкообразного активированного кокосового угля, пропитанных до насыщения аналогичным раствором (табл. 4). Это связано с тем, что площадь поверхности пор порошкообразного активированного древесного угля больше, чем площадь поверхности пор порошкообразного неактивированного древесного угля и порошкообразного активированного кокосового угля [34], что видно на полученных СЭМ-изображениях слоев на основе этих материалов (рис. 5).

Поры частиц порошкообразного активированного древесного угля могут удерживать больший объем водного раствора по сравнению с порами частиц порошкообразного неактивированного древесного угля и частиц порошкообразного активированного кокосового угля, что следует из результатов оценки влагосодержания порошкообразных древесных углей, пропитанных до насыщения водным раствором хлорида кальция (табл. 5).

Таблица 5

Влагосодержание порошкообразных древесных углей, пропитанных до насыщения водным раствором хлорида кальция и использованных для изготовления образцов типов 1, 2 и 3

Table 5

Moisture content of the powdered charcoals impregnated to saturation with calcium chloride aqueous solution and used for manufacturing of the samples of types 1, 2 and 3

Образец	Влагосодержание, масс. %
Тип 1	50
Тип 2	250,0
Тип 3	100,0

На СЭМ-изображениях слоев на основе порошкообразных углей, пропитанных до насыщения водным раствором хлорида кальция (рис. 6) видны кристаллики (самые яркие элементы), предположительно, хлорида кальция. Вкраплений раствора в жидкой фазе на рассматриваемых СЭМ-изображениях не наблюдается, так эти изображения были получены в условиях вакуума.

Значения коэффициента отражения электромагнитного излучения исследованных поглотителей ниже, чем их аналогов (табл. 6). При этом значения коэффициента передачи электромагнитного излучения у всех практически одинаковы.

По результатам сравнительного анализа параметров, представленных в табл. 1 и 6, установле-

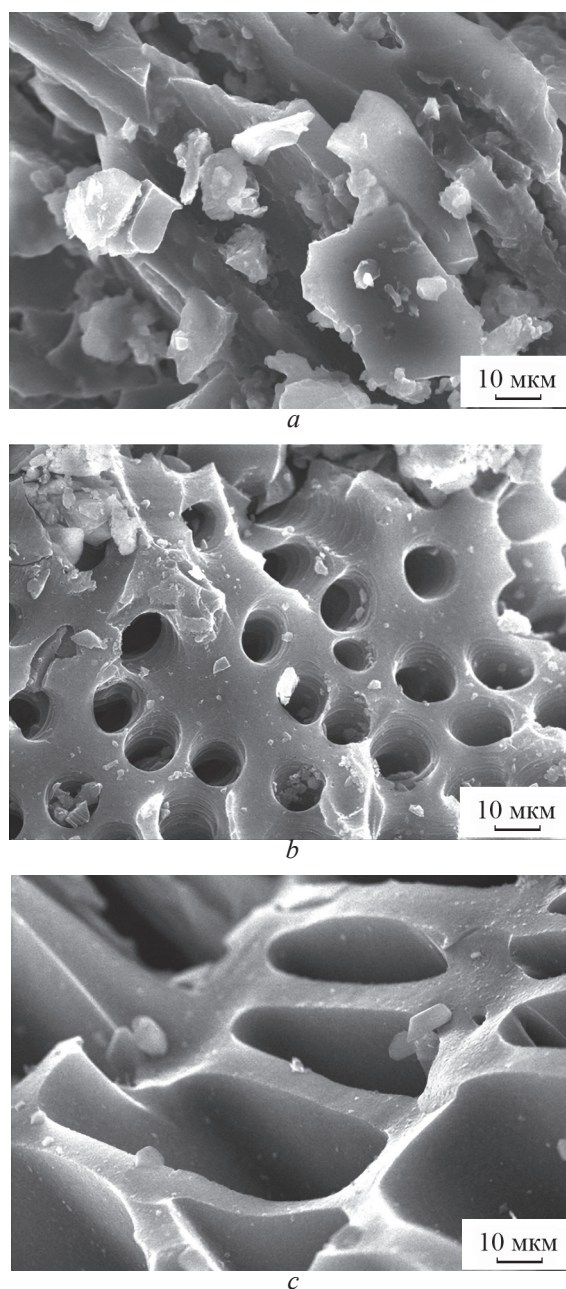


Рис. 6. СЭМ-изображения слоев образцов на основе порошкообразных углей, пропитанных до насыщения водным раствором хлорида кальция: *a* — тип 1; *b* — тип 2; *c* — тип 3.

Fig. 6. The SEM-images of the samples layers based on powdered charcoals, impregnated to saturation with calcium chloride aqueous solution: *a* — type 1; *b* — type 2; *c* — type 3.

но, что разработанная методика перспективна для получения эффективных поглотителей электромагнитного излучения. Это обусловлено тем, что процесс получения таких поглотителей характери-

Таблица 6

Характеристики поглотителей электромагнитного излучения, являющихся аналогами поглотителей, полученных в соответствии с разработанной авторами методикой

Table 6

Characteristics of radio-absorbing materials, which are analogues of absorbers obtained in accordance with the proposed method

Название аналога	Толщина, мм	Удельная электропроводность, См/м	Среднее значение коэффициента отражения ЭМИ, дБ	Среднее значение коэффициента передачи ЭМИ, дБ	Ссылка
Углеродсодержащие композиционные материалы	2,7	Не указано	Не указано	-30,0	[25]
Углеродсодержащие композиционные материалы	2,7	Не указано	Не указано	-30,0	[25]
Композиционные материалы на основе графита	Не указано	$2,8 \cdot 10^3$	-1,5	-20,0	[35]
Композиционные материалы на основе графена	Не указано	10,0	Не указано	-21,0	[36]
Композиционные материалы на основе углеродных нанотрубок	4,0	20,0	-2,2	-30,0	[37]

зуются более высокой технологичностью по сравнению с процессами получения их аналогов [25, 35 – 37].

Выводы

Процесс получения радиопоглощающих материалов в соответствии с разработанной авторами методикой характеризуется более высокой технологичностью по сравнению с процессами получения аналогов, так как основан на введении водного раствора электролита в поры частиц порошкообразного материала и на выполнении клеевого прессования. Не предполагается использование сложного в эксплуатации и дорогостоящего оборудования.

Материалы характеризуются гибкостью, благодаря чему на их основе можно получать изделия сложной формы.

Материалы отличаются более низкой стоимостью, что обусловлено соответствующим свойством их основного компонента (порошкообразного угля, изготавливаемого, как правило, на основе отходов производства).

Использование материалов, полученных по разработанной методике, представляется перспективным для решения проблемы снижения степени влияния внешнего электромагнитного излучения на радиоэлектронные приборы (в том числе для обеспечения электромагнитной совместимости). Это связано с тем, что такие материалы уменьша-

ют до 1000,0 раз энергию взаимодействующего с ними электромагнитного излучения. Кроме того, поскольку эти материалы обеспечивают в среднем десятикратное ослабление энергии электромагнитного излучения, отраженного от металлических подложек, они представляются перспективными для использования с целью снижения энергии пассивных электромагнитных помех. Такие помехи могут формироваться в помещениях, экранированных с помощью металлических материалов, и оказывать влияние на работу расположенных в таких помещениях радиоэлектронных приборов.

Радиопоглощающие материалы могут быть выполнены в виде панелей, предназначенных для закрепления на стенах помещений или в виде штор, предназначенных для разделения на секторы пространства в таких помещениях. Так как эти материалы являются гибкими, то на их основе можно получать изделия сложной формы. Для обеспечения требуемых размеров и формы радиопоглощающих материалов, полученных в соответствии с разработанной авторами методикой, в процессе изготовления этих материалов необходимо формировать фрагменты самоклеящихся пленок соответствующих размеров и формы.

Авторы выражают благодарность Д.В. Жигулину за содействие в проведении исследований образцов методами сканирующей электронной микроскопии и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии.

Литература/References

1. Kapelewski J. On current and prospective use of binary thin multilayers in radar absorbing structures. *Acta Physica Polonica*, 2013, v. 124(3), pp. 451 – 455.
2. Marra F., Lecini J., Tamburrano A., Pisu L., Sarto M.S. Electromagnetic wave absorption and structural properties of wide-band absorber made of graphene-printed glass-fibre composite. *Scientific Reports*, 2018, v. 8, art. 12029.
3. Prokopchuk A., Zozulia I., Didenko Y., Tatarchuk D., Heuer H., Poplavko Y. Dielectric permittivity model for polymer–filler composite materials by the example of ni- and graphite-filled composites for high-frequency absorbing coatings. *Coatings*, 2021, v. 11(2), doi: 10.3390/coatings11020172.
4. Pandey R., Tekumalla S., Gupta M. Materials for potential EMI shielding applications. *Processing. Properties and Current Trends*, Eds: J. Kuruvilla, W. Runcy, G. Gejo. Elsevier, 2020, chapter 21.
5. Guan H., Chung D.D.L. Absorption-dominant radio-wave attenuation loss of metals and graphite. *Journal of Materials Science*, 2021, v. 56(13), pp. 8037 – 8047.
6. Hung-Chuan Cheng, Chong-Rong Chen, Shan-hui Hsu, Kuo-Bing Cheng. Electromagnetic shielding effectiveness and conductivity of PTFE/Ag/MWCNT conductive fabrics using the screen printing method. *Sustainability*, 2020, v. 12(15), doi:10.3390/su12155899.
7. Tunakova V., Tunak M., Bajzik V., Ocheretna L., Arabuli S., Kyzymchuk O., Vlasenko V. Hybrid knitted fabric for electromagnetic radiation shielding. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 2020, v. 15, doi: 10.1177/1558925020925397.
8. Ozen M., Sancak E., Beyit A., Usta I., Akalin M. Investigation of electromagnetic shielding properties of needle-punched nonwoven fabrics with stainless steel and polyester fiber. *Textile Research Journal*, 2013, v. 83(8), pp. 849 – 858.
9. Chung D.D.L. Materials for electromagnetic interference shielding. *Materials Chemistry and Physics*, 2020, v. 255, art. 123587.
10. Kruzalak J., Kvasnicakova A., Hlozekova K., Dosoudil R., Goralik M., Hudec I. Electromagnetic interference shielding and physical-mechanical characteristics of rubber composites filled with manganese-zinc ferrite and carbon Black. *Polymers*, 2021, v. 13(616), doi:10.3390/polym13040616.
11. Ravindren R., Mondal S., Nath K., Das N. Ch. Investigation of electrical conductivity and electromagnetic interference shielding effectiveness of preferentially distributed conductive filler in highly flexible polymer blends nanocomposites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2019, v. 118, pp. 75 – 89, doi: 10.1016/j.compositesa.2018.12.012.
12. Cvek M., Moucka R., Sedlacik M., Babayan V., Pavlinek V. Enhancement of radio-absorbing properties and thermal conductivity of polysiloxane-based magnetorheological elastomers by the alignment of filler particles. *Smart Materials and Structures*, 2017, v. 26(9), 095005, doi: 10.1088/1361-665X/aa7ef6.
13. Kuznetsova I.E., Kolesov V.V., Fionov A.S., Kramarenko E.Yu., Stepanov G.V., Mikheev M.G., Verona E., Solodov I.Yu. Magnetoactive elastomers with controllable radio-absorbing properties. *Materials Today Communications*, 2019, v. 21, doi: 10.1016/j.mtcomm.2019.100610.
14. Maltsev A.A., Bibikov S.B., Maltseva I.E., Marnautov N.A., Komissarova L.Kh., Elfimov A.B. Working out the method of obtaining radio-absorbing composite material based on magnetite nanoparticles and polydimethylsiloxanes. *Key Engineering Materials*, 2020, v. 869, pp. 362 – 366.
15. Nguyen Thu Ha, Cao Hong Ha, Do Le Viet Hung, Nguyen Pham Duy Linh, Tran Thi Thuy, Phan Trung Nghia, Seiichi Kawahara, Toshiaki Ougizawa. Preparation of electromagnetic shielding coating based on natural rubber. *Materials Transactions*, 2020, v. 61(8), doi:10.2320/matertrans.MT-MN2019010.
16. Jia Z., Zhang M., Liu B., Wang F., Wie G., Su Z. Graphene foams for electromagnetic interference shielding: A review, *ACS Applied Nano Materials*, 2020, v. 3(7), pp. 6140 – 6155.
17. Thomas P., Abdulhakim L.V., Pushkaran N.K., Karuvandi A.C. Wideband radar absorbing structure using polyaniline-graphene nanocomposite. *Journal of Carbon Research*, 2020, v. 6(72), doi: 10.3390/c6040072.
18. Wanasinghe D., Aslani F., Ma G. Electromagnetic shielding properties of carbon fibre reinforced cementitious composites. *Construction and Building Materials*, 2020, v. 260, art. 120439.
19. Munalli D., Dimitrakis G., Chronopoulos D., Greedy S., Long A. Electromagnetic shielding effectiveness of carbon fibre reinforced composites. *Composites Part B: Engineering*, 2019, v. 173, art. 106906, doi: 10.1016/j.compositesb.2019.106906.
20. Kondrashov S.V., Gurevich Ya.M., Popkov O.V., Shashkeev K.A., Fionov A.S., Soldatov M.A., Yurkov G.Yu. Broadband radio-absorbing materials based on porous composites with carbon nanotubes. *Polymer Science, Series D*, 2017, v. 10(3), doi: 10.1134/S1995421217030078.
21. Kumar R., Kumari S., Dhakate S.R. Nickel nanoparticles embedded in carbon foam for improving electromagnetic shielding effectiveness. *Applied Nanoscience*, 2015, v. 5(5), doi 10.1007/s13204-014-0349-7.
22. Hye Ji Im, Gwang Hoon Jun, Dong Ju Lee, Ho Jin Ryu and Soon Hyung Hong. Enhanced electromagnetic interference shielding behavior of graphene nanoplatelet/Ni/Wax nanocomposites. *Journal of Materials Chemistry C*, 2017, v. 5, doi: 10.1039/C7TC01405H.
23. Al-Ghamdi A.A., El-Tantawy F. New electromagnetic wave shielding effectiveness at microwave frequency of polyvinyl chloride reinforced graphite/copper nanoparticles. *Composites Part A: Applied Science*

- and Manufacturing, 2010, v. 41(11), doi: 10.1016/j.compositesa.2010.08.006.
24. Arranz-Andres J., Perez E., Cerrada M.L. Nanocomposites based on isotactic polypropylene-copper nanoparticles as electromagnetic shields. *Science of Advanced Materials*, 2013, v. 5(10), doi: 10.1166/sam.2013.1643.
 25. Huang Y., Chen S., Ma R., Cheng Y., Jin L., Chen G. Coal-based carbon composite with excellent electromagnetic-shielding properties prepared from modification of coal with d-a reaction. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2021, doi: 10.1007/s42114-021-00290-5.
 26. Gore W.T. Energy and charcoal production from solid waste generated in the south african pulp and paper industry. *South African Forestry Journal*, 1986, v. 136(1), doi: 10.1080/00382167.1986.9629630.
 27. Dias J.M., Alvim-Ferraz M.C.M., Almeida M.F., Rivera-Utrilla J., Sanchez-Polo M. Waste materials for activated carbon preparation and its use in aqueous-phase treatment: a review. *Journal of Environmental Management*, 2007, v. 85(4), doi: 10.1016/j.jenvman.2007.07.031.
 28. Bogale W. Preparation of charcoal using agricultural wastes. *ethiopian journal of education and sciences. Ethiopian Journal of Education and Sciences*, 2009, v. 5(1), art. 56314.
 29. Kirchner H., Gall J.A. Liquid Calcium chloride for dust control and base stabilization of unpaved road systems. *Transportation Research Record*, 1991, v. 1291, pp. 173 – 178.
 30. Shedlovsky T., Brown A.S. The electrolytic conductivity of alkaline earth chlorides in water at 25°. *Journal of the American Chemical Society*, 1934, v. 56(5), pp. 1066 – 1071.
 31. Lan C., Zou L., Wang N., Qiu Y., Ma Y. Multi-reflection-enhanced electromagnetic interference shielding performance of conductive nanocomposite coatings on fabrics. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2021, v. 590, doi: 10.1016/j.jcis.2021.01.074.
 32. Kajina W., Junpen A., Garivait S., Kamnoet O., Keeratiisariyakul P., Rousset P. Charcoal production processes: an overview. *Journal of Sustainable Energy & Environment*, 2019, v. 10, pp. 19 – 25.
 33. Dobrego K.V., Chumachenko M.A., Boiprav O.V., Grinchik N.N., Pukhir H.A. Measurement of electrical resistance of liquid electrolytes and materials containing them. *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, 2020, v. 12(2), doi: 10.4236/jemaa.2020.122002.
 34. Malekian F., Ghafourian H., Zare K., Sharif A.A., Zamani Y. Surface characteristics of different wood and coal-based activated carbons for preparation of carbon molecular sieve. *Journal of the Mexican Chemical Society*, 2019, v. 63(2), doi: 10.29356/jmcs.v63i2.666.
 35. Vovchenko L., Matzui L., Oliynyk V., Launetz V., Prylutsky Y. The effect of filler morphology and distribution on electrical and shielding properties of graphite-epoxy composites. *International Journal of Nanoscience*, 2008, v. 7, pp. 263 – 268.
 36. Liang J., Wang Y., Huang Y., Ma Y., Liu Z., Cai J., Zhang C., Gao H., Chen Y. Electromagnetic interference shielding of graphene/epoxy composites. *Carbon*, 2009, v. 47, pp. 922 – 925.
 37. González M., Mokry G., de Nicolás M., Baselga J., Pozuelo J. Carbon nanotubes carbon nanotube composites as electromagnetic shielding materials in GHz range. *Current Progress of their Polymer Composites*, 2016, pp. 297 – 321, doi: 10.5772/62508.

*Статья поступила в редакцию — 06.10.2022 г.
после доработки — 22.11.2022 г.
принята к публикации — 23.11.2022 г.*

Бойправ Ольга Владимировна — учреждение образования *Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (220013 Республика Беларусь, Минск, ул. П. Бровки, 6)*, кандидат технических наук, доцент кафедры защиты информации, старший научный сотрудник научно-исследовательской части, специалист в области разработки радиопоглощающих материалов. E-mail: smu@bsuir.by.

Богуш Вадим Анатольевич — учреждение образования *Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (220013 Республика Беларусь, Минск, ул. П. Бровки, 6)*, доктор физико-математических наук, профессор кафедры защиты информации, главный научный сотрудник научно-исследовательской части, специалист в области разработки радиопоглощающих материалов. E-mail: bogush@bsuir.by.

Advanced layered flexible radio-absorbing materials based on powdered charcoal

O. V. Boiprav, V. A. Bogush

The article presents the technique for obtaining advanced layered radio-absorbing materials based on powdered charcoal. The technique includes the following technologies: incorporation of the electrolyte aqueous solution into the material particles pores; adhesive pressing. The developed technique is more manufacturable compared to the analogs. Materials obtained in accordance with this technique are characterized by the flexibility, as well as lower cost compared to other carbon-containing radio-absorbing materials. The experimental characteristics of electromagnetic radiation reflection and transmission coefficients in the frequency range 2.0 – 17.0 GHz of the materials obtained in accordance with the developed technique are described. The results of the comparative analysis of these characteristics are provided. Based on these results, it's determined that the average values of electromagnetic radiation reflection coefficient in the specified frequency range of the materials based on powdered non-activated wood charcoal, powdered activated wood charcoal and powdered activated coconut charcoal are –4.5 dB, –8,5 dB and –9.0 dB (when these materials fixed on metal reflectors). The average values of their electromagnetic radiation transmission coefficient are –11.5 dB, –20.0 dB and –15.5 dB respectively. The investigated materials seem to be promising for use in order to protect electronic equipment from external electromagnetic interference.

Key words: reflection coefficient, transmission coefficient, radio-absorbing material, charcoal.

Boiprav Olga — Educational Institution Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (220013 Republic of Belarus, Minsk, P. Brovki str., 6.), PhD, associate professor, associate professor of the Information protection department, senior researcher of R&D department, specialist in the field of radio absorbing materials development. E-mail: smu@bsuir.by.

Bogush Vadim — Educational Institution Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (220013 Republic of Belarus, Minsk, P. Brovki str., 6.), Doctor of Sciences, professor, professor of the information protection department, chief researcher of R&D department, specialist in the field of radio absorbing materials development. E-mail: bogush@bsuir.by.