

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

УДК 004.353.2:678.82

Гвоздева
Наталья Владимировна

**НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ ЭКРАНЫ
С ГЕЛЕВЫМИ И ГЕЛЕВО-ПОРОШКОВЫМИ
НАПОЛНИТЕЛЯМИ НА ОСНОВЕ
УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ**

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание степени магистра технических наук
по специальности 1-988001 — Методы и системы защиты информации,
информационная безопасность

Научный руководитель

Позняк Александр Анатольевич

*кандидат физико-математических наук,
доцент*

Минск 2015

КРАТКОЕ 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 усложняют функционирование маломощного высокоточного измерительного оборудования, обостряют проблемы электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств и защиты информации, оказывают отрицательное влияние на организм человека и биологические объекты.

Экранирование – наиболее эффективный способ защиты. Под экранированием в общем случае понимается как защита объектов от воздействия внешних полей, так и локализация излучения каких-либо средств, препятствующая проявлению этих излучений в окружающей среде. 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, а 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.

Одним из перспективных направлений является создание экранов на основе гибких радиопоглощающих материалов (РПМ) с различными наполнителями. В настоящий момент ясно, что высокими характеристиками радиопоглощения могут обладать только композитные материалы. Наиболее перспективным направлением является создание именно нанокompозитных материалов, которым можно придать комплекс уникальных свойств. На настоящий момент крайне мало разработано тонких РПМ и экранов ЭМИ, обладающих хорошей гибкостью, приемлемыми электромагнитными характеристиками при небольшом весе и толщине. Все вышеизложенное определило направление диссертационной работы, задачей которой является получение и анализ новых экспериментальных данных о влиянии состава наноструктурированных наполнителей гибких экранов на их экранирующие характеристики в СВЧ-диапазоне.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

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 их отдельных 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 сообщения показывают актуальность предпринятых автором исследований.

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 электромаг-

нитного излучения, в том числе работоспособных при пониженных температурах.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- провести сравнительный анализ современных методов создания радиозащитных 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* – радиозащитные свойства (коэффициенты передачи S_{21} и отражения S_{11}) указанных нанокompозитных экранов в сверхвысокочастотном диапазоне в зависимости от состава наполнителей.

Связь работы с крупными научными программами, темами

Диссертационная работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» в рамках инициативных исследований во время обучения в магистратуре.

Личный вклад соискателя

Содержание диссертации отражает личный вклад автора. Он заключается в анализе современных видов радиозащитных и радиопоглощающих материалов, обработке числовых результатов экспериментов (расчёт коэффициентов пропускания и передачи), графическом оформлении результатов экспериментов, анализе результатов.

Апробация результатов диссертации

Результаты исследований по теме настоящей диссертации были представлены в виде тезисов на научно-технических конференциях: 50-я научно-техническая конференция аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР (Минск, Беларусь), 24 Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и

телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2014) (Севастополь, Крым, Россия).

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 2003*, текстовый процессор *Microsoft Word 2003*, 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 2000* и программная система для создания и редактирования трехмерной графики и анимации *Autodesk 3ds Max 9*.

Положения диссертации, выносимые на защиту

1. Использование гидрогеля поливинилового спирта с добавлением хлорида калия в концентрации 1 М в качестве наполнителя текстильного полотна улучшает значение коэффициента передачи экрана на 4 дБ в диапазоне частот электромагнитного излучения 8 – 12 ГГц за счет образования наноразмерной сетчатой структуры из макромолекул полимера и ионов соли, а ион-дипольное взаимодействие между ионами соли и ОН группами макромолекул поливинилового спирта исключает переход гидрогеля в жидкое состояние, что обеспечивает их термическую устойчивость, а также временную стабильность путем предотвращения седиментации порошкового компонента.

2. Применение наноструктурированного углеродсодержащего минерала шунгита в наполнитель текстильного полотна из гидрогеля поливинилового спирта и хлорида калия способствует увеличению диапазона рабочих температур экрана в сторону отрицательных значений за счет дополнительной поляризации молекул воды и модификации совокупной структуры гидрогеля

при помощи полярной составляющей шунгита.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из перечня условных обозначений, введения, общей характеристики работы, трёх глав с краткими выводами по каждой главе, заключения, рекомендаций по практическому использованию и списка использованных источников. Общий объем работы – 99 страниц. Она включает 79 страниц машинописного текста, 48 рисунков на 38 страницах, 14 таблиц на 11 страницах, библиографию из 61 наименования использованных источников на 5 страницах и 2 наименований публикаций соискателя на 1 странице, и графический материал на 21 странице.

Благодарность

Автор благодарит Позняка А.А. за руководство выполнением исследований в рамках настоящей диссертационной работы, организацию оформления документов диссертации и докладов на конференции.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** и **общей характеристике работы** определены основные направления исследований, обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** на основе анализа литературных данных показано, что для экранирования применяются различные радиопоглощающие и радиоотражающие материалы. Однако в некоторых случаях экранирующие конструкции на основе РПМ могут создавать отраженные волны такой силы, что те могут усилить облучение. К тому же, при использовании металлического экранирования внутри помещений происходит снижение естественного магнитного поля Земли. Более удобно использовать для экранирования РПМ. Рассмотрены материалы и конструкции экранов для различных частотных диапазонов ЭМИ.

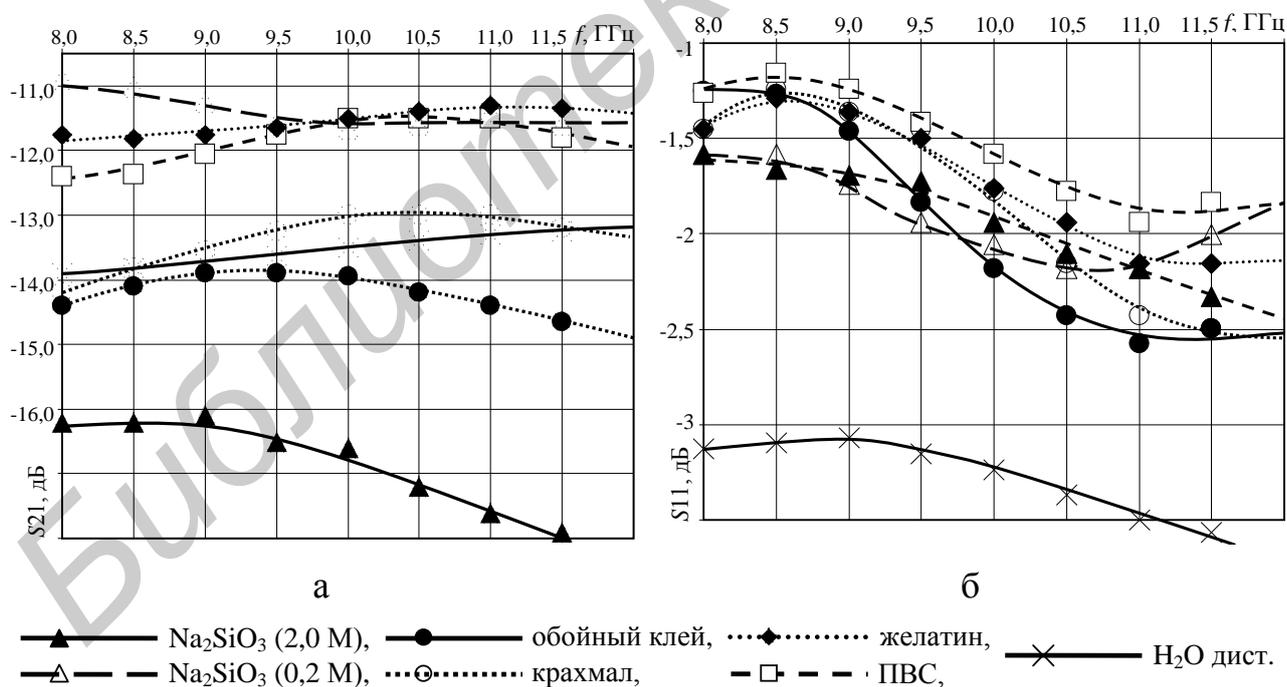
Для многих стационарных и мобильных источников ЭМИ необходимы защитные экраны с невысокими массогабаритными характеристиками, обладающие гибкостью, экологичностью, универсальностью и возможностью быстрого развертывания. Проведенный анализ показал перспективность использования для таких целей композитных материалов; в том числе с применением в качестве основы для создания композитов полимерного волокна; часто используют дисперсные (металлы, их оксиды), в том числе и углеродсодержащие наполнители, в том числе и наноструктурированные, например шунгит, углеродные нанотрубки, сажа, поскольку они широко используются не только в архитектуре и строительстве, но и в качестве защитных материалов для предотвращения утечки информации по электромагнитным каналам, в том числе радиочастотным. В силу уникальных радиопоглощающих свойств воды, также используемой в различных устройствах, подавляющих ЭМИ, перспективной является разработка композитных РПМ 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 (ПАН) машинно-вязаного полотна толщиной 2 мм. В качестве гелеобразующих агентов были опробованы поливиниловый спирт (ПВС) марки 16/1, желатин марки «Фото», крахмал картофельный, клей обойный промышленного производства и метасиликата натрия пентагидрат ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$). Кратко описана методика рентгеноструктурных и рентгенофазовых исследований порошков наноструктурированных углеродсодержащих материалов природного происхождения – активированного угля и минерала шунгита. Также описаны методики

подготовки высушенных и охлажденных до 258 К образцов композитных экранов и измерений их экранирующих характеристик в СВЧ-диапазонах 8 – 12 ГГц.

В третьей главе приведено описание исследований свойств ПАН текстильных полотен, наполненных гелями.

Исследование текстильных полотен, наполненных гелями различной природы, показало, что пропитка гелями не приводит к улучшению радиоэкранирующих свойств таких экранов в диапазоне 8 – 12 ГГц (рисунок 1). Сравнение экранирующих характеристик текстильных полотен, наполненных гидрогелем ПВС, гидрогелем ПВС с добавкой КСl, дистиллированной водой и 1 М раствором КСl, показывает, что введение в раствор КСl в любом случае приводит к снижению коэффициентов передачи, а в случае экспериментов с гелем ПВС – и к снижению коэффициента отражения ЭМИ до уровня, сравнимого с дистиллированной водой, что свидетельствует об увеличении поглощения энергии электромагнитной волны. Как я полагаю, введение примеси сильного электролита типа 1-1, полностью диссоциированного на ионы, расположенные при данной концентрации в объеме с шагом порядка 1 нм, но имеющие в наноструктурированной матрице гидрогеля ПВС, образованной за счёт водородных связей, весьма ограниченную подвижность, увеличивает количество ча-



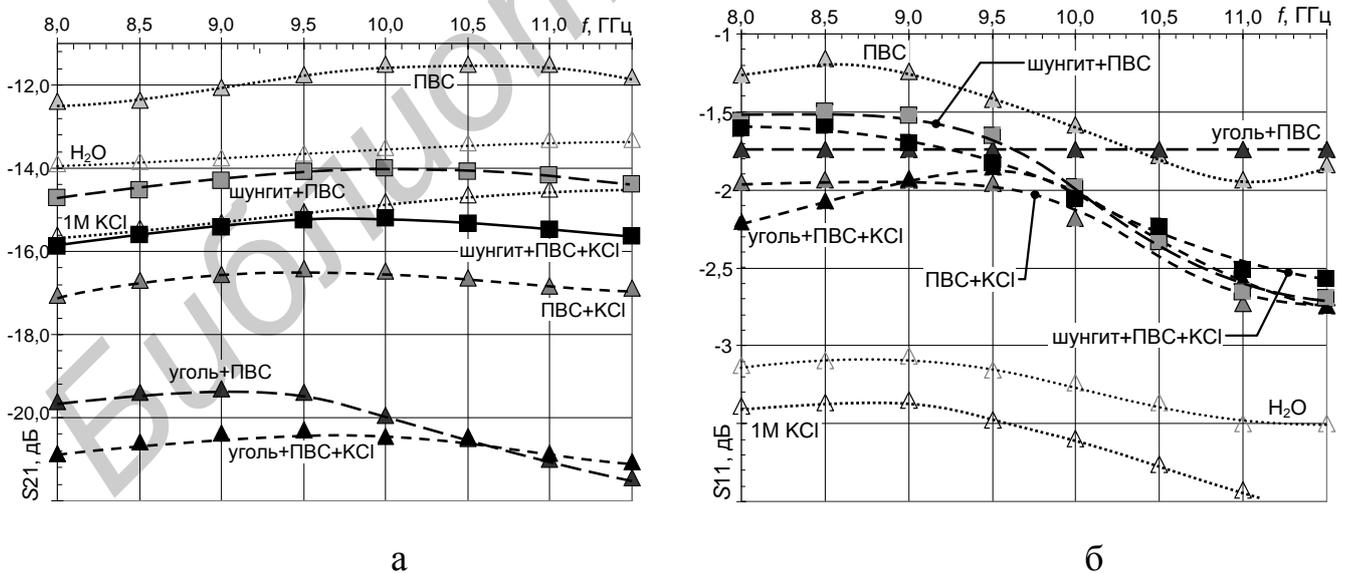
а – коэффициенты передачи; б – коэффициенты отражения

Рисунок 1 – Частотные зависимости коэффициентов передачи S_{21} , дБ и отражения S_{11} , дБ текстильных матриц, пропитанных различными гелями

стиц (без существенного увеличения электропроводности), способных колебаться под действием переменного электрического поля, за счет чего происходит поглощение энергии ЭМИ и ее диссипация. Кроме того, электрическое поле ионов оказывает также поляризующее воздействие на наноразмерную структуру гидрогеля в целом, в том числе и путем дополнительного связывания макромолекул за счет ион-дипольного взаимодействия с ОН-группами ПВС, что приводит к тому, что обратный переход гидрогеля в жидкое состояние при его нагревании становится невозможным вплоть до температуры деструкции, а следовательно, и возможность экранирования ЭМИ высокой мощности.

Также в третьей главе изложены результаты исследования радиоэкранирующих характеристик композитных экранов ЭМИ на текстильной основе с гелево-порошковыми наполнителями в диапазоне 8 – 12 ГГц. Исследования показали, что использование в качестве наполнителей текстильных полотен наноструктурированных углеродсодержащих материалов – активированного угля и шунгита, стабилизированных в геле ПВС с добавкой хлорида калия, позволило существенно улучшить характеристики влагосодержащих нанокомпозитных экранов ЭМИ (рисунок 2) и создать РПМ, существенно превосходящие аналоги, изготовленные с применением, например, металлизированных нитей.

Следует отметить, что применение именно наноструктурированного гидрогеля ПВС позволило решить сразу две задачи: обеспечить практически неограниченную временную стабильность экранов ЭМИ путем гарантированного



а – коэффициенты передачи; б – коэффициенты отражения

Рисунок 2 – Зависимость коэффициентов передачи S_{21} и отражения S_{11} , дБ однослойных текстильных матриц с различными пропитками и углеродсодержащими наполнителями от частоты f , ГГц

исключения седиментации порошкового компонента при одновременном обеспечении их высокого влагосодержания.

Установлено, что в зависимости от природы наполнителя и радиоэкранирующих характеристик исследованные экраны ЭМИ можно разделить на две основные группы – РПМ и радиоотражающие (материалы с наноструктурированными углеродсодержащими наполнителями), что вполне объяснимо, если принять во внимание проводимость аморфного углерода.

Очевидным недостатком водосодержащих экранов ЭМИ является зависимость их характеристик от температуры, однако ее удалось снизить за счет совместного применения наноструктурированных наполнителей. При температуре 258 К были исследованы радиоэкранирующие свойства текстильных полотен со следующими наполнителями: $\text{H}_2\text{O}_{\text{дист}}$, 1 М КСl, ПВС, ПВС+КСl, ПВС+TiO₂, ПВС+КСl+TiO₂, ПВС+шунгит, ПВС+КСl+шунгит, ПВС+ С_{акт}, ПВС+КСl+С_{акт} и была рассчитана разность между коэффициентами передачи ΔS_{21} и отражения ΔS_{11} этих материалов в стандартных условиях и при пониженной температуре. Исследования показали, во-первых, что во всех без исключения случаях замораживание образцов приводит к увеличению их коэффициента передачи и уменьшению коэффициента отражения в диапазоне 8 – 12 ГГц. Как и следовало ожидать, коэффициент передачи ЭМИ образцом ткани, пропитанным дистиллированной водой, существенно увеличивается при замораживании (в среднем на 12 дБ). Изменение при отрицательной температуре экранирующих характеристик экрана ЭМИ, содержащего смесь ПВС+КСl, ожидаемо меньше (ΔS_{21} менее 11 дБ), чем для образцов с чистой водой, гелем ПВС и раствором КСl. Несколько неожиданным является тот факт, что образцы, пропитанные гелем ПВС и раствором КСl, обладают близкими значениями ΔS_{21} . Это можно объяснить совместным воздействием наноструктурирующих добавок (ПВС+КСl), взаимно усиливающих свое влияние. Коэффициент отражения образцов с водой и ПВС в качестве пропиток после замораживания не поддается измерению вследствие малости значений, а ΔS_{11} образца с ПВС+КСl составляет около 4 дБ. Любопытно отметить, что у образца, наполненного раствором КСl, при существенном возрастании коэффициента передачи, коэффициент отражения уменьшился лишь на 1,5 дБ. Вероятно, это происходит по причине разделения пропитываемого раствора на две фазы – фазу льда со значением относительной диэлектрической проницаемости существенно меньшим, чем у воды, и фазу раствора КСl еще большей концентрации и еще более сниженным значением ϵ по сравнению с исходным 1 М раствором, но обладающей высокой электропроводностью и эффективно отражающей СВЧ-излучение. Для всех углеродсодержащих наполнителей характерна слабые изменения коэффициента отражения (0,5 – 1,5 дБ) при замораживании, поскольку его обуслови-

вают наличие проводящего углерода. Если принять во внимание экспериментально подтвержденный вывод об определяющем влиянии воды на ослабление ЭМИ подобными композитными материалами, то становится ясной причина существенного различия коэффициентов передачи этих образцов с добавкой хлорида калия и без нее после их охлаждения. В образцах без добавки сильного электролита происходит кристаллизация воды в полостях матрицы ПВС и образование композитного криогеля, как следствие – существенное снижение значения ϵ_r и рост S_{21} . Образец с порошком шунгита, распределенным в геле ПВС+КСl, характеризуется минимальным изменением ΔS_{21} (ΔS_{21} всего около 4,5 дБ), аналогичный наполнитель с $C_{\text{акт}}$ характеризуется значением ΔS_{21} около 8,5 дБ; разница, на наш взгляд, объясняется плохой адсорбцией полярного раствора поверхностью угля и намного лучшей – шунгитом, содержащим значительное количество полярных соединений в своем составе. Таким образом, развитая наноструктурированная поверхность шунгита существенно лучше модифицирует и стабилизирует структуру жидкой фазы, предупреждая замерзание существенной ее части как за счет дополнительной поляризации молекул воды, так и в результате дополнительного структурирования гидрогеля из-за взаимодействия ОН-групп ПВС с полярной составляющей шунгита. Таким образом, оптимальными параметрами при понижении температуры до 298 К из числа исследованных образцов водосодержащих композитных экранов ЭМИ на текстильной основе обладают материалы с наполнителем, содержащим порошок природного наноструктурированного материала – шунгита, распределённого в геле ПВС с добавкой хлорида калия.

Композитный экран, содержащий порошок TiO_2 , распределенный в смеси ПВС+КСl, изменил при замораживании свои свойства подобно текстильной матрице, содержащей наполнитель ПВС+КСl. Это обусловлено тем, что грубодисперсный порошок диоксида титана с относительно невысокой удельной площадью поверхности не меняет в существенной мере структуры и свойств исходной гелевой матрицы и не является проводящим материалом, в результате ΔS_{21} такого экрана даже выше, чем у композита с наполнителем $C_{\text{акт}}$ +ПВС+КСl.

На примере добавки КSl в водосодержащие гелево-порошковые композитные экраны ЭМИ на текстильной основе показана возможность увеличения их радиопоглощающей способности путем добавки сильного электролита.

Свойства образцов радиоэкранирующих и радиопоглощающих материалов на текстильной основе с гелевыми пропитками и гелево-порошковыми наполнителями при высыхании не сохраняются, что обусловлено определяющим влиянием воды на подавление ЭМИ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Добавление хлорида калия в наноструктурированный гидрогель поливинилового спирта, вводимый в текстильное полотно в качестве наполнителя, предотвращает переход гидрогеля в жидкое состояние вплоть до температуры деструкции, что обеспечивает стабильность и работоспособность наноструктурированного материала при температурах до 100 °С. Такая стабильность достигается за счёт ион-дипольного взаимодействия между ионами соли и ОН-группами макромолекул поливинилового спирта. Это приводит к улучшению по сравнению с наполнением дистиллированной водой согласования волновых сопротивлений композитного материала и воздуха в диапазоне частот электромагнитного излучения 8 – 12 ГГц и дает снижение на 4 дБ коэффициента передачи электромагнитного излучения. Данный эффект объясняется поляризующим воздействием макромолекул полимера, образующих трёхмерную сетчатую наноструктуру с размером структурных элементов от единиц до десятков нанометров, а также находящихся в ней гидратированных ионов соли, расположенных на расстоянии порядка 1 нм, на структуру воды, а также снижением подвижности ионов соли по сравнению с водным раствором. Использование в качестве наполнителей других органических и неорганических гелей не привело к улучшению характеристик отражения или поглощения электромагнитной энергии в сверхвысокочастотном диапазоне в сравнении с полотнами, пропитанными дистиллированной водой.

2. Применение гидрогеля поливинилового спирта в составе гелево-порошковых наполнителей гибких нанокомпозитных 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 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 радиоэкрани-

рующих и радиопоглощающих свойств, что свидетельствует в пользу определяющей роли воды в поглощении энергии электромагнитного излучения.

3. 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 [2].

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. При выполнении исследований в рамках настоящей диссертационной работы удалось достичь высоких показателей экранирования электромагнитного излучения гибкими и тонкими материалами, которые по сравнению с аналогичными по толщине экранами из трикотажных полотен с металлическими нитями имеют преимущество в поглощении электромагнитного излучения, имеют меньшую удельную массу, а также значительно проще и дешевле в изготовлении, что обуславливает технико-экономическую эффективность их внедрения.

2. Полученные данные необходимы для дальнейших исследований в области создания радиоэкранирующих и радиопоглощающих материалов. Также эти результаты могут использоваться для изготовления гибких электромагнитных экранов, применяемых в различных сферах:

- в военной области для снижения радиолокационной заметности объектов и повышения их помехозащищенности;
- в области радиоэкологической 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.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. Твердовский, А.А. Водосодержащие гибкие экраны электромагнитного излучения с расширенным диапазоном рабочих температур / А.А. Твердовский, Н.В. Гвоздева // Компьютерное проектирование и технологии производства электронных схем: материалы 50-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, 24-26 марта 2014 – Минск, 2014.

2. Позняк, А.А. Водосодержащие нанокompозитные экраны электромагнитного излучения, работающие при пониженных температурах / А.А. Позняк, Н.В. Гвоздева, Н.В. Насонова, Г.А. Пухир, А.А. Твердовский // Материалы 24-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», 7-13 сентября, 2014 – Севастополь, Российская Федерация – 2014. Севастополь, 2014. С. – 758-760.