

ГИБКИЕ МНОГОСЛОЙНЫЕ ПОГЛОТИТЕЛИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С УПОРЯДОЧЕННО-СТРУКТУРИРОВАННЫМ ПРОМЕЖУТОЧНЫМ СЛОЕМ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЕВОЙ СТРУЖКИ

О.В. Бойправ, В.С. Челядинский, Л.М. Лыньков, М.В. Тумилович

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск

FLEXIBLE MULTILAYER ELECTROMAGNETIC RADIATION ABSORBERS WITH AN ORDERED STRUCTURED INTERMEDIATE LAYER BASED ON ALUMINUM SHAVINGS

O.V. Boiprav, V.S. Chelyadinsky, L.M. Lynkou, M.V. Tumilovich

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk

Аннотация. Представлена технология изготовления низкостоймых гибких многослойных поглотителей электромагнитного излучения СВЧ-диапазона. Низкая стоимость поглотителей обусловлена тем, что в их состав входит алюминиевая стружка, являющаяся отходом производства. Из этой стружки выполнен второй слой поглотителей. Это реализовано путем формирования из нее элементов, характеризующихся одинаковыми формой и размерами, и фиксации этих элементов с одинаковым шагом между первым и третьим слоями, выполненными из синтетического нетканого волоконного материала. Установлено, что значения коэффициента поглощения электромагнитного излучения в диапазоне частот 2,0–17,0 ГГц поглотителей, изготовленных в соответствии с представленной технологией, достигают величины 0,9, а ширина их эффективной полосы поглощения – 140,0%.

Ключевые слова: *алюминиевая стружка, коэффициент поглощения, поглотитель электромагнитного излучения, эффективная полоса поглощения.*

Для цитирования: *Гибкие многослойные поглотители электромагнитного излучения с упорядоченно-структурированным промежуточным слоем на основе алюминиевой стружки / О.В. Бойправ, В.С. Челядинский, Л.М. Лыньков, М.В. Тумилович // Проблемы физики, математики и техники. – 2024. – № 2 (59). – С. 16–21. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2024_2_59_16. – EDN: ZEBMHD*

Abstract. A technology for manufacturing low-cost flexible multilayer microwave absorbers is proposed. The low cost of the absorbers is due to the fact that they contain aluminum shavings, which are a production waste. The second layer of the absorbers is made from these shavings. This is realized by forming from it the elements characterized by the same shape and size, and fixing these elements with the same step between the first and third layers made from synthetic non-woven fiber material. It has been established that electromagnetic radiation absorption coefficient values of the absorbers manufactured in accordance with the presented technology reach a value of 0.9 in the frequency range of 2.0–17.0 GHz, and the width of their effective absorption band is 140.0%.

Keywords: *aluminum shavings, absorption coefficient, electromagnetic radiation absorber, effective absorption band.*

For citation: *Flexible multilayer electromagnetic radiation absorbers with an ordered structured intermediate layer based on aluminum shavings / O.V. Boiprav, V.S. Chelyadinsky, L.M. Lynkou, M.V. Tumilovich // Problems of Physics, Mathematics and Technics. – 2024. – № 2 (59). – P. 16–21. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2024_2_59_16 (in Russian). – EDN: ZEBMHD*

Введение

Объектом ряда проводимых в настоящее время исследований в области разработки многофункциональных материалов являются поглотители электромагнитного излучения (ЭМИ) СВЧ-диапазона на основе отходов производства [1]–[15]. Такие поглотители могут быть условно разделены на следующие группы:

– поглотители на основе органических материалов (как правило, отходов целлюлозно-бумажного, стекольного, деревообрабатывающего, пищевого производств, растениеводства): макулатура [1], [2], стеклобой [2], остатки древесноволокнистых плит [3], древесный уголь [4]–[6], остатки кофе [7], рисовая шелуха [3], [8],

[9], сушеные листья банана [4], скорлупа кокоса [10] и т. п.;

– поглотители на основе неорганических материалов (как правило, отходов металлургических, химических и электронных производств): стальной шлак [11], шлак очистки ваграночных газов [12], покрышки автомобильных шин [13], остатки тонера, используемого в картриджах принтеров [14], материалы на основе электронного лома [15] и т. п.

Авторами статей [1]–[15] отмечено, что при использовании отходов производства для изготовления поглотителей ЭМИ можно одновременно решить следующие задачи:

1) получение низкостоимостных поглотителей ЭМИ, которые целесообразно использовать для электромагнитного экранирования зданий и помещений, в которых располагаются приборы электронной техники, чувствительные к воздействию электромагнитных помех;

2) способствование решению проблемы утилизации ряда отходов производств.

Авторами настоящей статьи было сделано предположение о перспективности применения алюминиевой стружки для изготовления поглотителей ЭМИ. Это предположение основывалось на совокупности следующих особенностей:

1. Алюминиевая стружка представляет собой объемную спираль.

2. Среды, в структуру которых входят проводники в форме объемных спиралей (как упорядоченно, так и хаотично распределенные по объему этих сред), обеспечивают эффективное поглощение энергии взаимодействующего с ними ЭМИ СВЧ-диапазона, что теоретически обосновано в работе [16]. Однако следует отметить, что такое поглощение обеспечивается в узкой полосе частот.

В связи с вышеизложенным целью исследовательской работы, результаты которой представлены в настоящей статье, состояла в экспериментальном обосновании технологии изготовления новых широкополосных поглотителей ЭМИ на основе алюминиевой стружки (т. е. по сути поглотителей в виде сред, содержащих проводники в форме объемных спиралей). Эта технология основана на технологии, представленной в работе [17], и состоит в формировании из алюминиевой стружки элементов одинаковых форм и размеров и дальнейшем фиксировании этих элементов с одинаковым шагом между двумя фрагментами материалов, характеризующихся диэлектрическими свойствами. Экспериментальное обоснование этой технологии базировалось на установленных закономерностях изменения характеристик поглощения ЭМИ таких поглотителей в зависимости от размера входящих в их структуру элементов из алюминиевой стружки.

1 Материалы и методы

Разработанная технология изготовления поглотителей ЭМИ включает в себя следующие операции:

1. Откраивание от рулона синтетического нетканого волокнистого материала двух одинаковых фрагментов, длина, ширина и форма которых зависят от требований, предъявляемым к длине, ширине и форме изготавливаемого поглотителя.

2. Размещение на поверхности одного из фрагментов, полученных в результате реализации операции 1, трафарета, предназначенного для формирования элементов из алюминиевой стружки и характеризующегося следующими свойствами:

– ячейки трафарета характеризуются одинаковыми размером и формой и распределены с одинаковым шагом;

– шаг распределения ячеек трафарета (S) удовлетворяет следующему условию:

$$S \leq \frac{0,4c}{f_l}, \text{ м}, \quad (1.1)$$

где f_l – требуемое значение нижней частоты эффективной полосы поглощения изготавливаемого поглотителя ЭМИ, c – скорость света в вакууме [18], [19];

– ячейки трафарета характеризуются круглой или квадратной формой;

– ширина ячеек трафарета (W) удовлетворяет следующему условию:

$$W \leq \frac{c}{3f_l}, \text{ м} [20]. \quad (1.2)$$

Условия (1.1), (1.2) должны учитываться для того, чтобы минимизировать степень зависимости граничных частот полосы поглощения изготавливаемых поглотителей от угла падения ЭМИ на их поверхность [20].

3. Заполнение каждой ячейки трафарета нормированными по массе порциями алюминиевой стружки.

4. Извлечение трафарета с поверхности фрагмента синтетического нетканого волокнистого материала.

5. Размещение поверх сформированных в результате операций 2–4 элементов на основе алюминиевой стружки (рисунок 1.1) второго из фрагментов, полученных в результате реализации операции 1.



Рисунок 1.1 – Внешний вид сверху элементов, сформированных из алюминиевой стружки и размещенных на поверхности фрагмента синтетического нетканого волокнистого материала

6. Термопрессование конструкции, полученной в результате реализации операций 1–5 при температуре $\sim 250,0^\circ\text{C}$ (т. е. при температуре, соответствующей температуре плавления синтетического нетканого волокнистого материала).

Таблица 1.1 – Характеристики изготовленных образцов поглотителей ЭМИ

Наименование образца	Расстояние между элементами, образующими второй слой образца, м	Ширина элементов, образующих второй слой образца, м	Масса на единицу площади образца, кг/м ²
Образцы поглотителей № 1	0,03	0,03	0,74
Образцы поглотителей № 2		0,06	0,96
Образцы поглотителей № 3		0,09	1,08

7. Откраивание от рулона фольгированной полимерной пленки одного фрагмента, длина, ширина и форма которого соответствуют длине, ширине и форме фрагментов, полученных в результате реализации операции 1.

8. Закрепление фрагмента, полученного в результате реализации операции 7, на одной из поверхностей конструкции, полученной в результате реализации операций 1–6, с помощью распыляемого клея.

В структуру поглотителей ЭМИ, изготовленных в соответствии с представленной технологией, входят четыре слоя. Первый и третий слои (относительно источника ЭМИ) – на основе синтетического нетканого волокнистого материала, второй – на основе упорядоченно расположенных элементов, сформированных из алюминиевой стружки, четвертый – на основе фольгированной полимерной пленки.

Для выполнения экспериментального обоснования разработанной технологии было реализовано следующее.

1. В соответствии с разработанной технологией были изготовлены образцы поглотителей ЭМИ. В таблице 1.1 представлены характеристики этих образцов.

2. Проведены измерения значений коэффициентов отражения и передачи ЭМИ по мощности (соответственно, S_{11} , дБ, и S_{21} , дБ) в диапазоне частот 2,0–17,0 ГГц изготовленных образцов поглотителей согласно методике, представленной в монографии [6, с. 32–34], и в соответствии с алгоритмом, приведенном в работе [21].

3. На основе результатов проведенных измерений выполнен расчет значений коэффициента поглощения ЭМИ (A) в диапазоне частот 2,0–17,0 ГГц изготовленных образцов поглотителей в соответствии с алгоритмом, приведенном в работе [21], и с использованием следующей формулы:

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

2 Результаты и их обсуждение

На рисунке 2.1 представлены частотные зависимости коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне 2,0–17,0 ГГц изготовленных образцов поглотителей.

Из рисунка 2.1 видно, что значения коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне частот 2,0–17,0 ГГц образцов поглотителей № 1, № 2 и № 3 изменяются соответственно в следующих пределах:

- от 0,08 отн. ед. до 0,85 отн. ед.;
- от 0,1 отн. ед. до 0,9 отн. ед.;
- от 0,1 отн. ед. до 0,94 отн. ед.

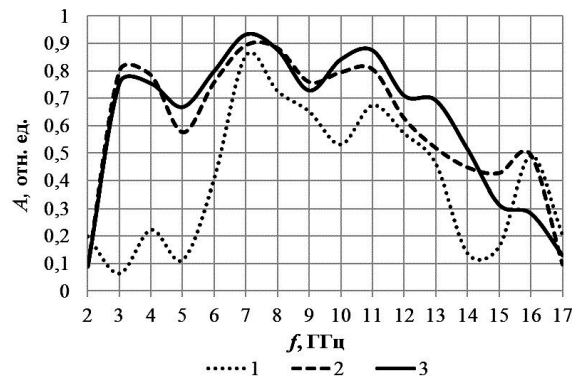


Рисунок 2.1 – Частотные зависимости коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне 2,0–17,0 ГГц образцов поглотителей № 1 (кривая 1), № 2 (кривая 2) и № 3 (кривая 3)

Диазоны эффективных полос поглощения ЭМИ образцов поглотителей № 1, № 2 и № 3 (т. е. диапазоны частот ЭМИ, в которых значения коэффициента поглощения ЭМИ перечисленных образцов составляют более 0,5 отн. ед. [22]) соответственно следующие:

- от 6,2 ГГц до 12,8 ГГц;
- от 2,5 ГГц до 13,0 ГГц;
- от 2,5 ГГц до 14,0 ГГц.

Значения ширины эффективных полос поглощения ЭМИ образцов поглотителей № 1, № 2 и № 3 соответственно составляют ~ 69,0 %, ~ 136,0 % и ~ 140,0 %, на основании чего можно заключить, что эти поглотители являются широкополосными. Таким образом, при увеличении с 0,03 м до 0,06 м или 0,09 м ширины элементов, образующих второй слой поглотителей ЭМИ, изготовленных в соответствии с разработанной методикой, можно обеспечить увеличение в 2,0 раза ширину их эффективной ширины полосы поглощения, что обусловлено увеличением в 2,0 или 4,5 раза количества содержащейся в этом слое алюминиевой стружки, обеспечивающей поглощение энергии ЭМИ [16].

Из рисунка 2.1 также видно, что характеристики поглощения ЭМИ в эффективных полосах поглощения изготовленных образцов имеют максимумы. Характеристика поглощения ЭМИ в эффективной полосе поглощения образцов поглотителей № 1 имеет два максимума. Значения точек этих максимумов – 7,0 ГГц и 11,0 ГГц,

значения этих максимумов – 0,85 отн. ед. и 0,68 отн. ед. соответственно. Характеристики поглощения ЭМИ в эффективной полосе поглощения образцов поглотителей № 2 и 3 имеют три максимума. Значения точек максимума этих характеристик – 3,5 ГГц, 7,0 ГГц и 11,0 ГГц. Значения соответствующих этим точкам максимумов у характеристики поглощения ЭМИ образцов поглотителей № 2 – 0,82 отн. ед., 0,9 отн. ед., 0,8 отн. ед., а у характеристики поглощения ЭМИ образцов поглотителей № 3 – 0,78 отн. ед., 0,94 отн. ед., 0,88 отн. ед. Максимумы характеристик поглощения ЭМИ изготовленных образцов обусловлены резонансным снижением коэффициента отражения ЭМИ (R) последних на частотах, равных значениям точек максимума (рисунок 2.2).

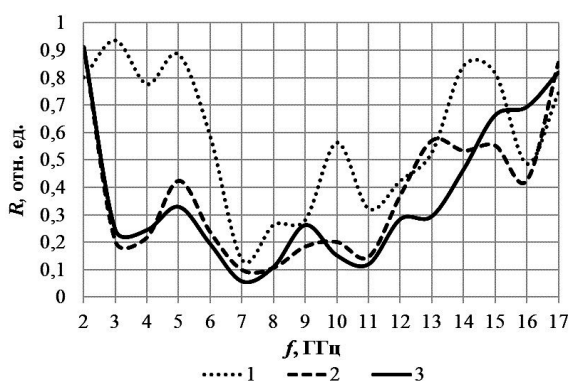


Рисунок 2.2 – Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 2,0–17,0 ГГц образцов поглотителей № 1 (кривая 1), № 2 (кривая 2) и № 3 (кривая 3)

Из рисунка 2.2 видно, что образцы поглотителей № 1 обеспечивает резонансное снижение энергии отражаемого от них ЭМИ на частотах 7,0 ГГц и 11,0 ГГц, а образцы поглотителей № 2 и № 3 обеспечивают резонансное снижение энергии отражаемого от них ЭМИ на частотах 3,5 ГГц, 7,0 ГГц и 11,0 ГГц. Это явление обусловлено тем, что перечисленным частотам соответствуют наибольшие значения разности между фазой ЭМИ, отраженного от поверхностей элементов из алюминиевой стружки, входящих в структуру второго слоя поглотителей, и фазой ЭМИ, отраженного от поверхности фольгированной полимерной пленки, на основе которой сформирован четвертый слой поглотителей [23]. Наибольшие значения характеристик поглощения ЭМИ изготовленных образцов соответствуют частоте 7,0 ГГц, исходя из чего можно заключить, что на этой частоте значения указанной разности у них выше, чем на других частотах, равных значениям точек максимума их характеристик поглощения ЭМИ.

Среднее значение коэффициента поглощения ЭМИ в эффективной полосе поглощения образцов поглотителей № 1 составляет 0,64 отн.

ед., а образцов поглотителей № 2 и № 3 – 0,73 отн. ед. и 0,79 отн. ед. соответственно. Более низкие значения коэффициента поглощения ЭМИ образцов поглотителей № 3 по сравнению с образцами поглотителей № 1 и № 2 обусловлено более низкими значениями коэффициента отражения ЭМИ первых по сравнению со вторыми. Это связано со следующими особенностями:

1. Поглотители ЭМИ, изготовленные в соответствии с разработанной технологией, могут быть условно разделены на элементарные многослойные ячейки, в структуру второго слоя каждой из которых входит один элемент из алюминиевой стружки и зазор между этим элементом и соседним к нему.

2. Эквивалентом элемента из алюминиевой стружки является совокупность катушек индуктивности, соединенных параллельно друг с другом (количество катушек индуктивности соответствует количеству стружки), эквивалентом зазора между этим элементом и соседним к нему является конденсатор, соединенный с указанными катушками последовательно [24, с. 66] (емкость конденсатора прямо пропорциональна отношению толщины элемента к расстоянию между этим элементом и соседним к нему [25]), а эквивалентом фрагмента фольгированного полимерного материала является резистор [25] (см. рисунок 2.3; использованный на рисунке 2.3 индекс « n » соответствует количеству алюминиевой стружки, содержащейся в сформированном из нее элементе, входящем в структуру второго слоя элементарной многослойной ячейки поглотителя ЭМИ, изготовленного в соответствии с разработанной технологией).

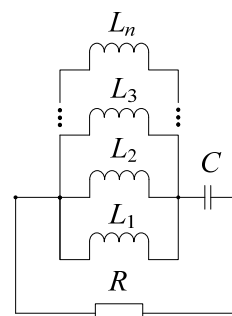


Рисунок 2.3 – Эквивалентная электрическая схема элементарной многослойной ячейки поглотителя ЭМИ, изготовленного в соответствии с разработанной технологией

3. Увеличение размера элемента из алюминиевой стружки, входящего в структуру второго слоя элементарной многослойной ячейки поглотителя ЭМИ, изготовленного в соответствии с разработанной технологией, обуславливает уменьшение суммарной емкости катушек индуктивности, соединенных параллельно друг с другом и входящих в эквивалентную электрическую

схему этой ячейки ($L_{\text{сум}}$), что связано с увеличением количества алюминиевой стружки. Это видно из нижепредставленной формулы (2.1), используемой для расчета суммарной емкости катушек индуктивности, соединенных параллельно друг с другом:

$$\frac{1}{L_{\text{сум}}} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} + \dots + \frac{1}{L_n}. \quad (2.1)$$

4. Уменьшение суммарной емкости катушек индуктивности, входящих в эквивалентную электрическую схему элементарной многослойной ячейки поглотителя ЭМИ, изготовленного в соответствии с разработанной технологией, обуславливает уменьшение волнового сопротивления этой ячейки ($Z_{\text{ин}}$), что видно из нижепредставленной формулы (2.2) [25]:

$$\frac{1}{Z_{\text{ин}}} = \frac{1}{2\pi f L_{\text{сум}} + \frac{1}{2\pi f C}} + \frac{1}{R}. \quad (2.2)$$

5. Уменьшение волнового сопротивления элементарной многослойной ячейки поглотителя ЭМИ, изготовленного в соответствии с разработанной технологией, обуславливает уменьшение волнового сопротивления этого поглотителя в целом, что в свою очередь обуславливает снижение значения его коэффициента отражения ЭМИ. Это видно из нижепредставленной формулы (2.3) [25]:

$$S_{11} = \frac{Z_{\text{ин}} - Z_0}{Z_{\text{ин}} + Z_0} = 1 - \frac{2Z_0}{Z_{\text{ин}} + Z_0}, \quad (2.3)$$

где Z_0 – волновое сопротивление воздуха.

Таким образом, при увеличении с 0,03 м до 0,06 м или 0,09 м ширины элементов, образующих второй слой поглотителей ЭМИ, изготовленных в соответствии с разработанной методикой, можно обеспечить увеличение с двух до трех количества точек максимума их характеристик поглощения ЭМИ в диапазоне частот 2,0–17,0 ГГц, что обусловлено возникновением эффекта резонансного снижения энергии отражаемого от этих поглотителей ЭМИ на частоте 3,5 ГГц. Кроме того, при увеличении с 0,03 м до 0,06 м или 0,09 м ширины элементов, образующих второй слой поглотителей ЭМИ, изготовленных в соответствии с разработанной методикой, можно обеспечить увеличение соответственно на 0,09 отн. ед. или 0,15 отн. ед. среднего значения их коэффициента поглощения ЭМИ в эффективной полосе поглощения, что обусловлено снижением волнового сопротивления этих поглотителей за счет увеличения в 2,0 или 4,5 раза количества содержащейся в указанном слое алюминиевой стружки, эквивалентом которой является совокупность катушек индуктивности, соединенных параллельно друг с другом.

Значения коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне частот 2,0–17,0 ГГц поглотителей, изготовленных в соответствии с разработанной методикой, на 0,05–0,4 отн. ед. выше, чем значения

коэффициента поглощения ЭМИ в этом диапазоне частот поглотителей, изготовленных путем прессования двух одинаковых фрагментов синтетического нетканого волокнистого материала и дальнейшего закрепления фрагмента фольгированной полимерной пленки на одной из поверхностей полученной в результате этого структуры (рисунок 2.4).

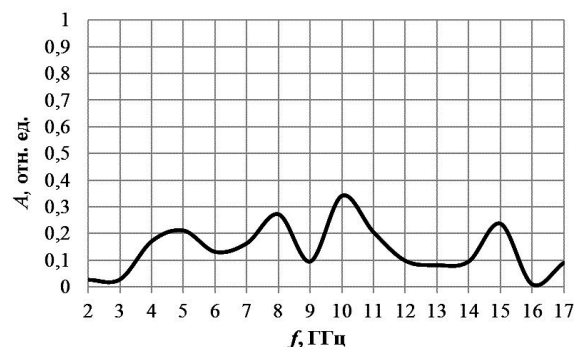


Рисунок 2.4 – Частотная зависимость коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне 2,0–17,0 ГГц образца поглотителя, содержащего два спрессованных фрагмента синтетического нетканого волокнистого материала и фрагмент фольгированной полимерной пленки

Заключение

Таким образом, в соответствии с разработанной технологией могут изготавливаться многослойные поглотители ЭМИ, характеризующиеся гибкостью, низкой стоимостью и широкополосностью. Гибкость этих поглотителей обусловлена тем, что их первый и третий слои выполнены на основе синтетического нетканого волокнистого материала, а четвертый – на основе фольгированной полимерной пленки. Низкая стоимость поглотителей обусловлена тем, что в их состав входит алюминиевая стружка, являющаяся отходом производства. Широкополосность этих поглотителей обусловлена их многослойностью, а также наличием в их структуре слоя в виде совокупности расположенных с одинаковым шагом одинаковых элементов, сформированных из алюминиевой стружки. Как показано по результатам экспериментального обоснования разработанной технологии, ширина эффективной полосы поглощения изготовленных в соответствии с ней поглотителей ЭМИ составляет 140,0 % при условии, что ширина входящих в структуру этих поглотителей элементов из алюминиевой стружки составляет 9,0 см.

Поглотители ЭМИ, изготовленные в соответствии с разработанной технологией, могут использоваться для создания ширм, предназначенных для экранирования оконных проемов помещений, в которых располагаются приборы электронной техники, чувствительные к воздействию электромагнитных помех СВЧ-диапазона.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Design and Manufacture of Electromagnetic Absorber Composed of Boric Acid-Incorporated Wastepaper Composites* / A.I. Kaya [et al.] // Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences. – 2022. – Vol. 30, iss. 3. – Article 23.
2. *A Low-Cost Lightweight Microwave Absorber: Silicon Carbide Synthesized from Tissue* / R. Tan [et al.] // Ceramics International. – 2021. – Vol. 47, iss. 2. – P. 2077–2085.
3. *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 Management. – 2021. – Vol. 119. – P. 91–100.
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 // Journal of Materials Science: Materials in Electronics. – 2022. – Vol. 33, № 19. – P. 13398–13407.
5. *Bin Lailan, N.H.H. Electromagnetic Wave Absorbing Performance of Activated Carbon Based Agricultural Waste – A Review* / N.H.H. bin Lailan, F.M. Idris // Proceeding Insan Junior Researchers International Conference 2021 (iJURECON 2021), Malaysia, 15–17 October 2021. – P. 95–98.
6. *Ayad, H. Electromagnetic Shields Based on Powdered Coal-Containing Materials* / H. Ayad, O. Boiprav, L. Lynkou; under the general edition of L. Lynkou. – Minsk: Bestprint, 2020. – 122 p.
7. *Microwave Absorption Property of Coffee Waste Bio-Carbon Modified by Industrial Waste MnFe₂O₄ Particles* / H. Ali [et al.] // Journal of Materials Research and Technology. – 2020. – Vol. 9, iss. 6. – P. 12869–12879.
8. *Malek, F. Pyramidal Microwave Absorber Design From Waste Material Using Rice Husk and Rubber Tire Dust* / F. Malek, H. Normikman, O. Nadiyah // Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering. – 2015. – Vol. 4, iss. 1. – P. 23–30.
9. *Kumar Dash, A. Development of Microwave Absorbing Material with Organic Waste based Epoxy Blended Composite* / A. Kumar Dash, G. Nath // Indian Journal of Pure & Applied Physics. – 2022. – Vol. 60. – P. 482–488.
10. *Gupta, S. Agricultural Waste Based-Coco Peat and Coconut Shell Activated Carbon Microwave Absorber* / S. Gupta, G. Deep // 2016 IEEE MTT-S International Microwave and RF Conference (IMaRC), India, 5–9 December 2016. – P. 1–4. – DOI: 10.1109/IMaRC.2016.7939621.
11. *Microwave Absorption Ability of Steel Slag and Road Performance of Asphalt Mixtures Incorporating Steel Slag* / B. Lou // Materials. – 2020. – Vol. 13, № 3. – Article 663.
12. *Радиоэкранирующие модульные конструкции на основе порошкообразных материалов* / М.Р.Н. Неамах [и др.]; под редакцией Л.М. Лынькова. – Минск: Бестпринт, 2013. – 182 с.
13. *Glass Foam Composites Based on Tire's Waste for Microwave Absorption Application* / Y. Lamri [et al.] // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2020. – Vol. 537. – Article 120017.
14. *An Ecofriendly, Cost-Effective, Lightweight Microwave Absorber Based on Waste Toner* / H. Habib // Journal of Electronic Materials. – 2021. – Vol. 50. – P. 2049–2056.
15. *Development of E-Waste Based Composite Microwave Absorbing Material* / A. Verma // Defence Science Journal. – 2021. – Vol. 71, № 3. – P. 365–371.
16. *Broadband Reflectionless Metasheets: Frequency-Selective Transmission and Perfect Absorption* / V. S. Asadchy [et al.] // Physical Review X. – 2015. – Vol. 5, iss. 3. – Article 031005.
17. *Боїправ, О.В. Усовершенствованная технология изготовления частотно-селективных электромагнитных экранов СВЧ-диапазона, содержащих спиралевидные элементы* / О.В. Бойправ, Н.В. Богущ // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. – 2023. – Т. 26, № 1. – С. 46–55.
18. *Anwar, R.S. Frequency Selective Surfaces: A Review* / R.S. Anwar, L. Mao, H. Ning // Applied Sciences. – 2018. – Vol. 8, № 9. – Article 1689.
19. *Avinash. Low-Cost Electromagnetic Absorbers for Shield Packaging* / Avinash, N. Gupta // IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. – 2023. – Vol. 13, № 3. – P. 374–381.
20. *Singh, A. Quad-Band FSS for Electromagnetic Shielding* / A. Singh, C. Singh // International Journal of Computer Communication and Informatics. – 2021. – Vol. 3, iss. 1. – P. 1–14.
21. *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), Tunisia, 19–21 December 2021. – P. 299–304.
22. *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.
23. *Gaoui, B. Enhancement of the Shielding Effectiveness of Multilayer Materials by Gradient Thickness in the Stacked Layers* / B. Gaoui, A. Hadjadj, M. Kious // Journal of Materials Science: Materials in Electronics. – 2017. – Vol. 28. – P. 11292–11299.
24. *Бей, Н.А. Антенны систем спутниковой связи и навигации* / Н.А. Бей, В.А. Вечтомов, В.Н. Зимин. – Москва: Рудомино, 2010. – 220 с.
25. *Makalesi, A. An Easily Optimizable Frequency Selective Absorber Design for X-Band* / A. Makalesi // Afyon Kocatepe University Journal of Science and Engineering. – 2022. – Vol. 22. – P. 136–141.

Поступила в редакцию 05.10.2023.

Информация об авторах

Бойправ Ольга Владимировна – к.т.н., доцент
 Челябинский Владислав Сергеевич – студент
 Лыньков Леонид Михайлович – д.т.н., профессор
 Тумилович Мирослав Викторович – д.т.н., доцент