

С.Э. САВАНОВИЧ, Т.В. БОРБОТЪКО

**ВЛИЯНИЕ ВЯЗКОСТИ ВОДНОГО РАСТВОРА ХЛОРИДА НАТРИЯ,
ВВЕДЕННОГО В ПОРЫ КЕРАМЗИТА,
НА ЕГО РАДИОПОГЛОЩАЮЩИЕ СВОЙСТВА**

*Белорусский государственный университет информатики
и радиоэлектроники, Минск, Беларусь,
e-mail: svetasav@bsuir.by*

Установлено влияние вязкости водного раствора хлорида натрия, вводимого в керамзит, на его значения коэффициентов отражения и передачи в диапазоне частот 0,9–17 ГГц. Определены оптимальные величины концентраций водного раствора. Предложено использование полученных результатов исследования при разработке конструкций экранов электромагнитного излучения для создания экранированных помещений.

Ключевые слова: экран, электромагнитное излучение, керамзит, хлорид натрия, водный раствор, вязкость, размер фракций, коэффициент отражения, коэффициент передачи.

S.E. SAVANOVICH, T.V. BORBOTKO

**THE EFFECT OF VISCOSITY AQUEOUS SODIUM CHLORIDE SOLUTION,
THE INTRODUCTION INTO THE PORES OF EXPANDED CLAY,
ON ITS RADIOABSORBING PROPERTIES**

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus,
e-mail: svetasav@bsuir.by*

Agency of viscosity of an aqueous solution of chloride of the sodium inducted into expanded clay, on its values of coefficients of reflexion and transfer over the range frequencies of 0,9–17 GHz is installed. Optimum values of concentrations of an aqueous

solution are spotted. Use of the gained effects of examination is offered by working out of constructions of shields of an electromagnetic radiation for making shielding premises.

Keywords: screen, electromagnetic radiation, expanded clay, sodium chloride, aqueous solution, viscosity, size fractions, reflection coefficient, transfer coefficient.

Ведение. Для создания конструкций экранов электромагнитного излучения (ЭМИ) широко применяются металлы и их сплавы, в виду их технологичности и коррозионной стойкости. Однако использование таких материалов ограничивается диапазоном рабочих частот, влиянием на экранируемый объект и стоимостью. Наиболее перспективными для формирования конструкций экранов ЭМИ представляются влагосодержащие материалы, характеризующиеся широким рабочим диапазоном частот, высокой эффективностью экранирования и невысокой стоимостью. Формирование влагосодержащих материалов основано на фиксации водных растворов в капиллярах и порах матрицы методом ее пропитки [1].

Применение воды в качестве поглощающей среды в конструкциях экранов обусловлено ее значительными диэлектрическими потерями, связанными с механизмом дипольной релаксации молекул воды под воздействием внешнего электромагнитного поля. Введение в воду примесей в виде солей, спиртов, кислот изменяет ее характеристики (электропроводность, диэлектрическую проницаемость, вязкость и т. д.), что позволяет синтезировать на ее основе растворы с определенными значениями коэффициентов отражения и передачи электромагнитного излучения.

Формирование конструкций экранов ЭМИ на основе влагосодержащих материалов, в поровых пространствах которых содержатся водные растворы, позволяет получать экраны, радиопоглощающие свойства которых определяются конструктивным исполнением, влагосодержанием, примесями и их концентрациями в водном растворе, структурой и свойствами матрицы. В качестве матрицы для создания конструкций экранов ЭМИ предпочтительно для использования

капиллярно-пористых (волокнистых, тканых и нетканых, порошкообразных и гранулированных) материалов с различными растворными наполнителями [2–5].

Получение необходимых значений коэффициентов отражения и передачи в таких конструкциях характеризуется объемным содержанием в порах матрицы растворного наполнителя. Показано, что увеличение объемного влагосодержания повышает эффективность экранирования таких конструкций [6]. Однако их существенными недостатками являются большой вес, обусловленный, в основном, высоким влагосодержанием растворного наполнителя (до 70 %), а также необходимость стабилизации влагосодержания на длительный временной промежуток для сохранения радиоэкранирующих характеристик. Герметизация таких конструкций экранов ЭМИ достигается путем применения полимерных плёнок и связующих веществ, позволяющих снизить испарение влаги [7].

Требуемые значения радиопоглощающих характеристик конструкций экранов ЭМИ на основе влагосодержащих материалов без существенного увеличения их влагосодержания и соответственно веса таких конструкций возможны при изменении вязкости растворного наполнителя, вводимого в поры матрицы, в качестве которой предложено использовать керамзит с размером фракций до 4 мм. Перспективность применения такого материала в конструкциях экранов ЭМИ обоснована в [8, 9].

Цель данной работы – определение влияния вязкости водного раствора хлорида натрия (NaCl), вводимого в керамзит, на его значения коэффициентов отражения и передачи ЭМИ в диапазоне частот 0,9–17,0 ГГц.

Обоснование выбора композитного материала. В качестве растворного наполнителя предложено использовать водный раствор NaCl с концентрацией растворенного вещества 20 %. Выбор хлорида натрия обусловлен его широким распространением и невысокой стоимостью. Его водный раствор обладает высокой степенью электролитической диссоциации (около 1), т. е. является «сильным» электролитом. Растворимость хлорида натрия в воде составляет до 36,0 г на 100 г воды при 20 °С, при этом диэлектрическая проницаемость (ϵ') раствора равна 23.

Как показано в [10], 20 %-ный водный раствор NaCl в СВЧ-диапазоне обеспечивает максимум диэлектрических потерь при незначительной зависимости их от температуры. Диэлектрические потери представляют собой результат взаимодействия электромагнитной волны с водным раствором соли и обуславливаются процессами ионной проводимости растворенного вещества (хлорида натрия) и дипольного вращения молекул растворителя (молекул воды).

Ионная проводимость раствора хлорида натрия определяется электрофоретической миграцией ионов Na^+ и Cl^- в растворе при воздействии электромагнитного поля. Потери, связанные с движением ионов, зависят от их размера, заряда и удельной электропроводности [11].

С увеличением концентрации ионов Na^+ и Cl^- в водном растворе NaCl повышается величина его электропроводности, которая уменьшается со снижением подвижности ионов и расстояния между ними. Для данного эффекта характерно увеличение диэлектрической проницаемости водного раствора NaCl (ϵ') в области средних и больших концентраций, что обуславливает рост коэффициента диэлектрических потерь (ϵ'').

Вращательное движение диполей H_2O возникает вследствие того, что с увеличением интенсивности электромагнитного излучения молекулы воды, имеющие постоянный дипольный момент, приобретают определенную ориентацию, что приводит к ослаблению ЭМИ. Благодаря большому значению дипольного момента молекул ($6,2 \cdot 10^{-30}$ Кл·м) вода может в 80 раз ослабить внешнее ЭМИ. При отсутствии воздействия ЭМИ на водные растворы NaCl за время релаксации τ в результате теплового движения молекулы возвращаются в беспорядочное состояние с выделением тепловой энергии [12].

Ослабление ЭМИ водными растворами хлорида натрия в значительной степени определяется подвижностью и концентрацией ионов в растворе, степенью взаимодействия ионов Na^+ и Cl^- с молекулами H_2O , временем релаксации диполей воды, частотой электромагнитного излучения и вязкостью раствора, так как последняя определяет подвижность ионов растворенного вещества и диполей растворителя.

Методика эксперимента. Для проведения исследования изготовлены конструкции экранов ЭМИ, выполненные в виде модулей с плоской формой поверхности, внутренний объем которых заполнялся влагосодержащим керамзитом с размерами фракций до 4 мм при толщине слоя 10 мм. Линейный размер модулей составлял 470 x 360 мм.

Водные растворы, инкорпорированные в поры керамзита, представляли собой 20 %-ный раствор хлорида натрия (далее по тексту раствор № 1). Для изменения значений вязкости в водный раствор NaCl вводилась натриевая соль карбоксиметилцеллюлозы (Na-карбоксиметилцеллюлоза) в виде 1 %-ного и 3 %-ного водного раствора (далее по тексту раствор № 2 и № 3).

Влагосодержание конструкций экранов ЭМИ, пропитанных водными растворами № 1, № 2 и № 3, оценивали гравиметрическим методом и варьировали в пределах (24 – 26) %, (35 – 37) % и (52 – 53) %, соответственно [13]. Относительная погрешность измерений составляла ± 2 %.

Измерения значений динамической вязкости η образцов водных растворов проводили на ротационном вискозиметре Реотестат 2.1 с использованием цилиндрических измерительных устройств по Сирле (Searle) при скорости сдвига $\dot{\gamma}_r = 27 \text{ c}^{-1}$ согласно инструкции по эксплуатации. При реологических исследованиях образцов водных растворов хлорида натрия их температуру поддерживали с помощью термостата СС1 фирмы Huber (Германия). Относительная погрешность измерений составляла не более 1 %.

Для измерения коэффициентов отражения и передачи исследуемых конструкций экранов ЭМИ в диапазоне частот 0,9–17,0 ГГц использовался панорамный измеритель коэффициентов передачи и отражения SNA 0,01-18, работающий по принципу отдельного выделения и непосредственного детектирования уровней падающей и отраженной волн, и антенны П6-23М. Измерения проводили по методике [14].

Результаты и их обсуждение. По результатам измерений определены следующие значения вязкости водных растворов хлорида натрия: раствор № 1 – $1,6 \cdot 10^{-3}$ Па·с; раствор № 2 – $3,0 \cdot 10^{-3}$ Па·с; раствор № 3 – $5,9 \cdot 10^{-3}$ Па·с.

В рассмотренном диапазоне частот можно выделить три области, в которых отличие значений коэффициентов отражения и передачи зависит от величины вязкости вводимого в керамзит водного раствора.

Диапазон частот 0,9–3 ГГц. Повышение вязкости водного раствора NaCl от $1,6 \cdot 10^{-3}$ до $5,9 \cdot 10^{-3}$ Па·с, вводимого в поры керамзита позволяет:

увеличить значения коэффициента отражения исследуемой конструкции экрана ЭМИ, выполненной на его основе, от $-7,7$ до $-0,4$ дБ, и от $-11,0$ до $-1,0$ дБ при закреплении такой конструкции экрана ЭМИ на металлической подложке (рис. 1, а, б);

снизить значения коэффициента передачи исследуемой конструкции экрана ЭМИ, выполненной на основе влагосодержащего керамзита, с $-5,0$ до $-25,5$ дБ (рис. 2).

Диапазон частот 3–9 ГГц. Повышение вязкости водного раствора NaCl от $1,6 \cdot 10^{-3}$ до $3,0 \cdot 10^{-3}$ Па·с, вводимого в поры керамзита, позволяет повысить значения коэффициента отражения исследуемой конструкции экрана ЭМИ, выполненной на его основе, от $-12,8$ до $-3,0$ дБ, и от $-12,6$ до $-3,0$ дБ при закреплении такой конструкции экрана ЭМИ на металлической подложке (рис. 3 а, б). Следует отметить, что указанная закономерность обусловленная повышением вязкости водного раствора NaCl, вводимого в керамзит, наблюдается при изменении частоты электромагнитных колебаний от 3 до 6,5 ГГц. На частотах свыше 6,5 ГГц, рассматриваемого диапазона частот, происходит снижение значений коэффициента отражения для исследуемой конструкции экрана ЭМИ с $-12,8$ до $-15,0$ дБ и с $-13,8$ до $-15,6$ дБ при размещении такой конструкции экрана ЭМИ на металлической подложке (рис. 3 а, б).

Увеличение вязкости водного раствора NaCl от $3,0 \cdot 10^{-3}$ до $5,9 \cdot 10^{-3}$ Па·с, введенного в керамзит, приводит к снижению значений коэффициента отражения исследуемой конструкции экрана ЭМИ, выполненной на его основе, с $-3,0$ до $-19,4$ дБ, и с $-3,0$ до $-19,8$ дБ при закреплении такой конструкции экрана ЭМИ на металлической подложке (рис. 3, а, б).

Установлено, что повышение вязкости водного раствора хлорида натрия от $1,6 \cdot 10^{-3}$ до $5,9 \cdot 10^{-3}$ Па·с, вводимого в керамзит, позволяет снизить значения коэффициента передачи конструкции экрана ЭМИ, выполненной на его основе, в рассматриваемом диапазоне частот, с $-6,2$ до $-26,7$ дБ (рис. 4).

Диапазон частот 9–17 ГГц. Рост вязкости водного раствора хлорида натрия от $3,0 \cdot 10^{-3}$ до $5,9 \cdot 10^{-3}$ Па·с, вводимого в керамзит, позволяет увеличить значения коэффициента отражения исследуемой конструкции экрана ЭМИ, выполненной на основе влагосодержащего керамзита, от $-14,6$ до $-2,6$ дБ (рис. 3, а).

Изменение вязкости водного раствора хлорида натрия в указанных выше пределах не оказывает существенного влияния на значения коэффициента отражения в диапазоне частот 9–17 ГГц исследуемой конструкции экрана ЭМИ в случае ее закрепления на металлической подложке (рис. 3, б).

Показано, что значения коэффициента передачи исследуемой конструкции экрана ЭМИ снижаются с $-12,7$ до $-28,6$ дБ (рис. 4) с повышением вязкости водного раствора хлорида натрия от $1,6 \cdot 10^{-3}$ до $5,9 \cdot 10^{-3}$ Па·с при частоте электромагнитных колебаний 9–11 ГГц. На частотах свыше 11 ГГц изменение вязкости водного раствора хлорида натрия, в указанных выше пределах, не оказывает существенного влияния на значения коэффициента передачи конструкций экранов ЭМИ.

Можно предположить, что в диапазоне частот 0,9–3,0 ГГц снижение значений коэффициента отражения ЭМИ обусловлено в большей степени влиянием ионной проводимости раствора NaCl, введенного в керамзит, а на частотах 3,0–17 ГГц – дипольно-релаксационной поляризацией молекул воды в вязкой среде [15].

Показано, что повышение вязкости 20 %-ного водного раствора хлорида натрия в пределах $3,0$ – $5,9 \cdot 10^{-3}$ Па·с, введенного в поры керамзита, на основе которого выполнены конструкции экранов ЭМИ, позволяет обеспечить более высокое ослабление ЭМИ в диапазоне частот 0,9–17,0 ГГц, что обуславливает перспективность применения в конструкциях экранов ЭМИ вязких водных растворов хлорида натрия.

Заключение. В результате исследований, установлено, что для снижения значений коэффициента отражения в диапазоне частот 0,9–3 ГГц конструкций экранов ЭМИ (толщина 10 мм), выполненных на основе керамзита с размерами фракции до 4 мм, предпочтительно использовать для его пропитки водные растворы NaCl, величина динамической вязкости которых не превышает $1,6 \cdot 10^{-3}$ Па·с, в диапазоне частот 3,0–9,0 ГГц – $5,9 \cdot 10^{-3}$ Па·с, а в диапазоне частот 9,0–17 ГГц – $3,0 \cdot 10^{-3}$ Па·с. Для снижения значений коэффициента передачи в диапазоне частот 0,9–17,0 ГГц конструкций экранов ЭМИ, выполненных на основе керамзита, предпочтительно использовать для его пропитки водные растворы хлорида натрия, динамическая вязкость которых находится в пределах $3,0$ – $5,9 \cdot 10^{-3}$ Па·с. Таким образом, практическое использование указанных выше закономерностей позволяет формировать конструкции экранов ЭМИ, характеризующиеся значениями коэффициентов отражения от –0,4 до –19,4 дБ и передачи от –5,0 до –28,6 дБ в диапазоне частот 0,9–17 ГГц, что позволяет рекомендовать их для использования при создании экранированных помещений.

Список использованной литературы

1. Новые материалы для экранов электромагнитного излучения / Л.М. Лыньков [и др.] // Докл. БГУИР. – 2004. – №3 (7). – С. 152–157.
2. Влияние природы растворных наполнителей на характеристики гибких радиопоглощающих покрытий / В.А. Богуш [и др.] // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: материалы 15-й Междунар. Крымской конф., Севастополь, Украина, 12–16 сент. 2005 г. в 2 т. / СевНТУ; редкол.: д-р техн. наук, проф. М.П. Батура [и др.]. – Севастополь, 2005. – Т. 2. С. 718–719.
3. Пористые волокнистые материалы с жидкостными наполнителями для экранирования электромагнитного излучения / Колбун Н.В. [и др.] // Вестн. ПГУ, Сер. В. Прикладные науки. – 2004. – № 12. – С. 30–35.
4. *Казанцева, Н.Е.* Перспективные материалы для поглотителей ЭМВ СВЧ диапазона / Н.Е. Казанцева, Н.Г. Рывкина, И.А. Чмутин // Радиотехника и электроника. – 2003. – Т.48, №2. – С. 196–209.
5. Гибкие конструкции экранов электромагнитного излучения / Л.М. Лыньков [и др.]; под ред. Л.М. Лынькова. – Минск : БГУИР, 2000. – 284 с.
6. *Пухир, Г.А.* Использование органических влагоудерживающих компонентов в качестве основы экранирующих конструкций СВЧ-диапазона / Г.А. Пухир, Насонова Н.В., Пулко Т.А. // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: материалы 23-й Междунар. Крымской конф., Севастополь, Украина, 8–13 сент. 2013 г. в 2 т. / СевНТУ; редкол.: д-р техн. наук, проф. М.П. Батура [и др.]. – Севастополь, 2013. – Т. 2. С. 718–719.
7. *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.
8. *Саванович, С.Э.* Радиоэкранирующие свойства электромагнитных экранов на основе влагосодержащего керамзита / С.Э. Саванович, В.Б. Соколов // Докл. БГУИР. – 2014. – № 4 (82). – С.48–52.

9. Влияние размеров фракций влагосодержащего керамзита на его коэффициенты отражения и передачи электромагнитного излучения / С.Э. Саванович [и др.] // Докл. БГУИР. – 2014. – № 8 (86). – С. 36–41.

10. *Анциферов, Е.А.* Диэлектрические свойства водных растворов солей щелочных металлов, галогеноводородных кислот и щелочей : автореф. дис. ... канд. хим. наук : 02.00.01 / Е.А. Анциферов. – Иркутск : 2006. – 24 с.

11. Пробоподготовка в микроволновых печах. Теория и практика: пер. с англ. / Л.Б. Джесси [и др.] ; под ред. Г.М. Кингстона. – М. : Мир, 1991. – 336 с., ил.

12. *Равич-Щербо, М.И.* Физическая и коллоидная химия: учебник для мед. ин-тов / М.И. Равич-Щербо, В.В. Новиков – М. : Высшая школа, 1975. – 255 с.

13. 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.: д-р техн. наук, проф. В.Ф. Голиков [и др.]. – Минск, 2004. – С. 42–44.

14. Радиоэкранирующие модульные конструкции на основе порошкообразных материалов / М.Р. Немах [и др.]; под ред. Л.М. Лынькова. – Минск : Бестпринт, 2013. – 184 с.

15. *Богородицкий, Н.П.* Электротехнические материалы: учебник для вузов / Н.П. Богородицкий, В.В. Пасынков, Б.М. Тареев – Изд. 7-е. – Л. : Энергоатомиздат, 1985. – 304 с., ил.

Поступила в редакцию 09.07.2015

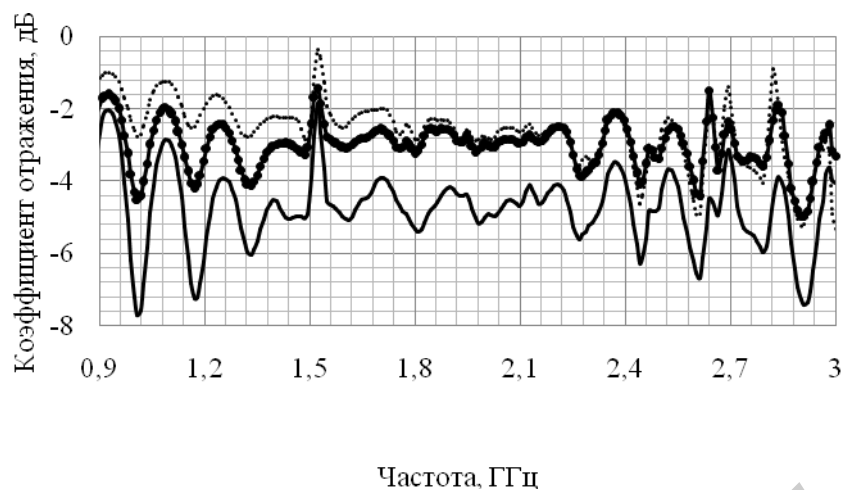
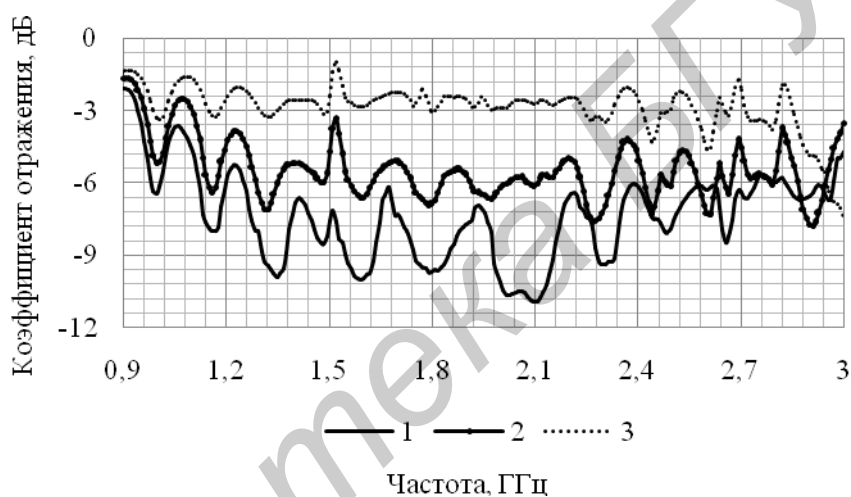
*a**б*

Рис. 1. Частотные зависимости коэффициента отражения (*a*) и коэффициента отражения с металлом (*б*), конструкции экрана ЭМИ в диапазоне частот 0,9–3 ГГц, выполненной на основе керамзита, содержащего водные растворы хлорида натрия:

1 – раствор № 1; 2 – раствор № 2, 3 – раствор № 3

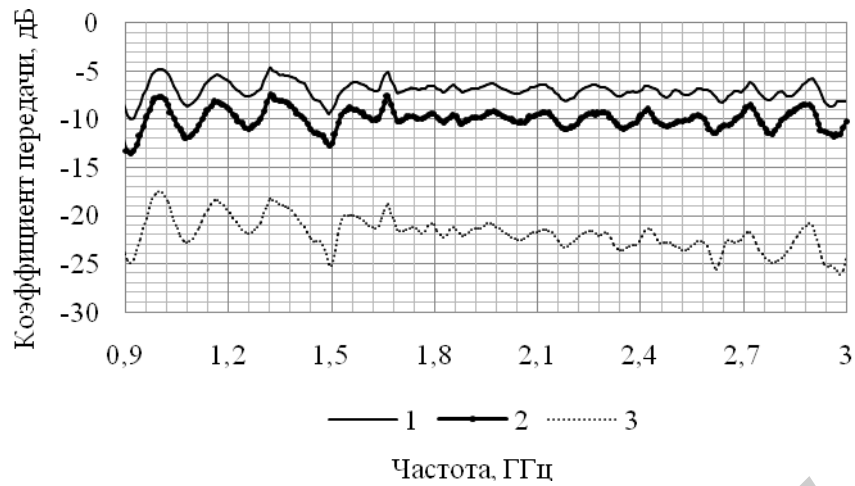


Рис. 2. Частотные зависимости коэффициента передачи конструкции экрана ЭМИ в диапазоне частот 0,9–3 ГГц, выполненной на основе керамзита, содержащего водные растворы хлорида натрия: 1 – 3 см. на рис. 1

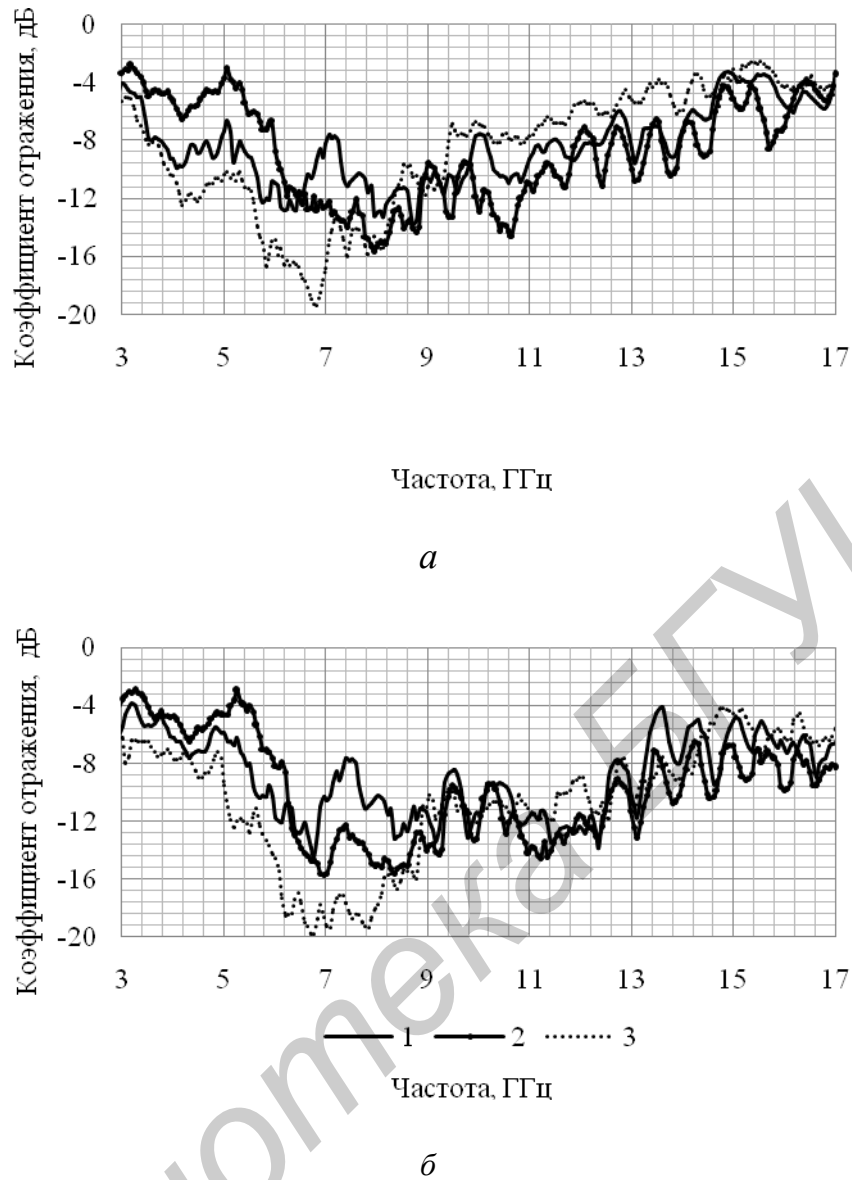


Рис. 3. Частотные зависимости коэффициента отражения (*a*) и коэффициента отражения с металлом (*b*) конструкции экрана ЭМИ в диапазоне частот 3–17 ГГц, выполненной на основе керамзита, содержащего водные растворы хлорида натрия:

1 – 3 см. на рис. 1

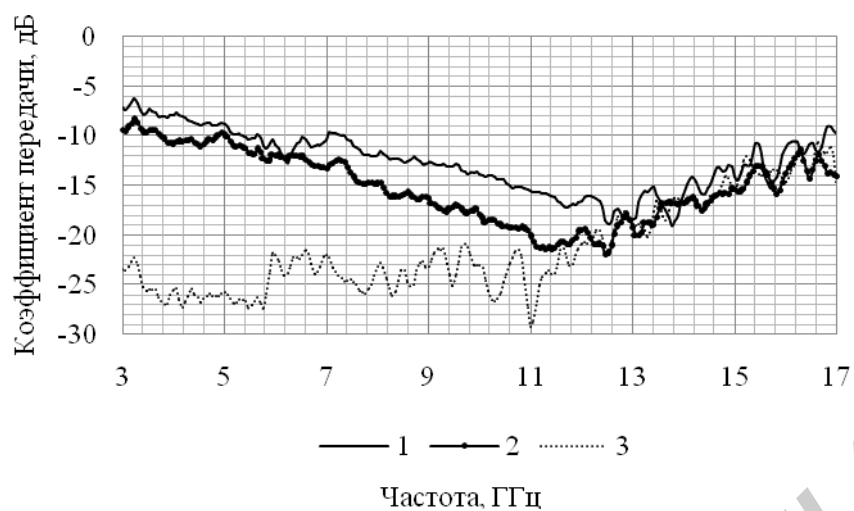


Рис. 4. Частотные зависимости коэффициента передачи конструкции экрана ЭМИ, в диапазоне частот 3–17 ГГц, выполненной на основе керамзита, содержащего водные растворы хлорида натрия: 1 – 3 см. на рис. 1

С.Э. Саванович, Т.В. Борботько

Влияние вязкости водного раствора хлорида натрия, введенного в поры керамзита, на его радиопоглощающие свойства // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз. -тэхн. навук. 2016. № 3. С.

Резюме

Установлено влияние вязкости водного раствора хлорида натрия, вводимого в керамзит, на его значения коэффициентов отражения и передачи в диапазоне частот 0,9–17 ГГц. Определены оптимальные величины концентраций водного раствора. Предложено использование полученных результатов исследования при разработке конструкций экранов электромагнитного излучения для создания экранированных помещений.

Ил. 4. Библиограф. – 15 назв.