

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ
RADIOELECTRONICS, INSTRUMENT-MAKING

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-3-215-224>
УДК 537.87



Оригинальная статья

О. В. Бойправ*, Е. С. Белоусова, В. С. Мокеров

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
ул. П. Бровки, 6, 220013, Минск, Республика Беларусь*

**ХАРАКТЕРИСТИКИ ОТРАЖЕНИЯ, ПЕРЕДАЧИ И ПОГЛОЩЕНИЯ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ УГЛЕСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ,
ПРОПИТАННЫХ ВОДНЫМИ РАСТВОРАМИ ХЛОРИДОВ**

Аннотация. Представлены установленные экспериментальным путем закономерности изменения характеристик отражения, передачи и поглощения электромагнитного излучения в диапазоне частот 2,0–17,0 ГГц материалов. Эти материалы содержали порошкообразный активированный березовый уголь, пропитанный водными растворами хлоридов (хлорид кальция, хлорид магния и хлорид натрия). С использованием установленных закономерностей определено, что материалы на основе порошкообразного активированного березового угля, пропитанного водным раствором хлорида кальция, являются радиопоглощающими в случае, если они взаимодействуют с электромагнитным излучением в диапазонах частот 3,5–4,5 и 5,5–17,0 ГГц. В свою очередь материалы на основе порошкообразного активированного березового угля, пропитанного водными растворами хлоридов магния и натрия, являются радиопоглощающими в случае, если они взаимодействуют с электромагнитным излучением в диапазонах частот 2,0–17,0 и 2,0–7,5 ГГц (раствор хлорида магния), 10,0–17,0 ГГц (раствор хлорида натрия). Значения коэффициента поглощения электромагнитного излучения исследованных материалов достигают 0,95. Исследуемые материалы представляются перспективными для изготовления перегородок, предназначенных для экранирования секторов помещений, где располагаются приборы электронной техники, чувствительные к воздействию электромагнитных помех.

Ключевые слова: коэффициент отражения, коэффициент передачи, коэффициент поглощения, поглотитель электромагнитного излучения, порошкообразный активированный березовый уголь, хлорид щелочного металла, хлорид щелочноземельного металла

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: *Бойправ Ольга Владимировна* – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры защиты информации Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. <https://orcid.org/0000-0002-9987-8109>. E-mail: smu@bsuir.by; *Белоусова Елена Сергеевна* – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры защиты информации, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. <https://orcid.org/0000-0001-9834-6074>. E-mail: belousova@bsuir.by; *Мокеров Вячеслав Сергеевич* – студент Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. E-mail: vyacheslav.mokerov@mail.ru

Вклад авторов: *Бойправ Ольга Владимировна* – определение целей и задач исследования, расчет значений коэффициента поглощения электромагнитного излучения экспериментальных образцов, интерпретация результатов расчета, написание текста рукописи; *Белоусова Елена Сергеевна* – изготовление экспериментальных образцов, анализ результатов измерения значений коэффициентов отражения и передачи экспериментальных образцов; *Мокеров Вячеслав Сергеевич* – изготовление экспериментальных образцов, измерение значений коэффициентов отражения и передачи электромагнитного излучения экспериментальных образцов.

Для цитирования: Бойправ, О. В. Характеристики отражения, передачи и поглощения электромагнитного излучения углесодержащих материалов, пропитанных водными растворами хлоридов / О. В. Бойправ, Е. С. Белоусова, В. С. Мокеров // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-тэхн. навук. – 2024. – Т. 69, № 3. – С. 215–224. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-3-215-224>

Поступила в редакцию: 04.10.2023

Доработанный вариант: 12.03.2024

Утверждена к публикации: 17.09.2024

Подписана в печать: 24.09.2024

© Бойправ О. В., Белоусова Е. С., Мокеров В. С., 2024

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author.

Original article**Olga V. Boiprav^{*}, Elena S. Belousova, Vyacheslav S. Mokerov***Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus***ELECTROMAGNETIC RADIATION REFLECTION, TRANSMISSION
AND ABSORPTION CHARACTERISTICS OF CHARCOAL-CONTAINING MATERIALS IMPREGNATED
WITH CHLORIDES AQUEOUS SOLUTIONS**

Abstract. The experimentally established regularities of changes in electromagnetic radiation reflection, transmission and absorption characteristics in the frequency range of 2.0–17.0 GHz of materials are presented. These materials contained powdered activated birch charcoal impregnated with chlorides aqueous solutions (calcium chloride, magnesium chloride and sodium chloride). Using the established regularities, it was determined that materials based on powdered activated birch charcoal impregnated with calcium chloride aqueous solution are radioabsorbing if they interact with electromagnetic radiation in the frequency ranges of 3.5–4.5 and 5.5–17.0 GHz. In turn, materials based on powdered activated birch charcoal impregnated with magnesium and sodium chlorides aqueous solutions are radioabsorbing if they interact with electromagnetic radiation in the frequency ranges of 2.0–17.0 and 2.0–7.5 GHz (magnesium chloride solution), 10.0–17.0 GHz (sodium chloride solution). Electromagnetic radiation absorption coefficient values of the studied materials reach 0.95. These materials seem promising for the manufacture of partitions to shield sectors of premises where electronic devices sensitive to electromagnetic interference are located.

Keywords: reflection coefficient, transmission coefficient, absorption coefficient, electromagnetic radiation absorber, powdered activated birch carbon, alkali metal chloride, alkaline earth metal chloride

Conflict of interest: the authors declare that there is no conflict of interest.

Information about the authors: *Olga V. Boiprav* – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Information Protection Department at Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. <https://orcid.org/0000-0002-9987-8109>. E-mail: smu@bsuir.by; *Elena S. Belousova* – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Information Protection Department at Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. <https://orcid.org/0000-0001-9834-6074>. E-mail: belousova@bsuir.by; *Vyacheslav S. Mokerov* – Student at Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. E-mail: vyacheslav.mokerov@mail.ru

Contribution of the authors: *Olga V. Boiprav* – determination of the study aim and objectives, calculation of electromagnetic radiation absorption coefficient values of the experimental samples, calculation results interpretation, writing the text of the manuscript; *Elena S. Belousova* – experimental samples production, analysis of the measurement results of electromagnetic radiation reflection and transmission coefficients values of the experimental samples; *Vyacheslav S. Mokerov* – experimental samples production, measurement of electromagnetic radiation reflection and transmission coefficients values of the experimental samples.

For citation: Boiprav O. V., Belousova E. S., Mokerov V. S. Electromagnetic radiation reflection, transmission and absorption characteristics of charcoal-containing materials impregnated with chlorides aqueous solutions; *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2024, vol. 69, no. 3, pp. 215–224 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-3-215-224>

Received: 04.10.2023

Modified: 12.03.2024

Approved for publication: 17.09.2024

Signed to the press: 24.09.2024

Введение. В настоящее время в связи с широким использованием приборов электронной техники остро встает проблема защиты от электромагнитного излучения (ЭМИ). Для решения этой проблемы исследователи предлагают использовать различные материалы. Так, в [1–4] экспериментально обоснована перспективность применения порошкообразного угля при изготовлении поглотителей ЭМИ СВЧ-диапазона.

Ранее авторами была представлена технология изготовления гибких поглотителей ЭМИ на основе порошкообразных древесных углей, пропитанных водным раствором хлорида кальция [5].

Цель настоящей работы – установление закономерностей изменения характеристик отражения, передачи и поглощения ЭМИ материалов на основе порошкообразного угля, пропитанного водными растворами хлоридов, в зависимости от типа последних; усовершенствование на основе установленных закономерностей технологии, представленной в [5].

Для достижения поставленной цели были обоснованы основные и вспомогательные компоненты для изготовления экспериментальных образцов материалов на основе порошкообразного угля, пропитанного водными растворами хлоридов, и изготовлены экспериментальные образцы таких материалов. Авторами установлены изменения значений коэффициентов отражения и передачи ЭМИ изготовленных экспериментальных образцов материалов; рассчитаны значения

коэффициента поглощения ЭМИ изготовленных экспериментальных образцов материалов. В рамках исследования выполнена оценка значений удельной электропроводности порошкообразного угля, использованных для изготовления экспериментальных образцов; а также составлены рекомендации, касающиеся порядка использования полученных результатов исследования в рамках технологий изготовления углесодержащих поглотителей ЭМИ.

Методика проведения исследования. Для изготовления экспериментальных образцов материалов в качестве основных были выбраны следующие компоненты:

- порошкообразный активированный березовый уголь с размером частиц 0,3–0,5 см;
- водные растворы хлоридов щелочноземельных и щелочных металлов (кальция, магния и натрия).

Выбор порошкообразного активированного березового угля обусловлен следующими причинами:

1) данный тип угля характеризуется более низкой плотностью по сравнению с другими порошкообразными углями, что обуславливает возможность получения на его основе материалов, характеризующихся сравнительно невысокой массой на единицу площади [6, с. 27–29];

2) значения коэффициентов отражения и передачи ЭМИ порошкообразного активированного березового угля ниже, чем значения аналогичных параметров, характерных для других порошкообразных углей [6, с. 37–45].

Выбор используемых в эксперименте водных растворов хлоридов щелочноземельных и щелочных металлов обусловлен их высокой электропроводностью, а также доступностью [7].

В качестве вспомогательного компонента для изготовления экспериментальных образцов авторы выбрали самоклеящуюся полимерную пленку. На ее основе были изготовлены матрицы, которые предназначались для фиксирования частиц порошкообразного активированного березового угля. Преимущество таких матриц по сравнению с матрицами на основе связующих веществ (клей, силикон, гипс и т. п.) состоит в том, что при их использовании в ходе изготовления поглотителей ЭМИ отсутствуют временные затраты, обусловленные процессом их затвердевания.

Каждая из матриц для фиксирования частиц порошкообразного активированного березового угля формировалась путем соединения двух одинаковых фрагментов прямоугольной формы из самоклеящейся полимерной пленки.

Соединение фрагментов выполнялось по трем краям периметра, при этом сами фрагменты были ориентированы лицевой стороной наружу (то есть стороной, на которую не нанесен клеевой слой). Края периметра указанных фрагментов, по которым последние не были соединены друг с другом, образовывали отверстие. Через это отверстие выполнялось заполнение матриц частицами порошкообразного активированного угля.

Было изготовлено восемь групп экспериментальных образцов. В табл. 1 представлены характеристики образцов каждой из групп. Толщина каждого из образцов составляла $0,3 \pm 0,1$ см.

Образцы № 1, 2 являлись, по сути, базовыми. Получение результатов оценки их значений коэффициентов отражения, передачи и поглощения ЭМИ было нужно для того, чтобы установить, как влияет пропитывание порошкообразного активированного березового угля водными растворами хлоридов кальция, магния и натрия на перечисленные значения, характерные для поглотителей ЭМИ на основе такого угля.

Образцы № 3–8, как видно из табл. 1, были изготовлены на основе порошкообразного активированного березового угля, частицы которого пропитаны до насыщения водными растворами хлорида кальция, магния или натрия. Концентрация этих растворов составляла $35,0 \pm 1,0$ мас.%, что соответствует предельной растворимости хлорида натрия в воде [8].

Между тем образцы № 2, 4, 6 и 8 (см. табл. 1) отличались от образцов № 1, 3, 5 и 7 наличием внутреннего слоя, изготовленного на основе фольгированной полимерной пленки. Результаты определения значений коэффициентов отражения и поглощения ЭМИ образцов № 2, 4, 6 и 8 были необходимы для оценки целесообразности использования углесодержащих материалов, которые стали объектом исследования, а также для снижения энергии пассивных электромагнитных помех в СВЧ-диапазоне (то есть помех, являющихся следствием отражения ЭМИ от металлических конструкций) [9].

Т а б л и ц а 1. Характеристики изготовленных экспериментальных образцов
T a b l e 1. Characteristics of manufactured experimental samples

Условное обозначение групп образцов	Основные компоненты образцов	Количество и состав слоев образцов
Образцы № 1	Порошкообразный активированный березовый уголь	Один слой на основе частиц угля, зафиксированных в матрице
Образцы № 2		Два слоя: наружный – на основе частиц угля, зафиксированных в матрице; внутренний – на основе фольгированной полимерной пленки
Образцы № 3	Порошкообразный активированный березовый уголь, водный раствор хлорида кальция	Один слой на основе частиц угля, пропитанных до насыщения водным раствором хлорида кальция и зафиксированных в матрице
Образцы № 4		Два слоя: наружный – на основе частиц угля, пропитанных до насыщения водным раствором хлорида кальция и зафиксированных в матрице; внутренний – на основе фольгированной полимерной пленки
Образцы № 5	Порошкообразный активированный березовый уголь, водный раствор хлорида магния	Один слой на основе частиц угля, пропитанных до насыщения водным раствором хлорида магния и зафиксированных в матрице
Образцы № 6		Два слоя: наружный – на основе частиц угля, пропитанных до насыщения водным раствором хлорида магния и зафиксированных в матрице; внутренний – на основе фольгированной полимерной пленки
Образцы № 7	Порошкообразный активированный березовый уголь, водный раствор хлорида натрия	Один слой на основе частиц угля, пропитанных до насыщения водным раствором хлорида натрия и зафиксированных в матрице
Образцы № 8		Два слоя: наружный – на основе частиц угля, пропитанных до насыщения водным раствором хлорида натрия и зафиксированных в матрице; внутренний – на основе фольгированной полимерной пленки

Значения коэффициентов отражения (S_{11} , дБ) и передачи (S_{21} , дБ) ЭМИ образцов измерялись диапазоне частот 2,0–17,0 ГГц в соответствии с методикой и алгоритмом, представленными в [6, с. 32–34; 10].

Для проведения измерений значений коэффициентов отражения и передачи ЭМИ образцов использовались система, в состав которой вошли: панорамный измеритель коэффициентов отражения и передачи SNA 0.01–18 (MWM Lab, г. Минск, Республика Беларусь); персональный компьютер; специальное программное обеспечение; две рупорные антенны П6-23М.

Обработка результатов измерений значений коэффициентов отражения и передачи ЭМИ образцов проводилась в соответствии с алгоритмом, представленным в [10].

Расчет значений коэффициента поглощения ЭМИ образцов (A) выполнялся на основе формулы

$$A = 1 - 10^{\frac{S_{11}}{10}} - 10^{\frac{S_{21}}{10}}, \text{ отн. ед.}$$

Значения удельной электропроводности порошкообразных углей, использованных для изготовления экспериментальных образцов, оценивались согласно методике, представленной в [5]. При этом был использован измеритель иммитанса E7-20 (ОАО «МНИПИ», г. Минск, Республика Беларусь).

Результаты и их обсуждение. На рис. 1 представлены частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 2,0–17,0 ГГц образцов № 1, 3, 5 и 7.

Видно, что величина указанного параметра, характерного для образцов, изготовленных на основе порошкообразного активированного березового угля, изменяется в пределах от –1,0 до –10,0 дБ, а для образцов, изготовленных на основе порошкообразного активированного березового угля, пропитанного водным раствором хлорида кальция, магния или натрия, – в пределах от –2,0 до –12,0 дБ, от –3,5 до –10,0 дБ или от –5,0 до –13,0 дБ соответственно. Величины рассматриваемого параметра, характерные для образцов на основе порошкообразного активированного березового угля, пропитанного водным раствором хлорида кальция, магния или натрия, в диапазоне частот 2,0–12,0 ГГц ниже в среднем на 2,0 дБ, чем для образцов на основе непропитанного порошкообразного активированного березового угля. В диапазоне частот 12,0–17,0 ГГц величины рассматриваемого параметра, характерные для образцов на основе порошкообразного активированного березового угля, в среднем сопоставимы с величинами рассматриваемого параметра,

характерными для образцов на основе угля, пропитанного водным раствором хлорида кальция, и ниже в среднем на 4,0 дБ или 2,0 дБ, чем для образцов на основе угля, пропитанного водным раствором хлорида магния или натрия соответственно.

Более низкие значения коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 2,0–12,0 ГГц образцов на основе порошкообразного активированного березового угля, пропитанного до насыщения водным раствором хлорида кальция, магния или натрия, по сравнению с образцами на основе порошкообразного активированного березового угля без пропитки могут быть обусловлены тем, что частицы угля, входящие в состав пропитанных образцов, обеспечивают в большей степени рассеяние взаимодействующих с ними электромагнитных волн, чем частицы угля, входящие в состав образцов без пропитки, ввиду того, что содержат влагу [11–13].

Значения коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 12,0–17,0 ГГц на основе порошкообразного активированного березового угля, пропитанного до насыщения водным раствором хлорида магния или натрия, выше, чем образцов на основе порошкообразного активированного березового угля, пропитанного до насыщения водным раствором хлорида кальция, и образцов на основе непропитанного порошкообразного активированного березового угля в связи со следующими особенностями:

1) размер частиц порошкообразного березового угля сопоставим с длинами волн в диапазоне частот 12,0–17,0 ГГц, в связи с чем эти волны в большей степени отражаются частицами угля, чем рассеиваются;

2) как установлено по результатам оценки, выполненной в соответствии с представленной в [5] методикой, удельная электропроводность порошкообразного активированного березового угля, пропитанного до насыщения водным раствором хлорида кальция, составляет 7,5 См/м, порошкообразного активированного березового угля, пропитанного до насыщения водным раствором хлорида магния, – 9,0 См/м, а порошкообразного активированного березового угля, пропитанного до насыщения водным раствором хлорида натрия, – 10,0 См/м, что выше, чем удельная электропроводность порошкообразного активированного березового угля без пропитки, которая составляет 0,5 См/м;

3) уровень потерь энергии ЭМИ в электропроводящем материале, обусловленных явлением отражения этого излучения от поверхности материала, описывается выражением $39,5 + 10 \lg \frac{\sigma}{2\pi f \mu}$ [14], где σ – значение удельной электропроводности материала, f – частота ЭМИ, μ – значение относительной магнитной проницаемости материала. То есть чем выше значение удельной электропроводности материала, тем выше его значение коэффициента отражения ЭМИ.

На рис. 2 представлены частотные зависимости коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне 2,0–17,0 ГГц образцов № 1, 3, 5 и 7.

Исходя из данных рисунка можно сделать заключение, что величина указанного параметра, характерного для образцов на основе порошкообразного активированного березового угля, изменяется в пределах от –0,5 до –6,0 дБ, что в среднем больше:

на 1,0 дБ, чем для образцов на основе порошкообразного активированного березового угля, пропитанного водным раствором хлорида кальция;

на 4,0 дБ, чем для образцов на основе порошкообразного активированного березового угля, пропитанного водным раствором хлорида магния;

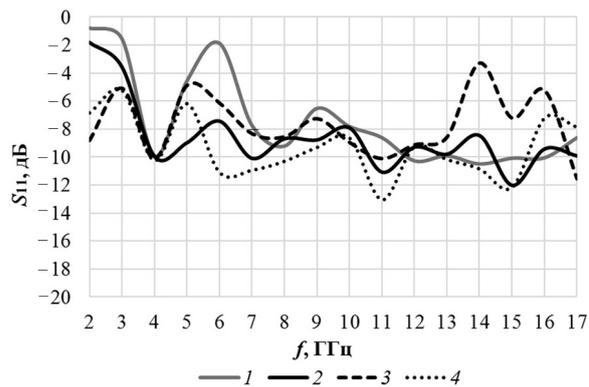


Рис. 1. Частотные зависимости коэффициента отражения электромагнитного излучения в диапазоне 2,0–17,0 ГГц образцов № 1, 3, 5 и 7 (графики 1, 2, 3 и 4 соответственно)
Fig. 1. Frequency dependences of the electromagnetic radiation reflection coefficient in the range of 2.0–17.0 GHz of samples No. 1, 3, 5 and 7 (graphs 1, 2, 3 and 4, respectively)

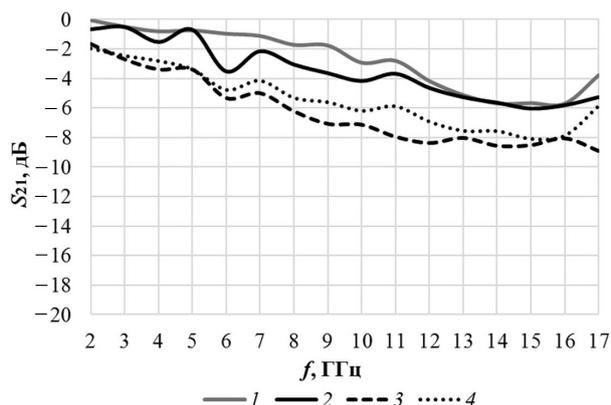


Рис. 2. Частотные зависимости коэффициента передачи электромагнитного излучения в диапазоне 2,0–17,0 ГГц образцов № 1, 3, 5 и 7 (графики 1, 2, 3 и 4 соответственно)

Fig. 2. Frequency dependencies of the electromagnetic radiation transmission coefficient in the range of 2.0–17.0 GHz of samples No. 1, 3, 5 and 7 (graphs 1, 2, 3 and 4, respectively)

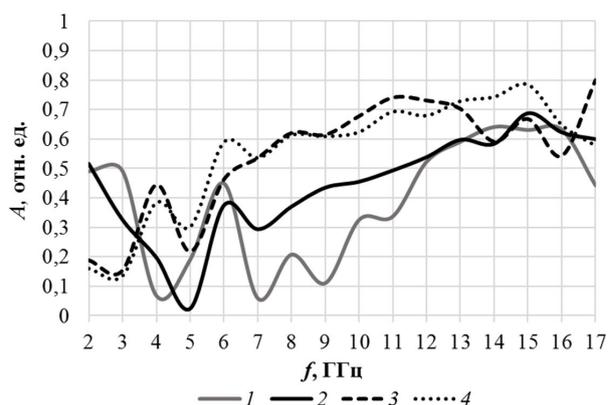


Рис. 3. Частотные зависимости коэффициента поглощения электромагнитного излучения в диапазоне 2,0–17,0 ГГц образцов № 1, 3, 5 и 7 (графики 1, 2, 3 и 4 соответственно)

Fig. 3. Frequency dependencies of the electromagnetic radiation absorption coefficient in the range of 2.0–17.0 GHz of samples No. 1, 3, 5 and 7 (graphs 1, 2, 3 and 4, respectively)

на 2,0 дБ, чем для образцов на основе порошкообразного активированного березового угля, пропитанного водным раствором хлорида натрия.

Обозначенные различия между значениями коэффициента передачи ЭМИ образцов на основе порошкообразного активированного березового угля без пропитки и пропитанного до насыщения водными растворами хлоридов обусловлены тем, что значение удельной электропроводности порошкообразного активированного березового угля, использованного для изготовления первых из указанных образцов, ниже, чем значения удельной электропроводности порошкообразных активированных березовых углей, использованных для изготовления вторых из указанных образцов.

Частотные зависимости коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне 2,0–17,0 ГГц образцов № 1, 3, 5 и 7 показаны на рис. 3.

Как видно на рис. 3, образцы № 5 и 7 характеризуются более высокими значениями коэффициента поглощения ЭМИ, чем образцы № 1 и 3, что обусловлено следующими особенностями:

во-первых, как уже было отмечено, значения удельной электропроводности порошкообразных активированных березовых углей, пропитанных до насыщения водными растворами хлоридов магния и натрия (то есть углей, использованных для изготовления образцов № 5 и 7 соответственно), превышают значения удельной электропроводности порошкообразного активированного березового угля без пропитки и порошкообразного активированного березового угля, пропитанного до насыщения водным раствором хлорида кальция (то есть углей, использованных для изготовления образцов № 1 и 3 соответственно);

во-вторых, уровень потерь энергии ЭМИ в электропроводящем материале, обусловленных явлением поглощения этого излучения материалом, описывается выражением $8,7 \cdot d \cdot \sqrt{f \cdot \pi \cdot \sigma \cdot \mu}$ [14], где d – толщина материала. То есть чем выше значение удельной электропроводности материала, тем выше значение его коэффициента поглощения ЭМИ.

Образцы № 5 и 7 по сравнению с образцами № 1 и 3 являются радиопоглощающими материалами [15]. Их эффективная полоса поглощения ЭМИ – от 6,0 до 17,0 ГГц. Значение ширины их эффективной полосы поглощения в абсолютных единицах составляет 9,0 ГГц, значение ширины их эффективной полосы поглощения в относительных единицах – 67,0 %. Исходя из этого можно заключить, что образцы № 5 и 7 являются широкополосными радиопоглощающими материалами.

На рис. 4 представлены частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 2,0–17,0 ГГц образцов № 2, 4, 6 и 8.

Видно, что значения коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 2,0–17,0 ГГц образцов, изготовленных на основе непропитанного порошкообразного активированного березового угля и содержащих фольгированную полимерную пленку, изменяются в пределах от $-0,5$ до $-9,0$ дБ; образцов на основе порошкообразного активированного березового угля, пропитанного до насыщения водным раствором хлорида кальция, и содержащих фольгированную полимерную пленку, – от $-0,5$ до $-13,0$ дБ; образцов на основе порошкообразного активированного березового угля, пропитанного до насыщения водным раствором хлорида магния, и содержащих фольгированную полимерную пленку, – от $-4,0$ до $-16,0$ дБ; образцов на основе порошкообразного активированного березового угля, пропитанного до насыщения водным раствором хлорида натрия, и содержащих фольгированную полимерную пленку, – от $-2,0$ до $-12,0$ дБ.

В свою очередь значения коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне частот 2,0–6,0 ГГц образцов, изготовленных на основе порошкообразного активированного березового угля, пропитанного до насыщения водным раствором хлорида магния или натрия, и содержащих фольгированную полимерную пленку, ниже соответственно в среднем на 4,0 дБ или 3,0 дБ, чем значения коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне частот 2,0–6,0 ГГц образцов на основе порошкообразного активированного березового угля, пропитанного до насыщения водным раствором хлорида кальция, и содержащих фольгированную полимерную пленку. Значения коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне частот 6,0–17,0 ГГц образцов, изготовленных на основе порошкообразного активированного березового угля, пропитанного до насыщения водным раствором хлорида кальция, и содержащих фольгированную полимерную пленку, ниже в среднем на 4,0 дБ, чем значения коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне частот 6,0–17,0 ГГц образцов на основе порошкообразного активированного березового угля, пропитанного до насыщения водным раствором хлорида магния или натрия, и содержащих фольгированную полимерную пленку.

Обозначенные особенности обусловлены тем, что в диапазоне частот 2,0–6,0 ГГц разность фаз электромагнитных волн, отражаемых от поверхности наружного слоя образцов, изготовленных на основе порошкообразного активированного березового угля, пропитанного до насыщения водным раствором хлорида магния или натрия, и электромагнитных волн, отражаемых от поверхности внутреннего слоя этих образцов (то есть от поверхности фольгированной полимерной пленки), превышает разность фаз электромагнитных волн, отражаемых от поверхности наружного слоя образцов, изготовленных на основе порошкообразного активированного березового угля, пропитанного до насыщения водным раствором хлорида кальция, и электромагнитных волн, отражаемых от поверхности внутреннего слоя этих образцов. В диапазоне же частот 6,0–17,0 ГГц наблюдается обратное соотношение между указанными разностями фаз [16, 17].

Как видно из рис. 4, наибольшая разность фаз электромагнитных волн, отражаемых от поверхности наружного слоя образцов, изготовленных на основе порошкообразного активированного березового угля, пропитанного до насыщения водным раствором хлорида магния или натрия, и электромагнитных волн, отражаемых от поверхности внутреннего слоя этих образцов, наблюдается на частоте 4,0 ГГц. При этом наибольшая разность фаз электромагнитных волн, отражаемых от поверхности наружного слоя образцов, изготовленных на основе порошкообразного активированного березового угля, пропитанного до насыщения водным раствором хлорида кальция, и электромагнитных волн, отражаемых от поверхности внутреннего слоя этих образцов, отмечается на частоте 15,0 ГГц.

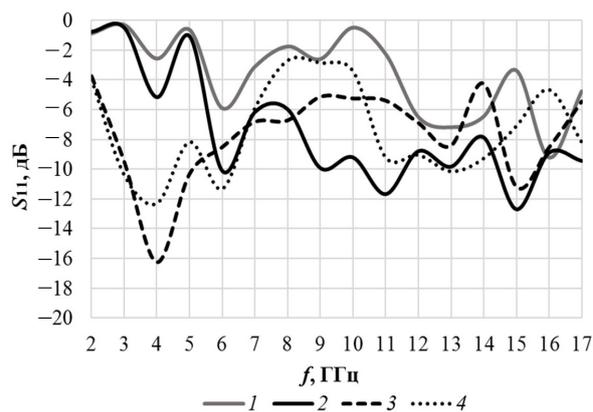


Рис. 4. Частотные зависимости коэффициента отражения электромагнитного излучения в диапазоне 2,0–17,0 ГГц образцов № 2, 4, 6 и 8 (графики 1, 2, 3 и 4 соответственно)

Fig. 4. Frequency dependencies of the electromagnetic radiation reflection coefficient in the range of 2.0–17.0 GHz of samples No. 2, 4, 6 and 8 (graphs 1, 2, 3 and 4, respectively)

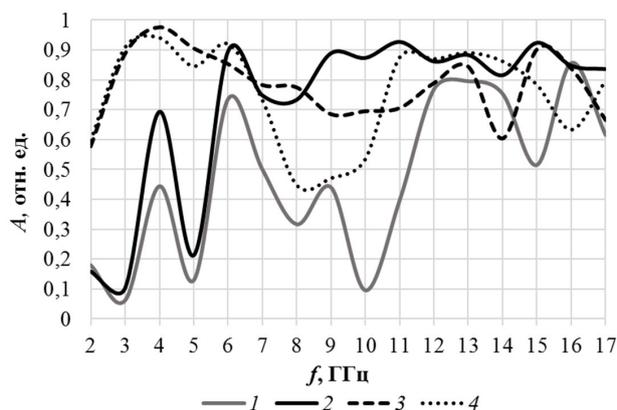


Рис. 5. Частотные зависимости коэффициента поглощения электромагнитного излучения в диапазоне 2,0–17,0 ГГц образцов № 2, 4, 6 и 8 (графики 1, 2, 3 и 4 соответственно)

Fig. 5. Frequency dependencies of the electromagnetic radiation absorption coefficient in the range of 2.0–17.0 GHz of samples No. 2, 4, 6 and 8 (graphs 1, 2, 3 and 4, respectively)

березового угля, пропитанного до насыщения водным раствором хлорида магния, и содержащие фольгированную полимерную пленку. Это обусловлено большим значением удельной электропроводности данного порошкообразного материала по сравнению с удельной электропроводностью порошкообразных активированных березовых углей, пропитанных до насыщения водным раствором хлорида кальция или натрия.

Т а б л и ц а 2. Характеристики образцов № 2, 4, 6 и 8

Table 2. Characteristics of samples No. 2, 4, 6 and 8

Условное обозначение образца	Эффективная(-ые) полоса(-ы) поглощения ЭМИ	Ширина эффективной(-ых) полосы (полос) поглощения ЭМИ, ГГц	Ширина эффективной(-ых) полосы (полос) поглощения ЭМИ, %	Диапазон(-ы) значений коэффициента поглощения ЭМИ
Образец № 2	5,5–7,0 ГГц 11,5–17,0 ГГц	1,5 5,5	24,0 39,0	0,5–0,75 0,5–0,8
Образец № 4	3,5–4,5 ГГц 5,5–17,0 ГГц	1,0 11,5	25,0 98,0	0,5–0,7 0,5–0,9
Образец № 6	2,0–17,0 ГГц	15,0	158,0	0,6–0,98
Образец № 8	2,0–7,5 ГГц 10,0–17,0 ГГц	5,5 7,0	116,0 50,0	0,5–0,95 0,5–0,9

Заключение. На основе полученных результатов исследования была усовершенствована технология изготовления гибких поглотителей ЭМИ на основе порошкообразных древесных углей, представленная в [5]. В частности, был включен этап, связанный с выбором типа раствора хлорида, которым нужно пропитать порошкообразный активированный березовый уголь для того, чтобы получить на основе последнего материал, характеризующийся требуемой эффективной полосой поглощения ЭМИ. Описание указанного этапа включает в себя данные, представленные в табл. 2.

Усовершенствованная технология изготовления гибких поглотителей ЭМИ на основе порошкообразных древесных углей может быть использована для решения практических задач, связанных с улучшением условий эксплуатации приборов электронной техники: например, для создания или совершенствования экранированных помещений и выделения в помещениях экранированных зон.

Установлено, что значения коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне частот 2,0–17,0 ГГц образцов № 2, 4, 6 и 8 несущественно зависят от состава последних и изменяются в пределах от –25,0 до –40,0 дБ. Частотные зависимости коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне 2,0–17,0 ГГц перечисленных образцов представлены на рис. 5.

Из рис. 5 следует, что образцы № 2, 4, 6 и 8 являются радиопоглощающими материалами. В табл. 2 представлены характеристики таких образцов.

Исходя из данных табл. 2 можно сделать заключение, что исследованные образцы, содержащие фольгированную полимерную пленку, являются по сути широкополосными радиопоглощающими материалами. Наибольшей шириной полосы поглощения и наибольшими значениями коэффициента поглощения ЭМИ характеризуются образцы, изготовленные на основе порошкообразного активированного

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Activated carbon and palm oil fuel ash as microwave absorbers for microwave-assisted pyrolysis of oil palm shell waste / S. Chuayjumnong [et al.] // *RSC Adv.* – 2020. – Iss. 53. – P. 32058–32068. <https://doi.org/10.1039/D0RA04966B>
2. Activated carbon derived from mango leaves as an enhanced microwave absorbing material / P. Negi [et al.] // *Sustain. Mater. Technol.* – 2021. – Vol. 27. – Art. ID e00244. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2020.e00244>
3. Boiprav, O. V. Flexible microwave absorbers based on powdered activated coconut charcoal and moisture-containing ceramsite / O. V. Boiprav, S. E. Savanovich, E. S. Belousova // *Mater. Phys. Mech.* – 2022. – Vol. 50, № 3. – P. 420–430. https://doi.org/10.18149/MPM.5032022_6
4. Pattanayak, S. S. Design from waste: an eco-efficient microwave absorber using dried banana leaves and charcoal based composite / S. S. Pattanayak, S. H. Laskar, S. Sahoo // *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.* – 2022. – Vol. 33. – P. 13398–13407. <https://doi.org/10.1007/s10854-022-08276-9>
5. Бойправ, О. В. Перспективные слоистые гибкие радиопоглощающие материалы на основе порошкообразного угля / О. В. Бойправ, В. А. Богуш // *Перспектив. материалы.* – 2023. – № 8. – С. 15–26.
6. Ayad, H. Electromagnetic Shields Based on Powdered Coal-Containing Materials / H. Ayad, O. Boiprav, L. Lynkou. – Minsk: Bestprint, 2020. – 122 p.
7. Transport properties of alkali/alkaline earth cations in ionic-liquid based electrolytes / H. P. Khanh Ngo [et al.] // *J. Ionic Liq.* – 2022. – Vol. 2, Iss. 2. – Art. ID 100044. <https://doi.org/10.1016/j.jil.2022.100044>
8. Pinho, S. P. Solubility of NaCl, NaBr, and KCl in Water, Methanol, Ethanol, and Their Mixed Solvents / S. P. Pinho, E. A. Macedo // *J. Chem. Eng. Data.* – 2005. – Vol. 50, № 1. – P. 29–32. <https://doi.org/10.1021/jc049922y>
9. Anomalous microwave reflection from a metal surface induced by spoof surface plasmon / W. Liang [et al.] // *Chinese Phys. B.* – 2012. – Vol. 21, № 1. – Art. ID 017301. <https://doi.org/10.1088/1674-1056/21/1/017301>
10. Charcoal- and Foil-Containing Materials for Radio Electronic Control Systems Protection from Electromagnetic Interferences / O. Boiprav [et al.] // 2022 IEEE 21st International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA), 19–21 Dec. 2022, Sousse, Tunisia. – P. 299–304. <https://doi.org/10.1109/STA56120.2022.10019059>
11. Coherent Scattering of Microwaves by Particles: Evidence from Clouds and Smoke / J. S. Erkelens [et al.] // *J. Atmos. Sci.* – 2001. – Vol. 58, iss. 9. – P. 1091–1102. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2001\)058<1091:CSOMBP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2001)058<1091:CSOMBP>2.0.CO;2)
12. Microwave scattering properties of sand particles: Application to the simulation of microwave radiances over sandstorms / G. Hong [et al.] // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* – 2008. – Vol. 109, № 4. – P. 684–702. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2007.08.018>
13. Sterlyadkin, V. V. Some Aspects of the Scattering of Light and Microwaves on Non-Spherical Raindrops / V. V. Sterlyadkin // *Atmosphere.* – 2020. – Vol. 11, iss. 5. – Art. ID 531. <https://doi.org/10.3390/atmos11050531>
14. Shukla, V. Review of electromagnetic interference shielding materials fabricated by iron ingredients / V. Shukla // *Nanoscale Adv.* – 2019. – Iss. 5. – P. 1640–1671. <https://doi.org/10.1039/C9NA00108E>
15. Quantitative Interpretation of Electromagnetic Interference Shielding Efficiency: Is It Really a Wave Absorber or a Reflector? / U. Hwang [et al.] // *ACS Omega.* – 2022. – Vol. 7, № 5. – P. 4135–4139. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c05657>
16. Gaoui, B. Enhancement of the shielding effectiveness of multilayer materials by gradient thickness in the stacked layers / B. Gaoui, A. Hadjadj, M. Kious // *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.* – 2017. – Vol. 28. – P. 11292–11299. <https://doi.org/10.1007/s10854-017-6920-8>
17. Effect of double-layer composite absorbing coating on shielding effectiveness of electromagnetic shielding fabric / J. Duan [et al.] // *Mater. Res. Express.* – 2019. – Vol. 6, № 8. – Art. ID 086109. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab1d2d>

References

1. Chuayjumnong S., Karrila S., Jumratb S., Pianroj Y. Activated carbon and palm oil fuel ash as microwave absorbers for microwave-assisted pyrolysis of oil palm shell waste. *RSC Advances*, 2020, iss. 53, pp. 32058–32068. <https://doi.org/10.1039/D0RA04966B>
2. Negi P., Kumar Chhantyal A. K., Dixit A. K., Kumar S., Kumar A. Activated carbon derived from mango leaves as an enhanced microwave absorbing material. *Sustainable Materials and Technologies*, 2021, vol. 27, art. ID e00244. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2020.e00244>
3. Boiprav O. V., Savanovich S. E., Belousova E. S. Flexible microwave absorbers based on powdered activated coconut charcoal and moisture-containing ceramsite. *Materials Physics and Mechanics*, 2022, vol. 50, no. 3, pp. 420–430. https://doi.org/10.18149/MPM.5032022_6
4. Pattanayak S. S., Laskar S. H., Sahoo S. Design from waste: an eco-efficient microwave absorber using dried banana leaves and charcoal based composite. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2022, vol. 33, pp. 13398–13407. <https://doi.org/10.1007/s10854-022-08276-9>
5. Boiprav O. V., Bogush V. A. Advanced layered flexible radio-absorbing materials based on powdered charcoal. *Perspektivnye materialy*, 2023, no. 8, pp. 15–26 (in Russian).
6. Ayad H., Boiprav O. V., Lynkov L. M. *Electromagnetic Shields Based on Powdered Coal-Containing Materials*. Minsk, Bestprint Publ., 2020. 122 p.
7. Khanh Ngo H. P., Planes E., Iojoiu C., Soudant P., Rollet A.-L., Judeinstein P. Transport properties of alkali/alkaline earth cations in ionic-liquid based electrolytes. *Journal of Ionic Liquids*, 2022, vol. 2, no. 2, art. ID 100044. <https://doi.org/10.1016/j.jil.2022.100044>

8. Pinho S. P., Macedo E. A. Solubility of NaCl, NaBr, and KCl in Water, Methanol, Ethanol, and Their Mixed Solvents. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 2005, vol. 50, no. 1, pp. 29–32. <https://doi.org/10.1021/je049922y>
9. Liang W., Jin-Xiang C., You L., Lei L., Yin-Chang D., Jia W. Anomalous microwave reflection from a metal surface induced by spoof surface plasmon. *Chinese Physics B*, 2012, vol. 21, no. 1, art. ID 017301. <https://doi.org/10.1088/1674-1056/21/1/017301>
10. Boiprav O., Ayad H., Abdaljlil S. A., Lynkou L., Abdulmawlay M. Charcoal- and Foil-Containing Materials for Radio Electronic Control Systems Protection from Electromagnetic Interferences. *2022 IEEE 21st International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA)*, December 2022, pp. 299–304. <https://doi.org/10.1109/STA56120.2022.10019059>
11. Erkelens J. S., Venema V. K. C., Russchenberg H. W. J., Ligthart L. P. Coherent Scattering of Microwaves by Particles: Evidence from Clouds and Smoke. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2001, vol. 58, iss. 9, pp. 1091–1102. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2001\)058<1091:CSOMBP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2001)058<1091:CSOMBP>2.0.CO;2)
12. Hong G., Yang P., Weng F., Liu Q. Microwave scattering properties of sand particles: Application to the simulation of microwave radiances over sandstorms. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2008, vol. 109, no. 4, pp. 684–702. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2007.08.018>
13. Sterlyadkin V. V. Some Aspects of the Scattering of Light and Microwaves on Non-Spherical Raindrops. *Atmosphere*, 2020, vol. 11, iss. 5, art. ID 531. <https://doi.org/10.3390/atmos11050531>
14. Shukla V. Review of electromagnetic interference shielding materials fabricated by iron ingredients. *Nanoscale Advances*, 2019, iss. 5, pp. 1640–1671. <https://doi.org/10.1039/C9NA00108E>
15. Hwang U., Kim J., Seol M., Lee B. Park I.-K., Suhr J., Nam J.-D. Quantitative Interpretation of Electromagnetic Interference Shielding Efficiency: Is It Really a Wave Absorber or a Reflector? *ACS Omega*, 2022, vol. 7, no. 5, pp. 4135–4139. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c05657>
16. Gaoui B., Hadjadj A., Kious M. Enhancement of the shielding effectiveness of multilayer materials by gradient thickness in the stacked layers. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2017, vol. 28, pp. 11292–11299. <https://doi.org/10.1007/s10854-017-6920-8>
17. Duan J., Wang X., Li Y., Liu Z. Effect of double-layer composite absorbing coating on shielding effectiveness of electromagnetic shielding fabric. *Materials Research Express*, 2019, vol. 6, no. 8, art. ID 086109. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab1d2d>