

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-1-17-27>
УДК 537.87



Оригинальная статья

**О. В. Бойправ^{*}, Е. С. Белоусова, Н. В. Богуш, С. Э. Саванович, М. М. Касперович,
А. В. Гусинский, И. А. Захаров**

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

УГЛЕСОДЕРЖАЩИЕ ПОГЛОТИТЕЛИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СВЧ-ДИАПАЗОНА С РЕЛЬЕФНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Аннотация. Представлена новая технология изготовления поглотителей электромагнитного излучения (ЭМИ) СВЧ-диапазона, характеризующихся геометрически неоднородной поверхностью. Новизна представленной технологии заключается в использовании радиопрозрачных полимерных форм с полусферическими углублениями одинакового объема, которые являются компонентом для формирования поверхностного слоя поглотителей. Технология состоит в заполнении указанных форм находящейся в жидкой фазе смесью порошкообразного активированного древесного (березового) угля и связующего вещества и дальнейшем ее высушивании в формах. По сравнению с аналогами разработанная технология характеризуется невысокой сложностью воспроизведения. Большая часть временных затрат, необходимых для реализации представленной технологии, связана с процессом высыхания смеси порошкообразного активированного березового угля и связующего вещества. Приведены установленные экспериментальным путем закономерности изменения значений коэффициентов отражения и поглощения электромагнитного излучения в диапазоне частот 1,0–28,0 ГГц поглотителей, изготовленных в соответствии с представленной технологией, в зависимости от типа содержащегося в них связующего вещества (водный раствор поливинилацетата, водный раствор гипса, полиуретановая мастика). Определено, что наиболее эффективными из исследованных в ходе установления обозначенных закономерностей поглотителей ЭМИ являются те, которые содержат водный раствор поливинилацетата. Значения коэффициента поглощения электромагнитного излучения в диапазоне частот 1,0–28,0 ГГц таких поглотителей изменяются в пределах от 0,75 до 0,99. Кроме того, масса на единицу площади таких поглотителей ниже в 1,5–2,0 раза массы на единицу площади поглотителей, содержащих водный раствор гипса или полиуретановую мастику. Изготовленные по представленной технологии поглотители ЭМИ СВЧ-диапазона характеризуются более высокой механической прочностью, а также более низкой стоимостью в сравнении с аналогами и рекомендованы для использования при создании безэховых камер.

Ключевые слова: коэффициент отражения, коэффициент поглощения, порошкообразный активированный древесный уголь, электромагнитное излучение

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 Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. <https://orcid.org/0000-0001-9834-6074>. E-mail: belousova@bsuir.by; *Богуш Наталья Валерьевна* – научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Материалы, технологии и средства обеспечения безопасности» научно-исследовательской части Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. <https://orcid.org/0000-0002-7832-8597>. E-mail: nbogush@bsuir.by; *Саванович Светлана Эдуардовна* – ассистент кафедры защиты информации Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. <https://orcid.org/0000-0001-7977-8031>. E-mail: svetasav@bsuir.by; *Касперович Марина Михайловна* – научный сотрудник научно-производственно-образовательного инновационного центра СВЧ-технологий и их метрологического обеспечения научно-исследовательской части Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. E-mail: kaspriarovich@bsuir.by; *Гусинский Александр Владимирович* – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой информационно-измерительных систем Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. E-mail: a.gusinskij@bsuir.by; *Захаров Иван Андреевич* – младший научный сотрудник научно-производственно-образовательного инновационного центра СВЧ-технологий и их метрологического обеспечения научно-исследовательской части Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. E-mail: iv.andr.zakharov@gmail.com

Вклад авторов: *Бойправ Ольга Владимировна* – разработка технологии, определение целей и задач исследования, изготовление экспериментальных образцов поглотителей электромагнитного излучения на основе водного раствора гипса и водного раствора поливинилацетата, расчет значений коэффициента поглощения электромагнитного

^{*} Автор, ответственный за переписку / Corresponding author.

излучения экспериментальных образцов, интерпретация результатов исследования, написание текста рукописи; *Белоусова Елена Сергеевна* – разработка технологии, изготовление экспериментальных образцов поглотителей электромагнитного излучения на основе водного раствора поливинилацетата; *Богущ Наталья Валерьевна* – разработка технологии, изготовление экспериментальных образцов поглотителей электромагнитного излучения на основе водного раствора гипса; *Саванович Светлана Эдуардовна* – изготовление экспериментальных образцов поглотителей электромагнитного излучения на основе полиуретановой мастики; *Касперович Марина Михайловна* – измерение значений коэффициентов отражения и передачи электромагнитного излучения экспериментальных образцов; *Гусинский Александр Владимирович* – анализ результатов измерения значений коэффициентов отражения и передачи электромагнитного излучения экспериментальных образцов; *Захаров Иван Андреевич* – измерение значений коэффициентов отражения и передачи электромагнитного излучения экспериментальных образцов.

Для цитирования: Углеродсодержащие поглотители электромагнитного излучения СВЧ-диапазона с рельефной поверхностью / О. В. Бойправ [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2024. – Т. 69, № 1. – С. 17–27. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-1-17-27>

Поступила в редакцию: 04.10.2023

Доработанный вариант: 23.01.2024

Утверждена к публикации: 22.02.2024

Подписана в печать: 15.03.2024

Original article

**Olga V. Boiprav*, Elena S. Belousova, Natalia V. Bogush, Sviatlana E. Savanovich,
Marina M. Kasperovich, Alexander V. Gusinsky, Ivan A. Zakharov**

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
6, P. Brovka Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus*

CHARCOAL-CONTAINING MICROWAVE ELECTROMAGNETIC RADIATION ABSORBERS WITH RELIEF SURFACE

Abstract. A new technology for manufacturing microwave electromagnetic radiation (EMR) absorbers characterized by a geometrically inhomogeneous surface is presented. The novelty of the presented technology lies in the use of radiotransparent polymer forms with hemispherical depressions of the same volume, which are the component for the formation of the surface layer of absorbers. The technology consists in filling these molds with a mixture of powdered activated (birch) charcoal and the binder in the liquid phase and further drying it in the forms. Compared with analogues, the developed technology is characterized by low complexity of reproduction. Most of the time required to implement the presented technology is associated with the drying process of a mixture of powdered activated birch charcoal and a binder. The experimentally established patterns of changes in the values of electromagnetic radiation reflection and absorption coefficients in the frequency range 1.0–28.0 GHz of the absorbers manufactured in accordance with the presented technology are provided, depending on the type of binder contained in them (polyvinyl acetate aqueous solution, gypsum aqueous solution, polyurethane mastic). It was determined that the most effective of the EMR absorbers studied in the course of establishing the indicated patterns are those ones that contain an aqueous solution of polyvinyl acetate. Electromagnetic radiation absorption coefficient values in the frequency range 1.0–28.0 GHz of such absorbers vary from 0.75 to 0.99. In addition, the mass per unit area of such absorbers is 1.5–2.0 times less than the mass per unit area of absorbers containing an gypsum aqueous solution or polyurethane mastic. Microwave EMR absorbers manufactured using the presented technology are characterized by higher mechanical strength, as well as lower cost compared to analogues and are recommended for use in the creation of anechoic chambers.

Keywords: reflection coefficient, absorption coefficient, powdered activated charcoal, electromagnetic radiation

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; *Natalia V. Bogush* – Researcher of the Scientific Research Laboratory “Materials, Technologies and Means of Security Ensuring” of R&D Department at Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. <https://orcid.org/0000-0002-7832-8597>. E-mail: nbogush@bsuir.by; *Svetlana E. Savanovich* – Assistant of the Information Protection Department at Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. <https://orcid.org/0000-0001-7977-8031>. E-mail: svetasav@bsuir.by; *Marina M. Kasperovich* – Researcher of the Scientific-Production-Educational Innovation Center for Microwave Technologies and Their Metrological Support of R&D Department at Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. E-mail: kaspiarovich@bsuir.by; *Alexander V. Gusinsky* – Dr. Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Information and Measuring Systems Department at Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. E-mail: a.gusinskij@bsuir.by; *Ivan A. Zakharov* – Junior Researcher of the Scientific-Production-Educational Innovation Center for Microwave Technologies and Their Metrological Support” of R&D Department at Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. E-mail: iv.andr.zakharov@gmail.com

Contribution of the authors: *Olga V. Boiprav* – technology development, determination of the study aim and objectives, production of experimental samples of electromagnetic radiation absorbers based on gypsum aqueous solution and polyvinyl acetate aqueous solution, calculation of electromagnetic radiation absorption coefficient values of the experimental samples,

research results interpretation, writing the text of the manuscript; *Elena S. Belousova* – technology development, production of experimental samples of electromagnetic radiation absorbers based on polyvinyl acetate aqueous solution; *Natalia V. Bogush* – technology development, production of experimental samples of electromagnetic radiation absorbers based on gypsum aqueous solution; *Svetlana E. Savanovich* – production of experimental samples of electromagnetic radiation absorbers based on polyurethane mastic; *Marina M. Kasperovich* – measurement of electromagnetic radiation reflection and transmission coefficients values of the experimental samples; *Alexander V. Gusinsky* – analysis of the results of measuring the electromagnetic radiation reflection and transmission coefficients values of the experimental samples; *Ivan A. Zakharov* – measurement of electromagnetic radiation reflection and transmission coefficients values of the experimental samples.

For citation: Boiprav O. V., Belousova E. S., Bogush N. V., Savanovich S. E., Kasperovich M. M., Gusinsky A. V., Zakharov I. A. Charcoal-containing microwave electromagnetic radiation absorbers with relief surface. *Vesti Natsyonal'noi akademii nauk Belarusi. Seriya fizika-tekhnichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2024, vol. 69, no. 1, pp. 17–27 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-1-17-27>

Received: 04.10.2023

Modified version: 23.01.2024

Approved for publication: 22.02.2024

Signed to the press: 15.03.2024

Введение. Поглотители электромагнитного излучения (ЭМИ) СВЧ-диапазона с геометрически неоднородной поверхностью в настоящее время используются как для создания безэховых камер и экранированных помещений, так и для зонального экранирования пространства в местах расположения приборов электронной техники [1–3]. Такие поглотители характеризуются более широким по сравнению с поглотителями с плоской поверхностью рабочим диапазоном частот [4].

Геометрические неоднородности поверхности современных поглотителей ЭМИ СВЧ-диапазона, как правило, представляют собой совокупность пирамид [5]. Такие поглотители изготавливаются с применением одной из следующих операций (совокупности операций):

высушивание в пресс-формах с пирамидальными углублениями композиционной смеси на основе радиопрозрачного связующего вещества и электропроводящего порошкообразного или волокнистого наполнителя и дальнейшего извлечения из этих форм полученных поглотителей ЭМИ [4, 6, 7];

нанесение на пирамидальные выступы поверхности основы, изготовленной из твердотельного радиопрозрачного материала, композиционной смеси на основе радиопрозрачного связующего вещества и электропроводящего порошкообразного или волокнистого наполнителя [8];

заполнение пор изготовленной из пенополиуретана основы, поверхность которой имеет выступы в виде пирамид, частицами диэлектрического и/или электропроводящего материала [9].

Одним из основных недостатков поглотителей ЭМИ, характеризующихся геометрически неоднородной поверхностью в виде совокупности пирамид, является низкая механическая прочность вершин последних, что накладывает ограничения на процессы транспортировки, монтажа и эксплуатации таких поглотителей.

Цель исследования – экспериментальное обоснование новой технологии изготовления поглотителей ЭМИ СВЧ-диапазона с геометрически неоднородной поверхностью, для которых не характерен обозначенный недостаток.

Для достижения этой цели были поставлены и решены следующие задачи:

1) выбраны и обоснованы основные и вспомогательные материалы, а также оснастка для изготовления поглотителей ЭМИ;

2) с применением выбранных материалов и оснастки изготовлены экспериментальные образцы поглотителей ЭМИ различных типов;

3) осуществлены количественная оценка и сравнительный анализ значений коэффициентов отражения, передачи и поглощения ЭМИ изготовленных экспериментальных образцов поглотителей ЭМИ;

4) проведен сравнительный анализ рабочего диапазона частот, а также эксплуатационных характеристик исследованных поглотителей ЭМИ и их аналогов.

Методика изготовления и исследования материалов. В ходе решения первой из задач, поставленных для достижения цели исследования, учитывались следующие особенности, связанные с разработкой поглотителей электромагнитного излучения СВЧ-диапазона с геометрически неоднородной поверхностью:

1) в настоящее время является актуальной задачей снижение стоимости поглотителей ЭМИ СВЧ-диапазона с геометрически неоднородной поверхностью за счет использования для их изготовления недорогостоящих компонентов [1, 4];

2) высота геометрических неоднородностей поверхности поглотителей ЭМИ СВЧ-диапазона не должна превышать 50,0 % от значения длины электромагнитной волны на верхней граничной частоте рабочего диапазона частот этих поглотителей [4];

3) ширина основания геометрических неоднородностей поверхности поглотителей ЭМИ СВЧ-диапазона не должна превышать значение длины электромагнитной волны на нижней граничной частоте рабочего диапазона частот этих поглотителей [4].

С учетом первой из обозначенных особенностей в качестве основного материала для изготовления поглотителей ЭМИ СВЧ-диапазона с геометрически неоднородной поверхностью был выбран порошкообразный активированный древесный (березовый) уголь. По сравнению с другими электропроводящими материалами, используемыми в настоящее время для изготовления исследуемого типа поглотителей, порошкообразный древесный (березовый) уголь характеризуется наиболее низкой стоимостью [10]. Также при выборе основного материала для изготовления поглотителей ЭМИ СВЧ-диапазона с геометрически неоднородной поверхностью учитывались представленные в [10] результаты исследований характеристик отражения и передачи ЭМИ в СВЧ-диапазоне композиционных материалов на основе порошкообразных углей различных типов.

В качестве вспомогательных материалов для изготовления поглотителей ЭМИ СВЧ-диапазона с геометрически неоднородной поверхностью были выбраны строительные связующие вещества. Такой выбор обусловлен их высокой доступностью и невысокой стоимостью по сравнению с нестроительными связующими веществами [11].

В качестве оснастки для изготовления поглотителей ЭМИ СВЧ-диапазона с геометрически неоднородной поверхностью использовались выполненные из радиопрозрачного полимерного материала твердотельные формы с полусферическими углублениями. Причиной такого выбора послужило отсутствие в них остроугольных вершин. Данная особенность обуславливает более низкие временные и финансовые затраты на изготовление таких форм. Кроме того, вершины поглотителей ЭМИ СВЧ-диапазона, произведенные с использованием таких форм, характеризуются более высокой механической прочностью, чем изготовленные с применением форм с пирамидальными углублениями. Высота и ширина оснований углублений выбранных форм удовлетворяла второй и третьей из обозначенных особенностей.

В ходе решения второй из задач исследования с использованием выбранных основных и вспомогательных материалов, а также оснастки были изготовлены три типа экспериментальных образцов поглотителей ЭМИ СВЧ-диапазона. В табл. 1 представлены характеристики изготовленных экспериментальных образцов.

Таблица 1. Характеристики изготовленных экспериментальных образцов

Table 1. Characteristics of the manufactured experimental samples

Условное обозначение	Вспомогательный материал, использованный для изготовления	Масса на единицу площади, кг/м ²
Образцы типа 1	30%-ный водный раствор гипса	7,5
Образцы типа 2	50%-ный водный раствор поливинилацетата	5,0
Образцы типа 3	Полиуретановая мастика	9,5

Порядок изготовления указанных экспериментальных образцов поглотителей ЭМИ СВЧ-диапазона был следующим.

1. Изготовление смеси на основе порошкообразного активированного древесного (березового) угля с размером частиц более 3,0 мм и вспомогательного материала (объемная пропорция указанных компонентов – 1 : 3).

2. Заполнение изготовленной смесью твердотельной формы с полусферическими углублениями.

3. Высушивание находящейся в данной форме смеси в вентиляционном сушильном шкафу при температуре 30,0–35,0 °С.

4. Откраивание от рулона фольгированного полимерного материала фрагмента, длина и ширина которого равны длине и ширине используемой формы.

5. Клеевое соединение откраенного фрагмента фольгированного полимерного материала и твердотельной формы с полусферическими углублениями, заполненной высушенной смесью на основе порошкообразного активированного древесного (березового) угля и вспомогательного материала.

Представленный порядок по своей сути является основой для предлагаемой авторами новой технологии изготовления поглотителей ЭМИ СВЧ-диапазона с геометрически неоднородной поверхностью. Как из него видно, большая часть временных затрат, необходимых для реализации предлагаемой технологии, связана с процессом высыхания смеси порошкообразного активированного березового угля и связующего вещества.

На рис. 1, *a* представлен внешний вид сверху одного из изготовленных экспериментальных образцов, а на рис. 1, *b* – внешний вид сбоку фрагмента одного из таких образцов. Высота геометрических неоднородностей поверхностей изготовленных экспериментальных образцов составляла 8,0 мм.

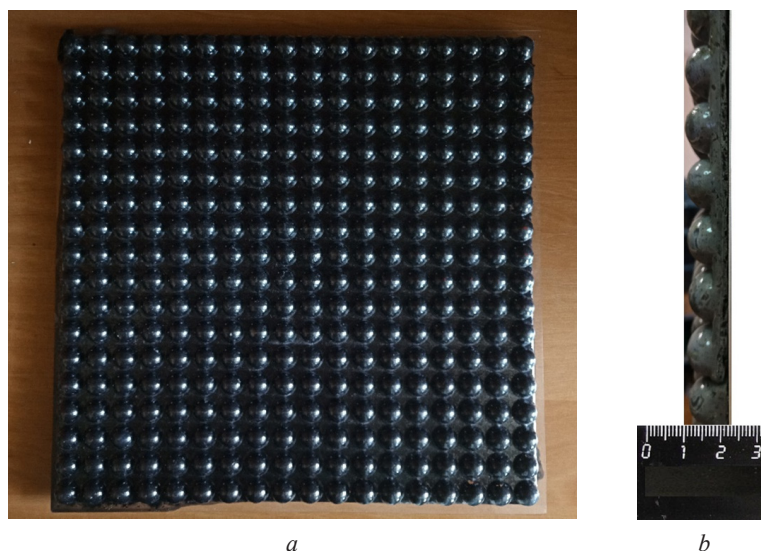


Рис. 1. Внешний вид сверху одного из изготовленных экспериментальных образцов (*a*) и внешний вид сбоку фрагмента одного из полученных образцов (*b*)

Fig. 1. Top view of one of the manufactured experimental samples (*a*) and side view of one of the obtained experimental samples fragment (*b*)

В ходе решения третьей из задач исследования проводились измерения значений коэффициентов отражения (S_{11} , дБ) и передачи (S_{21} , дБ) ЭМИ в диапазоне частот 1,0–28,0 ГГц изготовленных экспериментальных образцов. При этом использовалась установка, которая включала в себя векторный анализатор цепей MS4 644B, антенны П6-23 и П6-65. Измерения проводились в ближней зоне распространения электромагнитных волн путем перекрытия раскрыва антенны материалом исследуемого образца, что соответствует прямому углу падения указанных волн.

Значения коэффициента поглощения ЭМИ экспериментальных образцов устанавливались расчетным путем на основе результатов проведенных измерений значений коэффициентов отражения и передачи ЭМИ. Порядок проведения расчетов был следующим [12].

1. Преобразование значений коэффициента отражения ЭМИ, представленных в децибелах, в значения, представленные в относительных единицах (долях), в соответствии со следующей формулой:

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

где R – значение коэффициента отражения ЭМИ.

2. Преобразование значений коэффициента передачи ЭМИ, представленных в децибелах, в значения, представленные в относительных единицах (долях), в соответствии со следующим выражением:

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

где T – значение коэффициента передачи ЭМИ, представленное в относительных единицах.

3. Расчет значений коэффициента поглощения ЭМИ (A , отн. ед.) в соответствии со следующей формулой:

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

Результаты и их обсуждение. В ходе сравнительного анализа рабочего диапазона частот и эксплуатационных характеристик поглотителей ЭМИ (четвертая задача исследования) использовались полученные по результатам проведения измерений и расчетов частотные зависимости коэффициентов отражения и поглощения ЭМИ в диапазоне 1,0–28,0 ГГц исследованных образцов поглотителей ЭМИ. Частотные зависимости коэффициента отражения представлены на рис. 2.

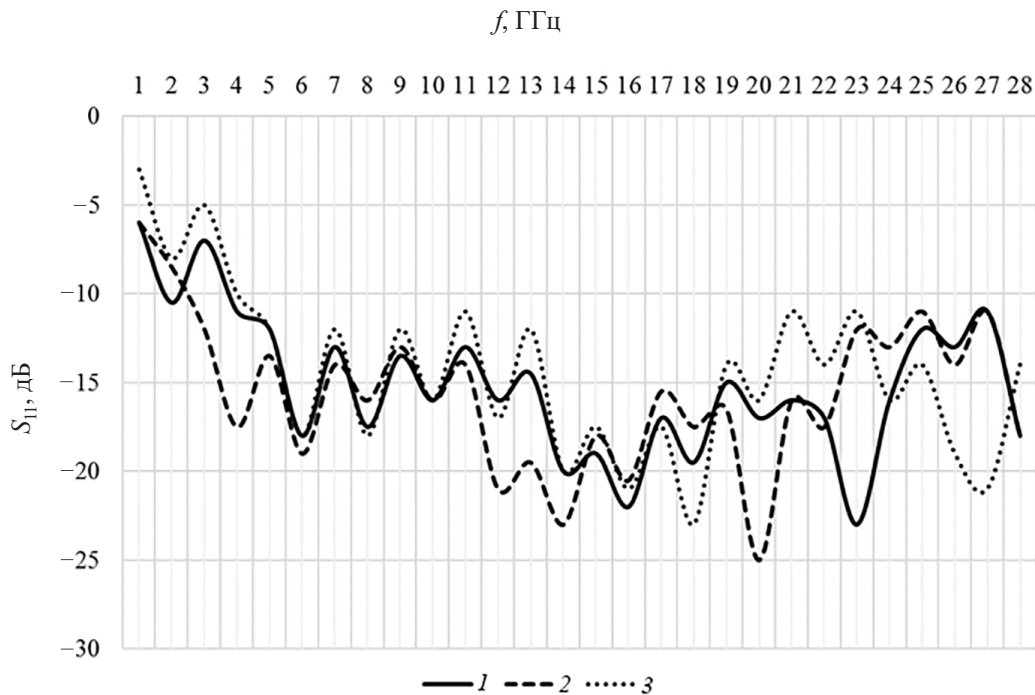


Рис. 2. Частотные зависимости коэффициента отражения электромагнитного излучения в диапазоне 1,0–28,0 ГГц экспериментальных образцов типов 1, 2 и 3 (кривые 1, 2 и 3 соответственно)

Fig. 2. Frequency dependencies of electromagnetic radiation reflection coefficient in the range 1.0–28.0 GHz of the experimental samples of absorbers 1, 2 and 3 (curves 1, 2 and 3, respectively)

Видно, что значения коэффициента отражения ЭМИ в указанном диапазоне частот экспериментальных образцов, изготовленных на основе водного раствора гипса, изменяются в пределах от $-6,0$ до $-23,0$ дБ, а изготовленных на основе водного раствора поливинилацетата и полиуретановой мастики – в пределах от $-6,0$ до $-25,0$ дБ и от $-3,0$ до $-23,0$ дБ соответственно. Установлено, что среднее значение коэффициента отражения ЭМИ первых из указанных экспериментальных образцов составляет $-15,1$ дБ, а вторых и третьих – соответственно $-15,7$ дБ и $-14,9$ дБ.

Более высокое среднее значение коэффициента отражения ЭМИ экспериментальных образцов, изготовленных на основе полиуретановой мастики, по сравнению со значениями коэффициента отражения ЭМИ экспериментальных образцов, изготовленных на основе водного раствора

поливинилацетата и водного раствора гипса, может быть обусловлено тем, что разность между волновым сопротивлением первого из указанных образцов и воздуха превышает разность между волновым сопротивлением второго и третьего из указанных образцов и воздуха, так как диэлектрическая проницаемость полиуретана выше, чем гипса и поливинилацетата [13–16]. Осциллирующий характер частотных зависимостей коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 1,0–28,0 ГГц экспериментальных образцов обусловлен соответствующим свойством электромагнитных волн.

Установлено, что значения коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне 1,0–28,0 ГГц исследуемых образцов всех типов составляют $\sim 40,0$ дБ. Изготовленные экспериментальные образцы характеризуются примерно одинаковыми значениями коэффициента передачи ЭМИ в указанном диапазоне частот, так как фольгированный полимерный материал, входящий в структуру этих образцов, оказывает большее влияние на уровень ослабляемой ими энергии ЭМИ, взаимодействующего с ними, чем содержащееся в них связующее вещество.

Частотные зависимости коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне 1,0–28,0 ГГц исследованных образцов поглотителей ЭМИ, значения которого были рассчитаны в соответствии с формулами (1)–(3), представлены на рис. 3.

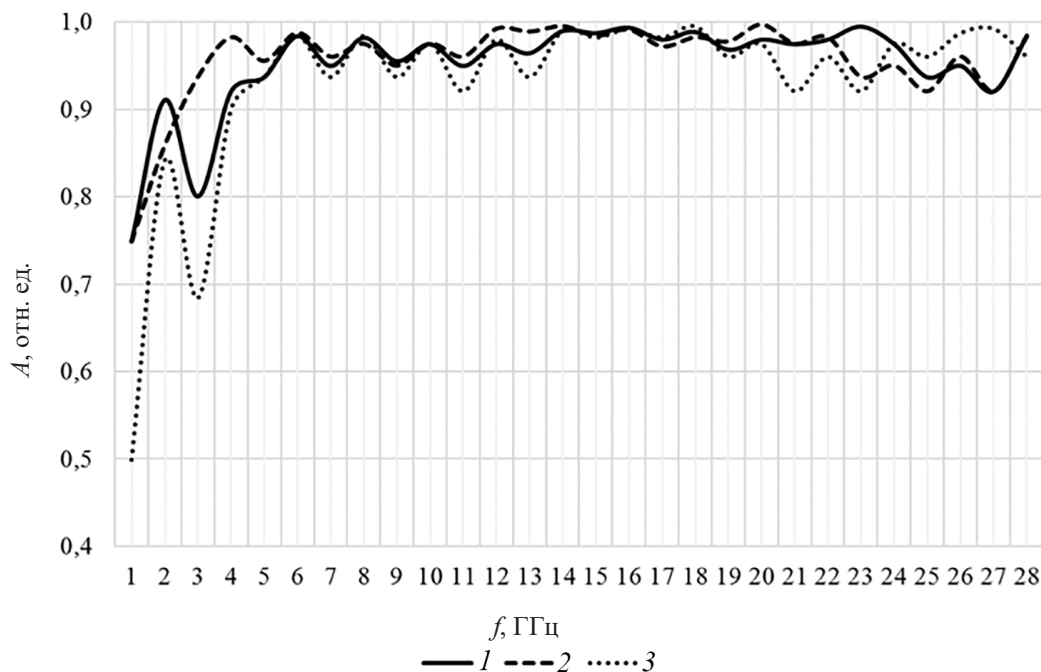


Рис. 3. Частотные зависимости коэффициента поглощения электромагнитного излучения в диапазоне 1,0–28,0 ГГц экспериментальных образцов поглотителей 1, 2 и 3 (кривые 1, 2 и 3 соответственно)

Fig. 3. Frequency dependencies of electromagnetic radiation absorption coefficient in the range 1.0–28.0 GHz of the experimental samples of types 1, 2 and 3 (curves 1, 2 and 3, respectively)

Видно, что значения коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне частот 1,0–28,0 ГГц экспериментальных образцов, изготовленных на основе водного раствора гипса и водного раствора поливинилацетата, изменяются в пределах от 0,75 до 0,99, а образцов, изготовленных на основе полиуретановой мастики, – в пределах от 0,50 до 0,99. Установлено, что среднее значение коэффициента поглощения ЭМИ первых и вторых из указанных экспериментальных образцов составляет соответственно 0,95 и 0,96, а третьего – 0,93. Более низкое среднее значение коэффициента поглощения ЭМИ экспериментальных образцов на основе полиуретановой мастики по сравнению с экспериментальными образцами на основе водного раствора гипса и водного раствора поливинилацетата обусловлено более высоким средним значением коэффициента отражения ЭМИ.

Значения коэффициента поглощения ЭМИ образцов типов 1, 2 и 3 в зависимости от значения частоты ЭМИ в диапазоне 1,0–28,0 ГГц могут быть аппроксимированы соответственно с использованием следующих функций:

$$A_1(f) = 1,0 - \frac{0,25}{f}, \quad A_2(f) = 1,0 - \frac{0,2}{f}, \quad A_3(f) = 1,0 - \frac{0,5}{f},$$

где $A_1(f)$, $A_2(f)$ и $A_3(f)$ – функции, аппроксимирующие значения коэффициента поглощения ЭМИ образцов типов 1, 2 и 3 соответственно.

Представленные функции по сути являются математическим описанием закономерностей изменения значений коэффициента поглощения ЭМИ исследованных образцов в диапазоне частот 1,0–28,0 ГГц. Как видно из этих функций, зависимость коэффициента поглощения ЭМИ исследованных образцов от значения частоты ЭМИ в диапазоне 1,0–28,0 ГГц носит гиперболический характер.

Так, значения коэффициента поглощения ЭМИ образцов типа 1 увеличиваются на 0,15 при возрастании частоты ЭМИ в пределах от 1,0 до 2,0 ГГц, в среднем на 0,02 – при увеличении частоты ЭМИ в пределах от 3,0 до 13,0 ГГц и в среднем на 0,005 – при росте частоты ЭМИ в пределах от 13,0 до 28,0 ГГц.

В свою очередь значения коэффициента поглощения ЭМИ образцов типа 2 увеличиваются в среднем на 0,2 при возрастании частоты ЭМИ в пределах от 1,0 до 4,0 ГГц и в среднем на 0,03 – при росте частоты ЭМИ в пределах от 4,0 до 28,0 ГГц.

Между тем значения коэффициента поглощения ЭМИ образцов типа 3 увеличиваются в среднем на 0,05 при возрастании частоты ЭМИ в пределах от 1,0 до 2,0 ГГц и от 3,0 до 6,0 ГГц и в среднем на 0,005 при увеличении частоты ЭМИ в пределах от 6,0 до 28,0 ГГц.

Значения коэффициента поглощения ЭМИ увеличиваются с возрастанием частоты ЭМИ в связи с уменьшением глубины проникновения этого излучения [17].

В ходе исследования установлено, что значения коэффициента поглощения ЭМИ исследованных поглотителей выше, чем у аналогов (табл. 2).

Т а б л и ц а 2. Характеристики исследованных поглотителей электромагнитного излучения (ЭМИ) и их аналогов

Table 2. Characteristics of the studied electromagnetic radiation absorbers and their analogues

Краткое описание поглотителей ЭМИ	Значения коэффициента поглощения ЭМИ, дБ	Рабочий диапазон частот, ГГц
Исследованные поглотители ЭМИ	0,75–0,99	1,0–28,0
Поглотители ЭМИ с геометрическими неоднородностями поверхности в виде усеченных пирамид высотой 0,6 см, изготовленные из метаматериала [18]	0,7–0,9	3,0–4,0
Поглотители ЭМИ с геометрическими неоднородностями поверхности в виде пирамид высотой 1,0 см, изготовленные на основе полиуретана [3]	0,80–0,99	1,0–20,0
Поглотители ЭМИ с геометрическими неоднородностями поверхности в виде пирамид высотой 11,5 см, изготовленные на основе рисовой шелухи [4]	0,80–0,99	2,0–6,0
Поглотители ЭМИ с геометрическими неоднородностями поверхности в виде пирамид высотой 0,9 см, изготовленные на основе углеродных волокон [6]	0,7–0,9	4,0–18,0

Заключение. Поглотители ЭМИ, результаты исследования которых представлены в настоящей работе, характеризуются следующими преимуществами по сравнению с аналогами:

– более широкий рабочий диапазон частот за счет того, что энергия ЭМИ частотой более 10,0 ГГц, рассеиваемого на частицах входящего в состав указанных поглотителей порошкообразного активированного древесного (березового) угля, превышает энергию излучения частотой более 10,0 ГГц, рассеиваемого на мелкодисперсных частицах электропроводящих и диэлектрических материалов, которые используются для изготовления поглотителей, аналогичных указанным [19];

– пониженная по сравнению с другими углеродосодержащими материалами стоимость за счет дешевизны входящего в состав указанных поглотителей порошкообразного активированного древесного (березового) угля (стоимость порошкообразного активированного угля минимум в 1,5 раза ниже стоимости других углеродосодержащих материалов, используемых в настоящее время для изготовления поглотителей ЭМИ);

– повышенная механическая прочность за счет того, что в структуру указанных поглотителей входят изготовленные из радиопрозрачного полимерного материала твердотельные формы, характеризующиеся отсутствием остроугольных вершин, которые могут повреждаться при оказываемом на них механическом воздействии.

Полученные поглотители ЭМИ представляются перспективными для использования в целях облицовки стен и потоков безэховых камер, а также создания внутренних перегородок для функционального зонирования пространства в таких камерах. При этом наиболее целесообразно применять поглотители ЭМИ, изготовленные на основе водного раствора поливинилацетата, так как они характеризуются более низкими значениями коэффициента поглощения ЭМИ, а также меньшей в 1,5–2,0 раза массой на единицу площади по сравнению с поглотителями, изготовленными на основе водного раствора гипса и полимерной мастики.

Список использованных источников

1. Effect on Source Signal Condition for Pyramidal Microwave Absorber Performance / H. Nornikman [et al.] // Int. Conf. on Computer and Communication Engineering (ICCCE'10). – 2010. – Vol. 10. – P. 11–13. <https://doi.org/10.1109/ICCCE.2010.5556825>
2. Rodriguez, V. Basic Rules for Indoor Anechoic Chamber Design [Measurements Corner] / V. Rodriguez // IEEE Antennas Propag. Mag. – 2016. – Vol. 58, № 6. – P. 82–93. <https://doi.org/10.1109/MAP.2016.2609821>
3. Design of Microwave Pyramidal Absorber for Semi Anechoic Chamber in 1 GHz–20 GHz Range / Z. Ali [et al.] // Int. J. Microw. Wirel. Technol. – 2020. – Vol. 2. – P. 22–29. <https://doi.org/10.5815/ijwmt.2020.02.03>
4. Enhanced Microwave Absorption of Rice Husk-Based Pyramidal Microwave Absorber with Different Lossy Base Layer / L. Y. Seng [et al.] // IET Microwaves, Antennas & Propagation. – 2020. – Vol. 14, iss. 3. – P. 215–222. <https://doi.org/10.1049/iet-map.2019.0571>
5. Investigate the Effect of Dielectric Properties on Microwave Absorption of Pyramidal Microwave Absorber / B. Vaganathan [et al.] // J. Microw., Optoelectron. Electromagn. Appl. – 2022. – Vol. 21, № 2. – P. 328–336. <http://dx.doi.org/10.1590/2179-10742022v21i2257631>
6. Electromagnetic Absorber Composite Made of Carbon Fibers Loaded Epoxy Foam for Anechoic Chamber Application / C. Méjean [et al.] // Mater. Sci. Eng., B. – 2017. – Vol. 220. – P. 59–65. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2017.03.009>
7. Product Design From Waste: A Novel Eco-Efficient Pyramidal Microwave Absorber Using Rice Husks and Medium Density Fibreboard Residues / C. F. Jung [et al.] // Waste Manage. (Oxford). – 2021. – Vol. 119. – P. 91–100. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.08.047>
8. A New Fire-Resistant Thin Pyramidal Absorber Based Straw and Gypsum Powder for Cost-Effective EMC Test Chambers / I. B. Basyigit [et al.] // Eng. Sci. Technol. Int. J. – 2023. – Vol. 40. – Art. ID 101344. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2023.101344>
9. Orakwue, S. I. Pyramidal Microwave Absorber Design for Anechoic Chamber in the Microwave Frequency Range of 1 GHz to 10 GHz / S. I. Orakwue, I. P. Onu // Eur. J. Eng. Res. Sci. – 2019. – Vol. 4, № 10. <http://doi.org/10.24018/ejers.2019.4.10.1409>
10. Charcoal-Containing Building Materials for Electromagnetic Radiation Shielding / O. V. Boiprav [et al.] // Mag. Civ. Eng. – 2023. – Vol. 117, № 1. – Art. ID 11709. <https://doi.org/10.34910/MCE.117.9>
11. Специальные цементы / Т. В. Кузнецова [и др.]. – СПб.: Стройиздат, 1997. – 314 с.
12. Resistance against Penetration of Electromagnetic Radiation for Ultra-Light Cu/Ni-Coated Polyester Fibrous Materials / K. Yang [et al.] // Polymers (Basel). – 2020. – Vol. 12, № 9. – P. 2029. <https://doi.org/10.3390/polym12092029>
13. Electromagnetic Waves Absorbing Characteristics of Composite Material Containing Carbonyl Iron Particles / V. A. Zhuravlev [et al.] // Mater. Sci. Appl. – 2014. – Vol. 5, № 11. – P. 803–811. <https://doi.org/10.4236/msa.2014.511080>
14. Dielectric Properties of Heterogeneous Mineral Compositions Based on Bentonite and Gypsum / A. Morozov [et al.] // Transp. Res. Procedia. – 2023. – Vol. 68. – P. 947–954. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.02.132>
15. Funt, B. L. Dielectric Properties of Polyvinyl Acetals / B. L. Funt, T. H. Sutherland // Can. J. Chem. – 1952. – Vol. 30, № 12. – P. 940–947. <https://doi.org/10.1139/v52-114>

16. The Rational Design of Polyurea & Polyurethane Dielectric Materials / R. G. Lorenzini [et al.] // *Polymer*. – 2013. – Vol. 54, iss. 14. – P. 3529–3533. <https://dx.doi.org/10.1016/j.polymer.2013.05.003>
17. Chung, D. D. L. Electromagnetic Skin Depth of Cement Paste and Its Thickness Dependence / D. D. L. Chung, M. Ozturk // *J. Build. Eng.* – 2022. – Vol. 52. – Art. ID 104393. <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.104393>
18. Pyramidal Metamaterial Absorber for Mode Damping in Microwave Resonant Structures / N. Chikhi [et al.] // *Sci. Rep.* – 2020. – Vol. 10. – Art. ID 19352. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-76433-3>
19. Microwave Absorption Performance of Porous Carbon Particles Modified by Nickel with Different Morphologies / Z. Shen [et al.] // *J. Mater. Sci. Technol.* – 2023. – Vol. 137. – P. 79–90. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2022.07.036>

References

1. Nornikman H., Malek F., Soh P. J., Azremi A. A. H. Effect on Source Signal Condition for Pyramidal Microwave Absorber Performance. *International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE'10)*, 2010, vol. 10, pp. 11–13. <https://doi.org/10.1109/ICCCE.2010.5556825>
2. Rodriguez V. Basic Rules for Indoor Anechoic Chamber Design [Measurements Corner]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2016, vol. 58, no. 6, pp. 82–93. <https://doi.org/10.1109/MAP.2016.2609821>
3. Ali Z., Muneer B., Chowdhry B. S., Jehangir S., Hyder G. Design of Microwave Pyramidal Absorber for Semi Anechoic Chamber in 1 GHz~20 GHz Range. *International Journal Wireless and Microwave Technologies*, 2020, vol. 2, pp. 22–29. <https://doi.org/10.5815/ijwmt.2020.02.03>
4. Seng L. Y., Jack S. P., Yeow Y. K., Hoon W. F., Yew L. C., Seng G. H., Malek F. Enhanced Microwave Absorption of Rice Husk-Based Pyramidal Microwave Absorber with Different Lossy Base Layer. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2020, vol. 14, iss. 3, pp. 215–222. <https://doi.org/10.1049/iet-map.2019.0571>
5. Vaganathan B., Lee Y. S., You K. Y., Gan H. S., Wee F. H. Investigate the Effect of Dielectric Properties on Microwave Absorption of Pyramidal Microwave Absorber, *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, 2022, vol. 21, no. 2, pp. 328–336. <http://doi.org/10.1590/2179-10742022v21i2257631>
6. Méjean C., Pometcu L., Benzerger R., Sharaiha A., Le Paven-Thivet C., Badard M., Pouliguen P. Electromagnetic Absorber Composite Made of Carbon Fibers Loaded Epoxy Foam for Anechoic Chamber Application. *Materials Science and Engineering: B*, 2017, vol. 220, pp. 59–65. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2017.03.009>
7. Jung C. F., Jesus Pacheco D. A. de, Sporket F., Nascimento C. A. do, Ten Caten C. S. Product Design From Waste: A Novel Eco-Efficient Pyramidal Microwave Absorber Using Rice Husks and Medium Density Fibreboard Residues. *Waste Management*, 2021, vol. 119, pp. 91–100. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.08.047>
8. Basyigit I. B., Dogan H., Genc A., Colak B. A New Fire-Resistant Thin Pyramidal Absorber Based Straw and Gypsum Powder for Cost-Effective EMC Test Chambers. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2023, vol. 40, art. ID 101344. <https://doi.org/10.1016/j.jestech.2023.101344>
9. Orakwue S. I., Onu I. P. Pyramidal Microwave Absorber Design for Anechoic Chamber in the Microwave Frequency Range of 1 GHz to 10 GHz. *European Journal of Engineering Research and Science*, 2019, vol. 4, no. 10. <http://doi.org/10.24018/ejers.2019.4.10.1409>
10. Boiprav O. V., Belousova E. S., Ahmetdinova E. S., Bogush N. V. Charcoal-Containing Building Materials for Electromagnetic Radiation Shielding. *Magazine of Civil Engineering*, 2023, vol. 117, no. 1, art. ID 11709. <https://doi.org/10.34910/MCE.117.9>
11. Kuznetsova T. V., Sychev M. M., Osokin A. P., Korneev V. I., Sudakas L. G. *Special Cements*. St. Petersburg, Stroiizdat Publ., 1997. 314 p. (in Russian).
12. Yang K., Periyasamy A. P., Venkataraman M., Militky J., Kremenakova D., Vecernik J., Pulíček R. Resistance against Penetration of Electromagnetic Radiation for Ultra-Light Cu/Ni-Coated Polyester Fibrous Materials. *Polymers (Basel)*, 2020, vol. 12, no. 9, p. 2029. <https://doi.org/10.3390/polym12092029>
13. Zhuravlev V. A., Suslyayev V. I., Korovin E. Yu., Dorozhkin K. V. Electromagnetic Waves Absorbing Characteristics of Composite Material Containing Carbonyl Iron Particles. *Materials Sciences and Applications*, 2014, vol. 5, no. 11, pp. 803–811. <https://doi.org/10.4236/msa.2014.511080>
14. Morozov A., Vasilchenko A., Shapovalov V., Kochur A., Yavna V. Dielectric Properties of Heterogeneous Mineral Compositions Based on Bentonite and Gypsum. *Transportation Research Procedia*, 2023, vol. 68, pp. 947–954. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.02.132>
15. Funt B. L., Sutherland T. H. Dielectric Properties of Polyvinyl Acetals. *Canadian Journal of Chemistry*, 1952, vol. 30, no. 12, pp. 940–947. <https://doi.org/10.1139/v52-114>
16. Lorenzini R. G., Kline W. M., Wang C. C., Ramprasad R., Sotzing G. A. The Rational Design of Polyurea & Polyurethane Dielectric Materials. *Polymer*, 2013, vol. 54, iss. 14, pp. 3529–3533. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2013.05.003>

17. Chung D. D. L., Ozturk M. Electromagnetic Skin Depth of Cement Paste and Its Thickness Dependence. *Journal of Building Engineering*, 2022, vol. 52, art. ID 104393. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104393>
18. Chikhi N., Passarelli A., Andreone A., Masullo M. R. Pyramidal Metamaterial Absorber for Mode Damping in Microwave Resonant Structures. *Scientific Reports*, 2020, vol. 10, art. ID 19352. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-76433-3>
19. 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, vol. 137, pp. 79–90. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2022.07.036>