

УДК 669.112.227.322:543.275.1

О. В. БОЙПРАВ, Т. В. БОРБОТЬКО, Л. М. ЛЫНЬКОВ

ВЛИЯНИЕ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ НА ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПОРШКООБРАЗНОГО ПЕРЛИТА

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

(Поступила в редакцию 13.03.2014)

Применение влагосодержащих материалов для формирования конструкций экранов электромагнитного излучения (ЭМИ) является весьма перспективным, ввиду того, что они обеспечивают ослабление энергии ЭМИ в широком диапазоне частот (от десятков мегагерц до сотен гигагерц) [1]. Процесс получения влагосодержащих материалов заключается в пропитывании пористых основ водными растворами. Вода состоит из свободных молекул и их конгломератов с упорядоченной гексагональной структурой, в вершинах шестиугольников которых находятся радикалы OH^- [2]. Ослабление энергии ЭМИ влагосодержащими материалами связано с потерями на электропроводность, а также с поляризационными и релаксационными потерями, возникающими при взаимодействии такого излучения с водой.

Потери энергии ЭМИ на электропроводность обусловлены протеканием во влагосодержащем материале под действием электромагнитного поля (ЭМП) электрического тока. Так как вода относится к сильнополярным диэлектрикам, то значение ее электропроводности составляет $10^3\text{--}10^5$ Ом·м [2].

Во влагосодержащем материале на границе раздела воды и пористой основы накапливаются заряды, что вызывает появление в нем внутрислойной и структурной поляризаций, являющихся составляющими его суммарной поляризации. Воздействие ЭМИ на влагосодержащий материал приводит к ее изменению. Это связано с тем, что полярные молекулы переориентируются под влиянием ЭМП, преодолевая при этом силы внутреннего трения, вызванные вязкостью жидкости. В результате данного процесса энергия ЭМИ переходит в тепловую энергию, что обуславливает ее поляризационные потери. При увеличении значения частоты ЭМИ полярные молекулы не успевают переориентироваться в пространстве за полупериод изменения ЭМП и возникают релаксационные потери [2].

Влагосодержание материала влияет на величину суммарной поляризации его молекул, обусловленной функциональной связью между электродинамическими параметрами материала (значениями критической частоты, диэлектрической проницаемости, тангенса угла диэлектрических потерь и т. п.) и его влажностью. Такая связь наиболее выражена в диапазоне сантиметровых длин волн [3]. Поэтому, изменяя величину влагосодержания материалов, можно получать требуемые значения характеристик отражения и передачи ЭМИ экранов, формируемых на основе таких материалов.

В качестве пористых основ для получения влагосодержащих материалов в настоящее время используются порошкообразные и волокнистые матрицы. Среди порошкообразных матриц наиболее широкое применение получили силикагель и бентонит [4–6]. Один недостаток таких матриц заключается в их значительной массе, превышающей по величине массу жидкости, которую они могут впитать. Объемная насыпная масса силикагеля в зависимости от размера его фракций составляет $400\text{--}760$ кг/м³, а его влагопоглощение – $30\text{--}70$ мас. % [7], объемная насыпная масса бентонита – $1750\text{--}2020$ кг/м³, влагопоглощение – $30\text{--}40$ мас. % [6]. Другой существенный недостаток влагосодержащих материалов состоит в необходимости их герметизации [8]. Ис-

ключение указанных недостатков возможно при выборе иной пористой основы для влагосодержащих материалов.

В рамках настоящей работы в качестве такой основы предложено использовать вспученный порошкообразный перлит (далее по тексту перлит) марки М75, который характеризуется наименьшим значением объемной насыпной массы ($45\text{--}75 \text{ кг/м}^3$) по сравнению с перлитом других существующих марок. Низкое значение объемной насыпной массы перлита марки М75 объясняется его высокой пористостью (примерно 80 %), которая характеризуется совокупностью открытых и закрытых пор. Непостоянство значения объемной насыпной массы перлита марки М75 связано с его неоднородным гранулометрическим составом: размер фракций перлита марки М75 1–3 мм. Перечень основных компонентов перлита и их содержание в нем представлены в таблице.

Состав перлита

| Компонент | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | NaO | K ₂ O | H ₂ O | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO |
|-------------------------------|------------------|--------------------------------|-----|------------------|------------------|--------------------------------|-----|-----|
| Процентное содержание, мас. % | 70–75 | 12–14 | 3–5 | 3–5 | 2,5–6 | 1–5 | 1–5 | 1–5 |

Наличие в перлите как открытых, так и закрытых пор обуславливает его способность не только впитывать, но и удерживать влагу. Установлено, что величина стабильного влагосодержания перлита марки М75, пропитанного водой, составляет 20 мас. %.

Цель настоящей работы заключалась в исследовании свойств (интенсивности испарения влаги, величины стабильного влагосодержания) и электродинамических параметров (значений критической частоты и мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости) влагосодержащего перлита марки М75. Для этого были решены следующие задачи:

выбор растворов для пропитывания перлита марки М75;

выявление зависимости влагоудерживающих свойств перлита марки М75 от концентрации использованного для его пропитывания раствора;

установление взаимосвязи между интенсивностью испарения влаги из перлита марки М75 и концентрацией использованного для его пропитывания раствора;

измерение коэффициентов передачи ЭМИ влагосодержащего перлита марки М75;

получение зависимости величины критической частоты и максимального значения мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости влагосодержащего перлита марки М75 от концентрации раствора, использованного для его пропитывания.

В качестве жидкостей для пропитывания перлита были выбраны водные растворы хлорида кальция, значения концентрации которых изменялись от 10 до 40 мас. %. Хлорид кальция является гигроскопичным материалом, поэтому за счет регулирования его концентрации в водном растворе, используемом для пропитывания перлита, можно управлять изменением величины стабильного влагосодержания последнего. Согласно [9], максимальная растворимость хлорида кальция в воде в условиях комнатной температуры составляет 42,7 мас. %.

Показано, что концентрация водного раствора хлорида кальция, использованного для пропитывания перлита, влияет не только на величину его стабильного влагосодержания, но и на длительность процесса стабилизации. Например, в перлите, для пропитывания которого использовался 10 %-ный водный раствор хлорида кальция, процесс стабилизации влагосодержания в условиях комнатной температуры длился 6 сут, в перлите, для пропитывания которого использовались 20 %-, 30 %- и 40 %-ные водные растворы хлорида кальция, данный процесс протекал 11, 10 и 9 сут соответственно. Контроль величин влагосодержания перлита, пропитанного водными растворами хлорида кальция, проводился в течение 30 сут с применением гравиметрического метода. В результате проведенного эксперимента получены зависимости величин стабильного влагосодержания (W) перлита марки М75 и интенсивности испарения из него влаги (V) от концентрации использованного для его пропитывания водного раствора хлорида кальция (C). Данные зависимости представлены на рис. 1, а, б. Измерения параметров, использованных для построения представленных зависимостей, проводились при температуре окружающей среды 20 °С и относительной влажности воздуха 80 %.

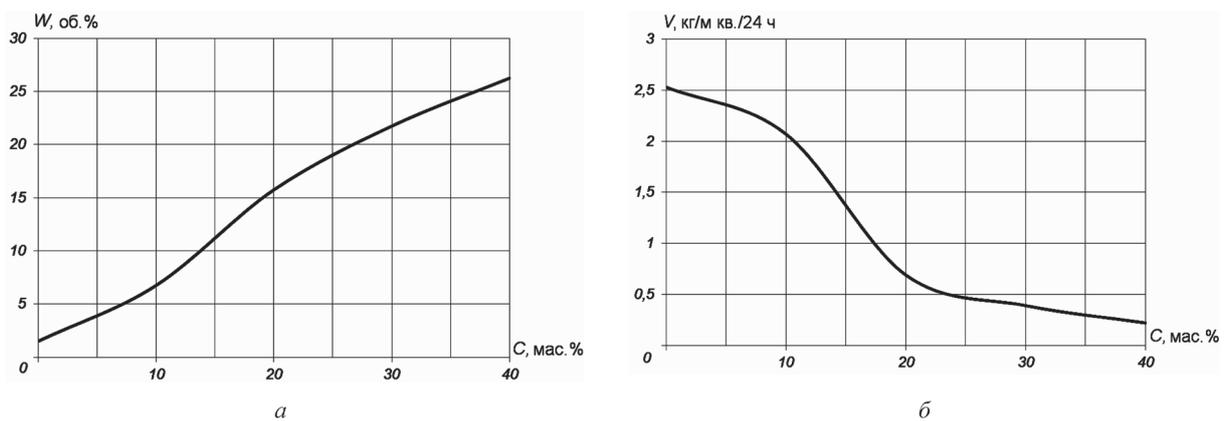


Рис. 1. Зависимости величины стабильного влагосодержания перлита марки М75 (а) и интенсивности испарения из него влаги (б) от концентрации использованного для его пропитывания водного раствора хлорида кальция

Установлено, что объемная насыпная масса 1 м³ влагосодержащего перлита марки М75, для пропитывания которого использовался 10 %-ный водный раствор хлорида кальция, составляет 85,5–142,5 кг, а перлита, для пропитывания которого применялись 20 %-, 30 %- и 40 %-ные водные растворы хлорида кальция, – 139,5–232,5, 175,5–292,5 и 202,5–337,5 кг соответственно. Таким образом, значения объемной насыпной массы влагосодержащего перлита марки М75 превышают значения объемной насыпной массы сухих силикагеля и бентонита.

В [3] показано, что величина влагосодержания материала влияет на его характеристики передачи ЭМИ, а значит, и на электродинамические параметры (значения критической частоты и мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости). Для определения указанных параметров влагосодержащего перлита марки М75 в рамках настоящей работы проведены измерения его коэффициентов передачи ЭМИ в диапазоне сантиметровых длин волн (3–17 ГГц) с использованием панорамного измерителя коэффициентов отражения и передачи SNA 0,01–18 согласно методике [10]. При этом в процессе измерений влагосодержащий перлит засыпался в кюветы с твердыми стенками, изготовленными из радиопрозрачного материала. Расстояние между передней и задней стенками кювет составляло 40 мм. При таком расстоянии обеспечивались малые значения коэффициентов отражения ЭМИ от задней стенки кюветы, что необходимо для увеличения точности определения электродинамических параметров влагосодержащего материала [3]. На основании частотных зависимостей коэффициентов передачи ЭМИ влагосодержащего перлита получены значения его критической частоты (f_0). Им соответствовали величины частот взаимодействующего с перлитом ЭМИ, при которых коэффициент передачи последнего был минимальным (так как на критической частоте значения мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости материала, а значит, и уровни поглощенной им энергии ЭМИ максимальные).

Показано, что увеличение влагосодержания перлита марки М75 приводит к уменьшению величины его критической частоты. Например, значение f_0 влагосодержащего перлита, для пропитывания которого использовался 10 %-ный водный раствор хлорида кальция, составило 11 ГГц, а перлита, для пропитывания которого применялись 20 %-, 30 %- и 40 %-ные водные растворы хлорида кальция, – 6, 4,8 и 4 ГГц соответственно. При этом значение коэффициента передачи ЭМИ влагосодержащего перлита марки М75 на частоте f_0 состав-

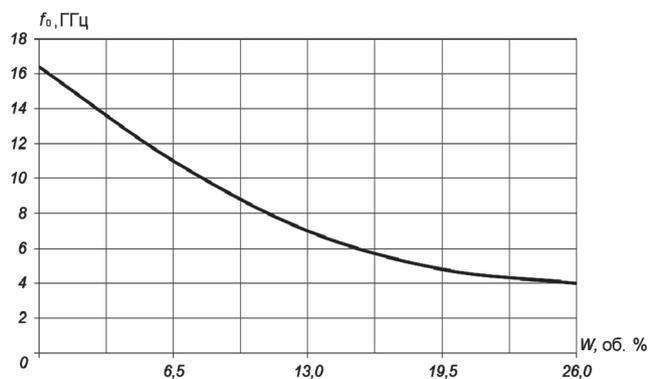


Рис. 2. Зависимость значений критической частоты влагосодержащего перлита марки М75 от величины его влагосодержания

ляло в зависимости от величины влагосодержания от -25 до -35 дБ. Зависимость значений критической частоты перлита от величины его влагосодержания приведена на рис. 2.

С использованием значений коэффициентов передачи ЭМИ влагосодержащего перлита, полученных в результате проведенных измерений, рассчитаны максимальные величины мнимой части (ε'') его комплексной диэлектрической проницаемости [3]:

$$\alpha = \frac{8,68d}{K_{\text{пер}}}, \quad (1)$$

где α – затухание ЭМИ в образце; d – толщина образца; $K_{\text{пер}}$ – модуль коэффициента передачи ЭМИ на резонансной частоте;

$$\alpha = \frac{\pi\varepsilon''}{\lambda\sqrt{\varepsilon'}}. \quad (2)$$

Здесь λ – длина волны, соответствующая частоте f_0 ;

$$\varepsilon' + \varepsilon'' = \varepsilon_0 \quad (3)$$

(ε' – значение действительной части комплексной диэлектрической проницаемости материала на частоте f_0 ; ε_0 – статическая диэлектрическая проницаемость). Представленное соотношение справедливо только для значений ε' и ε'' на частоте f_0 :

$$\varepsilon_0 = W\varepsilon_1 + (1-W)\varepsilon_2 \quad (4)$$

(ε_1 и ε_2 – значения статической диэлектрической проницаемости воды и перлита, равные соответственно 81 и 2,8).

На основании результатов расчета получена зависимость максимального значения мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости влагосодержащего перлита ($\varepsilon''_{\text{max}}$) от концентрации использованного для его пропитывания водного раствора хлорида кальция. Данная зависимость представлена на рис. 3. Установлено, что если для пропитывания перлита марки М75 используется водный раствор хлорида кальция с концентрацией 0–13 мас. %, то значение мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости получаемого в результате данного процесса влагосодержащего материала нелинейно возрастает от 1 до 2 по мере увеличения концентрации. Если используется водный раствор хлорида кальция с концентрацией 13–40 мас. %, то аналогичное значение линейно возрастает от 2 до 9.

Таким образом, результаты исследований могут быть использованы в процессе получения влагосодержащих материалов с требуемыми значениями критической частоты и мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости, а значит, и характеристиками передачи ЭМИ. При этом данные характеристики будут определяться концентрацией водного раствора хлорида

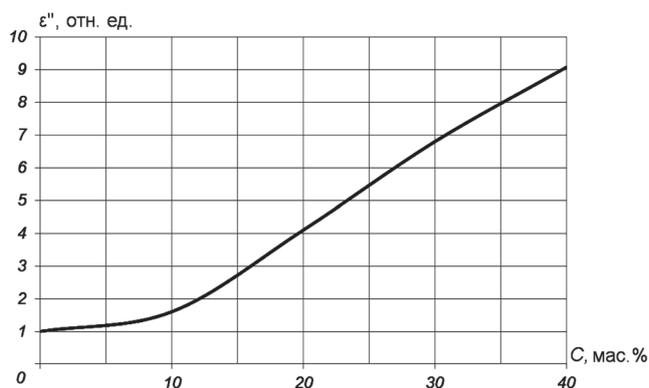


Рис. 3. Зависимость максимального значения мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости влагосодержащего перлита марки М75 от концентрации использованного для его пропитывания водного раствора хлорида кальция

кальция. Расширение области значений электродинамических параметров влагосодержащего перлита возможно путем изменения его марки (например, при использовании перлита марки М150 или агроперлита, которые характеризуются иными гранулометрическим составом, пористостью и характеристиками влагопоглощения).

При использовании влагосодержащего перлита могут формироваться специальные модули, экранирующие ЭМИ. При этом в процессе формирования таких модулей влагосодержащий перлит следует засыпать в контейнеры (например, формируемые на основе листового сотового поликарбоната). Кроме

того, на основе влагосодержащего перлита можно изготавливать композиты для экранирующих ЭМИ модулей, применяя в качестве связующего вещества цементные либо гипсовые растворы. Величина влагосодержания перлита в этих случаях будет определяться требованием к диапазону частот, в котором должно обеспечиваться необходимое значение коэффициента передачи ЭМИ таких модулей, а толщина последних – требованием, предъявляемым к параметрам их характеристик отражения и передачи ЭМИ. Данные модули не будут нуждаться в герметизации, что позволит увеличить их технологичность и уменьшить стоимость. Они могут использоваться в экранируемых помещениях.

Литература

1. Колбун Н. В., Лыньков Л. М., Богуш В. А. и др. // Вестн. ПГУ. Серия В. Прикладные науки. 2004. № 12. С. 30–35.
2. Семихина Л. П. Диэлектрические и магнитные свойства воды в водных растворах и биообъектах в слабых электромагнитных полях. Тюмень, 2005.
3. Федюнин П. А., Дмитриев Д. А., Воробьев А. А. и др. Микроволновая термовлагодетерминация. М., 2004.
4. Украинец Е. А., Колбун Н. В. // Докл. БГУИР. 2003. Т. 1, № 4. С. 118–122.
5. Колбун Н. В., Фан Н. Занг, Лыньков Л. М. и др. // Телекоммуникации: сети и технологии, алгебраическое кодирование и безопасность данных: Материалы докл. Междунар. науч.-техн. семинара. Мн., 2004. С. 78–84.
6. Колбун Н. В., Фан Н. Занг, Лыньков Л. М. // Докл. БГУИР. 2005. № 5. С. 51–54.
7. ГОСТ 3956–76. Силикагель технический. Технические условия.
8. Колбун Н. В., Фан Н. Занг // Изв. БИА. 2004. № 2 (18)/2. С. 158–159.
9. Позин М. Е. Технология минеральных солей. Л., 1974.
10. Бойправ О. В., Неамах М. Р., Соколов В. Б. // Докл. БГУИР. 2012. № 1 (63). С. 70–75.

O. V. BOIPRAV, T. V. BORBOTKO, L. M. LYNKOU

WATER CONTENT INFLUENCE ON THE ELECTRODYNAMIC PARAMETERS OF POWDERED PERLITE

Summary

The dependences of critical frequency and imaginary part of complex permittivity of the expanded powdered perlite brand M75 from its water content is researched. It's proposed to use the investigated results in the creation process of shielding modules on the basis of water-containing expanded powdered perlite with the required electromagnetic radiation transmission coefficients.