

Поглотители электромагнитного излучения СВЧ-диапазона на основе никельсодержащего порошкообразного активированного древесного угля

О. В. Бойправ, В. А. Богущ, В. С. Мокеров, Е. С. Белоусова

Представлены и обоснованы закономерности изменения характеристик поглощения электромагнитного излучения в диапазоне частот 2,0 – 17,0 ГГц материалов на основе никельсодержащего порошкообразного активированного древесного угля в зависимости от технологии его получения. Материалы изготовлены путем заполнения частицами угля емкостей, сформированных из полимерной самоклеящейся пленки. Толщина материалов составляла 0,3 см, значения коэффициента поглощения электромагнитного излучения в диапазоне частот 2,0 – 17,0 ГГц достигают величины 0,9. Ширина эффективной полосы поглощения электромагнитного излучения материалов на основе никельсодержащего порошкообразного активированного древесного угля, полученного в процессе осаждения наночастиц в течение 5,0 мин, равна 10,0 ГГц, а при длительности осаждения 10,0 мин и 15,0 мин, — 10,6 ГГц и 10,8 ГГц соответственно. При этом среднее значение коэффициента поглощения электромагнитного излучения в эффективной полосе поглощения полученных материалов составило 0,75, 0,77 и 0,82 отн. ед. соответственно. Ширина эффективной полосы поглощения электромагнитного излучения материалов равна 6,7 ГГц, а их среднее значение коэффициента поглощения электромагнитного излучения в указанной полосе — 0,74 отн. ед. Полученные материалы могут быть использованы для обеспечения электромагнитной совместимости приборов электронной техники и СВЧ-устройств.

Ключевые слова: коэффициент поглощения, порошкообразный активированный древесный уголь, химическое осаждение наночастиц никеля, электромагнитное излучение.

DOI: 10.30791/1028-978X-2024-7-34-41

Введение

Для изготовления поглотителей электромагнитного излучения (ЭМИ) СВЧ-диапазона широко используют пористые углеродные материалы [1 – 10], что обусловлено тремя причинами:

1. Состав пористых углеродных материалов может быть модифицирован введением в них частиц электропроводящих или магнитных материалов, что может увеличить коэффициент поглощения ЭМИ и расширить эффективную полосу поглощения [11 – 16].

2. Наличие микро- и макрополостей в пористых углеродных материалах создает условия для лучшего согласования волнового сопротивления поглотителей ЭМИ с волновым сопротивлением

воздуха, что обуславливает более высокие значения коэффициента поглощения ЭМИ [11, 16].

3. Такие поглотители характеризуются более низкой плотностью по сравнению с поглотителями на основе непористых материалов [1, 6, 7, 11].

Доля научных публикаций, посвященных поглотителям ЭМИ на основе пористых углеродных материалов, увеличивается с каждым годом и за прошедшие пять лет доля таких публикаций от общего количества публикаций по поглотителям ЭМИ, увеличилась с 26,0 до 44,0 %, а доля научных публикаций, посвященных поглотителям ЭМИ на основе пористых углеродных материалов, от количества публикаций, посвященных поглотителям ЭМИ на основе углеродных материалов — с 51,0 до 69,0 %.

В [17] экспериментально показана перспективность использования порошкообразных древесного и кокосового углей в качестве пористых углеродных материалов для изготовления поглотителей ЭМИ СВЧ-диапазона, характеризующихся низкими плотностью и стоимостью. В работе [18] для изменения значений коэффициентов отражения и передачи ЭМИ в СВЧ-диапазоне порошкообразных углей предложено модифицировать состав последних путем пропитывания водными растворами хлорида кальция и приведена технология изготовления гибких поглотителей ЭМИ. В [19] предложен метод к модификации состава порошкообразного активированного древесного угля осаждением наночастиц никеля из водных растворов. В результате формируется металл-углеродный наноккомпозит в виде никельсодержащего порошкообразного активированного древесного угля. Представлены закономерности изменения характеристик отражения ЭМИ в X-диапазоне частот в зависимости от состава водного раствора. Характеристики отражения и поглощения ЭМИ в СВЧ-диапазоне других никельсодержащих пористых углеродных материалов представлены в работах [16, 20 – 25].

Для дальнейшего развития этого направления необходимо решить ряд задач, в частности обосновать состав водного раствора для осаждения наночастиц никеля, исследовать характеристики поглощения ЭМИ разработанных материалов и ряд других.

Цель данной работы — установление и обоснование закономерностей изменения характеристик поглощения электромагнитного излучения в диапазоне частот 2,0 – 17,0 ГГц материалов на основе никельсодержащего порошкообразного активированного древесного угля (далее — никельсодержащего угля) в зависимости от технологии процесса осаждения наночастиц никеля из водных растворов.

Материалы поглотителей электромагнитного излучения и методы исследований

Для осаждения наночастиц никеля был выбран водный щелочной раствор состава: хлорид никеля (кристаллогидрат) — 30,0 г/л, лимоннокислый натрий — 10,0 г/л [26]. В качестве восстановителя использован гипофосфит натрия (10,0 г/л). Выбор водного раствора основан на результатах работы [19], в которой на никельсодержащий уголь, полученный с использованием водного раствора указанного состава, характеризуется меньшими значениями коэффициента отражения ЭМИ

в X-диапазоне частот, по сравнению с никельсодержащим углем, полученным с использованием водного кислотного раствора, в состав которого входят сульфат никеля (кристаллогидрат) и хлористый аммоний (при условии закрепления частиц угля на металлических подложках).

Были выбраны три временных режима осаждения наночастиц никеля.

Режим 1 — продолжительность осаждения 5,0 мин. Это соответствует среднему времени снижения температуры 0,2 л водного раствора с 85,0 до 75,0 °С (то есть среднему времени снижения с максимального до минимального значения температуры, при котором идет реакция осаждения), при условии, что в него погружены частицы порошкообразного активированного древесного угля, объем которых составляет ~ 50,0 % от объема указанного раствора. Режим 2 соответствовал продолжительности осаждения 10,0 мин и режим 3 — 15,0 мин.

Процесс изготовления никельсодержащего угля включал несколько этапов. Сначала приготавливали водный щелочной раствор и нагревали его до температуры 85,0°С. Промытый в дистиллированной воде уголь погружали в нагретый водный щелочной раствор при условии, что соотношение объемов раствора и частиц должно быть 2:1. В зависимости от режима осаждения, через 5,0, 10,0 или 15,0 мин частицы никельсодержащего угля извлекали из водного щелочного раствора и помещали в водный раствор поверхностно-активного вещества и выдерживали течение 1,0 мин для стабилизации осажденных наночастиц никеля. Затем угли промывали в дистиллированной воде с последующей сушкой.

В процессе изготовления соблюдали следующие условия: объема одной партии должно хватить для получения одного образца поглотителя ЭМИ определенной группы, в одну группу поглотителей ЭМИ должно входить пять образцов. Длина и ширина одного образца должны быть 30,0 см и 40,0 см, что основано на данных о длине и ширине раскрытия рупора антенны, которая планировалась к использованию для измерения значений коэффициентов отражения и передачи ЭМИ образцов поглотителей. Для получения одного образца поглотителя ЭМИ размером 30,0 × 40,0 см, нужно 100,0 мл никельсодержащего порошкообразного активированного древесного угля.

Экспериментальные образцы поглотителей ЭМИ были изготовлены в соответствии с технологией, приведенной в работе [18]. В ходе изготовления экспериментальных образцов формировали из полимерной самоклеящейся пленки



Рис. 1. Схематическое изображение изготовленных образцов: 1 — емкость, сформированная из полимерной самоклеящейся пленки; 2 — фольгированная полимерная пленка; 3 — частицы угля или никельсодержащего угля.

Fig. 1. Schematic view of manufactured samples: 1 — container formed from a polymer self-adhesive film; 2 — foil polymer film; 3 — particles of coal or nickel-containing coal.

прямоугольные емкости размером 30,0 × 40,0 см. Затем закрепляли фольгированную полимерную пленку на одной из поверхностей наружных стенок сформированных емкостей и заполняли сформированные емкости частицами угля.

Образцы групп 1, 2 и 3 были изготовлены на основе никельсодержащего угля, полученного по режимам 1, 2 и 3 соответственно. Образцы группы 4 были изготовлены на основе угля. Толщина изготовленных образцов составляла 0,3 см. Схематическое изображение изготовленных образцов представлено на рис. 1.

Исследование характеристик поглощения ЭМИ в СВЧ-диапазоне изготовленных образцов поглотителей ЭМИ выполняли в соответствии с методикой и алгоритмом, приведенными в работе [27]. Для этого измеряли значения коэффициентов отражения и передачи ЭМИ (в децибелах) в диапазоне частот 2,0 – 17,0 ГГц с использованием панорамного измерителя коэффициентов отражения и передачи ЭМИ SNA 0,01–18 (БГУИР, Республика Беларусь). Расчет значений коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне частот 2,0 – 17,0 ГГц изготовленных образцов проводили по следующим формулам:

$$R(f) = 10^{\frac{S_{11}(f)}{10}}, \text{ отн. ед.} \quad (1)$$

$$T(f) = 10^{\frac{S_{21}(f)}{10}}, \text{ отн. ед.} \quad (2)$$

$$A(f) = 1 - R(f) - T(f), \text{ отн. ед.} \quad (3)$$

где $R(f)$ — значение коэффициента отражения ЭМИ (частота f из диапазона 2,0 – 17,0 ГГц); $s_{11}(f)$ — значение коэффициента отражения ЭМИ измеренное в децибелах; $T(f)$ — значение коэффициента передачи ЭМИ; $s_{21}(f)$ — значение коэффициента передачи ЭМИ измеренное в децибелах; $A(f)$ — значение коэффициента поглощения ЭМИ.

Оценка значений удельной электропроводности никельсодержащего угля и угля, использованных для изготовления образцов поглотителей ЭМИ была выполнена в соответствии с методикой, приведенной в работе [18]. Измеряли сопротивление изготовленной из непроводящего материала ячейки с электродами, заполненной углем, с использованием измерителя имметанса E7-20 (ОАО “МНИПИ”, Республика Беларусь) и рассчитывали удельную электропроводность угля по следующей формуле:

$$\sigma = \frac{l}{R \cdot S}, \text{ См/м,} \quad (4)$$

где l — расстояние между электродами ячейки, м; S — площадь электродов ячейки, м²; R — измеренное сопротивление ячейки, заполненной углем, Ом.

Было проведено по 5 экспериментов по оценке удельной электропроводности угля с каждой из изготовленных партий. Результаты проведенных экспериментов усредняли с использованием формулы:

$$\sigma_g = \frac{\sum_{k=1}^5 \sum_{n=1}^5 \frac{\sigma_{k,n}}{5}}{5}, \text{ } g = \{1, 2, 3, 4\}, \quad (5)$$

где g — номер группы изготовленных образцов поглотителей ЭМИ; σ_g — усредненное значение удельной электропроводности угля, использованного для изготовления образцов поглотителей ЭМИ g -й группы; k — порядковый номер эксперимента по измерению удельной электропроводности угля n -й партии, использованного для изготовления образцов поглотителей ЭМИ g -й группы; n — порядковый номер партии угля, использованного для изготовления образцов поглотителей ЭМИ g -й группы.

Методом сканирующей электронной микроскопии (растровый электронный микроскоп ZEISS EVO, Германия) были исследованы элементный состав и морфология поверхностей частиц никельсодержащего угля, использованных для изготовления образцов поглотителей ЭМИ.

Результаты и обсуждение

Частотные зависимости коэффициента поглощения ЭМИ изготовленных образцов представлены на рис. 2.

Как следует из рис. 2, значения коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне частот 2,0 – 17,0 ГГц исследованных образцов поглотителей достигают величины 0,9. Эффективная полоса поглощения (ЭПП) образцов поглотителей, изготовленных на основе никельсодержащего угля, полученного

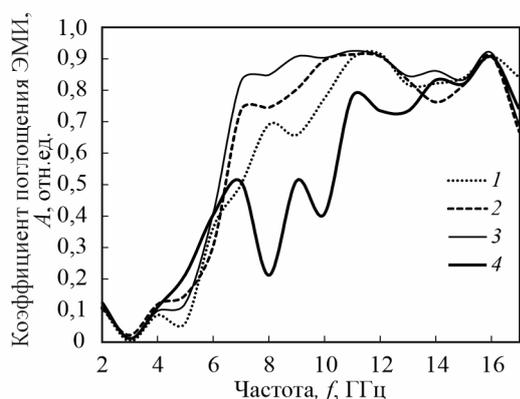


Рис. 2. Частотные зависимости коэффициента поглощения ЭМИ образцов 1, 2, 3 и 4 (кривые 1, 2, 3 и 4 соответственно)

Fig. 2. Frequency dependences of the EMR absorption coefficient of samples 1, 2, 3 and 4 (curves 1, 2, 3 and 4, respectively).

по режиму 1 (образцов 1), — от 7,0 до 17,0 ГГц. ЭПП образцов поглотителей, изготовленных на основе никельсодержащего угля по режимам 2 и 3 (образцов 2 и 3), — от 6,4 до 17,0 ГГц и от 6,2 до 17,0 ГГц соответственно. ЭПП образцов поглотителей, изготовленных на основе угля (образцов 4), — от 10,3 до 17,0 ГГц.

Под ЭПП материала следует понимать полосу частот, в которой значение его коэффициента поглощения более 0,5 [28].

Среднее значение коэффициента поглощения ЭМИ в ЭПП образцов 1, 2 и 3 соответственно равно 0,75, 0,77 и 0,82 отн. ед. Среднее значение коэффициента поглощения ЭМИ в ЭПП образцов 4 составляет 0,74 отн. ед.

Осаждение наночастиц никеля на частицы угля обеспечило увеличение на 4,1 ГГц ширины ЭПП и на 10,0 % среднего значения коэффициента поглощения ЭМИ в ЭПП поглотителей ЭМИ на его основе. Это обусловлено тем, что в результате осаждения наночастиц никеля на частицы порошкообразного активированного древесного угля значение удельной электропроводности последнего увеличивается с 0,5 до 0,6 См/м (если продолжительность осаждения 5,0 мин), а эффективность поглощения энергии ЭМИ материалом возрастает при увеличении удельной электропроводности последнего, что следует из формулы [29]:

$$SE_A = 8,7d \cdot \sqrt{f\pi\sigma\mu}, \quad (2)$$

где SE_A — эффективность поглощения энергии ЭМИ материалом; d — толщина материала; f — частота ЭМИ; σ — удельная электропроводность материала; μ — относительная магнитная проницаемость материала.

Если увеличить продолжительность осаждения наночастиц никеля на частицы угля с 5,0 до 15,0 мин, то можно обеспечить повышение ширины ЭПП на 0,8 ГГц и среднего значения коэффициента поглощения ЭМИ на 10,0 %. Это обусловлено тем, что в результате увеличения продолжительности осаждения с 5,0 до 15,0 мин, растет значение удельная электропроводность частиц с 0,6 до 0,8 См/м.

В табл. 1 представлен элементный состав партий никельсодержащего угля, использованных для изготовления образцов. Установлено, что в составе никельсодержащего угля, полученного при времени осаждения 5,0 мин, содержание никеля составляет 35,0 ат. % от содержания всех метал-

Таблица 1

Результаты исследования элементного состава партий никельсодержащих порошкообразных активированных древесных углей, использованных для изготовления образцов поглотителей ЭМИ

Table 1

Results of a study of the elemental composition of batches of nickel-containing powdered activated charcoal used for production of EMR absorbers samples

Химический элемент	Содержание элементов в образцах, ат. %		
	Образцы 1 (время осаждения 5 мин)	Образцы 2 (время осаждения 10 мин)	Образцы 3 (время осаждения 15 мин)
C	86,97	90,99	92,09
O	10,35	7,93	7,11
Ca	1,42	0,07	0,05
Ni	0,95	0,44	0,51
Na	0,31	0,56	0,23

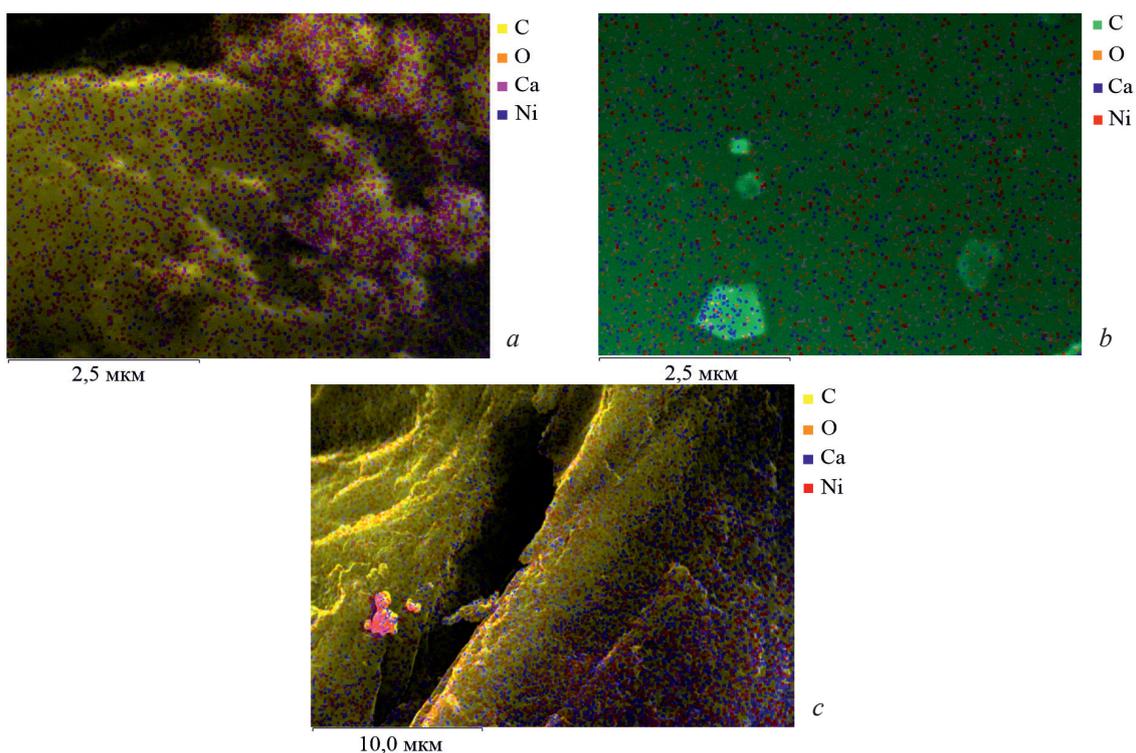


Рис. 3. СЭМ изображения поверхностей частиц из партий никельсодержащих порошкообразных активированных древесных углей, использованных для изготовления образцов 1, 2 и 3 (*a*, *b* и *c* соответственно)

Fig. 3. SEM-images of the surfaces of particles from batches of nickel-containing powdered activated charcoal used for the manufacture of samples 1, 2 and 3 (*a*, *b* and *c*, respectively).

Таблица 2

Параметры характеристик поглощения ЭМИ в СВЧ-диапазоне поглотителей на основе никельсодержащих пористых углеродных материалов

Table 2

Parameters of EMR absorption characteristics in the microwave range of absorbers based on nickel-containing porous carbon materials

Состав поглотителя ЭМИ	Источник	Толщина, см	Эффективная полоса поглощения, ГГц	Ширина эффективной полосы поглощения, ГГц
Разработанные поглотители ЭМИ	Эта работа	0,3	6,2 – 17,0	10,8
Материал на основе никельсодержащего пористого углерода	[14]	0,2	12,8 – 18,0	5,2
Композиционный материал на основе никель-углеродных микротрубок и политетрафторэтилена	[16]	0,3	8,0 – 18,0	10,0
Никель-углеродный нанокompозит	[21]	0,66	2,8 – 4,0	1,2
Никель-углеродный нанокompозит из биогеля	[22]	0,2	10,0 – 13,0 или 12,0 – 15,0	3,0
Композиционный материал на основе никельсодержащих углеродных волокон и стекловолокон	[23]	0,25	9,1 – 12,0	2,9
Материал на основе гетеросфер из никель-углеродных нанотрубок	[24]	0,24	8,0 – 12,1	4,1
Композиционный материал на основе никельсодержащего углерода и полипиррола	[25]	0,2	12,5 – 18,0	5,5

лов, а при 10,0 и 15,0 мин — 41,0 и 65,0 ат. % соответственно. Такое высокое содержание никеля вызывает повышение значения удельной электропроводности никельсодержащего угля, полученного при времени осаждения 15,0 мин по сравнению с другими образцами (осаждение 5,0 или 10,0 мин).

Наличие натрия в составе никельсодержащего угля обусловлено тем, что в состав водных растворов, использованных для получения этого угля, входили натрийсодержащие компоненты (лимоннокислый натрий и гипофосфит натрия).

По результатам исследования морфологии поверхности частиц из партий никельсодержащего угля, использованных для изготовления образцов поглотителей ЭМИ, установлено, что по поверхностям указанных частиц наночастицы никеля распределены сравнительно равномерно и не образуют кластеров (рис. 3).

В табл. 2 представлены параметры характеристик поглощения ЭМИ в СВЧ-диапазоне поглотителей ЭМИ, а также аналогов этих поглотителей. Из табл. 3 следует, что разработанные поглотители ЭМИ характеризуются большей шириной ЭПП, по сравнению с аналогами [14, 16, 21 – 25].

Выводы

Металл-углеродные нанокompозиты, полученные химическим осаждением из водных растворов наночастиц никеля на поверхность и в поры частиц порошкообразного активированного древесного угля, являются перспективными для использования в целях изготовления более широкополосных, по сравнению с аналогами поглотителей ЭМИ.

Показано, что ширина эффективной полосы поглощения ЭМИ образцов, внутри которых распределены частицы никельсодержащего порошкообразного активированного древесного угля, изменяется в зависимости от продолжительности процесса осаждения наночастиц никеля. При времени осаждения 15,0 мин она достигает величины 10,8 ГГц и превышает на 0,8 ГГц ширину эффективной полосы поглощения ЭМИ на основе никельсодержащего порошкообразного активированного древесного угля, полученного в процессе осаждения наночастиц никеля в течение 5,0 мин. Значение коэффициента поглощения ЭМИ таких поглотителей достигает величины 0,9.

Разработанные поглотители входят в число базовых материалов электронной техники и могут быть использованы для защиты приборов электронной техники, чувствительных к воздействию электромагнитных помех СВЧ-диапазона.

Литература/References

1. Qiu X., Wang L., Zhu H., Guana Y., Zhang Q. Lightweight and efficient microwave absorbing materials based on walnut shell-derived nano-porous carbon. *Nanoscale*, 2017, v. 9, no. 22, pp. 7408 – 7418.
2. Ansari A., Akhtar M.J. High porous carbon black based flexible nanocomposite as efficient absorber for X-band applications. *Materials Research Express*, 2018, v. 5, no. 10, art. 105017.
3. Zhang Z., Zhao H., Gu W., Yang L., Zhang B. A Biomass derived porous carbon for broadband and lightweight microwave absorption. *Scientific Reports*, 2019, v. 9, art. 18617.
4. Zhao H., Cheng Y., Liu W., Yang L., Zhang B., Wang L.P., Ji G., Xu Z.J. Biomass-derived porous carbon-based nanostructures for microwave absorption. *Nano-Micro Letters*, 2019, v. 11, no. 1, art. 24.
5. Cheng J.B., Shi H.-G., Cao M., Wang T., Zhao H.-B., Wang Y.-Z. Porous carbon materials for microwave absorption. *Materials Advances*, 2020, no. 8, pp. 2631 – 2645.
6. Guan H., Wang Q., Wu X., Pang J., Jiang Z., Chen G., Dong C., Wang L., Gong C. Biomass derived porous carbon (BPC) and their composites as lightweight and efficient microwave absorption materials. *Composites Part B: Engineering*, 2021, v. 207, art. 108562.
7. Zhang R., Qiao J., Zhang X., Yang Y., Zheng S., Li B., Liu W., Liu J., Zeng Z. Biomass-derived porous carbon for microwave absorption. *Materials Chemistry and Physics*, 2022, v. 289, art. 126437.
8. Chitraningrum N., Marlina R., Arundina R.Y., Togatorop E.R.S., Sulistyarningsih, Arisesa H., Budiman I., Daud P., Hamzah M. Microwave absorption properties of porous activated carbon-based palm oil empty fruit bunch. *AIP Advances*, 2022, v. 12, no. 11, art. 115024.
9. Aiqiong W., Li J., Chen M., Zhao X. A review of graphene-based broad bandwidth microwave absorbing textile-based composites in the low-frequency range. *Journal of Industrial Textiles*, 2022, v. 52, no. 2, pp. 1 – 21. <https://doi.org/10.1177/15280837221133113>.
10. Medeiros L.I., Medeiros N.C.F.L., Lima R.G.A., Amaral-Labat G., Baldan M.R., Lenz e Silva G.F.B., Boss A.F.N. Improved microwave absorption performance with sustainable porous carbon/carbon nanotube composites. *Materials Research*, 2022, v. 25 (suppl. 2), art. e20220169. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2022-0169>.
11. Zhou P., Zhang J., Zhu H., Wang L., Wang X., Song Z., Zhang Q., Yu M., Liu Z., Xu T., Feng W., Feng X. Silica-modified ordered mesoporous carbon for optimized impedance-matching characteristic enabling lightweight and effective microwave absorbers. *ACS Applied Materials Interfaces*, 2020, v. 12, no. 20, pp. 23252 – 23260.
12. Song Y., Yin F., Zhang C., Guo W., Han L., Yuan Y. Threedimensional ordered mesoporous carbon spheres modified with ultrafine zinc oxide nanoparticles for

- enhanced microwave absorption properties. Nano-Microletters, 2021, v. 13, no. 1, art. 76.
13. Wang J., Chen Y., Wei Y., Li Y., Li F., Li B., Wu Q., Zhao J. Enhancement of microwave absorption performance of porous carbon induced by Ce(CO₃)OH. *Frontiers in Chemistry*, 2022, v. 10, art.1100111. <https://doi.org/10.3389/fchem.2022.1100111>.
 14. Shen Z., Zu Y., Chen Y., Gong J., Sun C. Microwave absorption performance of porous carbon particles modified by nickel with different morphologies. *Journal of Materials Science & Technology*, 2023, v. 137, pp. 79 – 90.
 15. Zeng S., Han S., Sun X., Wang L., Gao Y., Chen Z., Feng H. Co₃O₄ Nanoparticle-modified porous carbons with high microwave absorption performances. *Nanomaterials*, 2023, v. 13, no. 6, art. 1073.
 16. Wu L., Wang G., Shi S., Liu X., Liu J., Zhao J., Wang G. Ni-Carbon microtube/polytetrafluoroethylene as flexible electrothermal microwave absorbers. *Advanced Science*, 2023, v. 10, no. 31, art. 2304218. <https://doi.org/10.1002/advs.202304218>.
 17. Ayad H., Boiprav O., Lynkou L. Electromagnetic shields based on powdered coal-containing materials. Minsk, Bestprint, 2020, 122 p.
 18. Бойправ О.В., Богуш В.А. Перспективные слоистые гибкие радиопоглощающие материалы на основе порошкообразного угля. Перспективные материалы. 2023, № 8, с. 15 – 26
 - Boiprav O.V., Bogush V.A. Perspektivnye sloistye gibkie radiopogloshhajushhie materialy na osnove poroshkoobraznogo uglja [Advanced layered flexible radio-absorbing materials based on powdered charcoal]. *Perspektivnye Materialy [Advanced Materials]*, 2023, no. 8, pp. 15 – 26. (In Russ.).
 19. Boiprav O., Ayad H., Lynkou L. Radioshielding properties of nickel-containing activated carbon. *Technical Physics Letters*, 2019, v. 45, pp. 635 – 637.
 20. Yapei Z., Zhangtao S., Gongjun C.Y., Chao S. Preparation method of porous carbon particle microwave absorbent with nano nickel deposited on surface. Patent CN114256630A. Published 29.03.2022.
 21. Sunny V., Kumar D.S., Mohanan P., Anantharaman M.R. Nickel / carbon hybrid nanostructures as microwave absorbers. *Materials Letters*, 2010, v. 64, no. 10, pp. 1130 – 1132.
 22. Xie P., Li H., He B., Dang F., Lin J., Fan R., Hou C., Liu H., Zhang J., Ma Y., Guo Z. Bio-gel derived nickel /carbon nanocomposites with enhanced microwave absorption. *Journal of Materials Chemistry C*, 2018, no. 6, pp. 8812 – 8822.
 23. Chen W., Peng K., Wang J., He X., Su Y., Zhang B., Su X. Enhanced Microwave absorption properties of nickel-coated carbon fiber / glass fiber hybrid epoxy composites – towards an industrial reality. *Materials Research Express*, 2019, v. 6, no. 12, art. 126324.
 24. Liu H., Wang P., Sun Z., Yan Z., Li A., Guo Z., Qian L. Ni/C-Carbon nanotube multidimensional heterospheres for highly efficient microwave absorbers. *ACS Applied Nano Materials*, 2022, v. 5, no. 11, pp. 17335 – 17346.
 25. Wang Q., Wu X., Huang J., Chen S., Zhang Y., Dong C., Chen G., Wang L., Guan H. Enhanced microwave absorption of biomass carbon / nickel / polypyrrole (C/Ni/PPy) ternary composites through the synergistic effects. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, v. 890, art. 161887.
 26. Химическое осаждение металлов из водных растворов. Под ред. В. В. Свиридова. Минск, Университетское, 1987, 270 с.
 - Himicheskoe osazhdenie metallov iz vodnyh rastvorov [Chemical Deposition of Metals from Aqueous Solutions]. Ed. by V. V. Sviridov. Minsk, Universitetskoe Publ., 1987, 270 p. (In Russ.).
 27. 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), (Tunisia, 19–21 December 2021), pp. 299 – 304.
 28. 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, v. 7, no. 5, pp. 4135 – 4139.
 29. Shukla V. Review of electromagnetic interference shielding materials fabricated by iron ingredients. *Nanoscale Advances*, 2019, no. 1, pp. 1640 – 1671.

*Статья поступила в редакцию — 23.10.2023 г.
после доработки — 10.01.2024 г.
принята к публикации — 11.01.2024 г.*

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

Богущ Вадим Анатольевич — Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (220013, Республика Беларусь, Минск, ул. П. Бровки, 6), доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, специалист в области разработки радиопоглощающих материалов. E-mail: bogush@bsuir.by.

Мокеров Вячеслав Сергеевич — Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (220013, Республика Беларусь, Минск, ул. П. Бровки, 6), студент. E-mail: vyacheslav.mokerov@mail.ru.

Белусова Елена Сергеевна — Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (220013, Республика Беларусь, Минск, ул. П. Бровки, 6), кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, специалист в области разработки радиопоглощающих материалов. E-mail: belousova@bsuir.by.

Microwave absorbers based on nickel-containing powdered activated charcoal

O. V. Boiprav, V. A. Bogush, V. S. Mokerov, E. S. Belousova

The patterns of changes in the electromagnetic radiation absorption characteristics in the frequency range 2.0 – 17.0 GHz of materials based on nickel-containing powdered activated charcoal are presented and substantiated depending on the duration of the process of nickel nanoparticles deposition from aqueous solutions implemented during its production. These materials are made by filling containers formed from a self-adhesive polymer film with particles of such coal. A foil-coated polymer film is attached to one of the outer surfaces of the walls of these containers. The thickness of these materials was 0.3 cm. It was established that their electromagnetic radiation absorption coefficient values in the frequency range 2.0 – 17.0 GHz reach of 0.9. The width of the electromagnetic radiation effective absorption band of materials based on nickel-containing powdered activated charcoal, during the production of which the duration of the process of nickel nanoparticles deposition was 5.0 min, is equal to 10.0 GHz, and for materials based on nickel-containing powdered activated charcoal, during the production in which the duration of the process of nickel nanoparticles deposition was 10.0 minutes and 15.0 minutes, 10.6 GHz and 10.8 GHz, respectively. The average value of electromagnetic radiation absorption coefficient in the effective absorption band of the listed materials is 0.75 rel. units, 0.77 rel. units and 0.82 rel. units respectively. It should be noted that the width of the electromagnetic radiation effective absorption band of materials manufactured in the above manner based on powdered activated charcoal is 6.7 GHz, and their average value of electromagnetic radiation absorption coefficient in the specified band is 0.74 rel. units. The studied materials are among the basic materials of electronic technology and can be used to ensure electromagnetic compatibility of electronic devices, as well as microwave devices.

Keywords: absorption coefficient, powdered activated charcoal, chemical deposition of nickel nanoparticles, electromagnetic radiation.

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

Bogush Vadim — Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (220013, Republic of Belarus, Minsk, P. Brovki str., 6), Dr Sci, professor, specialist in the field of radio absorbing materials development. E-mail: bogush@bsuir.by.

Mokerov Vyacheslav — Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (220013, Republic of Belarus, Minsk, P. Brovki str., 6), student. E-mail: vyacheslav.mokerov@mail.ru.

Belousova Elena — Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (220013, Republic of Belarus, Minsk, P. Brovki str., 6), PhD, associate professor, senior researcher, specialist in the field of radio absorbing materials development.