

ДИАГНОСТИКА И БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ И ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ
DIAGNOSTICS AND SAFETY OF TECHNICAL AND ENVIRONMENT SYSTEMSУДК 621.3.085.345:[537.531+691.4-032.2]
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-1-93-100>Поступила в редакцию 22.07.2020
Received 22.07.2020**Т. В. Борботько, С. Э. Саванович***Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь,***ВЛИЯНИЕ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ КЕРАМЗИТА НА ЗНАЧЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА
ОТРАЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ЭКРАНОВ,
ВЫПОЛНЕННЫХ НА ЕГО ОСНОВЕ**

Аннотация. Установлены закономерности влияния влагосодержания керамзита на значения коэффициента отражения электромагнитного излучения (ЭМИ) данного материала в диапазоне частот 1–17 ГГц. Определена взаимосвязь размера фракций (размера пор) керамзита и рабочего диапазона частот образцов экрана ЭМИ. Показано, что увеличение в 2 раза влагосодержания керамзита с размерами фракций 1...4 и 10...20 мм обеспечивает расширение рабочего диапазона частот образцов экрана ЭМИ, выполненных на основе данного материала, при снижении значений коэффициента отражения исследуемых образцов в 1,7 и 3 раза соответственно. Установлено, что увеличение влагосодержания керамзита от 19 до 40 % при уменьшении его размера фракций с 10...20 по 1...4 мм и размера пор с 0,1...0,2 по 0,01...0,06 мм обеспечивает снижение значений коэффициента отражения образцов экрана ЭМИ на частотах 7,7–17,0 ГГц, увеличение размера фракций керамзита от 1...4 до 10...20 мм при увеличении размера его пор от 0,01...0,06 до 0,1...0,2 мм – на частотах 1,0–7,7 ГГц. Показано, что практическое использование указанных закономерностей позволяет формировать образцы экрана ЭМИ со значениями коэффициентов отражения от –2,8 до –22,0 дБ в диапазоне частот 1–17 ГГц, что позволяет рекомендовать их для использования при создании экранированных помещений.

Ключевые слова: экран, электромагнитное излучение, керамзит, хлорид натрия, водный раствор, размер фракций, размер пор, влагосодержание, коэффициент отражения

Для цитирования: Борботько, Т. В. Влияние влагосодержания керамзита на значения коэффициента отражения электромагнитного излучения конструкций экранов, выполненных на его основе / Т. В. Борботько, С. Э. Саванович // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2020. – Т. 66, №1. – С. 93–100. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-1-93-100>

Timophei V. Borbot'ko, Sviatlana E. Savanovich*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus,***INFLUENCE OF WATER CONTENT OF EXPANDED CLAY ON THE REFLECTION COEFFICIENT
OF ELECTROMAGNETIC SHIELD**

Abstract. The regularities of the influence of the moisture content of expanded clay on the values of the reflection coefficient of electromagnetic radiation (EMR) of this material in the frequency range of 1–17 GHz have been established. The relationship between the size of fractions (pore size) of expanded clay and the operating frequency range of the EMR screen samples has been determined. It is shown that a twofold increase in the moisture content of expanded clay with fractions of 1...4 and 10...20 mm provides an extension of the operating frequency range of the EMR shield samples made on the basis of this material, with a decrease in the reflection coefficient of the test samples by 1.7 and 3 times, respectively. It was found that an increase in the moisture content of expanded clay from 19 to 40 % with a decrease in the size of its fractions from 10...20 to 1...4 mm and a pore size from 0.1...0.2 to 0.01...0.06 mm provides a decrease in the values of the reflection coefficient of EMR screen samples at frequencies of 7.7–17.0 GHz, and an increase in the size of expanded clay fractions from 1...4 to 10...20 mm with an increase in the size of its pores from 0.01...0.06 to 0.1...0.2 mm provides a decrease in the values of the

reflection coefficient of EMR screen samples at frequencies of 1.0–7.7 GHz. It is shown that the practical use of these regularities makes it possible to form EMR screen samples with reflection coefficients from –2.8 to –22.0 dB in the frequency range 1–17 GHz, which makes it possible to recommend them for use when creating shielded rooms.

Keywords: shield, electromagnetic radiation, expanded clay, sodium chloride, aqueous solution, size of fractions, pore size, moisture content, reflection coefficient

For citation: Borbot'ko T. V., Savanovich S. E. Influence of water content of expanded clay on the reflection coefficient of electromagnetic shield. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 66, no. 1, pp. 93–100 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-1-93-100>

Введение. Конструкции экранов электромагнитного излучения (ЭМИ) применяются в различных областях науки и техники [1]. Одним из современных направлений совершенствования является их разработка с управляемо изменяемыми значениями коэффициента отражения в широком диапазоне частот, что обусловлено требованиями, которые предъявляются к ним при использовании в различных областях.

Значения коэффициента отражения экрана ЭМИ зависят от согласования его волнового сопротивления и сопротивления свободного пространства [2]. Согласование волновых сопротивлений на границе сред «свободное пространство – поверхность экрана ЭМИ» обеспечивается выполнением внешних слоев такого экрана из материалов, относительная диэлектрическая проницаемость которых близка к 1 ($\epsilon \approx \epsilon_0$), а мнимая составляющая стремится к нулю ($\epsilon'' \rightarrow 0$). Согласование волновых сопротивлений сред «поверхность экрана ЭМИ – поверхность экранируемого объекта» осуществляется применением материалов с высокими значениями ϵ'' и μ'' ; выполнением экрана в виде многослойной конструкции, состоящей из слоев материала с низкими значениями ϵ и поглощающих пленок, расположенных между слоями [3].

Поглощающая способность экрана ЭМИ характеризуется значениями коэффициента отражения в пределах его рабочего диапазона частот, которые являются переменной величиной вследствие частотной зависимости значений ϵ'' и μ'' материалов, используемых при формировании экрана. Поэтому при выборе материалов руководствуются законами их изменения с учетом частотной дисперсии [4].

Аналогичный принцип формирования и подбора компонентов соблюдается при разработке конструкции экрана ЭМИ, выполняемой на основе влагосодержащих гранулированных матриц [5]. Данное направление относится к перспективным, так как такая матрица позволяет получить требуемые значения коэффициента отражения ЭМИ за счет варьирования размера гранул (размера пор) матрицы [6], изменения поглощающих и реологических свойств растворов, вводимых в ее поры [7], или применения обоих способов одновременно. Перечисленные способы изменения значений коэффициента отражения экрана ЭМИ сводятся к варьированию влагосодержания матрицы. Поэтому актуальным представляется исследование взаимосвязи значений коэффициента отражения ЭМИ гранулированной матрицы и ее влагосодержания. При проведении исследования в качестве матрицы предложено использовать керамзит с размерами фракций 1...4 и 10...20 мм [8].

Цель работы – определение закономерностей изменения значений коэффициента отражения конструкции экрана ЭМИ, выполненной на основе керамзита, в диапазоне частот 1–17 ГГц, обусловленных увеличением его влагосодержания и варьированием размера фракций (размера пор).

Обоснование выбора растворного наполнителя. Основными критериями при подборе водного раствора, применяемого для формирования влагосодержащей матрицы, являлись: способность раствора смачивать поверхность керамзита; его значения ϵ'' в рассматриваемом диапазоне частот [9]. Помимо указанных свойств, конструкция экрана ЭМИ, выполненная на основе влагосодержащего керамзита, должна обеспечивать воспроизведение значений коэффициента отражения в интервале температурных режимов от –50 до +50 °С в течение длительного времени. Согласно правилу уравнивания полярностей П. А. Ребиндера [10], твердая поверхность лучше смачивается водным раствором, который ближе к ней по полярности, ее макроскопической мерой могут служить: дипольный момент, поверхностное натяжение, диэлектрическая проницаемость. Керамзит относится к полярным гидрофильным адсорбентам с ионным строением кристаллической решетки, поэтому предложено использовать для его пропитки водный раствор хлорида натрия (NaCl). Указанным выше критериям соответствует 20%-ный раствор NaCl. Выбранный раствор обладает

низкими значениями поверхностного натяжения и высокой проникающей способностью вследствие того, что радиусы ионов Na^+ и Cl^- не превышают $3 \cdot 10^{-6}$ мм [11]. В диапазоне частот 1–17 ГГц 20%-ный раствор NaCl характеризуется значительными диэлектрическими потерями, обусловленными дипольной и ионной поляризациями молекул воды и ионов Na^+ и Cl^- под воздействием внешнего ЭМИ [12], и позволяет снизить температуру замерзания воды до $-21,2$ °С [13].

Известно [14], что эффективность экрана ЭМИ, выполненного на основе влагосодержащих материалов, увеличивается с повышением влагосодержания матрицы до 70 %. Авторами предлагается увеличить влагосодержание керамзита, содержащего раствор NaCl , до 40 %, что возможно следующими способами: увеличением его концентрации, введением в матрицу раствора под воздействием вакуума, повышением объемного содержания раствора за счет повышения его вязкости. Увеличение концентрации NaCl от 20 до 25 % позволит повысить влагосодержание керамзита на 3...5 %, что приведет к снижению значений ϵ'' и увеличению его значений коэффициента отражения ЭМИ в рассматриваемом диапазоне частот [15]. Пропитка керамзита 20%-ным раствором NaCl под воздействием давления обеспечит увеличение его влагосодержания на 8...10 %, что не окажет существенного влияния на снижение его значений коэффициента отражения в диапазоне частот 1–17 ГГц [16]. Авторы предлагают использовать для увеличения влагосодержания керамзита водные растворы натриевой соли карбоксиметилцеллюлозы (Na-КМЦ). Растворы Na-КМЦ являются неньютоновскими жидкостями, обладают стабильностью и устойчивостью к температурным колебаниям в течение длительного времени и обеспечивают снижение поверхностного натяжения приготовленных растворов на поверхности керамзита за счет поверхностно-активных веществ (ПАВ), содержащихся в Na-КМЦ [17].

Методика эксперимента. Для проведения исследования подготовлены и стабилизированы по массе образцы керамзита с размерами фракций 1...4 и 10...20 мм, проведен анализ структуры керамзита и определены средние размеры его пор, подобраны и приготовлены растворы, позволяющие варьировать влагосодержание керамзита в пределах 19...40 %.

Получение керамзита с указанным размером фракций осуществлялось в результате его сепарирования с помощью вибрационного грохота ВГ-1-2,9 в соответствии с методикой, приведенной в СТБ ЕН 933-2-2002 «Методы испытания геометрических свойств гранулометрических фракций горных пород. Часть 2. Определение гранулометрического состава. Контрольные сита, номинальные размеры отверстий сит», что позволило отобрать материал с однородной структурой и обеспечило стабильность воспроизведения значений коэффициентов отражения образцов экранов ЭМИ, выполненных на его основе.

Определение распределения пор в структуре керамзита и их средних размеров выполнялось в результате обработки микрофотографий поверхности срезов (шлифов) (рис. 1), полученных с помощью оптического микроскопа «Микро200» при 50-кратном увеличении, в программе ImageJ [18], которая позволяет анализировать структурно-морфологические характеристики материалов по данным сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Погрешность определения средних размеров пор керамзита составляла 1 %. Численная обработка и визуализации полученных данных выполнялась в программе OriginPro 8 [19].

Содержание приготовленных растворов в керамзите оценивалось гравиметрически с использованием весов SC-1213, относительная погрешность определения влагосодержания керамзита составляла ± 2 % [20]. Взвешивание влагосодержащего керамзита проводилось в течение 2 мин после его изъятия из раствора.

Для проведения исследования был приготовлен водный раствор NaCl с 20%-ной концентрацией растворенного NaCl (ч.д.а.). Температура дистиллированной воды при приготовлении раствора составляла от 18 до 20 °С. Влагосодержание керамзита с размерами фракций 1...4 и 10...20 мм, содержащего NaCl (далее по тексту – раствор № 1), варьировалось в пределах 22...24 и 19...21 % соответственно.

Повышение влагосодержания керамзита обеспечивалось введением в 2%-ный и 4%-ный водные растворы Na-КМЦ 20%-ного раствора NaCl (далее по тексту растворы № 2 и 3). Температура дистиллированной воды при приготовлении растворов находилась в пределах 48...50 °С. Влагосодержание керамзита с размерами фракций 1...4 и 10...20 мм, содержащего растворы № 2 и 3, варьировалось в пределах 36...39 и 38...40 % соответственно.

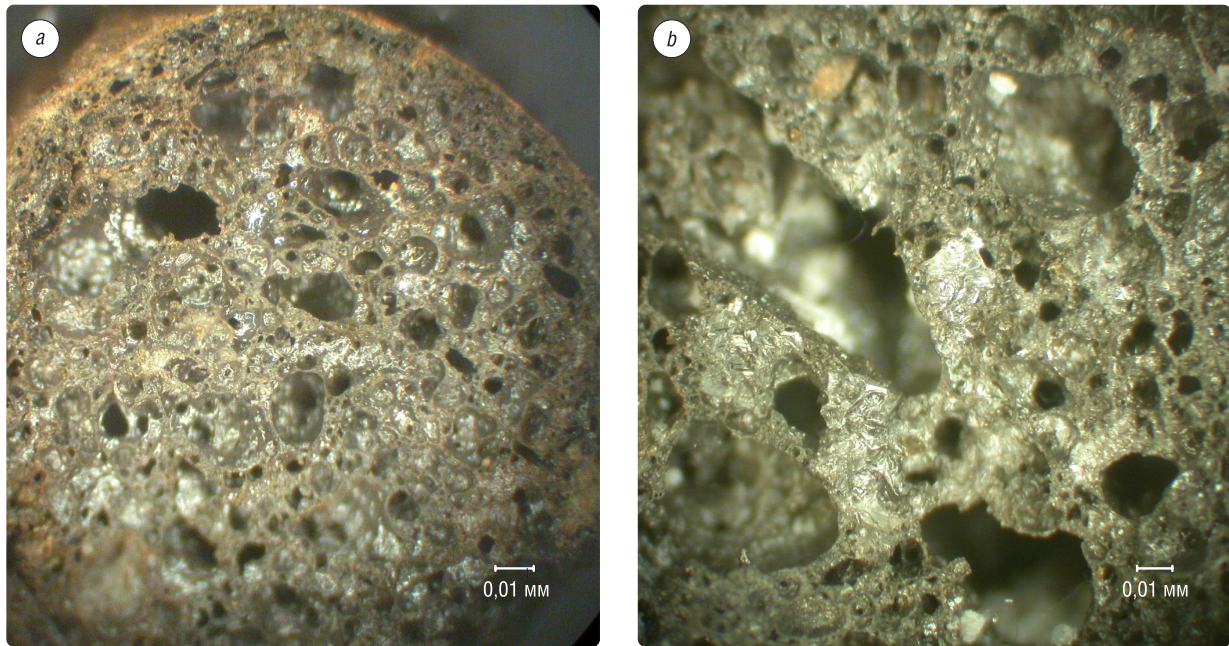


Рис. 1. Микроструктура керамзита с размером фракций 1...4 мм (а) и 10...20 мм (б) при 50-кратном увеличении
 Fig. 1. The microstructure of expanded clay with fractions of 1...4 mm (a) and 10...20 mm (b) with a 50-fold increase

Введение в поры керамзита с размерами фракций 1...4 и 10...20 мм приготовленных растворов осуществлялось методом иммерсионного смачивания при атмосферном давлении 101,3 кПа и температуре окружающей среды 20 ± 3 °С. Время выдержки керамзита в растворах № 1–3 составляло 48^{+1} ч. При пропитке керамзита растворами № 2 и 3 контейнер, заполненный керамзитом и раствором, помещался в термостат СС–106А фирмы Huber (Германия).

Для проведения исследования на основе вышеуказанных компонентов были изготовлены образцы экрана ЭМИ с плоской формой поверхности размером 470×360 мм, внутренний объем которых заполнялся керамзитом с размерами фракций 1...4 и 10...20 мм, содержащим растворы № 1–3.

Определение значений коэффициента отражения образцов экрана ЭМИ в рассматриваемом диапазоне частот выполнялось с помощью панорамного измерителя коэффициентов отражения и передачи SNA 0,01-18 в соответствии с методикой, приведенной в [21]. Толщина слоя керамзита обоих размеров фракций при проведении исследования составляла 10 мм. Выполнение измерений осуществлялось при размещении образцов экрана ЭМИ, заполненных влагосодержащим керамзитом, на металлической подложке, которая имитировала поверхность защищаемого объекта. Погрешность измерения значений коэффициентов отражения ЭМИ составляла $\pm(0,05A + 0,5)$, где A – измеряемая величина (дБ).

Результаты и обсуждение. При анализе полученных результатов установлено, что уменьшение размера фракций керамзита с 10...20 по 1...4 мм при влагосодержании 19...24 % приводит к снижению значений коэффициента отражения ЭМИ на частотах 1,5–2,5 и 8,2–17,0 ГГц, разница в значениях коэффициента отражения на указанных частотах составляет до 5,2 дБ. Увеличение размера фракций влагосодержащего керамзита от 1...4 до 10...20 мм позволяет снизить его значения коэффициента отражения ЭМИ на частотах 1,0–1,5 и 2,5–8,2 ГГц. Различия в значениях коэффициента отражения ЭМИ на указанных частотах составляет от 8,5 до 9,5 дБ (рис. 2).

Показано, что увеличение влагосодержания керамзита от 19 до 40 % приводит к снижению его значения коэффициента отражения ЭМИ на частотах 7,7–17,0 ГГц за счет уменьшения размера фракций керамзита с 10...20 по 1...4 мм. Различия в значениях коэффициента отражения ЭМИ на указанных частотах составляет до 10 дБ. Увеличение размера фракций керамзита от 1...4 до 10...20 мм позволяет снизить его значения коэффициента отражения ЭМИ на частотах 1,0–7,7 ГГц. Отличия в значениях коэффициента отражения ЭМИ на указанных частотах составляет до 15 дБ (рис. 3).

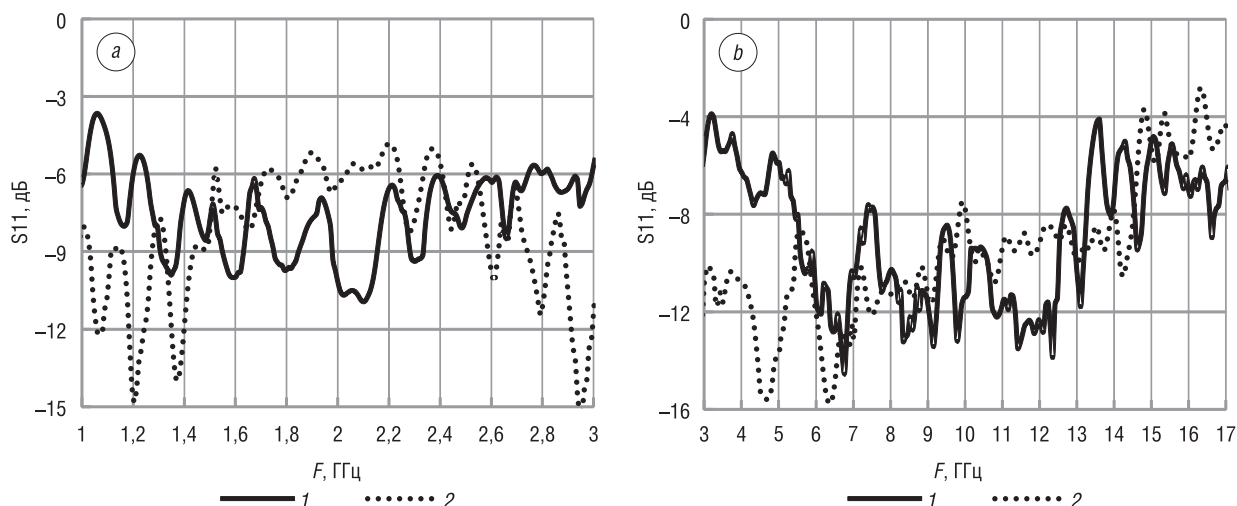


Рис. 2. Частотные зависимости (диапазон частот 1–17 ГГц) значений коэффициента отражения образцов экрана ЭМИ, заполненных керамзитом, содержащим раствор №1, размещенных на металлической подложке. Размер фракций керамзита: 1 – 1...4 мм, 2 – 10...20 мм

Fig. 2. Frequency dependences (frequency range 1–17 GHz) of the reflection coefficient of EMR screen samples filled with expanded clay containing solution No. 1, placed on a metal substrate. Expanded clay fractions: 1 – 1...4 mm, 2 – 10...20 mm

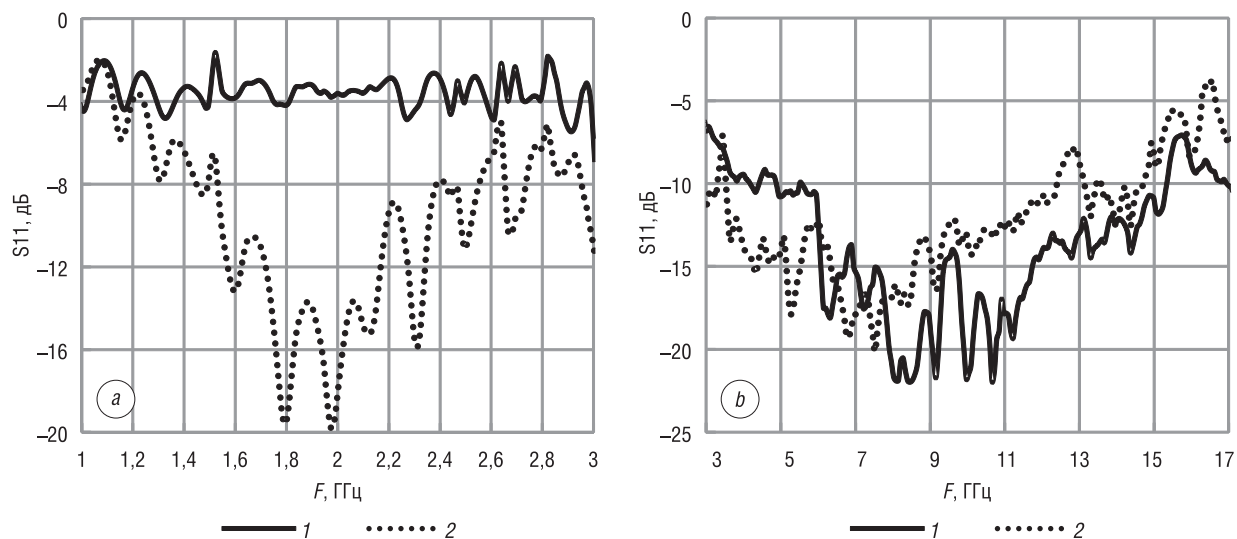


Рис. 3. Частотные зависимости (диапазон частот 1–17 ГГц) значений коэффициента отражения образцов экранов ЭМИ, заполненных керамзитом, содержащим растворы №2 и 3, размещенных на металлической подложке. Размер фракций керамзита: 1 – 1...4 мм, 2 – 10...20 мм

Fig. 3. Frequency dependences (frequency range 1–17 GHz) of the reflection coefficient of the samples of EMR screens filled with expanded clay containing solutions No. 2 and 3, placed on a metal substrate. Expanded clay fractions: 1 – 1...4 mm, 2 – 10...20 mm

Определено, что увеличение влагосодержания керамзита в 2 раза обеспечивает расширение рабочего диапазона частот образцов экрана ЭМИ, заполненных керамзитом с размером фракций 1...4 и 10...20 мм, и позволяет снизить значения коэффициента отражения таких экранов соответственно в 1,7 и 3 раза.

Установлено, что увеличение влагосодержания керамзита от 19 до 40 % при уменьшении его размера фракций с 10...20 по 1...4 мм и размера пор с 0,1...0,2 по 0,01...0,06 мм обеспечивает снижение значений коэффициента отражения образцов экрана ЭМИ на частотах 7,7–17,0 ГГц, а увеличение размера фракций керамзита от 1...4 до 10...20 мм при увеличении размера его пор от 0,01...0,06 до 0,1...0,2 мм – на частотах 1,0–7,7 ГГц (рис. 4).

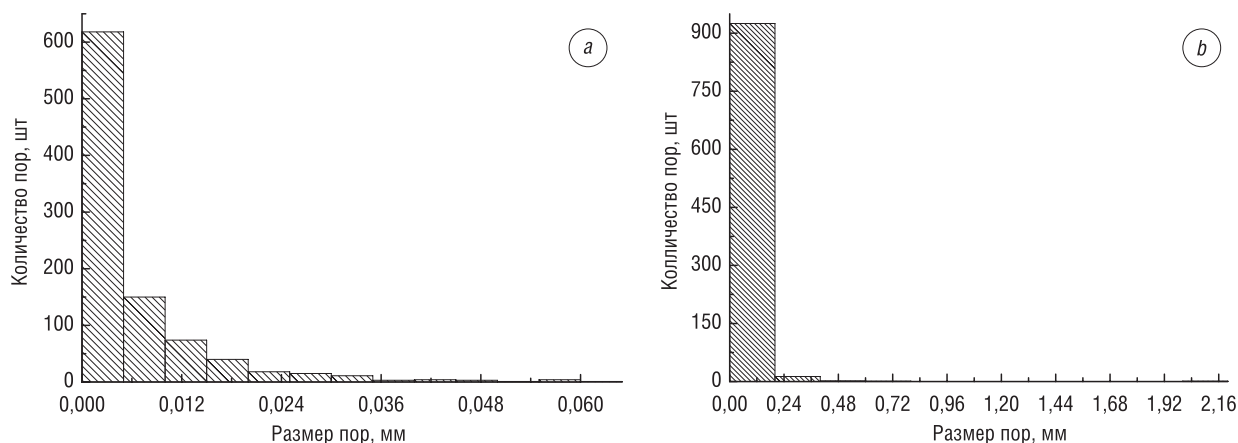


Рис. 4. Гистограмма распределения средних размеров пор керамзита. Размер фракций керамзита: *a* – 1...4 мм, *b* – 10...20 мм

Fig. 4. A histogram of the distribution of the average pore size of expanded clay. Expanded clay fractions: *a* – 1...4 mm, *b* – 10...20 mm

Закключение. Таким образом, установлено, что размер фракций (размер пор) керамзита определяет рабочий диапазон частот образцов экрана ЭМИ, выполненных на его основе, а мнимая составляющая ϵ'' и влагосодержание керамзита оказывают влияние на значения коэффициента отражения таких экранов. Применение в образце экрана ЭМИ керамзита с размером фракций 1...4 мм (размеры пор 0,01...0,06 мм), содержащего раствор NaCl в пределах 19...24 %, позволяет снизить его значения коэффициента отражения с $-2,8$ по $-13,8$ дБ на частотах 1,5–2,5 и 8,2–17,0 ГГц, с размером фракций 10...20 мм (размеры пор 0,1...0,2 мм) – с $-3,6$ по $-15,4$ дБ на частотах 1,0–1,5 и 2,5–8,2 ГГц. Увеличение влагосодержания керамзита с 19 до 40 % приводит к снижению значений коэффициента отражения образцов экрана ЭМИ, заполненных керамзитом с размером фракций 1...4 мм, с $-4,0$ по $-22,0$ дБ на частотах 7,7–17,0 ГГц, с размером фракций 10...20 мм – с $-1,6$ по $-20,1$ дБ на частотах 1,0–7,7 ГГц.

Практическое использование указанных закономерностей позволяет разрабатывать экраны ЭМИ со значениями коэффициентов отражения от $-2,8$ до $-22,0$ дБ в диапазоне частот 1–17 ГГц, которые можно рекомендовать к использованию при создании экранированных помещений.

Список использованных источников

1. Электромагнитные излучения. Методы и средства защиты / В. А. Богущ [и др.]; под ред. Л. М. Лынькова. – Минск: Бестпринт, 2003. – 406 с.
2. Львова, Л. А. Радиолокационная заметность летательных аппаратов / Л. А. Львова. – Снежинск: Изд-во РФЯЦ – ВНИИТФ, 2003. – 232 с.
3. Вакин, С. А. Основы радиоэлектронной борьбы: учеб. пособие / С. А. Вакин, Л. Н. Шустов. – М.: ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 1998. – Ч. 1 – 435 с.
4. Алексеев, А. Г. Физические основы технологии Stealth / А. Г. Алексеев, Е. А. Штагер, С. В. Козырев. – СПб.: ВВМ, 2007. – 284 с.
5. Бойправ, О. В. Электромагнитные экраны на основе порошкообразного перлита для технических средств защиты информации: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.13.19 / О. В. Бойправ ; Беларус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники. – Минск, 2017. – 24 с.
6. Влияние размеров фракций влагосодержащего керамзита на экранирующие характеристики экранов ЭМИ / С. Э. Саванович [и др.] // Доклады БГУИР. – 2014. – № 8 (86). – С. 36–40.
7. Саванович, С. Э. Влияние вязкости водного раствора хлорида натрия, введенного в поры керамзита, на его радиопоглощающие свойства / С. Э. Саванович, Т. В. Борботько // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2016. – № 2. – С. 115–119.
8. Саванович, С. Э. Радиозэкранируючыя свойствы влагасодержащих материалов на основе керамзита / С. Э. Саванович, В. Б. Соколов // Технические средства защиты информации: тез. докл. XII Беларус.-рос. науч.-техн. конф., Минск, 28–29 мая 2014 г. / Беларус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники; редкол.: Л. М. Лыньков [и др.]. – Минск, 2014. – С. 61.
9. Саванович, С. Э. Конструкция экрана для экранирования технических средств и помещений / С. Э. Саванович // Современные средства связи: материалы XVIII междунар. науч.-техн. конф., Минск, 15–16 окт. 2013 г. / Беларус. гос. академия связи; редкол.: А. О. Зеневич [и др.]. – Минск, 2013. – С. 209–210.

10. Клындюк, А. И. Поверхностные явления и дисперсные системы: учеб. пособие / А. И. Клындюк. – Минск: БГТУ, 2011. – 317 с.
11. Химия (специальные разделы для направления «Строительство») / Г. И. Бердов [и др.]. – Новосибирск: Новосиб. гос. архитектур.-строит. ун-т, 2011. – 187 с.
12. Ахадов, Я. Ю. Диэлектрические свойства бинарных растворов: справочник / Я. Ю. Ахадов. – М.: Глав. ред. физ.-мат. лит. изд. «Наука», 1977. – 400 с.
13. Краткий справочник по химии / под ред. О. Д. Куриленко. – 4-е изд. – Киев: Наук. думка, 1974. – 967 с.
14. Колбун, Н. В. Технология изготовления экранов электромагнитного излучения на основе влагосодержащих капиллярно-пористых материалов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.27.06 / Н. В. Колбун; Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники. – Минск, 2005. – 24 с.
15. Саванович, С. Э. Водосодержащие экраны электромагнитного излучения для защиты радиоэлектронной аппаратуры / С. Э. Саванович, В. Б. Соколов // Технические средства защиты информации: тез. докл. XI Белорус.-рос. науч.-техн. конф., Минск, 5–6 июня 2013 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники; редкол.: Л. М. Лыньков [и др.]. – Минск, 2013. – С. 73.
16. Борботько, Т. В. Влияние методов формирования радиопоглощающего покрытия на основе влагосодержащего керамзита на его радиопоглощающие свойства / Т. В. Борботько, С. Э. Саванович // Комплексная защита информации: материалы XXIII науч.-практ. конф., Суздаль, 16–19 мая 2018 г. / Полоц. гос. ун-т; отв. за вып. С. Н. Касанин. – Новополоцк: Полоц. гос. ун-т, 2017. – С. 53–56.
17. Саванович, С. Э. Влияние вязкости растворного наполнителя на влагосодержание конструкции экрана на основе влагосодержащего керамзита // С. Э. Саванович, В. Б. Соколов // Технические средства защиты информации: тез. докл. XII Белорус.-рос. науч.-техн. конф., Минск, 28–29 мая 2014 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники; редкол.: Л. М. Лыньков [и др.]. – Минск, 2014. – С. 61.
18. Чернякова, К. В. Анализ и обработка СЭМ изображений поверхности пленок нанопористого оксида алюминия с помощью ImageJ / К. В. Чернякова, Р. Карпич, И. А. Врублевский // IV Международная научная конференция «Проблемы взаимодействия излучения с веществом», посвященная 90-летию со дня рождения Б. В. Бокутя, 9–11 ноября 2016 г.: [материалы]: в 2 ч. / редкол.: С. А. Хахомов (гл. ред.) [и др.]. – Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2016. – Ч. 2. – С. 181–186.
19. Исакова, О. П. Обработка и визуализация данных физических экспериментов с помощью пакета ORIGIN / О. П. Исакова, Ю. Ю. Тарасевич, Ю. И. Юзюк. – М.: Либроком, 2009. – 138 с.
20. Гравиметрическое исследование временной стабильности жидкостносодержащих поглотителей ЭМИ / Л. М. Лыньков [и др.] // Технические средства защиты информации: материалы II Белор.-рос. науч.-техн. конф., Нарочь, 17–21 мая 2004 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники; редкол.: В. Ф. Голиков [и др.]. – Минск, 2004. – С. 42–44.
21. Радиоэкранирующие модульные конструкции на основе порошкообразных материалов / М. Р. Неамах [и др.]; под ред. Л. М. Лынькова. – Минск: Бестпринт, 2013. – 210 с.

References

1. Bogush V. A., Borbot'ko T. V., Gusinskii A. V., Lyn'kov L. M., Tamelo A. A. *Electromagnetic Radiation. Methods and Means of Protection*. Minsk, Bestprint Publ., 2003. 406 p. (in Russian).
2. L'vova L. A. *Aircraft Radar Signature*. Snezhinsk, Publishing House RFYC – VNIITF, 2003. 232 p. (in Russian).
3. Vakin S. A., Shustov L. N. *The Basics of Radioelectronic Warfare. Part 1*. Moscow, Military Air Academy named after Professor N. E. Zhukovsky, 1998. 435 p. (in Russian).
4. Alekseev A. G., Shtager E. A., Kozyrev S. V. *Physical Fundamentals of Technology Stealth*. St. Petersburg, VVM Publ., 2007. 284 p. (in Russian).
5. Boiprav O. V. *Powder Perlite-Based Electromagnetic Shields for Information Security Equipment*. Minsk, Belarussian State University of Informatics and Radioelectronics, 2017. 24 p. (in Russian).
6. Savanovich S. E., Borbot'ko T. V., Sokolov V. B., Rusakovich M. V. The influence of the sizes of fractions of moisture-containing expanded clay on the screening characteristics of screens EMR. *Doklady BGUIR*, 2014, no. 8 (86), pp. 36–40 (in Russian).
7. Savanovich S. E., Borbot'ko T. V. The effect of the viscosity of an aqueous solution of sodium chloride introduced into the pores of expanded clay on its radar absorbing properties. *Vesti Natsyonal'noi akademii nauk Belarusi. Seriya fizika-technichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2016, no. 2, pp. 115–119 (in Russian).
8. Savanovich S. E., Sokolov V. B. Radio-shielding properties of moisture-containing materials based on expanded clay. *Tekhnicheskie sredstva zashchity informatsii: tezisy dokladov XII Belorussko-rossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, Minsk, 28–29 maya 2014 g.* [Technical Means of Information Protection: Abstracts of the XII Belarusian-Russian Scientific and Technical Conference, Minsk, May 28–29, 2014]. Minsk, 2014, p. 61 (in Russian).
9. Savanovich S. E. Screen design for shielding hardware and facilities. *Sovremennye sredstva svyazi: materialy XVIII mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, Minsk, 15–16 oktyabrya 2013 g.* [Modern Means of Communication: Materials of the XVIII International Scientific and Technical Conference, Minsk, October 15–16, 2013]. Minsk, 2013, pp. 209–210 (in Russian).
10. Klyndyuk, A. I. Surface phenomena and disperse textbook for students of chemical engineering specialties. Minsk, Belarussian State Technological University, 2011. 317 p. (in Russian).

11. Berdov G. I., Zyryanova V. N., Kucherova E. A., Mashkin N. A., Baev V.S. *Chemistry (Special Sections for the Direction "Civil Engineering")*. Novosibirsk, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, 2011. 187 p. (in Russian).
12. Ahadov Y. Yu. *Dielectric Properties of Binary Solutions: Handbook*. Moscow, Nauka Pub., 1977. 400 p. (in Russian).
13. Kurilenko O. D. (ed.), Goronovskii I. T., Nazarenko Yu. P., Nekryach E. F. *Chemistry Quick Reference*. Kiev, Naukova dumka Publ., 1974. 967 p. (in Russian).
14. Kolbun N. V. *The Manufacturing Technology of Shields of Electromagnetic Radiation Based on Moisture-Containing Capillary-Porous Materials*. Minsk, 2005. 24 p. (in Russian).
15. Savanovich S. E., Sokolov V. B. Water-containing screens of electromagnetic radiation for the protection of electronic equipment. *Tekhnicheskie sredstva zashchity informatsii: tezisy dokladov XI Belorussko-rossiiskoi nauchno-tekhnicheskoj konferentsii, Minsk, 5–6 iyunya 2013 g.* [Technical Means of Information Protection: Abstracts of the XI Belarusian-Russian Scientific and Technical Conference, Minsk, June 5–6, 2013]. Minsk, 2013, p. 73 (in Russian).
16. Borbot'ko T. V., Savanovich S. E. The influence of methods for the formation of a radar absorbing coating based on moisture-containing expanded clay on its radar absorbing properties. *Kompleksnaya zashchita informatsii: materialy XXIII nauchno-prakticheskoi konferentsii, Suzdal', 16–19 maya 2018 g.* [Comprehensive Information Protection: Materials of the XXIII Scientific-Practical Conference, Suzdal, May 16–19, 2018]. Novopolotsk, Polotsk State University, 2017, pp. 53–56 (in Russian).
17. Savanovich S. E., Sokolov V. B. The effect of the viscosity of the mortar filler on the moisture content of the shield structure based on moisture-containing expanded clay. *Tekhnicheskie sredstva zashchity informatsii: tezisy dokladov XII Belorussko-rossiiskoi nauchno-tekhnicheskoj konferentsii, Minsk, 28–29 maya 2014 g.* [Technical Means of Information Protection: Abstracts of the XII Belarusian-Russian Scientific and Technical Conference, Minsk, May 28–29, 2014]. Minsk, 2014, p. 61 (in Russian).
18. Chernyakova K. V., Karpich R., Vrublevskiy I. A. Analysis and SEM processing of surface images of nanoporous alumina films using ImageJ. *IV Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya "Problemy vzaimodeistviya izlucheniya s veshchestvom", posvyashchennaya 90-letiyu so dnya rozhdeniya B. V. Bokutya, 9–11 noyabrya 2016 g. Chast' 2* [IV International Scientific Conference "Problems of the Interaction of Radiation with Matter" dedicated to the 90th Anniversary of the birth of B. V. Bokut, November 9–11, 2016. Part 2]. Gomel, Francisk Skorina Gomel State University, 2016, pp. 181–186 (in Russian).
19. Isakova O. P., Tarasevich Yu. Yu., Yuzyuk Yu. I. *Processing and Visualization of Physical Experiment Data Using the ORIGIN Package*. Moscow, Librokom Publ., 2009. 138 p. (in Russian).
20. Lyn'kov L. M., Borbot'ko T. V., Kolbun N. V., Prudnik A. M. Gravimetric study of the temporary stability of liquid-containing absorbers of EMR. *Tekhnicheskie sredstva zashchity informatsii: materialy II Belorussko-rossiiskoi nauchno-tekhnicheskoj konferentsii, Naroch', 17–21 maya 2004 g.* [Technical Means of Information Protection: Materials of the II Belarusian-Russian Scientific and Technical Conference, Naroch, May 17–21, 2004]. Minsk, 2004, pp. 42–44 (in Russian).
21. Neamach M. R., Boiprav O. V., Borbot'ko T. V., Lyn'kov L. M., Sokolov V. B. *Radio-Shielding Modular Structures Based on Powder Materials*. Minsk, Bestprint Publ., 2013. 210 p. (in Russian).

Информация об авторах

Борботько Тимофей Валентинович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой защиты информации, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (ул. П. Бровки, 6, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: secure@bsuir.by

Саванович Светлана Эдуардовна – ассистент кафедры защиты информации, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (ул. П. Бровки, 6, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: svetasav@bsuir.by

Information about the authors

Timophei V. Borbot'ko – D. Sc. (Engineering), Professor, Head of the Department of Information Security, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (6, P. Brovka Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: secure@bsuir.by

Svialana E. Savanovich – Assistant of the Department of Information Security, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (6, P. Brovka Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: svetasav@bsuir.by