

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники

УДК 004.353.2-026.66

На правах рукописи

ЛАВРЕНТЬЕВ
Андрей Олегович

**ВОДОСОДЕРЖАЩИЕ ГЕЛЕВО-ПОРОШКОВЫЕ
КОМПОЗИТНЫЕ ЭКРАНЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ

на соискание степени магистра техники и технологии
по специальности 1-39 81 01 Компьютерные технологии проектирования
электронных систем

Научный руководитель
ПОЗНЯК Александр Анатольевич
канд. физ.-мат. наук,
доцент

Минск 2015

Работа выполнена на кафедре проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Научный руководитель:

Позняк Александр Анатольевич,
кандидат физико-математических наук, доцент кафедры химии учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Рецензент:

Стемпичкий Виктор Романович,
кандидат технических наук, доцент кафедры микро- и наноэлектроники учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Защита диссертации состоится «22» июня 2015 г. года в 10⁰⁰ часов на заседании Государственной комиссии по защите магистерских диссертаций в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г.Минск, ул. П.Бровки, 6, 1 уч. корп., ауд. 415, тел.: 293-89-92, e-mail: kafpiks@bsuir.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

ВВЕДЕНИЕ

Неизбежность воздействия электромагнитного излучения (ЭМИ) на население и окружающую живую природу стало данью современному техническому прогрессу и все более широкому применению телевидения и радиовещания, радиосвязи и радиолокации, использованию сверхвысокочастотных (СВЧ) излучающих приборов и технологий и т. п. В результате жизнедеятельности человечества уровень ЭМИ возрастает на несколько порядков по сравнению с естественным фоном. Повышенные уровни электромагнитного поля (ЭМП) усложняют функционирование маломощного высокоточного измерительного оборудования, обостряют проблемы электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств (РЭС) и защиты информации (ЗИ), оказывают отрицательное влияние на организм человека и биологические объекты.

У человека наиболее чувствительными к воздействию ЭМП являются нервная, сердечно-сосудистая система, мозг. ЭМП вызывают изменения кровотока, нарушения со стороны эндокринной системы, метаболических процессов, заболевания органов зрения. Самые опасные поля – это поля СВЧ-диапазона. Сантиметровые и миллиметровые волны действуют на кожу, а дециметровые, проникая на глубину 10...15 см, уже напрямую воздействуют на внутренние органы.

Экранирование – наиболее эффективный способ защиты. Под экранированием в общем случае понимается защита объектов от воздействия внешних полей, так и локализация излучения каких-либо средств, препятствующая проявлению этих излучений в окружающей среде. В некоторых случаях для защиты невозможно применить экран в виде корпуса или пластины, тогда используют гибкие экраны. Особенно актуальна проблема создания гибких, мобильных, воздухопроницаемых, технологичных и дешевых материалов, обеспечивающих достаточную степень подавления ЭМИ в широком диапазоне частот.

Гибкие электромагнитные экраны находят широкое применение не только для «классических» целей подавления нежелательных излучений электронной техники, но также актуальны и в других областях, таких, как защита живых организмов от вредного воздействия ЭМИ, создание одежды и накидок специального назначения, подавление электромагнитного канала утечки информации, снижение радиолокационной заметности объектов и защита устройств обработки информации от электромагнитного воздействия.

Например, различия в характеристиках электромагнитного сигнала, отраженного от объектов, позволяют сделать выводы об их природе, структуре, зачастую и составе, на основе анализа радиолокационного портрета некоторой области пространства. Основным средством скрытия наземных объектов от обнаружения радиолокационной техникой является установка маскирующих радиопоглощающих материалов (РПМ), позволяющих преобразовать отражаемый от металлических поверхностей и объектов сложной формы сигнал в сигнал с другими характеристиками, близкими к фону окружающей среды,

что позволяет снизить дальность обнаружения подвижных и неподвижных радиолокационных целей в широком диапазоне частот.

Одним из перспективных направлений является создание экранов на основе гибких радиопоглощающих материалов с различными наполнителями. В настоящий момент ясно, что высокими характеристиками радиопоглощения могут обладать только композитные материалы. Наиболее перспективным направлением является создание нанокompозитных материалов, которым можно придать комплекс уникальных свойств. Но, несмотря на актуальность проблемы, эта область изучена слабо, а объем экспериментальных данных по электромагнитным характеристикам и физическим свойствам ограничен. На настоящий момент крайне мало разработано тонких радиопоглощающих материалов и экранов ЭМИ, обладающих хорошей гибкостью, приемлемыми электромагнитными характеристиками при небольшом весе и толщине. Все это обусловило необходимость проведения исследований в этой области.

Целью работы является получение и анализ новых экспериментальных данных о влиянии природы и концентрации растворов электролитов и иных наноструктурированных наполнителей гибких экранов на их экранирующие характеристики в СВЧ-диапазоне.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Создание радиоэкранирующих и радиопоглощающих материалов актуально в силу целого ряда причин и обстоятельств. Существенным является применение такого рода материалов для защиты объектов от утечек информации по индукционным (электромагнитным) каналам.

Создание элементной базы, нуждающейся для своего функционирования в небольших рабочих напряжениях (порядка единиц и десятых долей вольта) повышает экономичность аппаратуры, проектируемой и изготавливаемой с использованием таких электрорадиоэлементов. Но, с другой стороны, это приводит к тому, что наводки на электронные схемы становятся сравнимыми с полезными сигналами, что имеет своим следствием снижение помехозащищенности аппаратуры. Использование эффективных радиоэкранирующих и радиопоглощающих покрытий решает проблему помехозащищенности устройств в целом и электромагнитной совместимости отдельных их частей.

В военной сфере радиоэкранирующие и радиопоглощающие материалы способствуют сокрытию и маскировке объектов военного назначения и живой силы, повышают устойчивость функционирования аппаратуры в условиях постановки противником внешних помех и могут применяться также для защиты оборудования и личного состава от электромагнитного оружия различного рода.

Во многих отраслях промышленности и в быту работает большое количество источников высокочастотного электромагнитного излучения, которое

оказывает вредное воздействие на организм человека и отрицательно влияет на работоспособность электронной техники. Проблема электромагнитной экологии в последние годы выходит на одно из первых мест. Поэтому создание высокоэффективных материалов, экранирующих и/или поглощающих высокочастотное ЭМИ, является важной научно-технической задачей. Перечисленные соображения показывают актуальность предпринятых автором исследований.

Степень разработанности проблемы

Теоретическими и практическими вопросами экранирования и проектирования экранов электромагнитного излучения занимались такие ученые как Л.М. Лыньков, Т.В. Борботько, Н.В. Колбун, О.В. Кирикова, П.А. Кузнецов, В.Н. Батыгин и др. Среди зарубежных ученых можно выделить таких как P. Holdstock, J.E. Holme, M. Stefecka.

Цель и задачи исследования

Целью работы является установление взаимосвязи между составом наполнителей пористых матриц из машинно-вязаного полиакрилонитрильного (нитронового) полотна высокой плотности вязки и их свойствами в радиочастотном диапазоне для получения новых нанокompозитных экранов электромагнитного излучения, в том числе работоспособных при пониженных температурах.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить **следующие задачи:**

- провести сравнительный анализ современных радиоэкранирующих и радиопоглощающих материалов различного назначения и перспектив использования наноматериалов при их разработке;
- разработать методики приготовления нанокompозитных наполнителей, их введения в текстильную матрицу и стабилизации;
- провести исследования эффективности экспериментальных образцов предлагаемых нанокompозитных материалов;
- провести сравнительный анализ эффективности экспериментальных образцов радиозащитных покрытий между собой и с существующими аналогами.

В качестве **объекта исследования** выбраны гибкие композитные экраны электромагнитного излучения для сверхвысокочастотного диапазона, создаваемые путем введения наноструктурированных водосодержащих наполнителей в полиакрилонитрильное (нитроновое) машинно-вязаное полотно высокой плотности вязки. **Предмет исследования** – радиоэкранирующие свойства (коэффициенты передачи S_{21} и отражения S_{11}) указанных нанокompозитных экранов в сверхвысокочастотном диапазоне в зависимости от состава наполнителей.

Область исследования. Содержание диссертационной работы соответствует образовательному стандарту высшего образования второй ступени (магистратуры) специальности 1-39 81 01 Компьютерные технологии проектирования электронных систем.

Методология и методы проведенного исследования

При решении поставленных задач использовали широко известные методы исследования пропускания и отражения электромагнитного излучения, а также элементного и фазового состава материалов.

Контроль фазового состава, структуры порошковых компонентов экспериментальных образцов осуществляли методами рентгеноструктурного анализа (РСА) (установка ДРОН 3.0 М). Для работы были использованы базы данных *PDF-2* версии 2002 г., подготовленный *International Centre for Diffraction Data*, под управлением оболочки *PCPDFWIN* и базы данных *COD (Crystallography Open Database)* релиза 23.08.2012 г. в сочетании с программой *MATCH!* версий 1.11 и 2.0.10, разработанной фирмой *Crystal Impact*. Для обработки результатов, их графического представления и подготовки настоящей работы были использованы математические таблицы *Microsoft Excel 2010*, текстовый процессор *Microsoft Word 2010*, пакет программ математической и графической обработки экспериментальных данных *OriginPro 8.0 SR6 ver. 8.0988* разработки *OriginLab Corporation*, пакеты программ *ChemWindow 3.0* и *ChemOffice 2004* разработки компании *CambridgeSoft Corporation*, а также графический редактор *Visio 2010*.

Научная новизна и значимость полученных результатов

Разработанные и исследованные в рамках настоящей работы водосодержащие нанокompозитные гибкие экраны ЭМИ на текстильной основе обладают уникальным комплексом свойств и могут найти многочисленные применения в различных областях техники:

- в военной области для снижения радиолокационной заметности объектов и повышения их помехозащищенности;
- в области радиозэкологической защиты живых организмов от вредного воздействия электромагнитного излучения путем создания специальной одежды, накидок, других средств индивидуальной защиты;
- в области защиты информации для подавления электромагнитного канала утечки информации;
- для защиты устройств обработки и хранения информации от воздействия электромагнитного излучения;
- в измерительной и контрольной аппаратуре;
- в других областях науки и техники.

Положения диссертации, выносимые на защиту

1. Применение гидрогеля поливинилового спирта в составе гелево-порошковых наполнителей гибких нанокompозитных экранов электромагнитного излучения на текстильной основе обеспечивает их временную стабильность в сочетании с высоким водосодержанием путем предотвращения седиментации порошкового компонента.

2. Добавление наноструктурированного углеродсодержащего минерала – шунгита в наполнитель текстильного полотна из гидрогеля поливинилового спирта и хлорида калия обеспечивает работоспособность создаваемых из них экранов электромагнитного излучения при температурах, сниженных до минус 15 °С за счет дополнительной поляризации молекул воды и модификации совокупной структуры гидрогеля.

3. Двухслойные экраны электромагнитного излучения на основе текстильного полотна, состоящие из ближнего к источнику излучения слоя с гелево-порошковым наполнителем и располагающегося за ним слоя с шунгитсодержащим наполнителем, имеют в диапазоне частот электромагнитного излучения 8...12 ГГц коэффициенты передачи электромагнитного излучения на 12...14 дБ ниже по сравнению с однослойными экранами того же состава, благодаря увеличению отраженной доли электромагнитного излучения на границе раздела слоев при таком сочетании материалов.

Теоретическая значимость диссертации заключается в разработке методики приготовления гибких экранов электромагнитного излучения и исследовании полученных водосодержащих нанокompозитных экранов на текстильной основе.

Практическая значимость диссертации состоит в разработке водосодержащих нанокompозитных гибких экранов электромагнитного излучения на текстильной основе, которые будут обладать уникальным комплексом свойств и могут найти применение в различных областях техники.

Апробация и внедрение результатов исследования

По материалам диссертации опубликовано 3 научные работы. В их числе 3 тезиса докладов на научных конференциях. Общий объем публикаций по теме диссертации составляет 3 авторские страницы.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из перечня условных обозначений, введения, общей характеристики работы, трех глав с краткими выводами, заключения, библиографического списка и приложения. Общий объем работы – 88 страниц. Она включает 32 рисунка, 9 таблиц, библиографию из 85 наименования использованных источников и 3 наименования публикаций соискателя, приложения на 10 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** рассмотрены проблемы экранирования электромагнитного излучения для снижения степени отрицательного воздействия внешних полей на организм человека и биологические объекты, проблемы электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств и защиты информации.

В **общей характеристике работы** сформулированы ее цель и задачи, показана связь с научными программами и проектами, даны сведения об объекте исследования и обоснован его выбор, представлены положения, выносимые на защиту, приведены сведения о личном вкладе соискателя, апробации результатов диссертации, наличие публикаций, а также, структура и объем диссертации.

В **первой главе** рассмотрены теоретические основы процесса экранирования, его качественная оценка – эффективность экранирования. Дана классификация диапазонов электромагнитных волн и общая характеристика экранирующих материалов.

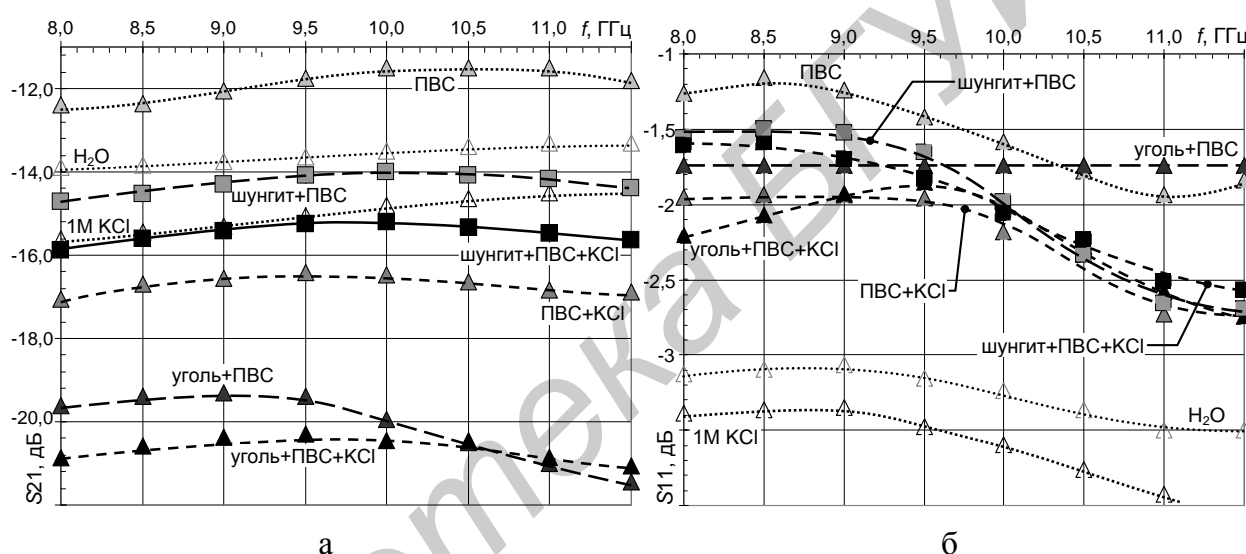
Обосновано, что для многих стационарных и мобильных источников ЭМИ необходимы экраны с невысокими массогабаритными характеристиками, обладающие гибкостью, экологичностью, универсальностью и возможностью быстрого развертывания. Анализ показал перспективность использования для таких целей композитных материалов, в том числе с применением в качестве основы для создания композитов полимерного волокна. Часто используются дисперсные, в том числе углеродные нанотрубки, сажа. В силу уникальных радиопоглощающих свойств воды, также используемой в подобных устройствах, подавляющих ЭМИ, перспективной является разработка композитных радиопоглощающих материалов на водной основе.

Во **второй главе** обоснован подбор материалов для создания водосодержащих нанокompозитных радиоэкранирующих материалов, кратко охарактеризованы их свойства, описаны методики приготовления гелевых и гелево-порошковых наполнителей полиакрилонитрильного машинно-вязаного полотна. Кратко описана методика рентгеноструктурных и рентгенофазовых исследований порошков наноструктурированных углеродсодержащих материалов природного происхождения – шунгита и активированного угля. Также описаны методики подготовки высушенных и охлажденных до 258 К образцов композитных экранов и измерений их экранирующих характеристик в СВЧ диапазонах.

В **третьей главе** проведено исследование радиочастотных характеристик полученных текстильных пористых матриц с гелево-порошковыми наполнителями. В серии экспериментов с однослойными капиллярно-пористыми матрицами с гелево-порошковыми наполнителями образцы для исследования представляли собой текстильные матрицы, пропитанные гелем на основе ПВС и других гелеобразующих агентов, а также гелей, смешанных с различными порошковыми наполнителями.

На рисунке 1 представлены частотные зависимости коэффициентов пропускания и отражения текстильных капиллярно-пористых матриц с различными пропитками и углеродсодержащими наполнителями. Графики соответствующих зависимостей для образцов, пропитанных дистиллированной водой, гелем ПВС, раствором KCl и гелем $PVC+KCl$, даны для сравнения.

Наполнение капиллярно-пористых текстильных матриц суспензиями углеродных порошков на основе геля ПВС (рисунок 1) заметно снижает коэффициент передачи (на 2,0...7,3 дБ) при незначительном изменении коэффициента отражения (на 0,4...0,7 дБ) по сравнению с исходным гелем из-за влияния проводящих свойств углеродных частиц и возникновения локальных потерь на проводимость, не приводящих к уменьшению волнового сопротивления материала в целом.



а – коэффициенты передачи; б – коэффициенты отражения
Рисунок 1 – Зависимость коэффициентов передачи S_{21} и отражения S_{11} , дБ однослойных текстильных матриц с различными пропитками и углеродсодержащими наполнителями от частоты f , ГГц

В результате выполнения вспомогательных исследований по определению фазового состава металлооксидных наполнителей текстильных матриц, удалось установить конкретные полиморфные модификации оксидов и показать, что все они (ZnO , Fe_2O_3 , ZrO_2 и TiO_2), за исключением гемеоксида меди (Cu_2O), содержат практически одну фазу. Наличие примесей меди и монооксида меди (CuO) в последнем веществе обусловлено нестабильностью соединений одновалентной меди и ее склонностью к диспропорционированию.

Несмотря на то, что очевидным недостатком водосодержащих экранов ЭМИ является зависимость их характеристик от температуры, ее удалось снизить за счет совместного применения наноструктурирующих добавок и наноструктурированных наполнителей, модифицирующих надмолекулярную

структуру воды. Оптимальными параметрами из числа исследованных образцов водосодержащих композитных экранов ЭМИ на текстильной основе обладают материалы с наполнителем, содержащим порошок природного наноструктурированного материала – шунгита, распределенного в геле поливинилового спирта с добавкой хлорида калия. Совместное применение наноструктурированного углеродсодержащего минерала – шунгита и наноструктурирующих добавок (ПВС+KCl) позволило предотвратить фазовый переход значительной доли воды композитного материала при снижении температуры ниже 273 К.

В результате выполнения исследований свойств текстильных водосодержащих матриц с гелево-порошковыми наполнителями удалось условно выделить две группы композиционных материалов. Для одной группы (матрицы содержат оксиды металлов) характерно невысокое отражение и пропускание энергии электромагнитной волны (ЭМВ). Для другой группы материалов (в матрицах присутствуют углеродсодержащие наполнители) характерно слабое пропускание ЭМИ, обусловливаемое, как показывают исследования, не только и не столько поглощением энергии ЭМИ, сколько ее отражением.

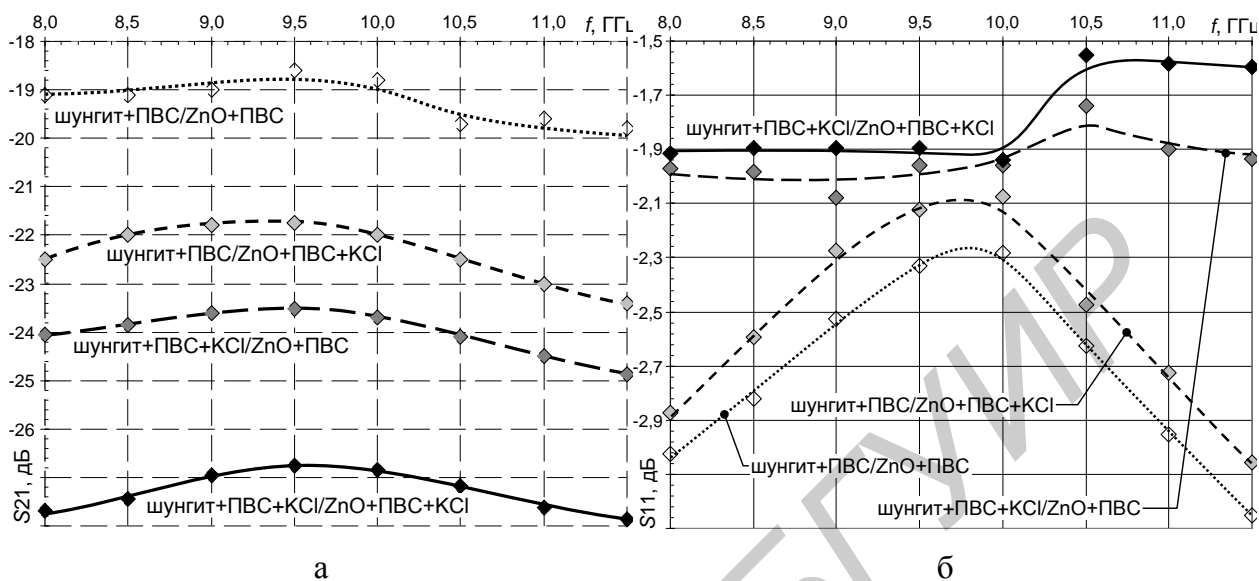
Была исследована эффективность двухслойных гибких водосодержащих экранов ЭМИ на текстильной основе с металлооксидными порошковыми наполнителями в поглощающем слое и активированным углем – в отражающем. Кроме того, было исследовано влияние добавки сильного электролита – 1 М раствора хлорида калия и влияние порядка расположения слоев экрана относительно направления распространения ЭМВ. Все двухслойные гелево-порошковые системы имели одинаковый характер зависимости радиопоглощающих характеристик от наличия добавки.

Природный наноструктурированный минерал, используемый в качестве основы для гелевого наполнителя текстильной нитроновой матрицы – элемента двухслойного экрана ЭМИ, также стал объектом исследования.

В данной серии экспериментов были исследованы свойства двухслойных матриц с отражающим слоем на основе шунгита и влияние на них добавки хлорида калия в частотном диапазоне 8...12 ГГц. Как и предполагалось, в том случае, когда первым к источнику ЭМИ расположен шунгитсодержащий слой, коэффициент отражения, несколько выше, тогда как коэффициент передачи практически не зависит от ориентации слоев. Зависимость коэффициента передачи S_{21} и отражения S_{11} двухслойных текстильных матриц с гелево-порошковыми наполнителями, ориентированных шунгитсодержащим слоем к источнику ЭМИ, от частоты изображена на рисунке 2.

Применением двухслойных экранов можно добиться управляемого и воспроизводимого изменения их экранирующих и радиопоглощающих характеристик. При этом оптимальной явилась такая ориентация слоев, когда углеродсодержащий слой расположен вторым по отношению к направлению распространения ЭМИ, а металлооксидный – первым. Наилучшими характе-

ристиками обладают экраны, содержащие во втором (отражающем) слое активный уголь.



а – коэффициенты передачи; б – коэффициенты отражения

Рисунок 2 – Зависимость коэффициента передачи S_{21} и отражения S_{11} , дБ двухслойных текстильных матриц с гелево-порошковыми наполнителями, ориентированных шунгитсодержащим слоем к источнику ЭМИ, от частоты f , ГГц

В заключение сравниваются характеристики разработанных нанокomпозитных экранирующих материалов с уже существующими аналогами и прототипами. Сравнение доступных в открытых источниках информации данных по эффективности некоторых существующих композитных экранов ЭМИ с материалами, исследованными в настоящей работе, показало, что предложенные в настоящей работе экраны обладают удачным сочетанием свойств, позволяющим найти им широкое применение в различных областях человеческой деятельности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Применение гидрогеля поливинилового спирта в составе гелево-порошковых наполнителей гибких нанокomпозитных экранов электромагнитного излучения на текстильной основе позволяет решить проблему их временной стабильности путём предотвращения седиментации порошкового компонента при сохранении высокого водосодержания. Исследование однослойных экранов электромагнитного излучения в сверхвысокочастотном диапазоне с наполнителями, представляющими собой суспензии порошков оксидов переходных металлов и наноструктурированного сырья природного происхождения – активированного угля и шунгита, показали, что экраны с металлооксидными

наполнителями обладают в основном радиопоглощающими, а экраны с углеродсодержащими – радиоотражающими свойствами, что объясняется прежде всего различием в характере и величине электропроводности этих наполнителей. Высыхание (обезвоживание) образцов приводит к полной потере радиозащитных и радиопоглощающих свойств, что свидетельствует в пользу определяющей роли воды в поглощении энергии электромагнитного излучения.

2. Применение геля поливинилового спирта с добавкой хлорида калия в сочетании с природным наноструктурированным углеродсодержащим минералом – шунгитом, позволяет снизить температурный предел эксплуатации водосодержащих композитных экранов электромагнитного излучения на текстильной основе до 258 К, обеспечивая увеличение коэффициента передачи не более, чем на 5 дБ и уменьшение коэффициента отражения не более, чем на 0,5 дБ по сравнению с 298 К, что обусловлено модификацией совокупной наноструктуры гидрогеля в данном наполнителе полярной составляющей шунгита.

3. Показано, что двухслойные экраны электромагнитного излучения на основе текстильного полотна с гелево-порошковым наполнителями, состоящие из ближнего к источнику излучения слоя с оксидсодержащим наполнителем и располагающегося за ним слоя с шунгитсодержащим наполнителем, имеют коэффициенты передачи электромагнитного излучения на 12...14 дБ ниже по сравнению с аналогичными однослойными экранами, благодаря увеличению отраженной доли электромагнитного излучения на границе раздела слоев при таком сочетании материалов.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. Водосодержащие гибкие экраны электромагнитного излучения, работоспособные при высоких температурах / А.О. Лаврентьев, А.А. Позняк, С.Г. Ким // Технические средства защиты информации: тез. докл. XIII Белорусско-российской науч.-техн. конф., Минск 4–5 июня 2015 г. / редкол.: Л.М. Лыньков [и др.]. – Минск: БГУИР, 2015. – 100 с. – С. 68.

2. Водосодержащие гибкие экраны электромагнитного излучения, работоспособные при низких температурах / С.Г. Ким, А.О. Лаврентьев, А.А. Позняк // Технические средства защиты информации: тез. докл. XIII Белорусско-российской науч.-техн. конф., Минск 4–5 июня 2015 г. / редкол.: Л.М. Лыньков [и др.]. – Минск: БГУИР, 2015. – 100 с. – С. 67.

3. Экраны электромагнитного излучения с улучшенными эксплуатационными характеристиками / А.О. Лаврентьев // 51-я научно-техническая конференция аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР: тез. докл., г. Минск, 13-17 апреля 2015 г. – Минск: БГУИР, 2015. – В печати.