

**О. В. Бойправ, Е. С. Белоусова, Д. В. Бордиловская**

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
Минск, Республика Беларусь*

## **ГЕТЕРОГЕННЫЕ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ПОРОШКООБРАЗНЫХ УГЛЕЙ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ПРИБОРОВ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ**

**Аннотация.** Представлены результаты теоретического и экспериментального обоснований разработанной авторами методики изготовления гетерогенных (двух- или трехслойных) радиопоглощающих композиционных материалов на основе порошкообразных углей. Методика основана на послойной заливке в формы смесей гипсового связующего вещества и порошкообразного угля (березового неактивированного, березового активированного, кокосового активированного) в очередности, при которой наружный (относительно фронта распространения электромагнитного излучения) слой композиционного материала характеризуется наименьшим волновым сопротивлением, а внутренний – наибольшим волновым сопротивлением. Указанная очередность определена по результатам теоретического обоснования разработанной методики. В ходе ее экспериментального обоснования установлены закономерности изменения значений коэффициентов отражения и передачи электромагнитного излучения изготовленных материалов в зависимости от значения частоты этого излучения в диапазоне 0,7–17,0 ГГц. Исходя из установленных закономерностей констатировано, что минимальное значение коэффициента отражения электромагнитного излучения изготовленных согласно разработанной и обоснованной методике двуслойных материалов (толщина ~ 5,0 мм) составляет  $-12,0 \pm 1,0$  дБ и соответствует частотам электромагнитного излучения 0,8 и 2,6 ГГц (при условии, если такие материалы закреплены на металлических подложках). Минимальное значение коэффициента отражения электромагнитного излучения полученных трехслойных материалов (толщина ~ 10,0 мм) при указанном условии также составляет  $-12,0 \pm 1,0$  дБ и соответствует частотам электромагнитного излучения 4,5 и 6,0 ГГц. Значения коэффициента передачи электромагнитного излучения таких материалов уменьшаются со средним шагом 4,0 дБ по мере увеличения на 1,0 ГГц частоты этого излучения в диапазоне 2,0–10,0 ГГц и увеличиваются с аналогичным шагом по мере увеличения на 1,0 ГГц частоты в диапазоне 10,0–17,0 ГГц. Минимальное значение составляет  $-30,0 \pm 2,0$  дБ. Изготовленные согласно разработанной и обоснованной методике материалы представляются перспективными для обеспечения защиты приборов электронной техники от воздействия электромагнитных помех (как активного, так и пассивного типов).

**Ключевые слова:** коэффициент отражения, коэффициент передачи, порошкообразный уголь, радиопоглощающий материал, электромагнитное излучение

**Для цитирования:** Бойправ, О. В. Гетерогенные радиопоглощающие композиционные материалы на основе порошкообразных углей для защиты приборов электронной техники от воздействия электромагнитных помех / О. В. Бойправ, Е. С. Белоусова, Д. В. Бордиловская // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2022. – Т. 67, № 4. – С. 360–369. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-4-360-369>

**Olga V. Boiprav, Elena S. Belousova, Daniela V. Bordilovskaya**

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus*

## **HETEROGENEOUS RADIO ABSORBING COMPOSITE MATERIALS BASED ON POWDERED CHARCOALS FOR ELECTRONIC DEVICES PROTECTION FROM THE ELECTROMAGNETIC RADIATION IMPACT**

**Abstract.** The results of theoretical and experimental substantiation of the technique developed by the authors for the manufacture of heterogeneous (two- or three-layer) radio absorbing composite materials based on powdered charcoals are presented. The technique is based on layer-by-layer pouring of mixtures of a gypsum binder and powdered charcoal (non-activated birch, activated birch, activated coconut) into molds in the order in which the outer (relative to the electromagnetic radiation propagation front) layer of the composite material is characterized by the lowest wave resistance, and the inner layer is characterized by the highest wave resistance. The specified order is determined by the results of the theoretical substantiation of the developed technique. In the course of its experimental substantiation, regularities for changing the electromagnetic radiation reflection and transmission coefficients values of the manufactured materials depending on the value of the radiation frequency in the range of 0.7–17.0 GHz have been established. Based on the established regularities, it was stated that the min-

imum value of the electromagnetic radiation reflection coefficient of the two-layer materials manufactured according to the developed and substantiated technique (thickness  $\sim 5.0$  mm) is  $-12.0 \pm 1.0$  dB and corresponds to electromagnetic radiation frequencies of 0.8 and 2.6 GHz (it's provided, when such materials are fixed on metal substrates). The minimum value of the electromagnetic radiation reflection coefficient of the three-layer materials (thickness  $\sim 10.0$  mm) under the specified condition is also  $-12.0 \pm 1.0$  dB and corresponds to electromagnetic radiation frequencies of 4.5 and 6.0 GHz. The electromagnetic radiation transmission coefficient values of such materials decrease with an average step of 4.0 dB as the frequency of the radiation increases by 1.0 GHz in the range of 2.0–10.0 GHz and increase with a similar step as the frequency increases by 1.0 GHz in the range of 10.0–17.0 GHz. The minimum value is  $-30.0 \pm 2.0$  dB. The materials manufactured according to the developed and substantiated technique seem to be promising for ensuring the protection of electronic devices from the effects of electromagnetic interference (both active and passive types).

**Keywords:** reflection coefficient, transmission coefficient, powdered charcoal, radio absorbing material, electromagnetic radiation

**For citation:** Boiprav O. V., Belousova E. S., Bordilovskaya D. V. Heterogeneous radio absorbing composite materials based on powdered charcoals for electronic devices protection from the electromagnetic radiation impact. *Vestsi Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2022, vol. 67, no. 4, pp. 360–369 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-4-360-369>

**Введение.** Защита приборов электронной техники от воздействия электромагнитных помех – задача, решаемая для нужд практической деятельности в рамках таких направлений, как:

разработка радиоизмерительной аппаратуры (обеспечение требуемых характеристик измерительных антенн и/или заданного уровня собственных электромагнитных шумов разрабатываемой аппаратуры) [1, 2];

проведение радиоизмерений (снижение вероятности возникновения случайной погрешности измерений, обусловленной изменениями уровней электромагнитного фона в помещениях, где проводятся измерения) [3, 4];

создание летательных аппаратов и электромобилей (создание условий для электромагнитной совместимости бортовой аппаратуры) [5–7];

обеспечение информационной безопасности (поддержание целостности информации, обрабатываемой средствами вычислительной техники, или информационных сигналов, передаваемых по каналам связи, как проводным, так и беспроводным) [8–10].

Решение обозначенной задачи, как правило, реализуется за счет использования радиопоглощающих материалов, которые обеспечивают ослабление энергии электромагнитного излучения в СВЧ-диапазоне и характеризуются при этом низкими (по сравнению с металлическими листовыми или сетчатыми материалами) значениями коэффициента отражения электромагнитного излучения в указанном диапазоне частот. Обозначенная характеристика рассматриваемых материалов обусловлена необходимостью снижения уровня риска, возникающего при эксплуатации приборов электронной техники и связанного с повышением энергии пассивных (переотраженных) электромагнитных помех в местах расположения данного оборудования. Современные радиопоглощающие материалы с низким коэффициентом отражения электромагнитного излучения являются композиционными и изготавливаются путем комбинирования в определенных пропорциях компонентов, обеспечивающих ослабление энергии электромагнитного излучения (волокнистые или дисперсные материалы, характеризующиеся высокими значениями удельной электропроводности и/или магнитной проницаемости), и условий, обуславливающих для изготавливаемых материалов определенные эксплуатационные свойства (температура и влажность окружающей среды). Путем регулирования пропорций, в которых комбинируются указанные компоненты, можно обеспечивать требуемые параметры (значения коэффициентов отражения и передачи электромагнитного излучения, границы рабочего диапазона частот) изготавливаемых композиционных радиопоглощающих материалов [1, 11–13].

В настоящее время для создания радиопоглощающих материалов широко используются углеродосодержащие компоненты (графит, графен, углеродные нанотрубки) [1, 2, 14–18]. Это связано с тем, что такие материалы обеспечивают высокий уровень потерь энергии взаимодействующего с ними электромагнитного излучения в широком диапазоне частот. Основным недостатком радиопоглощающих материалов на основе перечисленных углеродосодержащих компонентов связан с высокой стоимостью последних. В связи с этим в настоящее время авторами статьи проводятся исследования, направленные на поиск углеродосодержащих компонентов,

перспективных для изготовления радиопоглощающих материалов и характеризующихся более низкой стоимостью по сравнению с применяемыми в настоящее время компонентами. Так, в [19] рассмотрены результаты экспериментального обоснования перспективности использования производимых в настоящее время на промышленной основе порошкообразных углей (березовый неактивированный, березовый активированный, кокосовый активированный) для изготовления радиопоглощающих материалов.

*Цель настоящего исследования* – теоретическое и экспериментальное обоснование методики изготовления гетерогенных (двух- или трехслойных) радиопоглощающих композиционных материалов на основе производимых в настоящее время на промышленной основе порошкообразных углей (березовый неактивированный, березовый активированный, кокосовый активированный).

В ходе достижения поставленной цели были решены следующие пять задач:

1) теоретическое обоснование связующего вещества для изготовления материалов и очередности использования порошкообразных углей обозначенных разновидностей в ходе формирования слоев материалов;

2) выбор оборудования и оснастки, необходимых для изготовления материалов;

3) документирование разработанной методики;

4) изготовление экспериментальных образцов материалов в соответствии с разработанной методикой;

5) установление закономерностей изменения значений коэффициентов отражения и передачи электромагнитного излучения изготовленных экспериментальных образцов в зависимости от принадлежащего диапазону 0,7–17,0 ГГц значения частоты этого излучения.

**Методика изготовления и исследования материалов.** По результатам решения первой из обозначенных задач [19] было определено, что для изготовления радиопоглощающих композиционных материалов на основе порошкообразных углей наиболее целесообразно использовать в качестве связующего вещества гипсовое вяжущее, что обусловлено его следующими преимуществами по сравнению с другими связующими, используемыми в настоящее время [20]:

низкая стоимость (при условии, что наполнитель(и) композиционного материала характеризуется(ются) сопоставимой стоимостью);

невысокая длительность затвердевания при стандартных условиях, что определяет невысокую технологическую сложность процесса изготовления материала с применением данного связующего вещества.

Также в ходе решения первой задачи установлено, что для обеспечения согласования волнового сопротивления гетерогенных радиопоглощающих композиционных материалов на основе порошкообразных углей необходимо для формирования их наружного (относительно фронта распространения электромагнитного излучения) слоя использовать порошкообразный уголь, который характеризуется наименьшим значением удельной электропроводности. Волновое сопротивление каждого последующего (относительно фронта распространения электромагнитного излучения) слоя должно увеличиваться [21].

На основе результатов исследований, представленных в [19, с. 36], было определено, что из всех производимых в настоящее время на промышленной основе порошкообразных углей наименьшими величинами удельной электропроводности характеризуется березовый неактивированный древесный уголь, а наибольшими – березовый активированный древесный уголь. Удельная электропроводность кокосового активированного угля выше, чем у березового неактивированного, но ниже, чем у березового активированного угля. Значения этих величин зависят от температуры получения угля, а также от длительности этого процесса (то есть от длительности оказываемого на уголь высокотемпературного воздействия). В связи с этим было установлено, что для обеспечения наибольшего согласования волнового сопротивления поверхности гетерогенного (двух- или трехслойных) радиопоглощающего композиционного материала с волновым сопротивлением воздуха (первичная среда распространения электромагнитного излучения) его наружный (относительно фронта распространения электромагнитного излучения) слой необходимо формировать на основе березового неактивированного древесного угля, а внутренний – на основе березового активированного.

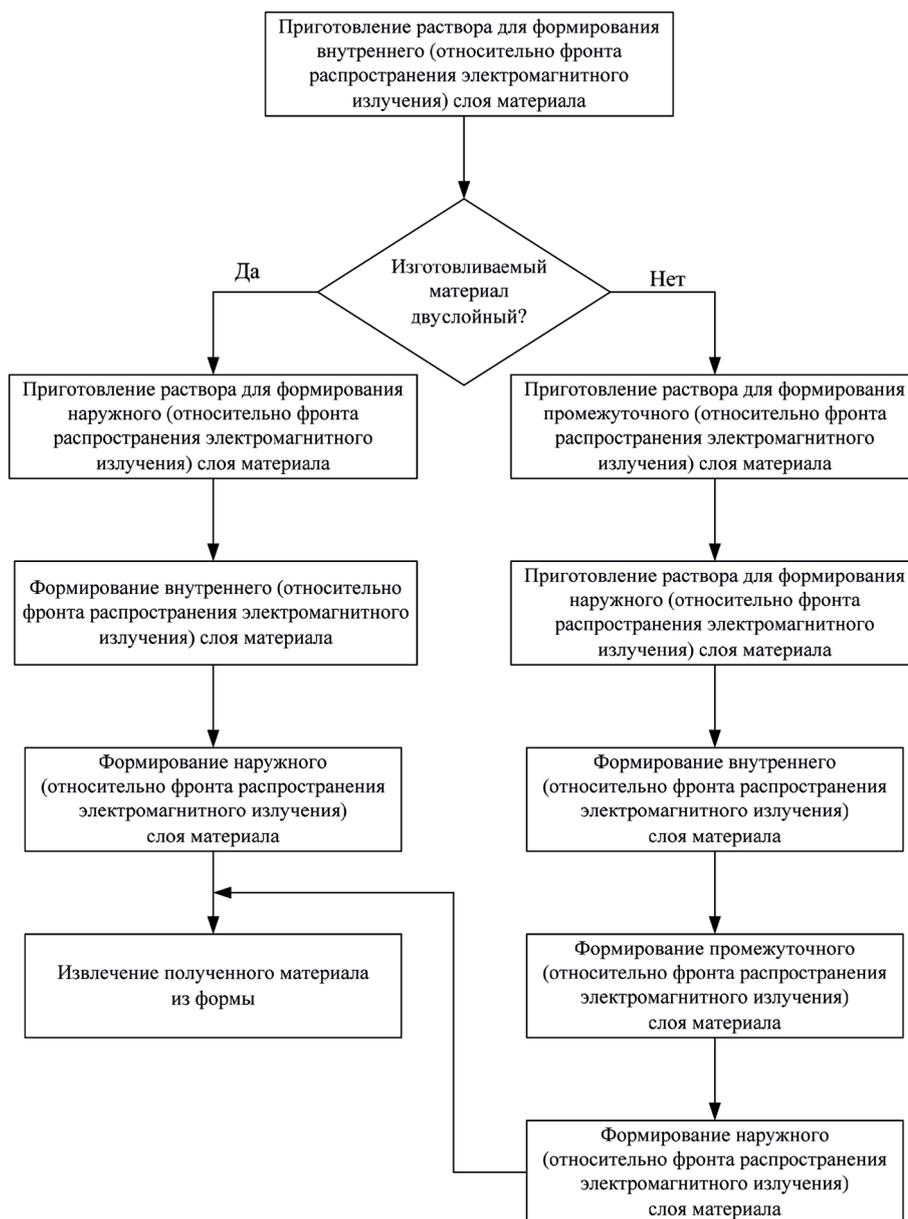


Рис. 1. Схема алгоритма действий в рамках разработанной методики  
 Fig. 1. The scheme of the actions algorithm within the framework of the developed technique

Согласно результатам решения второй из обозначенных задач было определено, что для изготовления радиопоглощающих композиционных материалов на основе выбранных компонентов необходимо использовать мерные емкости (с целью подготовки компонентов растворов, предназначенных для формирования слоев изготавливаемых материалов), строительный миксер (чтобы смешивать компоненты растворов, предназначенные для формирования слоев изготавливаемых материалов), гибкие полимерные формы (для обеспечения требуемых размеров изготавливаемых материалов), эталонный конус, соответствующий ГОСТ 5802-86 «Растворы строительные. Методы испытаний» (с целью определения высоты уровня растворов).

По результатам решения третьей задачи было определено, что алгоритм действий в рамках разработанной методики является ветвящимся. Схема этого алгоритма представлена на рис. 1.

Разработанная методика изготовления гетерогенных радиопоглощающих композиционных материалов на основе порошкообразных углей включает в себя восемь этапов.

*Этап 1.* Приготовление раствора для формирования внутреннего (относительно фронта распространения электромагнитного излучения) слоя материала путем смешивания с помощью

строительного миксера порошкообразного березового активированного угля, гипсового вяжущего и воды в оптимальном объемном соотношении. Авторами экспериментальным путем было установлено, что оптимальным объемным соотношением, в котором необходимо смешивать указанные ингредиенты при изготовлении гетерогенных радиопоглощающих композиционных материалов на основе порошкообразных углей, является 2 : 3 : 10. Используемый при этом критерий – одновременное выполнение двух условий:

1) поверхность материала, получаемого в результате нанесения на подложку слоем толщиной  $3,0 \pm 1,0$  мм приготовленного раствора и дальнейшего его высушивания, характеризуется отсутствием трещин;

2) в состав материала входит наибольшее количество порошкообразного угля (по сравнению с другими материалами на основе рассматриваемого раствора, для которых выполнимо условие 1).

*Этап 2.* Если изготавливаемый материал является двухслойным, то приготовление раствора для формирования наружного (относительно фронта распространения электромагнитного излучения) слоя путем смешивания с помощью строительного миксера порошкообразного березового неактивированного угля, гипсового вяжущего и воды в оптимальном объемном соотношении.

Если изготавливаемый материал трехслойный, то приготовление раствора для формирования промежуточного (относительно фронта распространения электромагнитного излучения) слоя путем смешивания с помощью строительного миксера порошкообразного кокосового активированного угля, гипсового вяжущего и воды в оптимальном объемном соотношении.

*Этап 3.* При условии, что изготавливаемый материал является трехслойным, приготовление раствора для формирования наружного (относительно фронта распространения электромагнитного излучения) слоя материала путем смешивания с помощью строительного миксера порошкообразного березового неактивированного угля, гипсового вяжущего и воды в оптимальном объемном соотношении.

*Этап 4.* Равномерное распределение полученного в ходе реализации этапа 1 раствора по объему гибкой полимерной формы, высота которой составляет не менее 1,0 см, а длина и ширина определяются требованиями к длине и ширине изготавливаемого композиционного материала (высота уровня раствора после его распределения должна составлять  $3,0 \pm 1,0$  мм и измеряться с помощью эталонного конуса, соответствующего ГОСТ 5802-86).

*Этап 5.* Высушивание раствора в гибкой полимерной форме при стандартных условиях.

*Этап 6.* Если изготавливаемый материал является двухслойным, то равномерное распределение полученного в ходе реализации этапа 2 раствора для формирования наружного (относительно фронта распространения электромагнитных волн) слоя по поверхности находящегося в гибкой полимерной форме высушенного раствора, полученного в результате реализации этапов 1, 4 и 5 (высота уровня раствора после его распределения должна составлять  $3,0 \pm 1,0$  мм и измеряться при этом с помощью эталонного конуса, соответствующего ГОСТ 5802-86).

При условии, что получаемая структура является трехслойной, равномерное распределение полученного в ходе реализации этапа 2 раствора для формирования промежуточного (относительно фронта распространения электромагнитных волн) слоя по поверхности находящегося в гибкой полимерной форме высушенного раствора, полученного в результате реализации этапов 1, 4 и 5 (высота уровня раствора после его распределения должна составлять  $3,0 \pm 1,0$  мм и измеряться при этом с помощью эталонного конуса, соответствующего ГОСТ 5802-86).

*Этап 7.* Высушивание раствора в гибкой полимерной форме при стандартных условиях.

*Этап 8.* Если изготавливаемый материал является двухслойным, то извлечение изготовленного материала из формы.

При условии, что изготавливаемый материал является трехслойным:

этап 8.1 – равномерное распределение полученного в ходе реализации этапа 3 раствора по поверхности находящегося в гибкой полимерной форме высушенного раствора, полученного в результате реализации этапов 2 и 7 (высота уровня раствора после его распределения должна составлять  $3,0 \pm 1,0$  мм);

этап 8.2 – высушивание раствора в форме при стандартных условиях;

этап 8.3 – извлечение изготовленного материала из формы.

По результатам решения четвертой из обозначенных задач согласно разработанной методике были изготовлены партия экспериментальных образцов двухслойных радиопоглощающих композиционных материалов и партия экспериментальных образцов трехслойных радиопоглощающих композиционных материалов. Толщина каждого из экспериментальных образцов двухслойных радиопоглощающих композиционных материалов составляла  $\sim 5,0$  мм, а трехслойных –  $\sim 10,0$  мм.

При решении пятой из обозначенных задач выполнялись измерения значений коэффициентов отражения и передачи электромагнитного излучения в диапазоне частот 0,7–17,0 ГГц экспериментальных образцов материалов, изготовленных согласно разработанной методике [19, с. 31] с использованием панорамного измерителя коэффициентов отражения и передачи SNA 0.01–18. Выбор частотного диапазона для проведения измерений значений коэффициентов отражения и передачи электромагнитного излучения обусловлен тем, что ему соответствуют высокоэнергетические составляющие спектра электромагнитного излучения современных приборов электронной техники [22].

На основе результатов выполненных измерений были построены графики, соответствующие частотным зависимостям коэффициентов отражения и передачи электромагнитного излучения экспериментальных образцов материалов, изготовленных согласно разработанной методике, после чего анализировался характер этих зависимостей.

**Результаты и их обсуждение.** На рис. 2, 3 представлены частотные зависимости коэффициента отражения электромагнитного излучения экспериментальных образцов материалов, изготовленных согласно разработанной методике. Указанные зависимости представлены в двух поддиапазонах (0,7–3,0 ГГц и 3,0–17,0 ГГц) диапазона частот, в котором проводились измерения, в связи с тем, что измерения и аппроксимация значений коэффициентов отражения и передачи электромагнитного излучения с помощью панорамного измерителя SNA 0.01–18 в обозначенных поддиапазонах выполняются с разным шагом: в поддиапазоне 0,7–3,0 ГГц – с шагом 0,009 ГГц, в поддиапазоне 3,0–17,0 ГГц – с шагом 0,059 ГГц.

Из рис. 2 и 3 видно, что значения коэффициента отражения электромагнитного излучения в диапазоне частот 0,7–17,0 ГГц материалов, изготовленных согласно разработанной методике, изменяются в пределах от  $-2,0$  до  $-12,0$  дБ. Двухслойные материалы отражение взаимодействующего с ними излучения в наименьшей степени при условии, если его частота составляет 2,2 и 5,0 ГГц, а трехслойные материалы – если частота последнего равна 1,6, 4,5, 6,0, 10,5 и 11,5 ГГц (указанные значения являются точками минимума частотных зависимостей коэффициента отражения электромагнитного излучения, представленных на рис. 2). Это обусловлено тем, что на указанных частотах разность фаз между электромагнитными волнами, отраженными от границ раздела слоев, является максимальной.

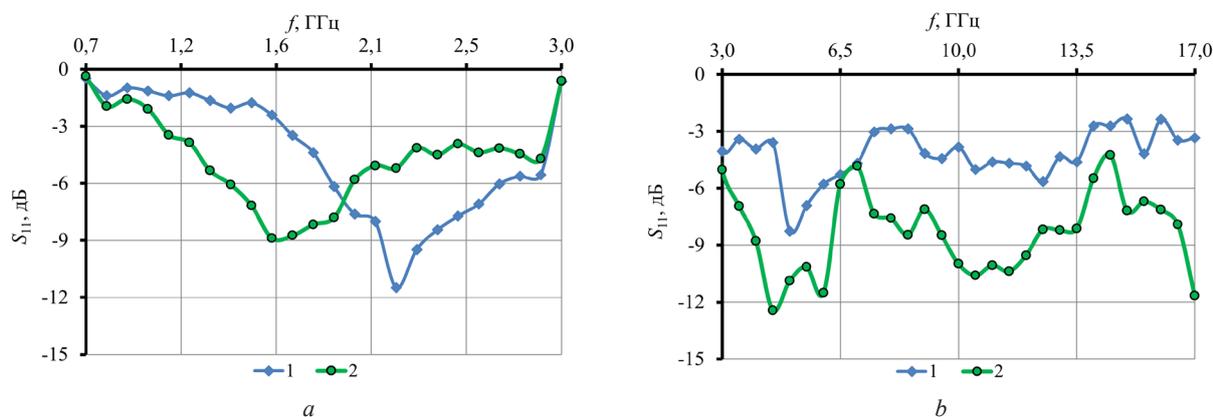


Рис. 2. Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазонах 0,7–3,0 ГГц (а) и 3,0–17,0 ГГц (б) двухслойного (кривая 1) и трехслойного (кривая 2) экспериментальных образцов материалов, изготовленных согласно разработанной методике

Fig. 2. Frequency dependencies of the electromagnetic radiation reflection coefficient in the ranges of 0.7–3.0 GHz (a) and 3.0–17.0 GHz (b) of two-layer (curve 1) and three-layer (curve 2) experimental samples of the materials made according to the developed technique

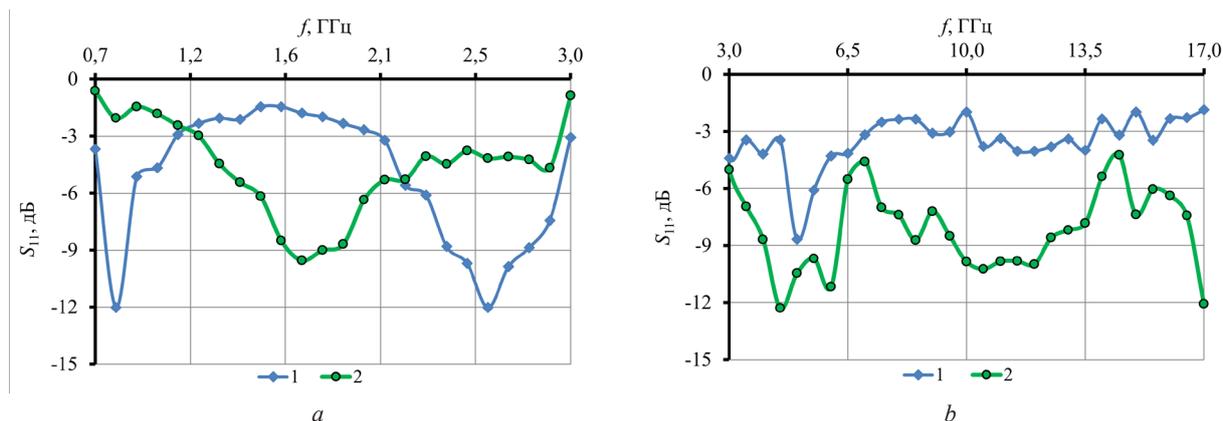


Рис. 3. Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазонах 0,7–3,0 ГГц (*a*) и 3,0–17,0 ГГц (*b*) двуслойного (кривая 1) и трехслойного (кривая 2) экспериментальных образцов материалов, изготовленных согласно разработанной методике и закрепленных на металлических подложках

Fig. 3. Frequency dependencies of the electromagnetic radiation reflection coefficient in the ranges of 0.7–3.0 GHz (*a*) and 3.0–17.0 GHz (*b*) of two-layer (curve 1) and three-layer (curve 2) experimental samples of the materials made according to the developed technique and fixed on the metal plates

Значения и количество точек минимума частотных зависимостей коэффициента отражения электромагнитного излучения в диапазоне 0,7–3,0 ГГц двуслойных материалов, изготовленных согласно разработанной методике и закрепленных на металлических подложках, отличаются от значений и количества точек минимума аналогичных зависимостей, характерных для таких материалов, не закрепленных на металлических подложках. Указанные значения составляют 0,8 и 2,6 ГГц. Отмеченная особенность связана с тем, что в диапазоне частот 0,7–3,0 ГГц энергия отражаемого рассматриваемыми материалами электромагнитного излучения формируется в результате взаимодействия электромагнитных волн, отражаемых от следующих границ раздела: «воздух – наружный (относительно фронта распространения электромагнитного излучения) слой», «наружный (относительно фронта распространения электромагнитного излучения) слой – внутренний (относительно фронта распространения электромагнитного излучения) слой», «внутренний (относительно фронта распространения электромагнитного излучения) слой – металлическая подложка» (в отличие от случая формирования энергии электромагнитного излучения, отражаемого рассматриваемыми материалами, не закрепленными на металлических подложках, при котором отсутствуют волны, отражаемые от границ раздела «внутренний (относительно фронта распространения электромагнитного излучения) слой – металлическая подложка»).

Частотные зависимости коэффициента отражения электромагнитного излучения в диапазоне 2,0–17,0 ГГц, характерные для двуслойных материалов, закрепленных на металлических подложках, и частотные зависимости коэффициента отражения электромагнитного излучения в диапазоне 0,7–17,0 ГГц, типичные для трехслойных материалов, закрепленных на металлических подложках, несущественно отличаются от аналогичных зависимостей, свойственных этим материалам, не закрепленным на металлических подложках. Это обусловлено тем, что энергия электромагнитных волн, которые отражаются от границ раздела «внутренний (относительно фронта распространения электромагнитного излучения) слой – металлическая подложка» и для которых характерны значения частоты, принадлежащие указанным диапазонам, поглощается в толще материалов.

На рис. 4 представлены частотные зависимости коэффициента передачи электромагнитного излучения в диапазоне 0,7–17,0 ГГц экспериментальных образцов материалов, изготовленных по разработанной методике.

Из рис. 4 видно, что значения коэффициента передачи электромагнитного излучения изготовленных по приведенной методике материалов уменьшаются со средним шагом 4,0 дБ по мере роста на 1,0 ГГц частоты этого излучения в диапазоне 2,0–10,0 ГГц и увеличиваются с аналогичным шагом по мере возрастания на 1,0 ГГц частоты этого излучения в диапазоне 10,0–17,0 ГГц. Минимальное из таких значений составляет  $-30,0 \pm 2,0$  дБ. Значения коэффициента передачи электромагнитного излучения в диапазоне частот 0,7–2,0 ГГц таких материалов составляют  $\sim -10,0$  дБ.

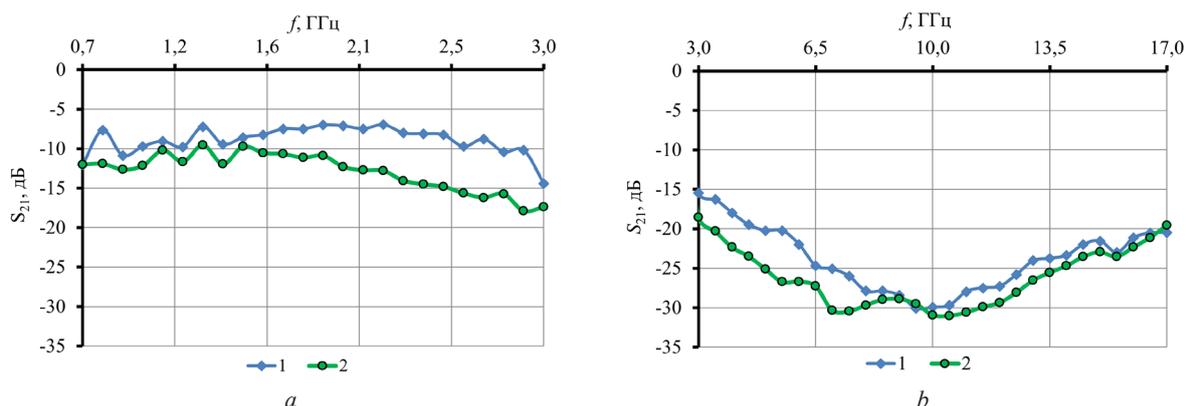


Рис. 4. Частотные зависимости коэффициента передачи ЭМИ в диапазонах 0,7–3,0 ГГц (*a*) и 3,0–17,0 ГГц (*b*) двуслойного (кривая 1) и трехслойного (кривая 2) экспериментальных образцов материалов, изготовленных согласно разработанной методике

Fig. 4. Frequency dependencies of the electromagnetic radiation transmission coefficient in the ranges of 0.7–3.0 GHz (*a*) and 3.0–17.0 GHz (*b*) of two-layer (curve 1) and three-layer (curve 2) experimental samples of the materials made according to the developed technique

Снижение значений коэффициента передачи электромагнитного излучения в диапазоне частот 2,0–10,0 ГГц материалов, изготовленных согласно разработанной методике, может быть обусловлено уменьшением глубины проникновения этого излучения (расстояния, которое проходит электромагнитное излучение в толще материала до момента, когда энергия этого излучения уменьшится в  $e$  раз).

Увеличение значений коэффициента передачи электромагнитного излучения в диапазоне частот 10,0–17,0 ГГц рассматриваемых материалов может быть обусловлено тем, что значения удельной электропроводности порошкообразных углей снижаются с увеличением частоты электромагнитного излучения в указанном диапазоне.

На основе сравнительного анализа характеристик, представленных на рис. 4, можно заключить, что значения коэффициента передачи электромагнитного излучения в диапазоне частот 0,7–17,0 ГГц изучаемых трехслойных материалов на 1,0–5,0 дБ ниже значений аналогичного параметра двуслойных материалов, изготовленных согласно разработанной методике. Это обусловлено тем, что трехслойные материалы, характеризуются бóльшим количеством границ раздела между средами, отличающимися волновым сопротивлением.

**Заключение.** Таким образом, гетерогенные радиопоглощающие композиционные материалы на основе порошкообразных углей, изготовленные согласно разработанной методике, обеспечивают ослабление до 1000 раз энергии взаимодействующего с ними электромагнитного излучения, и потому являются перспективными для использования в целях защиты приборов электронной техники от воздействия активных электромагнитных помех. Для решения этой задачи такие материалы целесообразно закреплять с помощью строительного клея на стенах помещений, где расположены приборы электронной техники, или использовать при изготовлении перегородок, предназначенных для отделения в таких помещениях секторов, в пределах которых установлены эти приборы. Кроме того, полученные в ходе исследования композиционные материалы представляются перспективными для использования с целью снижения энергии пассивных электромагнитных помех, вносимых в работку приборов электронной техники, расположенных в помещениях или секторах помещений, экранированных с помощью металлических листов, так как указанные материалы обеспечивают ослабление до 16 раз энергии электромагнитного излучения, отражаемого от металлических подложек. Для достижения обозначенных целей полученные в ходе исследования композиционные материалы должны закрепляться на поверхностях данных листов.

#### Список использованных источников

1. Dugin, N. Using carbon-based composite materials for manufacturing C-range antenna devices / N. Dugin, T. Zaboronkova, E. Myasnikov // *Latv. J. Phys. Tech. Sci.* – 2016. – Vol. 53, iss. 5. – P. 17–23. <https://doi.org/10.1515/lpts-2016-0032>
2. Carbon-based composite microwave antennas / N. A. Dugin [et al.] // *Electronics.* – 2020. – Vol. 9, iss. 4. – Art. ID: 590. <https://doi.org/10.3390/electronics9040590>

3. Radio-absorbing materials based on polymer composites and their application to solving the problems of electromagnetic compatibility / A. Fionov [et al.] // *Polymers*. – 2022. – Vol. 14, iss. 15. – Art. ID: 3026. <https://doi.org/10.3390/polym14153026>
4. A measuring system for characterization of radar-absorbing materials with sounding ultra-short electromagnetic pulses over the range 0.1–40 GHz / K. Yu. Sakharov [et al.] // *Conference on Microwave Techniques (COMITE 2015)*, 22–23 April 2015, Pardubice, Czech Republic. – Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2015. – Art. ID: 15201605. <https://doi.org/10.1109/COMITE.2015.7120224>
5. Zhukov, P. A. The application of radar absorbing materials to reduce interference emissions from instruments and devices of spacecraft electrical systems / P. A. Zhukov, V. Yu. Kirillov // *IOP Conf. Ser.: Materials Science and Engineering*. – 2019. – Vol. 868. – Art. ID: 012009. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/868/1/012009>
6. Advanced radar absorbing ceramic-based materials for multifunctional applications in space environment / A. Delfini [et al.] // *Materials*. – 2018. – Vol. 11, iss. 9. – Art. ID: 1730. <https://doi.org/10.3390/ma11091730>
7. Electromagnetic Compatibility Issues in Electric Vehicle Applications / A. G. Mamalis [et al.] // *Mater. Sci. Forum.* – 2018. – Vol. 915. – P. 71–76. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.915.71>
8. Wu, T.-L. Overview of Signal Integrity and EMC Design Technologies on PCB: Fundamentals and Latest Progress / T.-L. Wu, F. Buesink, F. Canavero // *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* – 2013. – Vol. 55, № 4. – P. 624–638. <https://doi.org/10.1109/TEMC.2013.2257796>
9. Deutschmann, B. Impact of electromagnetic interference on the functional safety of smart power devices for automotive applications / B. Deutschmann, G. Winkler, P. Kastner // *Elektrotechnik und Informationstechnik*. – 2018. – Vol. 135. – P. 352–359. <https://doi.org/10.1007/s00502-018-0633-4>
10. Protection from electromagnetic pollution by using metal based shielding materials / M. A. A. Frah [et al.] // *J. Phys. Conf. Ser.* – 2021. – Vol. 2056, № 1. – Art. ID: 012058. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2056/1/012058>
11. Choudhary, A. Broadband millimeter-wave absorbers: a review / A. Choudhary, S. Pal, G. Sarkhel // *Int. J. Microw. Wirel. Technol.* – 2022. – First View. – P. 1–17. <https://doi.org/10.1017/S1759078722000162>
12. Radio-absorbing materials and technologies for their production / A. Fionov [et al.] // *Polymers*. – 2022. – Vol. 14. – Art. ID: 3026. <https://doi.org/10.3390/polym14153026>
13. Electromagnetic evaluation of radar absorbing materials based on conducting polypyrrole and organic–inorganic nanocomposite of polypyrrole/kaolinite / C. P. R. Malere [et al.] // *J. Appl. Polym. Sci.* – 2022. – Vol. 39, iss. 17. – Art. ID: 52023. <https://doi.org/10.1002/app.52023>
14. Carbon-based radar absorbing materials: A critical review / F. Ruiz-Perez [et al.] // *J. Sci.: Adv. Mater. Devices*. – 2022. – Vol. 7, iss. 3. – Art. ID: 100454. <https://doi.org/10.1016/j.jsamd.2022.100454>
15. Kuzhir, P. Microwave absorption by carbon-based materials and structures / P. Kuzhir, A. Celzard, X. Chen // *J. Appl. Phys.* – 2022. – Vol. 131. – Art. ID: 200401. <https://doi.org/10.1063/5.0098596>
16. Singh, N. Carbon nanotubes based composites for electromagnetic absorption – a review / N. Singh, G. D. Aul // *Curr. Appl. Mater.* – 2022. – Vol. 1, iss. 1. – Art. ID: e050821195213. <https://doi.org/10.2174/2666731201666210803110914>
17. Recent developments in RAM based MWCNT composite materials: a short review / I. V. S. Yeswanth [et al.] // *Funct. Compos. Struct.* – 2022. – Vol. 4, № 2. – Art. ID: 024001. <https://doi.org/10.1088/2631-6331/ac5730>
18. Minur, A. Radar absorbing materials: the study of functionalized carbon nanotubes behavior on the attenuation of electromagnetic waves in X-band / A. Minur // *Adv. Polym. Tech.* – 2017. – Vol. 36. – P. 362–370. <https://doi.org/10.1002/ADV.21617>
19. Аяд Хишам Ашур Эль Мокхтар. Порошкообразные углеродсодержащие материалы для электромагнитных экранов / Аяд Хишам Ашур Эль Мокхтар, О. В. Бойправ, Л. М. Лыньков. – Минск: Бестпринт, 2019. – 100 с.
20. Karni, J. Gypsum in construction: origin and properties / J. Karni, E. Karni // *Mater. Struct.* – 1995. – Vol. 28. – P. 92–100. <https://doi.org/10.1007/BF02473176>
21. Development of the broadband multilayer absorption materials with genetic algorithm up to 8 GHz frequency / K. M. Krishna [et al.] // *Security and Communication Networks*. – 2022. – Art. ID: 4400412. <https://doi.org/10.1155/2022/4400412>
22. Shukla, V. Review of electromagnetic interference shielding materials fabricated by iron ingredients / V. Shukla // *Nanoscale Adv.* – 2019. – № 5. – P. 1640–1671. <https://doi.org/10.1039/c9na00108e>

## References

1. Dugin N., Zaboronkova T., Myasnikov E. Using carbon-based composite materials for manufacturing C-range antenna devices. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, 2016, vol. 53, iss. 5, pp. 17–23. <https://doi.org/10.1515/lpts-2016-0032>
2. Dugin N. A., Zaboronkova T. M., Krafft C., Belyaev G. R. Carbon-based composite microwave antennas. *Electronics*, 2020, vol. 9, iss. 4, art. ID: 590. <https://doi.org/10.3390/electronics9040590>
3. Fionov A., Kraev I., Yurkov G., Solodilov V., Zhukov A., Surgay A., Kuznetsova I., Kolesov V. Radio-absorbing materials based on polymer composites and their application to solving the problems of electromagnetic compatibility. *Polymers*, 2022, vol. 14, iss. 15, art. ID 3026. <https://doi.org/10.3390/polym14153026>
4. Sakharov K. Yu., Turkin V. A., Mikheev O. V., Sukhov A. V., Aleshko A. I. A measuring system for characterization of radar-absorbing materials with sounding ultra-short electromagnetic pulses over the range 0.1–40 GHz. *Conference on Microwave Techniques (COMITE 2015)*, 22–23 April 2015, Pardubice, Czech Republic. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2015, art. ID 15201605. <https://doi.org/10.1109/COMITE.2015.7120224>
5. Zhukov P. A., Kirillov V. Yu. The application of radar absorbing materials to reduce interference emissions from instruments and devices of spacecraft electrical systems. *IOP Conference. Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 868, art. ID 012009. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/868/1/012009>

6. Delfini A., Albano M., Vricella A., Santoni F., Rubini G., Pastore R., Marchetti M. Advanced radar absorbing ceramic-based materials for multifunctional applications in space environment. *Materials*, 2018, vol. 11, iss. 9, art. ID: 1730. <https://doi.org/10.3390/ma11091730>
7. Mamalis A. G., Enokizono M., Kladas A., Sawada T., Güden M., Demir M. M. Electromagnetic Compatibility Issues in Electric Vehicle Applications. *Materials Science Forum*, 2018, vol. 915, pp. 71–76. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.915.71>
8. Wu T.-L., Buesink F., Canavero F. Overview of Signal Integrity and EMC Design Technologies on PCB: Fundamentals and Latest Progress. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2013, vol. 55, no. 4, pp. 624–638. <https://doi.org/10.1109/TEMC.2013.2257796>
9. Deutschmann B., Winkler G., Kastner P. Impact of electromagnetic interference on the functional safety of smart power devices for automotive applications. *Elektrotechnik und Informationstechnik*, 2018, vol. 135, pp. 352–359. <https://doi.org/10.1007/s00502-018-0633-4>
10. Frah M. A. A., Pavlushkina T., Babinova A., Belyaev V. Protection from electromagnetic pollution by using metal based shielding materials. *Journal of Physics Conference Series*, 2021, vol. 2056(1), art. ID 012058. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2056/1/012058>
11. Choudhary A., Pal S., Sarkhel G. Broadband millimeter-wave absorbers: a review. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 2022, first view, pp. 1–17. <https://doi.org/10.1017/S1759078722000162>
12. Fionov A., Kraev I., Yurkov G., Solodilov V., Zhukov A., Surgay A., Kuznetsova I., Kolesov V. Radio-absorbing materials and technologies for their production. *Polymers*, 2022, vol. 14, art. ID 3026. <https://doi.org/10.3390/polym14153026>
13. Malere C. P. R., Donati B., Eras N., Silva V. A., Lona L. F. Electromagnetic evaluation of radar absorbing materials based on conducting polypyrrole and organic-inorganic nanocomposite of polypyrrole/kaolinite. *Journal of Applied Polymer Science*, 2022, vol. 39, iss. 17, art. ID 52023. <https://doi.org/10.1002/app.52023>
14. Ruiz-Perez F., López-Estrad S. M., Tolentino-Hernández R. V., Caballero-Briones F. Carbon-based radar absorbing materials: A critical review. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, 2022, vol. 7, iss. 3, art. ID 100454. <https://doi.org/10.1016/j.jsamd.2022.100454>
15. Kuzhir P., Celzard A., Chen X. Microwave absorption by carbon-based materials and structures. *Journal of Applied Physics*, 2022, vol. 131, art. ID 200401. <https://doi.org/10.1063/5.0098596>
16. Singh N., Aul G. D. Carbon nanotubes based composites for electromagnetic absorption – a review. *Current Applied Materials*, 2022, vol. 1, iss. 1, art. ID e050821195213. <https://doi.org/10.2174/2666731201666210803110914>
17. Yeswanth I. V. S., Jha K., Bhowmik S., Kumar R., Sharma S., Ilyas R. A. Recent developments in RAM based MWCNT composite materials: a short review. *Functional Composites and Structures*, 2022, vol. 4, no. 2, art. ID 024001. <https://doi.org/10.1088/2631-6331/ac5730>
18. Minur A. Radar absorbing materials: the study of functionalized carbon nanotubes behavior on the attenuation of electromagnetic waves in X-band. *Advances in Polymer Technologies*, 2017, vol. 36, pp. 362–370. <https://doi.org/10.1002/ADV.21617>
19. Ayad Hisham Ashoor El Mokhtar, Boiprav O. V., Lynkov L. M. *Powdered Coal-Containing Materials for Electromagnetic Shields*. Minsk, Bestprint Publ., 2019. 100 p. (in Russian).
20. Karni J., Karni E. Gypsum in construction: origin and properties. *Materials and Structures*, 1995, vol. 28, pp. 92–100. <https://doi.org/10.1007/BF02473176>
21. Krishna K. M., Jain A., Kang H. S., Venkatesan M., Shrivastava A., Singh S. K. Development of the broadband multilayer absorption materials with genetic algorithm up to 8GHz frequency. *Security and Communication Networks*, 2022, art. ID 4400412. <https://doi.org/10.1155/2022/4400412>
22. Shukla V. Review of electromagnetic interference shielding materials fabricated by iron ingredients. *Nanoscale Advances*, 2019, no. 5, pp. 1640–1671. <https://doi.org/10.1039/c9na00108e>

### Информация об авторах

*Бойправ Ольга Владимировна* – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры защиты информации, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (ул. П. Бровки, 6, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: [smu@bsuir.by](mailto:smu@bsuir.by)

*Белюсова Елена Сергеевна* – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры защиты информации, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (ул. П. Бровки, 6, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: [belousova@bsuir.by](mailto:belousova@bsuir.by)

*Бордиловская Даниэла Владиславовна* – студент кафедры защиты информации, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (ул. П. Бровки, 6, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: [daniela.bordilovskaya@gmail.com](mailto:daniela.bordilovskaya@gmail.com)

### Information about the authors

*Olga V. Boiprav* – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Information Protection Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (6, P. Brovka Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [smu@bsuir.by](mailto:smu@bsuir.by)

*Elena S. Belousova* – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Information Protection Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (6, P. Brovka Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [belousova@bsuir.by](mailto:belousova@bsuir.by)

*Daniela V. Bordilovskaya* – Student of the Information Protection Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (6, P. Brovka Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [daniela.bordilovskaya@gmail.com](mailto:daniela.bordilovskaya@gmail.com)