

## **Стабильность экранирующих характеристик влагосодержащих материалов при фазовом переходе воды**

**Пухир Г. А.\*, Насонова Н. В.\*\*, Лыньков Л. М.\*\*\***

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР),  
ул. П.Бровки, 6, 220013, Минск, Беларусь*

*\*e-mail: [aleks@bsuir.by](mailto:aleks@bsuir.by)*

*\*\*e-mail: [NasonovaN@bsuir.by](mailto:NasonovaN@bsuir.by)*

*\*\*\*e-mail: [leonid@bsuir.by](mailto:leonid@bsuir.by)*

### **Аннотация**

Исследовано влияние физико-химических процессов, происходящих в объеме и на поверхности влагосодержащих композиционных материалов при нагреве до 150°C, на стабильность их экранирующих характеристик. Получены гибкие экранирующие материалы, сохраняющие стабильность свойств при изменении температуры в широких пределах.

**Ключевые слова:** экран электромагнитного излучения, композиционные материалы, влагосодержащие материалы, температурная зависимость эффективности экранирования

### **Введение**

Одним из перспективных направлений развития экранов и радиопоглотителей электромагнитного излучения является синтез композиционных влагосодержащих материалов, механические свойства которых обеспечиваются за счет используемой пористой матрицы – упорядоченной или неупорядоченной, волокнистой или порошковой, применения полимерного связующего и т.д.- а экранирующие свойства обуславливаются свойствами жидкости, заполняющей поровое пространство матрицы [1-3].

Высокие диэлектрические потери воды в СВЧ-диапазоне и совокупность ее физико-химических свойств обеспечивают перспективность ее применения в качестве основы для синтеза высокоэффективных радиопоглощающих материалов [4]. Введение в воду примесей

позволяет изменять ее характеристики: электропроводность и диэлектрическую проницаемость раствора, вязкость и т.д. Использование в радиопоглощающих конструкциях различных растворов на основе дистиллированной воды позволяет получать экраны и радиопоглотители с заданными электромагнитными характеристиками.

В работах [5-8] показано, что в зависимости от природы и концентрации добавок раствора, структурных и физических параметров матрицы, а также доли жидкости в поровом объеме матрицы, экранирующие характеристики композиционных влагосодержащих материалов могут быть получены в достаточно широких пределах: ослабление 3–40 дБ и коэффициент отражения  $-2...-12$  дБ.

Области применения экранирующих материалов широки: решение проблем радиоэкологии, обеспечение электромагнитной совместимости электронного оборудования, снижение радиолокационной заметности наземных объектов и др., поэтому важным является сохранение экранирующих характеристик в заданных пределах при изменении условий эксплуатации (в частности, температуры и влажности). Как уже отмечалось, эксплуатационные свойства влагосодержащих композиционных материалов задаются свойствами матрицы и составом раствора [9]. Исследования [10] показали, что стабильность электромагнитных параметров влагосодержащих материалов в основном определяется температурной зависимостью диэлектрической проницаемости воды и до температуры  $+50^{\circ}\text{C}$  существенно не изменяется. Интерес представляет исследование поведения таких гетерогенных материалов в точках фазовых переходов воды, как основного компонента таких экранирующих материалов.

Целью работы являлось установление влияния физико-химических процессов, происходящих в объеме и на поверхности влагосодержащих композиционных материалов при изменении температуры в широких пределах, на стабильность их экранирующих характеристик.

### **Теоретические сведения**

Вода представляет собой полярный диэлектрик, молекулы которого образуют диполь и обладают постоянным электрическим моментом в отсутствие внешнего поля.

Согласно современным представлениям [11, 12] молекулы воды в жидком состоянии образуют сложные молекулярные конфигурации (ассоциаты), состоящие из связанных гексагональных фрагментов, которые в пространстве ориентированы хаотично [13].

Действительная и мнимая части диэлектрической проницаемости дистиллированной воды являются частотнозависимыми [14].

Поглощение энергии электромагнитного излучения диапазона СВЧ связано с релаксационным процессом ориентационной поляризации диполей воды в диапазоне частот до 300 ГГц и описывается уравнением Дебая:

$$\varepsilon^* = \left( \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty}{1 + \omega^2 \tau^2} \right) + j \left( \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty}{1 + \omega^2 \tau^2} \right) \omega \tau$$

или

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty}{1 + j \frac{\lambda_{rel}}{\lambda}},$$

где  $\varepsilon_0, \varepsilon_\infty$  — статическое и высокочастотное значение диэлектрической проницаемости;

$\tau$  — время релаксации молекул воды;

$\omega$  — частота внешнего переменного электрического поля;

$\lambda_{rel}$  — релаксационная длина волны.

Диэлектрические потери воды малы как на низких, так и на высоких частотах, однако вблизи частоты  $\omega\tau$  проходят широкий максимум. В микроволновом диапазоне и на более низких частотах в области дебаевской релаксации действительная часть диэлектрической проницаемости воды (рисунок 1) монотонно уменьшается от значения статической диэлектрической проницаемости ( $\approx 80$ ) и, согласно теории Дебая, стремится к постоянной (наименьшей) величине  $\varepsilon_\infty$ . На частоте  $12,3 \cdot 10^{14}$  Гц измеренные значения комплексной диэлектрической проницаемости воды составляют  $\varepsilon' = 4,33$ ,  $\varepsilon'' = 2,8$  при температуре  $20^\circ\text{C}$  [15].

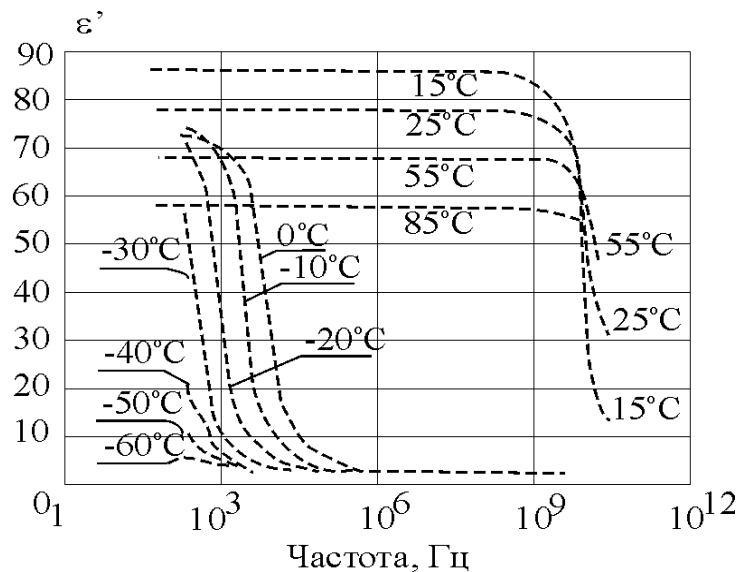


Рис. 1. Диэлектрическая постоянная объемной воды как функция частоты и температуры [16]

Нарушение структуры жидкой воды при ее фазовых переходах приводит к существенному изменению ее диэлектрических свойств. Так, диэлектрическая проницаемость воды при 99°C составляет 55,1 по сравнению со значением 1,006 для водяного пара (при 101°C).

В отличие от воды в объеме свойства тонких, моно- и полимолекулярных слоев воды, образующихся вблизи поверхности твердых тел, сильно зависят от силы притяжения поверхности и толщины слоя, поэтому их диэлектрическая проницаемость снижена по сравнению с объемной водой. Толщина слоя воды и количество такой связанной воды, а следовательно, и ее вклад в макроскопическую диэлектрическую проницаемость пористого влагосодержащего материала зависит от концентрации раствора, свойств поверхности твердого тела и общей площади поверхности пор материала. Это дает дополнительные возможности по управлению электромагнитными характеристиками композиционных экранирующих материалов путем выбора параметров пористых матриц.

Для формирования экранирующих водосодержащих материалов применяются пористые матрицы с большой пористостью, способные удерживать большое количество жидкости за счет различных механизмов сорбции. Это могут быть волокнистые или порошковые материалы, органические и неорганические.

В обычных условиях влажные материалы находятся в процессе постоянного массообмена с окружающей средой вследствие парообразования с поверхности материала. Это приводит к снижению влагосодержания пористых матриц и делает их электромагнитные характеристики зависимыми от условий эксплуатации (температуры и влажности воздуха) [17]. Для стабилизации характеристик могут применяться герметизирующие материалы [18], а в некоторых случаях и формирующие форму экранирующего материала [19] – при использовании полимерных связующих.

В качестве полимерного связующего был выбран однокомпонентный низкомолекулярный силиконовый эластомер, содержащий полимер, наполнитель и вулканизатор, и отверждающийся при комнатной температуре. Он характеризуется водостойкостью, эластичностью, хорошей адгезией к большинству материалов, высокотемпературной и морозостойкостью (от -60 до +300 °C), стойкостью к солнечному ультрафиолету и агрессивным средам, долговечностью. Полимерный силиконовый каучук является диэлектриком (диэлектрическая проницаемость  $\epsilon=2-3$ ) с высокой стабильностью свойств в диапазоне температур -50 до +270 °C и в условиях высокой влажности.

Силиконовые эластомеры поглощают при нормальной температуре до 6% воды. Однако пар при 165°C и 7 атм вступает достаточно быстро во взаимодействие с силиконовым эластомером и вызывает частичный гидролиз, размягчение и разрушение поверхности.

Использование силиконового каучука в композиционных водосодержащих материалах позволяет улучшить механическую прочность и стабилизировать экранирующие характеристики таких материалов при изменении температуры окружающей среды в пределах 0...50 °С за счет герметизации жидкой фазы в поровом объеме используемой твердотельной матрицы [20]. Однако поведение электромагнитных параметров при расширении температурного диапазона за температуру фазовых переходов воды требует дальнейшего изучения.

### **Экспериментальная часть**

В процессе исследования были изготовлены образцы, основу которых составляли порошковые и гранулированные силикагелевые адсорбирующие матрицы с размером частиц сферической формы порядка 10 мкм, диаметром гранул 2...4 мм, материал которой имеет большую площадь поверхности (до 800 м<sup>2</sup>/1 г), состоящую из групп SiOH, расположенных на расстоянии 0,5 нм друг от друга, и являющихся активными центрами адсорбции, что позволяет размещать большое количество жидкости в поровом объеме этого материала.

Для повышения электропроводности образцов (в целях увеличения эффективности экранирования) в качестве порошковой матрицы использовались также углеродсодержащие частицы природного минерала шунгит с размером фракций порядка 5...8 мкм. Шунгит состоит из высокодисперсных кристаллических силикатных частиц, имеющих глобулярную структуру, размером в среднем около 1 мкм, равномерно распределенных в аморфной углеродной матрице.

Твердотельные порошковые матрицы заполнялись водой, а также водным раствором CaCl<sub>2</sub> равновесной концентрации. Хлористый кальций обладает высокими гигроскопическими свойствами и формирует кристаллогидраты, устойчивые к изменению температуры в широких пределах, и препятствует испарению жидкости из композиционного материала, тем самым повышая стабильность экранирующих характеристик [21]. Затем порошок смешивался с силиконовым эластомером, из смеси формировался слой толщиной 3 мм, а при использовании гранулированного адсорбента – 5 мм, и производилось ее отверждение (рисунок 2).



а

б

в

Рисунок 2 – Внешний вид полученных композиционных материалов (а – образец с гранулированной матрицей, б – образец с порошковой силикагелевой матрицей, в – образец с порошковой шунгитовой матрицей)

Влагосодержание образцов контролировалось гравиметрически.

Исследование экранирующих характеристик изготовленных образцов проводились в частотном диапазоне 8...12 ГГц измерением величины ослабления (через коэффициент передачи) и коэффициента отражения ЭМИ с использованием скалярного анализатора цепей типа P2 и волноводного измерительного тракта.

После оценки экранирующих характеристик образцов в СВЧ-диапазоне частот, образцы выдерживались в электрической печи около 90 минут при постоянном мониторинге их состояния на предмет сохранения массогабаритных и эксплуатационных характеристик. Нагревание образцов осуществлялось в несколько этапов по следующим температурным точкам: 30°C, 60°C, 90°C, 120°C и 150°C. Контроль температуры поверхности образцов осуществлялся при помощи тепловизора MobIR M4 (спектральный диапазон 8...12 мкм) с разрешением 0,12 °C. Погрешность измерения абсолютных температур по абсолютно черному телу по всему полю зрения прибора составляла  $\pm 1$  °C. Методика измерения температуры основана на дистанционном измерении тепловизором температурного поля, распределенного по поверхности исследуемого модуля СТЗ (системы технического зрения), между внутренней и наружной стороной которого создан перепад температур. Тепловое изображение поверхности модуля СТЗ просматривают и снимают обзорные термограммы, выбрав базовый участок. За базовый принимают участок модуля, имеющий линейные размеры свыше двух его толщин и равномерное температурное поле, которому соответствует минимальное значение выходного сигнала тепловизора [22]. По результатам замеров температура поверхности образца

в соответствующей точке оставалась на несколько градусов ниже средней температуры в печи.

После нагрева образцов до предельной температуры они были оставлены для остывания в лабораторных условиях при комнатной температуре. Контроль изменения температуры образца также осуществлялся с помощью тепловизора. После чего были повторно исследованы экранирующие характеристики в частотном диапазоне 8...12 ГГц.

### **Результаты и обсуждение**

После смешивания компонентов начался процесс вулканизации каучукового эластомера при комнатной температуре, сопровождающийся поглощением молекул воды для формирования межмолекулярных связей из окружающего воздуха. При реакции образуется побочный продукт, который в зависимости от химического состава может быть кислотным (например, уксусная кислота), основным (например, амин) или нейтральным (например, оксим или спирт) [23].

Гравиметрические исследования показали, что вес образцов, не содержащих водного наполнителя, (при 25% равновесном влагосодержании используемой силикагелевой матрицы [24]) снизился на 14-18% за счет ухода излишков влаги и побочных продуктов вулканизации, содержащихся в эластомере, в окружающую среду. Вес образцов, заполненных водой, при этом снизился на 46-58%, что связано с поглощением воды из порошкового адсорбента при вулканизации эластомера, в том числе и физически связанной, и дальнейшим ее испарением. Вес образцов с водным раствором  $\text{CaCl}_2$  снизился всего на 10-15% вследствие удерживания воды абсорбентом.

Из характеристик динамики влагосодержания при нагреве образцов до 150°C видно, что вес образцов снижается на 3-8%, причем, видимо, происходит испарение физически связанной воды из пор адсорбентов и некоторой части химически связанной воды из абсорбента.

Типичный график динамики влагосодержания образцов композиционного материала на основе порошкового влагоудерживающего сорбента в полимерном связующем при нагреве до 150°C приведен на рисунке 3.

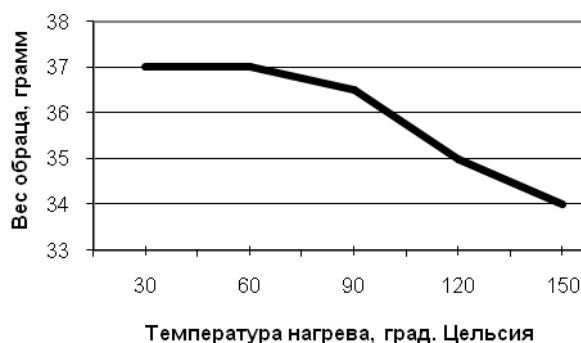


Рисунок 3 – Типичная динамика влагосодержания образцов влагосодержащих композиционных материалов при нагреве

Видно, что повышение температуры больше 60° приводит к усилению парообразования и уходу воды из материала. Нагрев до 150° приводит к испарению всей физически связанной воды из композита. При этом влагосодержание образцов, пропитанных водой, снизилось на 3-6 % по сравнению с весом образца перед нагревом и до 40-50 % мас. по сравнению с исходным весом всех компонентов. Показано, что применение  $\text{CaCl}_2$  в качестве компонента раствора препятствует полному испарению влаги из объема материала и влагосодержание таких образцов снизилось до 62-83% от первоначального значения вследствие формирования химических связей с молекулами воды в кристаллогидрате хлористого кальция.

Сравнивая динамику влагосодержания разных видов адсорбентов, видно, что существенной разницы в характеристиках не наблюдается и нагрев приводит к разрушению физических связей молекул воды и поверхности адсорбента.

По результатам замеров температуры остывания образцов, полное остывание образцов на основе силикагелевых матриц было достигнуто за 10-15 минут, а с добавкой порошка шунгита – за 25 минут, когда температура поверхности образца достигла средней температуры воздуха в лаборатории (25°C).

Исследование экранирующих характеристик образцов на основе порошковых матриц в полимерном связующем толщиной 2 мм показали (рисунок 4), что различия в характеристиках ослабления и отражения ЭМИ находятся в пределах погрешности измерений. Это объясняется тем, что при использовании порошковой матрицы эластомер имеет большую поверхность контакта с твердотельной матрицей и, следовательно, поглощает для вулканизации большую долю воды, содержащейся на поверхности адсорбента, по сравнению с гранулированной матрицей. Разница в величине ослабления ЭМИ между порошковыми матри-



цами, пропитанными и незаполненными водой, вызвана технологическими трудностями при изготовлении образцов, в результате в образце с порошком, незаполненным водой, содержится больше порошка силикагеля и меньше – связующего, и в итоге, удельный вес жидкой фазы оказался больше.

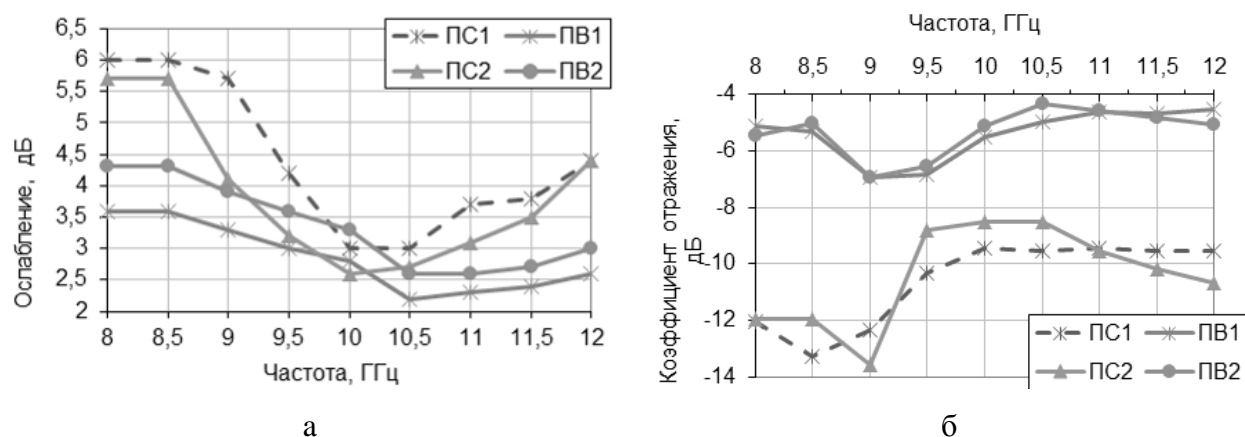


Рисунок 4 – Экранирующие характеристики (ослабление (а) и коэффициент отражения (б) ЭМИ в режиме КЗ) порошкообразных силикагелевых матриц в полимерном связующем, толщиной 2 мм: PC1, PC2 – порошковые матрицы, не заполненные водой, до и после нагрева; PB1, PB2 – порошковые матрицы, пропитанные водой, до и после нагрева

Введение в состав пористой матрицы проводящих частиц шунгита приводит к увеличению ослабления ЭМИ на 1-3 дБ вследствие добавления потерь на проводимость и увеличения коэффициента отражения ЭМИ.

После воздействия температуры 150°C, несмотря на уменьшение доли воды в образцах, величина ослабления ЭМИ повышается с 4,8...7,1 дБ до 7,0...9,1 дБ. Это можно объяснить выгоранием алифатических цепочек под действием температуры, которые изолируют друг от друга проводящие комплексы, создавая большое сопротивление прохождению тока. При повышении температуры и длительности термообработки такие соединения выгорают, причем с тем большей скоростью, чем выше температура. Структура при этом упорядочивается, кристаллиты графита начинают соприкасаться друг с другом, создавая единую систему, что и вызывает резкое снижение сопротивления углерода при их нагревании и активировании.

Для образцов на основе гранул силикагеля без воды и предварительно заполненных водой (рисунок 5), ослабление ЭМИ до и после нагрева находится на одинаковом уровне, что

может быть связано с поглощением дополнительной воды из пористой матрицы в процессе вулканизации эластомера. Нагрев до 150°C приводит к испарению оставшейся доли воды из пор адсорбента, что выражается в некотором снижении величины ослабления ЭМИ и коэффициента отражения после нагрева.

Ослабление ЭМИ образцами на основе гранулированного адсорбента выше по сравнению с характеристикой порошкообразной матрицы из-за различной толщины исследованных образцов.

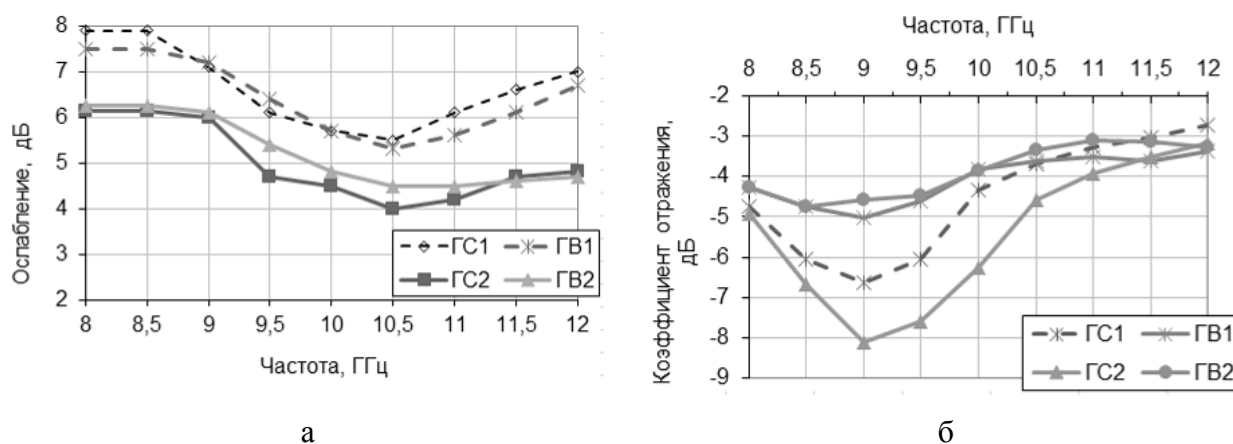


Рисунок 5 – Экранирующие характеристики (ослабление (а) и коэффициент отражения (б) ЭМИ в режиме КЗ) гранулированных матриц в полимерном связующем, толщиной 4 мм: ГС1, ГС2 – гранулированные матрицы, не заполненные водой, до и после нагрева; ГВ1, ГВ2 – гранулированные матрицы, пропитанные водой, до и после нагрева

Поведение экранирующих характеристик образцов на основе матриц, заполненных водным раствором адсорбента (рисунок б), аналогично зависимостям, полученным для образцов, заполненных водой. Однако общее ослабление ЭМИ выше за счет большей доли воды, оставшейся после нагрева и удерживаемой химическими связями адсорбента, что следует и из результатов гравиметрических исследований.

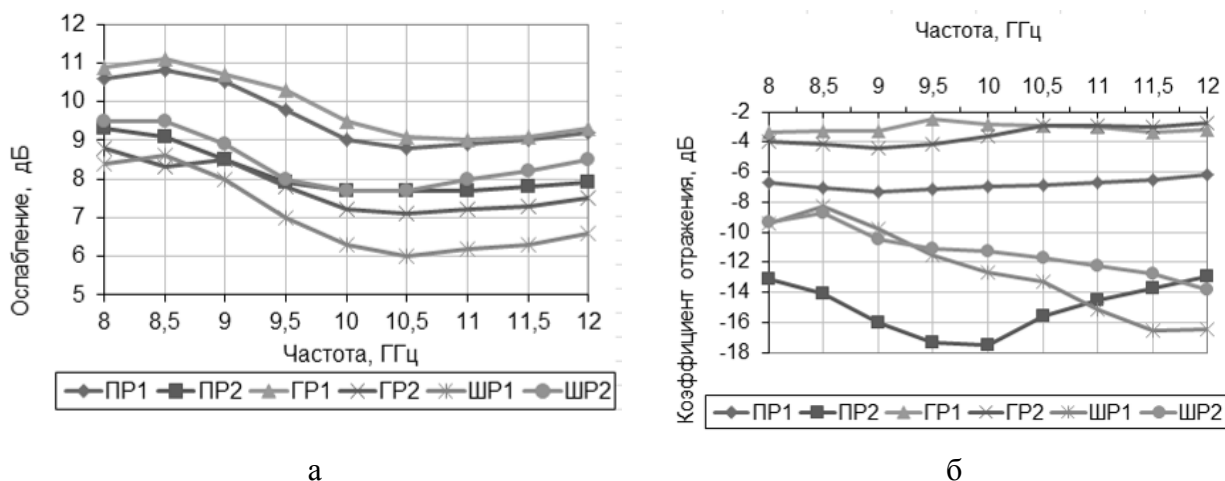


Рисунок 6 – Экранирующие характеристики (ослабление (а) и коэффициент отражения (б) ЭМИ в режиме К3) порошковых и гранулированных матриц в полимерном связующем, толщиной 2 и 4 мм: ПР1, ПР2 – порошковые матрицы, заполненные водным раствором  $\text{CaCl}_2$ , до и после нагрева; ГР1, ГР2 – гранулированные матрицы, пропитанные водным раствором  $\text{CaCl}_2$ , до и после нагрева; ШР1, ШР2 – шунгитовые порошковые матрицы, пропитанные водным раствором  $\text{CaCl}_2$ , до и после нагрева.

### Заключение

Полученные экспериментальные данные результатов гравиметрии и измерений экранирующих характеристик исследуемых образцов экранирующих композиционных материалов позволяют сделать вывод о следующем. Формирование устойчивых к воздействию различных факторов внешней среды материалов и экранов электромагнитного излучения является не менее важным, чем обеспечение их высокой эффективности экранирования. Одним из существенных воздействий на влагосодержащие композиционные материалы является повышение температуры выше установленного значения фазового перехода воды. Испарение жидкости может приводить к изменению экранирующих характеристик и вызывать ухудшение эксплуатационных свойств влагосодержащего образца или его полное разрушение.

Применение кремнийорганического связующего для порошковых сорбентов с жидкими включениями позволяет создавать гибкие конструкции экранов ЭМИ различной формы и толщины. Данный тип эластичного полимера позволяет сохранять воду в структуре композиционного материала как при обычных условиях эксплуатации без дополнительной герметизации активных компонентов системы, так и в условиях повышения температуры до  $150^\circ\text{C}$ .

При нагреве образцов с кремнийорганической матрицей до 150°C происходит понижение ослабления ЭМИ в среднем на 2...3 дБ вследствие испарения воды, причем при использовании порошковых матриц уход воды больше из-за большей площади поверхности, взаимодействующей с полимерным связующим. Коэффициент отражения сильно зависит от формы поверхности образца.

Для образцов на основе углеродосодержащего порошка после термической обработки наблюдается улучшение эффективности экранирования вследствие разрушения непроводящих прослоек между проводящими частицами, что приводит к увеличению проводимости материала.

Пропитка сорбирующих порошков растворами гидрофильных солей щелочно-земельных металлов замедляет процесс испарения жидкости из образца и обеспечивает восстановление влагосодержания композита через 10 – 20 минут после прекращения высокотемпературного воздействия на образец, что подтверждается результатами гравиметрических замеров. Необходимым условием в данном случае является наличие относительной влажности воздуха среды, в которую помещен образец после нагрева. Изменение экранирующих характеристик, как при формировании композиционного материала, так и при воздействии температуры, составляет  $\pm 1,5$  дБ для различных видов порошковых и гранулированных матриц, что позволяет предложить такие композиционные материалы в качестве элементов экранов ЭМИ, обладающих стабильными свойствами в широком диапазоне температур.

Размер частиц сорбента оказывает влияние на конструктивные возможности и процесс изготовления материала. Увеличение размера частиц до гранул размером 2...4 мм приводит к снижению эластичности и гибкости образца композиционного материала. При предварительной пропитке гранул водой или солевым раствором ухудшается адгезия связующего к сорбенту, что делает невозможным формирование целостной структуры без дополнительной герметизации и ограничивает область использования таких материалов. Для образцов на основе мелкодисперсных порошков характерна высокая гибкость, технологичность изготовления и эффективность экранирования сравнимая с аналогичными характеристиками образцов большей толщины. Порошковые сорбенты позволяют создавать более развитую структуру поверхности и обладают хорошей адгезией к связующему.

Таким образом, композиционные материалы на основе влагосодержащих порошков, распределенных в эластичном полимере, позволяют создавать гибкие конструкции экранов ЭМИ, эффективные для защиты как стационарных, так и мобильных объектов в условиях

воздействия повышенных температур с сохранением стабильности их эксплуатационных свойств.

### Библиографический список

1. Борботько Т.В., Колбун Н.В., Лыньков Л.М., Терех И.С., Хижняк А.В. Поглотители электромагнитного излучения. Применение в вооруженных силах: монография / под ред. Л.М. Лынькова. — Минск: Бестпринт, 2006. — 228 с.
2. Борботько Т.В., Колбун Н.В., Лыньков Л.М. Антропогенные источники электромагнитного излучения. Безопасность жизнедеятельности человека: монография / под ред. Лынькова. — Минск: Бестпринт, 2008. — 214 с.
3. Альлябад Х.М., Пулко Т.А., Насонова Н.В., Лыньков Л.М., под общ. редакцией Лынькова Л.М. Пассивные технические средства обеспечения информационной безопасности от утечки по электромагнитному, оптическому и акустическому каналам / под ред. Лынькова. — Минск: Бестпринт, 2010. — 225 с.
4. Лыньков Л.М., Богуш В.А., Колбун Н.В. и др. Новые материалы для экранов электромагнитного излучения / Доклады БГУИР. — 2004. — Т.2, №5. — С.152–167.
5. Kolbun N.V., Borbot'ko T.V., Kazeka A.A., etc. Simulation of electromagnetic radiation passing through liquid-containing nanostructured materials / Proc. of SPIE. — 2009. — Vol. 7377-0A
6. Пухир Г.А., Пулко Т.А. Композиционные материалы с диэлектрическими включениями для экранов электромагнитного излучения и условия повышения их эффективности / Современные средства связи. Материалы XVI Международной научно-технической конференции, 27-29 сентября 2011 г., Минск: УО ВГКС, 2011. — С. 101.
7. Колбун Н.В., Лыньков Л.М., Борботько Т.В., Богуш В.А. Пористые волокнистые материалы с жидкостными наполнителями для экранирования электромагнитного излучения / Вестник ПГУ, Сер.В. Прикладные науки. — 2004. — № 12. — С.30–34.
8. Колбун Н.В., Альлябад Х.М., Лыньков Л.М. Использование композитных сред с порошкообразными сорбентами для экранов электромагнитного излучения // Вестник военной академии Республики Беларусь. — №2 (19), 27 июня 2008 г. — С.71-74.
9. Kolbun N. Temperature dependence of electromagnetic radiation attenuation by water-containing materials with dispersed structure // Proceedings of XXVIIIth General Assembly of the International Union of Radio Science in New Delhi, India, 23-29 October 2005 (CD-R).
10. Лыньков Л.М., Борботько Т.В., Колбун Н.В. и др. Исследование свойств гетерогенных радиопоглощающих материалов / Тезисы докладов МПК по военно-техническим про-

- блемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного применения. – Минск: ГУ “Бел ИСА”, 2005. – С. 42-43.
11. Богданов Е.В., Мантрова М. Эквикластерная модель воды // Биомедицинская радиоэлектроника. — 2000. — №7. — С.19–28.
  12. Гапочка Л.Д., Гапочка М.Г., Королев А.Ф. и др. Механизмы функционирования водных биосенсоров ЭМИ / Биомедицинская радиоэлектроника. — 2000. — №3. — С.48–55.
  13. Петросян В.И., Синицын Н.И., Ёлкин В.А., Башкатов О.В. Взаимодействие водосодержащих сред с магнитными полями / Биомедицинская радиоэлектроника. — 2000. — №2. — С.10–19.
  14. Бензарь В.К. Техника СВЧ-влажнометрии. — Мн.: Вышэйшая школа, 1974. — 374 с.
  15. Гайдук В.И., Либерман Б.М., Аплеталин В.Н., Мериакри В.В. Молекулярная модель "сверхдебаевского" поглощения излучения в воде и водном растворе неэлектролита / Радиотехника и радиоэлектроника. — 1999. — Т.44, №2. — С.234–242.
  16. Ryszard S. Jachowicz. Moisture content measurements in solid limitations and improvements with modern technology / Electromagnetic wave interaction with water and moist substances: Collect. of papers of 3-d workshop, Georgia, USA, April, 1999. — P.32–41.
  17. Пулко, Т.А., Альлябад Хуссейн Мохаммед, Насонова Н.В. Методика стабилизации влагосодержания капиллярно-пористых материалов / Инженерный вестник. — 2010.— №2(30). — С.32-34.
  18. Колбун Н.В., Фан Н. Занг Методы герметизации экранов ЭМИ на основе жидкостно-содержащих волокнистых материалов / Известия Белорусской инженерной академии. — 2004. — №2 (18)/2. — С. 158-159.
  19. Пухир Г.А., Махмуд М.Ш., Лыньков Л.М. Гибкие поглотители электромагнитных излучений на основе эластичного полимера с добавлением сорбирующих порошков» / Доклады БГУИР. — 2011. № 8 (62). — С. 99-102.
  20. Пухир Г.А., Аль-Махди М. Способы герметизации активных поглощающих компонентов экранов электромагнитного излучения и их влияние на защитные свойства экранирующих конструкций / Технические средства защиты информации. Материалы IX Белорусско-российской научно-технической конференции, 28–29 июня 2011 г., Минск: БГУИР, 2011. — С. 74.
  21. Kolbun N., Pulko T., Proudnik A., Lynkov L. Stabilization of shielding efficiency of electromagnetic radiation shields based on liquid-containing composite materials / The 18<sup>th</sup> Interna-

- tional Conference "Electromagnetic disturbances EMD 2008". Proceedings of the 18<sup>th</sup> International Conference. September 25–26 2008, Vilnius. Lithuania. P.191-194.
22. ГОСТ 26629-85. Метод тепловизионного контроля качества теплоизоляции ограждающих конструкций. М.: Изд-во стандартов, 1985. – 12 с.
  23. Корнев А.Е., Буканов А.М., Шевердяев О.Н. Технология эластомерных материалов - М., 2005. – 472 с.
  24. Ласкорин Б.Н., Стрелько В.В., Стражеско Д.Н., Денисов В.Н. Сорбенты на основе силикагеля в радиохимии. М.: Атом-издат, 1974. – 304 с.