

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования

Белорусский государственный университет информатики и
радиоэлектроники

УДК537.86:004.056.5

Лукашевич

Анатолий Александрович

Моделирование взаимодействия ЭМИ с гетерогенными материалами для
создания широкополосных средств защиты информации от утечки по каналу
ПЭМИН

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации

на соискание степени магистра технических наук

по специальности 1-98 80 01 «Методы и системы защиты информации,
информационная безопасность»

Научный руководитель

Насонова Наталья Викторовна

к.т.н., доцент

Минск 2015

Введение

Современные средства обработки информации, широко используемые в различных сферах деятельности человека, являются источниками побочных электромагнитных излучений и наводок. Актуальность разработки высокоэффективных, широкополосных, технологичных и удобных в эксплуатации экранирующих и радиопоглощающих материалов обуславливается не только проблемами защиты информации от утечки по электромагнитным каналам, но и биологического воздействия электромагнитных излучений, а также высокой потребностью в таких материалах при разработке и усовершенствовании конструкций изделий радиоэлектроники.

Последние исследования в области разработки гибких широкополосных экранов ЭМИ с повышенной эффективностью направлены на создание многофункциональных конструкций на основе композиционных материалов. При этом в качестве наполнителей используются различные материалы с потерями, а механические характеристики обуславливаются свойствами образующей матрицы. Синтезируемые материалы представляют собой сложные гетерогенные среды, свойства и механизмы взаимодействия которой с ЭМИ зависят от многих параметров и изучены недостаточно. Это обуславливает актуальность разработки физико-математических моделей, описывающих электромагнитные свойства сложных сред в зависимости от параметров их формирования.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является анализ экранирующих характеристик влагосодержащих композиционных материалов и разработка модели, позволяющей на основании структурных параметров материалов определять их диэлектрические и в дальнейшем экранирующие свойства.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- провести анализ экранирующих характеристик влагосодержащих пористых матриц от типа матрицы и ее материала, а также от концентрации воды в композите;

- установить зависимости диэлектрических свойств влагосодержащих композитов от влагосодержания и вида матрицы;

- получить данные о влиянии доли связанной воды в пористых матрицах с развитой поверхностью на диэлектрическую проницаемость водосодержащего композиционного материала, обосновать необходимость учета влияния связанной воды на диэлектрические характеристики материала;

- разработать модель, описывающую диэлектрические свойства водосодержащих композиционных материалов, на основании соотношений Дебая и теории смесей;

- оценить доли связанной воды в композиционных материалах и разработать рекомендации по выбору пористой матрицы для разработки влагосодержащих экранирующих материалов.

Объект исследования – влагосодержащие композиционные материалы для экранов электромагнитного излучения.

Предмет исследования – диэлектрические свойства гетерогенной структуры, состоящей из большого числа компонентов с разными характеристиками.

Положения, выносимые на защиту

1. Предложена модель, описывающая диэлектрические свойства влагосодержащих композиционных матриц, позволяющая оценить долю связанной воды в композите и ее влияние на величину общей диэлектрической проницаемости материала.

Личный вклад соискателя

Основные результаты диссертации получены автором самостоятельно.

В совместно опубликованных работах автору принадлежит разработка модели диэлектрической проницаемости гетерогенной среды, состоящей из

компонентов с различными характеристиками, результаты определения величины диэлектрической проницаемости композиционных материалов по коэффициентам передачи и отражения электромагнитного излучения материалов, обоснование влияния доли связанной воды в композите на величину общей диэлектрической проницаемости материала.

Апробация результатов диссертации

Теоретические и практически результаты диссертационных исследований окладывались и обсуждались на следующих научных конференциях и семинарах: XIX Международная науч.-тех. конф. «Современные средства связи», Минск, 14-15 октября 2014 г.

Опубликованность результатов диссертации

По результатам исследований, представленных в диссертации, опубликована 1 печатная работа в сборнике тезисов и докладов на международной научно-технической конференции.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, основной части из трех глав, заключения, библиографического списка. Полный объем диссертационной работы составляет 72 страниц, из них 67 страниц основного текста, библиография из 44 наименований на 3 страницах, включая 1 публикацию автора на 1 странице.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, показана необходимость разработки физико-математических моделей, описывающих электромагнитные свойства сложных сред в зависимости от параметров их формирования, для создания на их основе экранирующих материалов.

В **первой** главе проведен анализ основных механизмов и соотношений взаимодействия ЭМИ с экранирующими материалами, рассмотрены типы и конструкции экранов электромагнитных излучений, принципы их формирования и создания радиопоглощающих конструкций на основе различных типов материалов – с диэлектрическими, магнитными и магнитоэлектрическими потерями.

Во **второй** главе приводятся описания методик проведения экспериментов в диссертационной работе. На основе анализа методов определения диэлектрической проницаемости композиционных

влагосодержащих материалов обоснован метод определения диэлектрических свойств влагосодержащих композиционных материалов в диапазоне частот 8..12 ГГц и получены выражения для расчета диэлектрической проницаемости, исходя из экспериментально измеренных коэффициентов S21 и S11.

$$\varepsilon' = \left[\frac{(\varphi + n \cdot 180^\circ) \cdot \lambda}{2\pi \cdot x} + \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}}\right)^2} \right]^2 + \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}}\right)^2$$

$$tg\delta = \frac{S_{21} \cdot \lambda}{8.68 \cdot x \cdot \pi} \cdot \frac{\sqrt{\varepsilon' - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}}\right)^2}}{\varepsilon'}$$

$$\varepsilon'' = tg\delta \cdot \varepsilon'$$

где λ – длина волны излучения в свободном пространстве, м

$\lambda_{кр}$ – критическая длина волны излучения в волноводе, м, определяется как $\lambda_{кр} = 2a$, где a – длинная стенка волновода сечения, который используется для измерений в данном диапазоне частот (=23 мм для диапазона частот 8...12 ГГц)

φ – фаза коэффициента передачи

S21 – амплитуда коэффициента передачи, раз

x – толщина образца, м

Описаны методики получения образцов влагосодержащих композиционных материалов на основе волокнистых и порошковых матриц.

Микроскопические исследования структуры выбранных матриц проводили с использованием оптических микроскопов OlympusMX-50 и NikonOptifot с увеличением до 1000 раз и металлографического микроскопа Метам-Р1 с увеличением до 500 раз оборудованных цифровыми фотокамерами.

Для исследования коэффициентов передачи и отражения влагосодержащих композиционных материалов в диапазоне 8...12 ГГц в соответствии с ГОСТ 20271.1-91 Изделия электронные СВЧ. Методы измерения электрических параметров использовался векторный анализатор цепей VNAMS4644BAnritsu. Измерения проводились в панорамном режиме измерения коэффициентов передачи S21 и отражения S11, образец зажимался между фланцами волноводов.

В **третьей** главе приведены результаты моделирования взаимодействия электромагнитного излучения с влагосодержащими композиционными материалами для экранов ЭМИ.

Исследованы экранирующие характеристики влагосодержащих волокнистых материалов в диапазоне частот 8...12 ГГц. Исследовалось взаимодействие электромагнитного излучения с влагосодержащими волокнистыми матрицами на основе синтетических (образцы Т, толщина 1,3 мм) и натуральных (образцы К, толщина 1,2 мм) волокон. Влагосодержание матриц изменялось в пределах 10...55 % мас. с шагом 5% (рисунок 1).

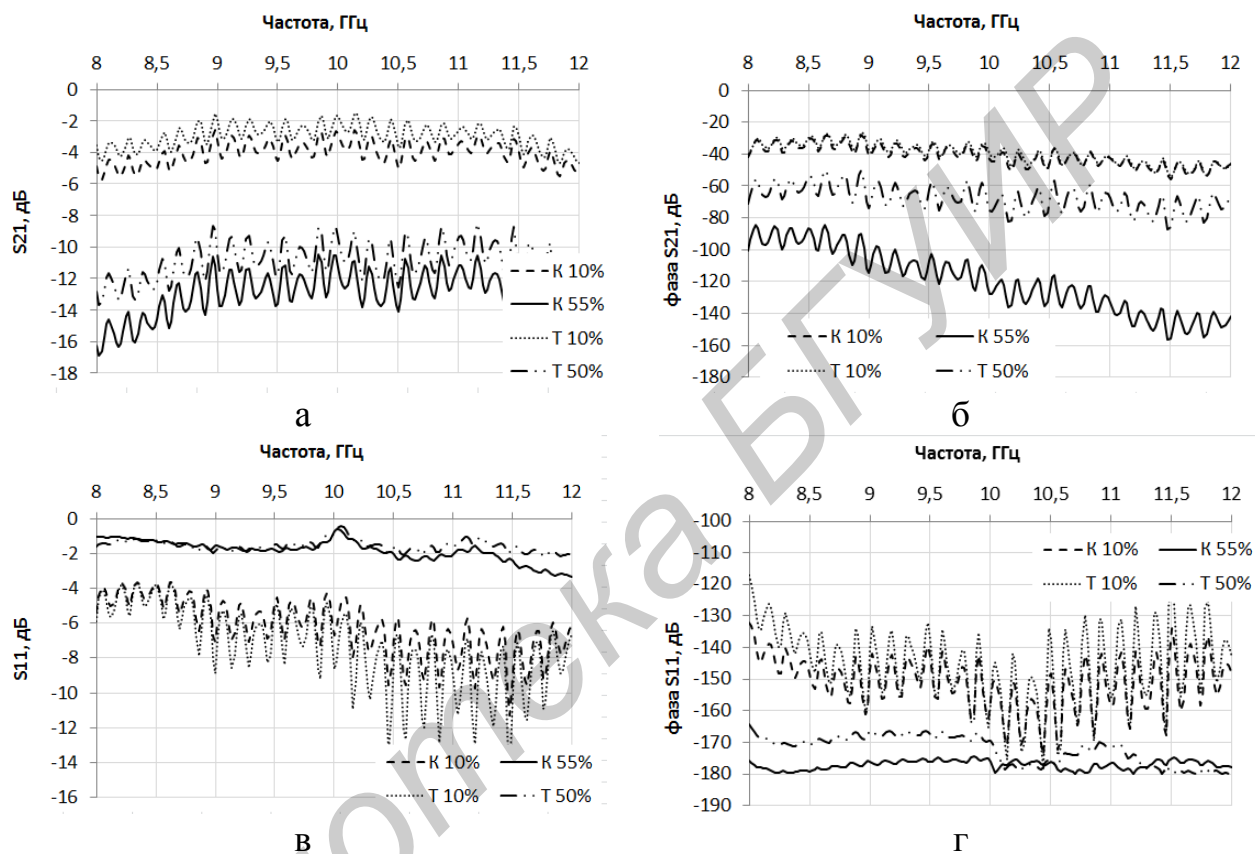


Рисунок 1. – Частотная зависимость экранирующих характеристик влагосодержащих волокнистых (Т – трикотаж, К – целлюлоза) матриц в диапазоне частот 8...12 ГГц с различной массовой долей воды: а, б – амплитуда и фаза коэффициента передачи, в, г – амплитуда и фаза коэффициента отражения

Показано, что характеристики коэффициента передачи ЭМИ исследованных образцов в диапазоне частот 8...12 ГГц относительно равномерны и находятся на уровне -5,5...-2,0 дБ для волокнистых матриц с 10 % мас. влагосодержанием. При увеличении концентрации воды характер коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне частот не изменяется, величина снижается за счет диэлектрических потерь воды, распределенной в поровом пространстве пропитанных матриц. Наблюдается небольшое различие

величины коэффициентов передачи для волокнистых матриц различных типов, которое становится более заметным при повышении влагосодержания матриц.

Влагосодержащие волокнистые матрицы обеспечивают характеристики коэффициента отражения ЭМИ в пределах $-10...-1,5$ дБ, также равномерные в исследуемом диапазоне частот.

Исследовалась зависимость коэффициентов передачи и отражения ЭМИ от влагосодержания образцов волокнистых матриц. Результаты приведены на рисунках 2-3.

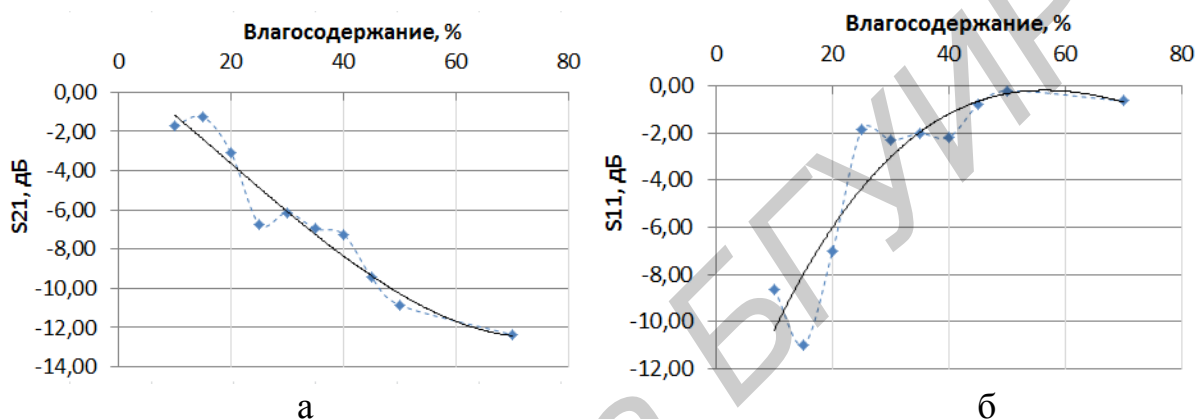


Рисунок 2. – Зависимость экранирующих характеристик влагосодержащих волокнистых синтетических матриц T на частоте 10 ГГц от массовой доли воды: а – амплитуда коэффициента передачи, б – амплитуда коэффициента отражения

Как видно из результатов исследований (рисунок 2-3), коэффициент передачи возрастает с ростом массовой доли воды вследствие увеличения общих диэлектрических потерь композиционного материала. Взаимодействие ЭМИ с влагосодержащим материалом, содержащим значительную долю воды, приводит к поглощению значительной части энергии ЭМИ и рассеянию ее в виде тепловой энергии за счет возникновения токов смещения в объеме композита. Часть энергии ЭМИ отражается от влагосодержащего материала, причем доля отражаемой энергии также увеличивается при росте массовой доли воды в составе композита вследствие снижения волнового сопротивления материала. Анализ характеристик коэффициентов передачи и отражения показывает, что между образцами с влагосодержанием 20% и 25% происходит значительное изменение величин S_{21} и S_{11} и угла наклона кривой зависимости экранирующих характеристик от влагосодержания матриц. Это явление может быть объяснено различием свойств форм воды, заполняющей пористую матрицу до определенного влагосодержания, и существованием многослойной

структуры воды в пористых телах с развитой поверхностью, которые были использованы в качестве матриц для пропитки.

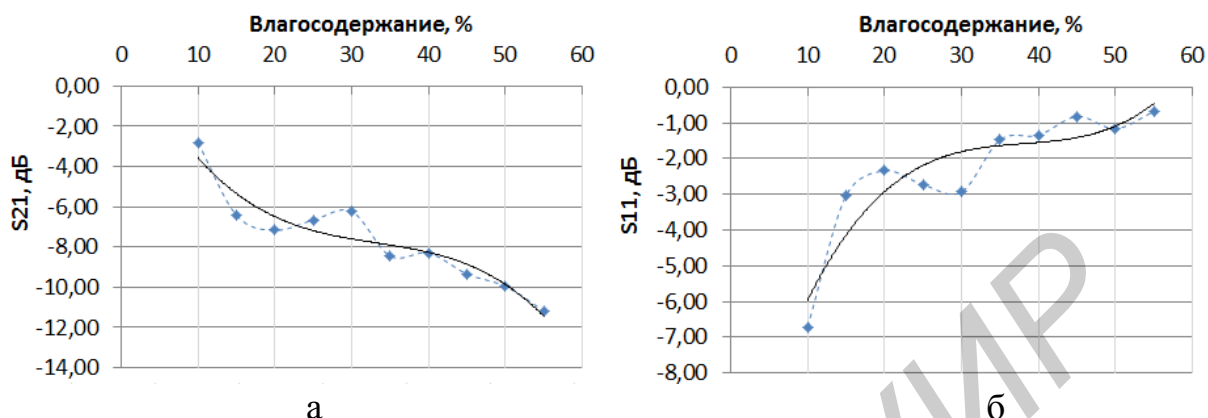


Рисунок 3. – Зависимость экранирующих характеристик влагосодержащих волокнистых целлюлозных матриц K на частоте 10 ГГц от массовой доли воды: а – амплитуда коэффициента передачи, б – амплитуда коэффициента отражения

Анализ характеристик коэффициентов передачи и отражения ЭМИ, приведенных на рисунке 3 для целлюлозных матриц, показывает, что характер зависимости S_{21} и S_{11} от влагосодержания сохраняется. Для такого вида матриц резкое изменение экранирующих характеристик наблюдается для образцов с влагосодержанием 10...15 % мас. С дальнейшим ростом влагосодержания наклон кривых уменьшается и зависимость становится практически линейной.

Расчитанные зависимости комплексных показателей диэлектрической проницаемости для исследованных волокнистых матриц приведены на рисунке 4.

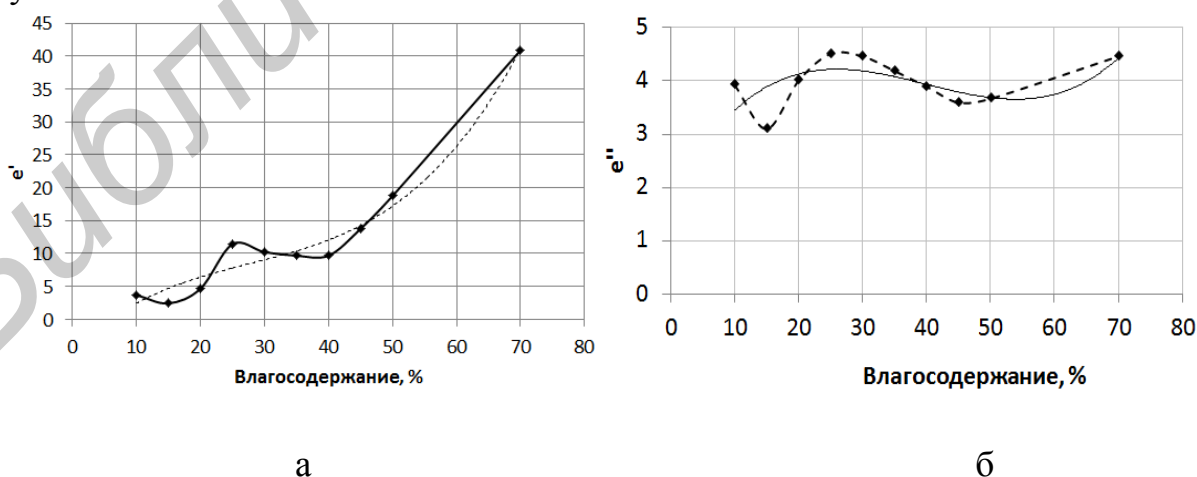


Рисунок 4. – Зависимость диэлектрических характеристик влагосодержащих волокнистых синтетических матриц T на частоте 10 ГГц от массовой доли воды: а – действительная часть, б – мнимая часть

Как видно из результатов расчетов (рисунок 5), увеличение влагосодержания волокнистой матрицы выражается в росте величины диэлектрической проницаемости с 3...5 для влагосодержания 10...20% мас. до 20...40 при максимальном насыщении пористой матрицы водой. Характер зависимости диэлектрической проницаемости от массовой доли воды в композите нелинейный, на кривой могут быть выделены участки с различным наклоном. Можно предположить, что положение отдельных участков связано с влиянием различных форм воды на общую диэлектрическую проницаемость полученных образцов. Диэлектрические потери составляют от 3 до 4,5 и обнаруживают слабую зависимость от влагосодержания матрицы.

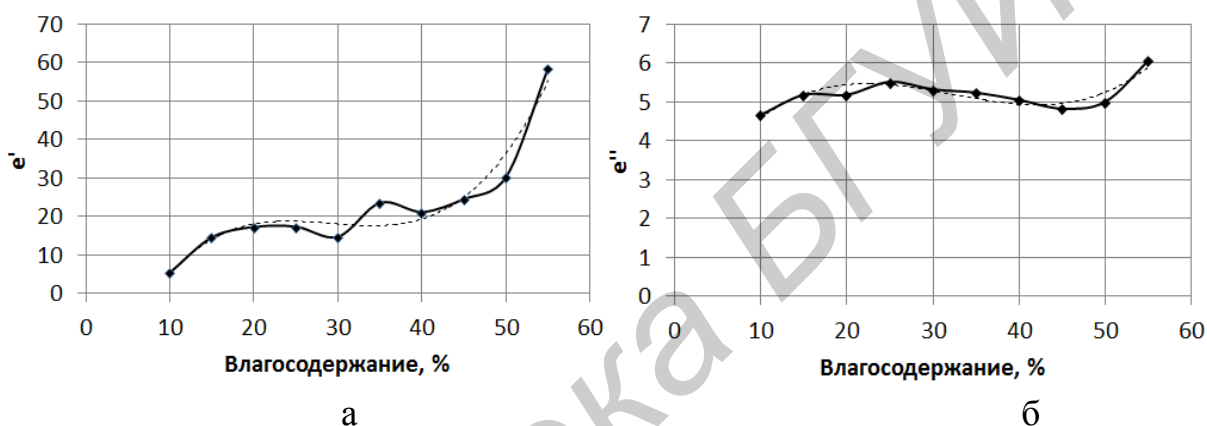


Рисунок 5. – Зависимость диэлектрических характеристик влагосодержащих волокнистых целлюлозных матриц K на частоте 10 ГГц от массовой доли воды: а – действительная часть, б – мнимая часть

Зависимость диэлектрической проницаемости водосодержащих целлюлозных матриц от массовой доли воды также нелинейна и на характеристике могут быть выделены отдельные участки. В диапазоне влагосодержаний 15...50% диэлектрическая проницаемость увеличивается с 15 до 30, а при 55 % мас. влагосодержании составляет уже 58. Особенностью исследуемой влагосодержащей матрицы является способность целлюлозы к набуханию и взаимодействие ее макромолекул с молекулами воды, что влияет на подвижность молекул воды и способность диполей взаимодействовать с внешним электрическим полем. Диэлектрические потери влагосодержащих целлюлозных матриц составляет 4,7...6. Наблюдаемое небольшое изменение диэлектрических потерь с увеличением влагосодержания матриц может быть связано с высокой пористостью и большой удельной поверхностью пор исследуемых волокнистых материалов, что обуславливает наличие большого количества воды, находящейся вблизи поверхности твердого тела и попадающей под влияния поверхностных сил.

Помимо волокнистых матриц к материалам с развитой поверхностью относятся и порошковые материалы. К порошковым адсорбентам, которые обладают высокой пористостью, большой удельной площадью поверхности и высокой гигроскопичностью и, как следствие, равновесной влажностью, что позволяет им удерживать в поровом объеме и на поверхности частиц (и в объеме порошка) большое количество воды, относятся: природные и синтетические цеолиты; силикагели; активный оксид алюминия; глины (модифицированный монтмориллонит, бентонит); активированные угли.

Выбранные порошковые матрицы относятся к диэлектрикам с низкой диэлектрической проницаемостью (силикагель, бентонит) в сухом виде. Это означает, что сами частицы порошков являются радиопрозрачными. Взаимодействие частиц порошка с влагой приводит к формированию большого количества границ раздела твердое тело-жидкость-газ, количество, форма и свойства которых зависят от степени насыщения порового пространства порошков пропиточным раствором, формы и размеров частиц порошка и способности его частиц к набуханию.

Были исследованы коэффициенты передачи и отражения порошковыми матрицами на основе бентонита и силикагеля, пропитанными дистиллированной водой. Результаты исследований экранирующих характеристик порошковых влагосодержащих матриц представлены на рисунках 6-7.

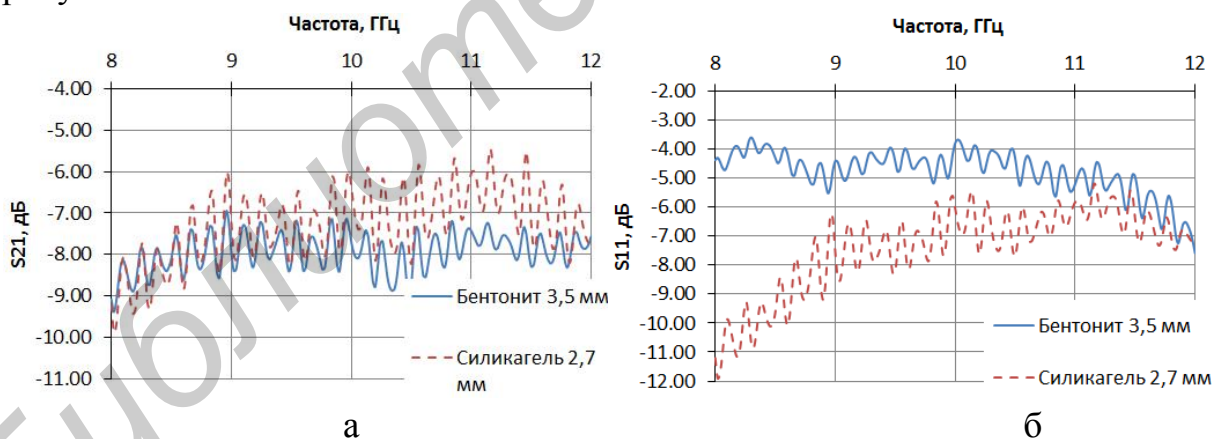


Рисунок 6. – Частотная зависимость экранирующих характеристик влагосодержащих пористых матриц в диапазоне частот 8...12 ГГц с влагосодержанием 15 % мас.: а – амплитуда коэффициента передачи, б – амплитуда коэффициента отражения

Величина коэффициента передачи, обеспечиваемая порошковыми матрицами с влагосодержанием 15% мас., составляет -8,8...-6,3 дБ при слое материала толщиной 2,7 мм для порошка силикагеля и 3,5 мм для бентонита. Коэффициент отражения ЭМИ исследованных порошковых матриц различается на 0,2...5,1 дБ. Это может быть связано с различной структурой жидкости,

сформированной в пористых матрицах. При пропитке силикагеля воды распределяется в его поровом пространстве и оказывается разделенной частицами твердого тела. При взаимодействии бентонита с водой образуется суспензия. Большая величина коэффициента отражения ЭМИ образцом влагосодержащего бентонита связана с формой взаимодействия молекул воды с частицами глин, составляющих бентонит, и схожа с величиной коэффициента отражения ЭМИ, характерной для слоя раствора.

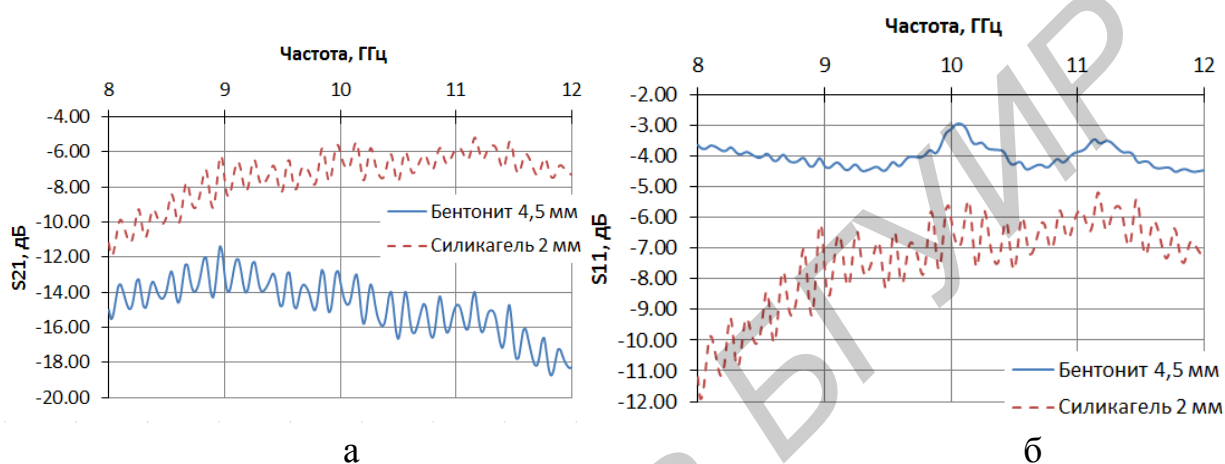


Рисунок 7. – Частотная зависимость экранирующих характеристик влагосодержащих пористых матриц в диапазоне частот 8...12 ГГц с влагосодержанием 25 % мас.: а – амплитуда коэффициента передачи, б – амплитуда коэффициента отражения

При увеличении влагосодержания порошковых матриц до 25 % происходит снижение коэффициента передачи ЭМИ до -17,2...-13,0 дБ для бентонитовой матрицы толщиной 4,5 мм и до -11,0...-6,0 дБ для порошка силикагеля, толщиной 2 мм. Различия в величинах связаны с разной толщиной сформированных слоев. Коэффициент отражения образцов на основе бентонита также выше, чем у силикагелевых образцов на 2...5,5 дБ вследствие описанной выше причины. Характеристики коэффициентов передачи и отражения относительно равномерны в исследованном диапазоне частот.

Проводились исследования влияния структуры воды в составе влагосодержащих композиционных материалов на их диэлектрические характеристики.

Для исследования влияния поверхности твердого тела пористых матриц на диэлектрические характеристики влагосодержащих материалов были разработаны образцы, представляющие собой смесь порошковых матриц в различных объемных долях. Поскольку гигроскопичные свойства бентонита и силикагеля различны, это позволит изменять долю удельной поверхности пор в композиционной порошковой матрице и варьировать долю связанной воды в

общем объеме образца. Объем порошка определялся из его насыпной плотности и контролировался весами.

Смешанные порошковые матрицы заполнялись дистиллированной водой до влагосодержания 15 % и 25 % мас. и механическим перемешиванием смеси достигали равномерного распределения воды по объему матрицы.

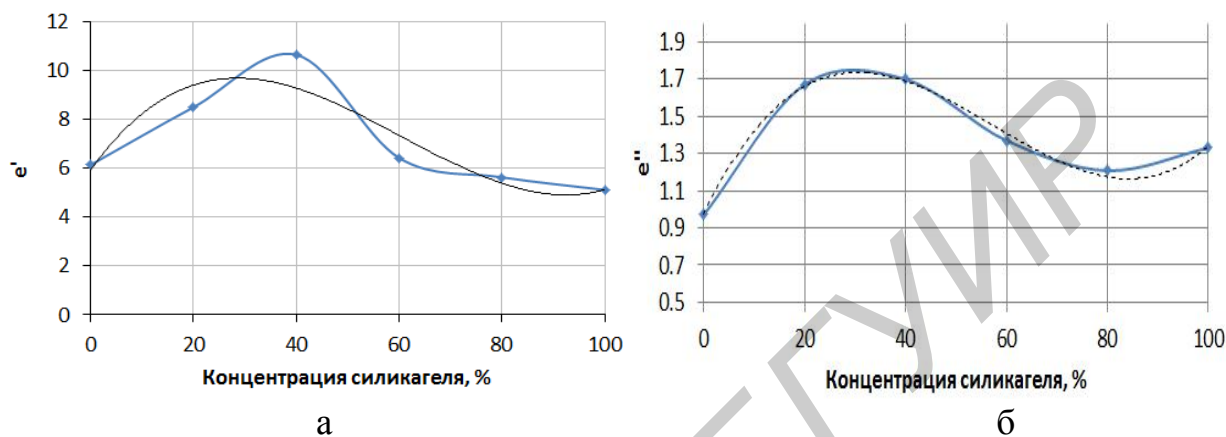


Рисунок 3.8. – Зависимость диэлектрических характеристик влагосодержащих порошковых смешанных матриц от концентрации силикагеля для массовой доли воды 15 % на частоте 10 ГГц: а – диэлектрическая проницаемость, б – диэлектрические потери

Из рисунка 8 видно, что диэлектрическая проницаемость и диэлектрические потери смеси порошков с влагосодержанием 15 % изменяются незначительно и составляют 5,2...10,7 для действительной части диэлектрической проницаемости и 1,0...1,75 для мнимой части. Видимо, вся вода оказывается распределена между частицами порошков, свободной воды нет и величины комплексной диэлектрической проницаемости малы.

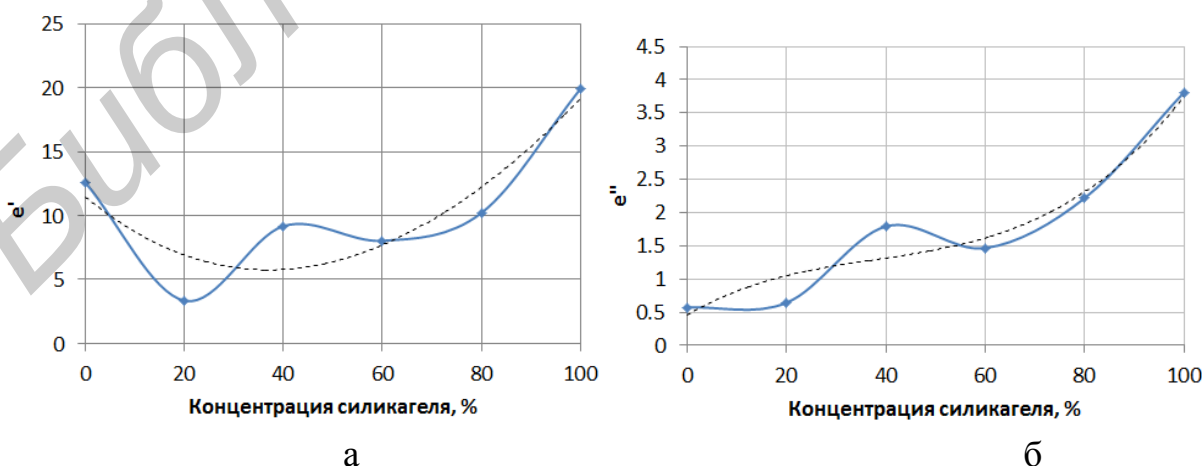


Рисунок 9. – Зависимость диэлектрических характеристик влагосодержащих порошковых смешанных матриц от концентрации

силикагеля для массовой доли воды 25 % на частоте 10 ГГц: а – диэлектрическая проницаемость, б – диэлектрические потери

При увеличении влагосодержания до 25 % мас. диэлектрическая проницаемость обнаруживает зависимость от концентрации силикагеля в смеси порошковых матриц. Диэлектрическая проницаемость влагосодержащей бентонитовой матрицы составляет 13, это может быть связано с образованием отдельных включений, содержащих локальные объемы свободной воды с более высокой диэлектрической проницаемостью. При введении порошка силикагеля в смесь диэлектрическая проницаемость композита снижается до 3...9,5, а затем растет до 20 для полностью силикагелевой матрицы. Это может быть объяснено тем, что уменьшается доля связанной воды, поглощенной частицами бентонитовой глины, а в силикагелевой матрице доля молекул воды, подвергающихся воздействию сил, препятствующих взаимодействию диполей воды с электрическим полем, становится меньше.

На основании полученных экспериментальных результатов и анализа взаимодействия электромагнитного излучения с композиционными материалами проводилось моделирование структуры жидкости в пористых влагосодержащих материалах и их диэлектрических свойств.

В программном пакете 3DS MAX была смоделирована структура жидкости в поровом объеме трикотажа (Рисунок 10 б) с параметрами, определенными по микрофотографиям (Рисунок 10 а):

- диаметр волокна - 25 мкм;
- примерное количество волокон в нити, шт.: 45;
- примерный диаметр нити – 220 мкм в несплюсненном (в месте наложения петель) состоянии;
- примерные габариты петли: 830x718 мкм, высоту петли в месте наложения на следующую смоделируем эмпирическим путем, с учетом искривления (сплющивания) сечения волокна в месте наложения;

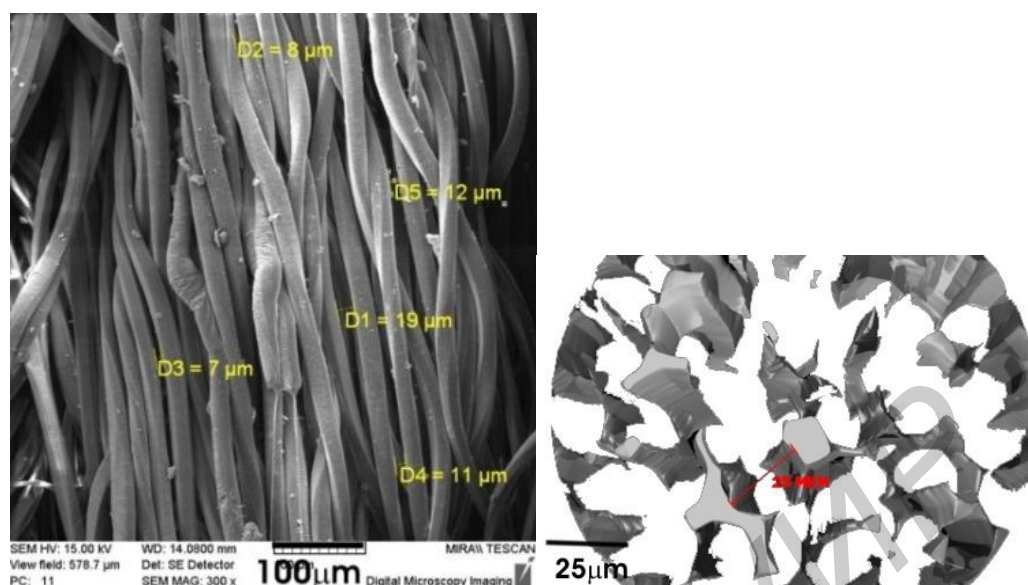


Рисунок 10. – СЭМ-изображения структуры исследуемых волокнистых матриц с указанием характерных размеров межволоконных промежутков (а) и результаты моделирования геометрической структуры воды (б)

Полученная модель трикотажа была «заполнена» водой и изучена форма жидкости в пространстве между волокнами. Форма жидкости в поровом пространстве матрицы между волокнами представляет собой вытянутые объемные включения сложной формы, толщина которых на остриях достигает размеров единиц микрометров – десятков нанометров

Для моделирования использовалась теория многослойной структуры воды в порах и капиллярах вследствие влияния физико-химических сил, действующих на молекулы воды со стороны поверхности твердого тела.

При определении диэлектрической проницаемости гетерогенного материала, состоящего из нескольких фаз: твердого тела образующей матрицы, жидкости (свободной и связанной воды) и воздуха, воспользуемся формулой рефракционной модели закона смешения для определения диэлектрической проницаемости смесей:

$\sqrt{\varepsilon_m} = v_1 \cdot \sqrt{\varepsilon_1} + v_2 \cdot \sqrt{\varepsilon_2} + v_3 \cdot \sqrt{\varepsilon_3}$, где v – парциальный объем каждого компонента смеси, ε – диэлектрическая проницаемость каждого компонента смеси.

Высокая пористость исследуемых матриц и рассмотрение воды в порах в виде многослойной структуры свидетельствуют о необходимости учета диэлектрических свойств связанной и свободной воды в качестве компонентов $\varepsilon_{\text{вод}}$. Для этого также воспользуемся теорией смесей.

Применительно к влагосодержащим пористым матрицам была составлена систему из трех уравнений:

$$\begin{aligned} v_{\text{связ.вод}} \cdot \sqrt{\varepsilon_{\text{связ.вод}}} + v_{\text{своб.вод}} \cdot \sqrt{\varepsilon_{\text{своб.вод}}} + v_{\text{возд}} \cdot \sqrt{\varepsilon_{\text{возд}}} \\ = \sqrt{\varepsilon_{\text{м}}} - v_{\text{вол}} \cdot \sqrt{\varepsilon_{\text{вол}}} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\rho_{\text{связ.вод}} \cdot v_{\text{связ.вод}} + \rho_{\text{своб.вод}} \cdot v_{\text{своб.вод}} + \rho_{\text{возд}} \cdot v_{\text{возд}} = \rho_{\text{м}} - \rho_{\text{вол}} \cdot v_{\text{вол}}, \quad (2)$$

$$v_{\text{связ.вод}} + v_{\text{своб.вод}} + v_{\text{возд}} = 1 - v_{\text{вол}}. \quad (3)$$

где $v_{\text{вол}}$, $v_{\text{вод}}$, $v_{\text{возд}}$ – объемная доля волокнистого материала, воды и воздуха соответственно в рассматриваемом композиционном материале; $\varepsilon_{\text{вол}}$, $\varepsilon_{\text{вод}}$, $\varepsilon_{\text{возд}}$ – диэлектрическая проницаемость компонентов композиционного материала: волокнистого материала, воды и воздуха соответственно.

Для расчетов использовались следующие коэффициенты:

Плотности:

$$\rho_{\text{связ.вод}} = 1200 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$\rho_{\text{своб.вод}} = 1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$\rho_{\text{возд}} = 1.225 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$\rho_{\text{вол.карт}} = 1.5 \frac{\text{г}}{\text{см}^3} = 1500 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \rho_{\text{вол.трж}} = 1.17 \frac{\text{г}}{\text{см}^3} = 1170 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$\rho_{\text{м}} = \frac{\rho_{\text{каж}}}{1 - w} = \frac{v_{\text{вол}} \rho_{\text{вол}}}{1 - w},$$

где w – массовое влагосодержание

$$v_{\text{вол}} = \frac{\rho_{\text{каж}}}{\rho_{\text{вол}}} = 1 - \text{пористость} v_{\text{вол.карт}} = 0.475 v_{\text{вол.трж}} = 0.473$$

Диэлектрическая проницаемость воды $\varepsilon_{\text{своб.вод}}$ и $\varepsilon_{\text{связ.вод}}$ на СВЧ определяется теорией Дебая, учитывающей частотную дисперсию:

$$\varepsilon_{\text{своб.вод}} = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_{\infty}}{1 + (2\pi f \tau_e)^2},$$

где $\varepsilon_0 = 87.80685 - 0.399233T + 8.17525 \cdot 10^{-4}T^2$ – статическая диэлектрическая проницаемость,

$$\tau_e = \frac{1}{2\pi \cdot 10^9} \frac{1}{8.98 + 0.3128T + 4.7 \cdot 10^{-3}T^2 - 2.12 \cdot 10^{-5}T^3} - \text{время релаксации,}$$

$T = 21 \text{ } ^\circ\text{C}$ – температура (подставляется в виде градусов цельсия),

$\varepsilon_{\infty} = 4.9$ - диэлектрическая проницаемость при $f \rightarrow \infty$, f – частота поля.

Согласно научным исследованиям в этой области время релаксации молекул связанной и свободной воды различается на 1-2 порядка (Таблица 3). Это обуславливает различия величин диэлектрической проницаемости этих типов воды. Для связанной воды диэлектрические проницаемости ε_0 и ε_{∞} совпадают с этими же диэлектрическими проницаемостями для свободной воды. Время релаксации для связанной воды $\tau_e = 5.0 \cdot 10^{-11}$ соответствует времени релаксации рыхлосвязанной воды.

Диэлектрическая проницаемость воздуха $\varepsilon_{\text{возд}} = 1$, а диэлектрическая проницаемость волокон $\varepsilon_{\text{вол}} = 3$ бралась одинаково, как для картона, так для трикотажа.

Для расчета доли связанной воды во влагосодержащих материалах использовались экспериментальные результаты, рассчитанные по измеренным данным ε_m .

Сначала определим диэлектрическую проницаемость влажного пористого материала без учета связанной воды:

$$\sqrt{\varepsilon'_m} = v'_{\text{своб.вод}} \cdot \sqrt{\varepsilon_{\text{своб.вод}}} + v'_{\text{возд}} \cdot \sqrt{\varepsilon_{\text{возд}}} + v_{\text{вол}} \cdot \sqrt{\varepsilon_{\text{вол}}},$$

где $v'_{\text{своб.вод}}$ и $v'_{\text{возд}}$ – объемные доли свободной воды и воздуха соответственно, рассчитанных без учета связанной воды (т. е. считалось что связанной воды нет) и находятся из системы следующих уравнений

$$\rho_{\text{своб.вод}} \cdot v'_{\text{своб.вод}} + \rho_{\text{возд}} \cdot v'_{\text{возд}} = \rho_m - \rho_{\text{вол}} \cdot v_{\text{вол}},$$

$$v'_{\text{своб.вод}} + v'_{\text{возд}} = 1 - v_{\text{вол}}.$$

С учетом доли связанной воды диэлектрическая проницаемость влажного пористого материала может быть определена следующим образом:

Обозначим за $v''_{\text{связ.вод}}$, $v''_{\text{своб.вод}}$, $v''_{\text{возд}}$ объемные доли связанной воды, свободной воды и воздуха при варьировании доли связанной воды соответственно.

Диэлектрическую проницаемость материала, считаем по формуле:

$$\sqrt{\varepsilon''_m} = v''_{\text{связ.вод}} \cdot \sqrt{\varepsilon_{\text{связ.вод}}} + v''_{\text{своб.вод}} \cdot \sqrt{\varepsilon_{\text{своб.вод}}} + v''_{\text{возд}} \cdot \sqrt{\varepsilon_{\text{возд}}} + v_{\text{вол}} \cdot \sqrt{\varepsilon_{\text{вол}}}, \quad (4)$$

Примем, что доля связанной воды пропорциональна количеству свободной воды

$$v''_{\text{связ.вод}} = kv''_{\text{своб.вод}} \quad (5)$$

Тогда система уравнений (3.2), (3.3) с учетом (3.5) примет вид

$$(\rho_{\text{связ.вод}} \cdot k + \rho_{\text{своб.вод}}) \cdot v''_{\text{своб.вод}} + \rho_{\text{возд}} \cdot v''_{\text{возд}} = \rho_{\text{м}} - \rho_{\text{вол}} \cdot v_{\text{вол}},$$

$$(k + 1)v''_{\text{своб.вод}} + v''_{\text{возд}} = 1 - v_{\text{вол}}.$$

Пренебрегая членом $\rho_{\text{возд}} \cdot v''_{\text{возд}}$ получим

$$v''_{\text{своб.вод}} = \frac{\rho_{\text{м}} - \rho_{\text{вол}} \cdot v_{\text{вол}}}{\rho_{\text{связ.вод}} \cdot k + \rho_{\text{своб.вод}}},$$

$$v''_{\text{возд}} = 1 - v_{\text{вол}} - (k + 1)v''_{\text{своб.вод}}.$$

По результатам моделирования построены зависимости общей диэлектрической проницаемости влагосодержащего материала для различных параметров (Рисунок 11).

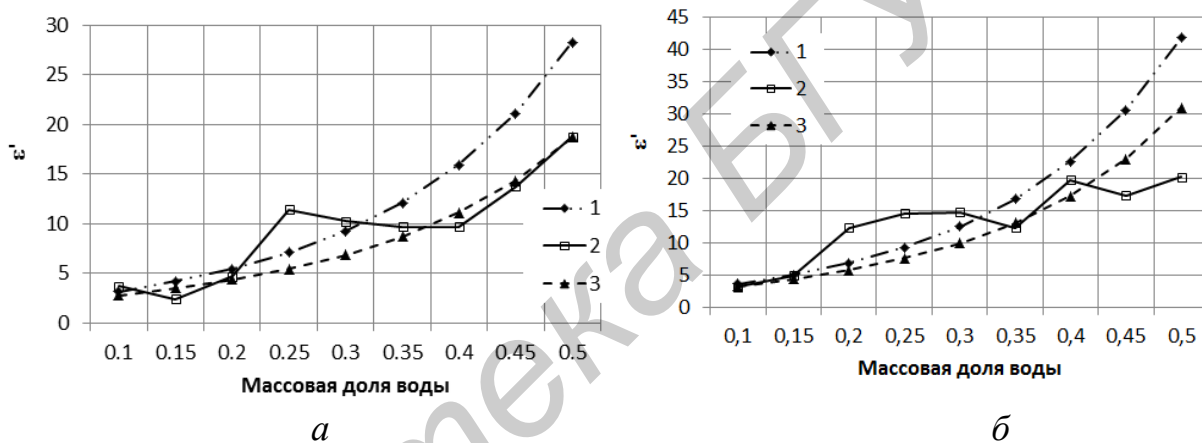


Рисунок 11 – Результаты моделирования диэлектрической проницаемости волокнистой синтетической матрицы Т(трикотаж) $k=0,5$ (а) и целлюлозной матрицы К (б) $k=0,3$: 1 - Результаты моделирования без учета связанной воды; 2 - Экспериментальные данные; 3 - Результаты моделирования с учетом связанной воды

Из рисунка 11 видно, что диэлектрическая проницаемость модели влагосодержащего материала, заполненного свободной водой, выше, чем полученные экспериментальные данные. Это может объясняться более высокой диэлектрической проницаемостью свободной воды, описываемой в модели.

С использованием построенной модели, которая учитывает влияние доли связанной воды на общую диэлектрическую проницаемость материала, получена зависимость, близкая к экспериментальным данным, для величины параметра $k=0,5$.

С использованием построенной модели, которая учитывает влияние доли связанной воды на общую диэлектрическую проницаемость материала, получена зависимость диэлектрической проницаемости и для целлюлозных

матриц, близкая к экспериментальным данным, для величины параметра $k=0,3[1-A]$.

Количество (объемная доля) связанной воды может быть определена из толщины слоя связанной воды (5-10 мономолекулярных слоев воды по данным различных исследователей) и площади поверхности волокон при следующих допущениях:

- минимальный предел влажности исследуемых волокнистых материалов основан на том, что вода в виде тонких пленок распределяется по поверхности волокон. С увеличением влажности толщина пленок растет и жидкость начинает конденсироваться в пространствах между волокнами в виде капиллярной влаги.

Долю связанной воды можно связать с удельной площадью поверхности пор следующим образом:

$$S_{уд.пов} d_{связ} = \frac{v_{связ.вод}}{\rho_{каж}} = \frac{v_{связ.вод}}{v_{вол} \rho_{вол}} \text{ куда подставим значение } v_{связ.вод}.$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

Применение водосодержащих экранирующих материалов позволяет получать эффективные экраны ЭМИ. Для того, чтобы иметь возможность управлять экранирующими и эксплуатационными характеристиками композиционных материалов, важно установить зависимости их характеристик от материалов и структуры компонентов.

Значимость данной работы заключается в том, что предложена модель, описывающая диэлектрические свойства влагосодержащих композиционных матриц. Исследована структура жидкости в пористой матрице и показано, что большое влияние на общую величину диэлектрической проницаемости влагосодержащего композита имеет доля связанной воды, которая составляет значительную величину для пористых волокнистых и порошковых матриц. Вследствие отличий величин диэлектрической проницаемости свободной и связанной воды величина общей диэлектрической проницаемости влажного материала меньше рассчитанной по теории Дебая для трехкомпонентной смеси. Показано, что при моделировании электромагнитных характеристик пористых матриц с развитой поверхностью необходимо учитывать присутствие связанной воды, свойства которой отличаются от свойств воды свободной. Варьируя коэффициент пропорциональности в предложенной модели можно оценить долю связанной воды в образце. Для исследованных волокнистых матриц получены коэффициенты пропорциональности для доли связанной воды 0,5 для синтетической матрицы, 0,3 для целлюлозной матрицы.

Получены формулы, позволяющие описать диэлектрические характеристики влагосодержащего композиционного материала в зависимости от его удельной поверхности.

Рекомендации по практическому применению.

Разработана математическая модель, позволяющая задавать требования к структурным параметрам пористых матриц, используемых для пропитки водой и растворами, для экранирующих ЭМИ композиционных влагосодержащих материалов.

СПИСОК СОБСТВЕННЫХ ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Моделирование взаимодействия ЭМИ с гетерогенными материалами для создания эффективных экранов СВЧ-диапазона / Лукашевич А.А., Аламир Х.С.Х., Ауси Р.М.Х. и др. // Современные средства связи: материалы XIX Международной науч.-тех. конф., Минск, 14-15 октября 2014 г. / ВГКС; редкол.: А.О. Зеневич [и др.]. – Минск, 2014. - С. 190

Библиотека БГУИР