

Учреждение образования
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 004.353.2-026.66:661.66, 004.056.5 : 621.315.6

НАСОНОВА
Наталья Викторовна

**НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ
НА ОСНОВЕ ПОРИСТЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТРИЦ,
ЗАПОЛНЕННЫХ ВОДНЫМИ РАСТВОРАМИ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

по специальностям 05.16.08 – Нанотехнологии и наноматериалы,
05.27.06 – Технология и оборудование для производства полупроводников,
материалов и приборов электронной техники

Минск 2018

Работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Научный консультант **Лыньков Леонид Михайлович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры защиты информации учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Официальные оппоненты: **Лабунов Владимир Архипович**, академик НАН Беларуси, доктор технических наук, профессор, заведующий научно-исследовательской лабораторией «Интегрированные микро- и наносистемы» БГУИР

Петюшик Евгений Евгеньевич, доктор технических наук, профессор, заместитель генерального директора ГНПО ПМ

Поболь Игорь Леонидович, доктор технических наук, доцент, заведующий лабораторией электрофизики ГНУ «ФТИ НАН Беларуси»

Оппонирующая организация Государственное научно-производственное объединение «Научно-производственный центр НАН Беларуси по материаловедению»

Защита состоится « » 2018 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.07 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, тел. 293-89-89, e-mail dissovet@bsuir.by.

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

Автореферат разослан « » 2018 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций
доктор физ.-мат. наук, доцент

Д. Б. Мигас

КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Диэлектрические материалы, применяемые в различных областях электронной техники, обычно используются в качестве изолирующих материалов. К этому классу относятся разнообразные органические и неорганические вещества и компаунды. Они также применяются при создании электромагнитных экранов и поглотителей, однако выбор подходящих материалов в этом случае намного уже и ограничен требованиями к значениям диэлектрической проницаемости и потерь. Обычно такие материалы получают диспергированием проводящих порошков в радиопрозрачном связующем. Высокие значения диэлектрической проницаемости воды в широком диапазоне частот, возможность синтеза на ее основе растворов с широким спектром свойств обуславливают перспективность ее применения при создании композиционных материалов с диэлектрическими потерями, что может найти применение при разработке широкополосных средств электромагнитной защиты биологических и технических объектов для различных областей.

Рынок электромагнитных экранов и радиопоглотителей охватывает различные сферы – применение в вооруженных силах, проведение радиоизмерений, индивидуальные средства для ограничения электромагнитного излучения радиоэлектронной аппаратуры и средств связи, архитектурное экранирование. Необходимость разработки новых композиционных материалов связана с преодолением недостатков существующих материалов (узкополосность, большая масса и т. д.) и расширением функциональных возможностей существующих электромагнитных экранов и радиопоглотителей. Поэтому разработка наноструктурированных композиционных материалов на основе пористых диэлектрических матриц, заполненных водой и водными растворами электролитов, является актуальной научной задачей, решение которой имеет важное значение для электромагнитной защиты биологических и технических объектов.

Перспективы создания электромагнитных экранов и поглотителей на основе пористых материалов, заполняемых водой, исследуются научными группами в Институте синтетических полимерных материалов им. Н. С. Ениколопова РАН (А. Т. Пономаренко) (Москва, РФ), Институте медико-биологических проблем РАН (А. И. Григорьев) (Москва, РФ), Центральном конструкторском бюро спецрадиоматериалов (Москва, РФ). Однако эти работы имеют единичный, несистемный, характер.

Диссертационная работа посвящена установлению закономерностей формирования композиционных влагосодержащих материалов на основе пористых диэлектрических матриц, заполненных водой и водными растворами электролитов, исследованию зависимости их электромагнитных свойств от условий формирования, состава и концентраций компонентов, выявлению роли наноразмерных слоев воды во взаимодействии таких материалов с электромагнитным излучением, установлению температурных режимов их эксплуатации, разработке технологии формирования наноструктурированных композиционных влагосодержащих материалов и создании на их основе средств электромагнитной защиты технических и биологических объектов.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Тема диссертационной работы утверждена приказом ректора учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» № 307-о от 02.10.2009 и соответствует подразделу 8.4 «Новые композиционные материалы на основе металлов, керамики и углерода, нано- и микроструктурированные материалы и способы их синтеза, нанотехнологии, моделирование и создание адаптивных материалов» приоритетных направлений фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2011–2015 гг., утвержденных Постановлением Совета Министров Республики Беларусь 19 апреля 2010 г., № 585, и разделу 8 «Многофункциональные материалы и технологии» приоритетных направлений научных исследований Республики Беларусь на 2016–2020 гг., утвержденных Постановлением Совета Министров Республики Беларусь 12.03.2015, № 190.

Работа выполнялась в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» в рамках заданий Государственных программ ориентированных фундаментальных исследований «Наноматериалы и нанотехнологии» – «Разработка и исследование поглотителей и экранов электромагнитного излучения в широком диапазоне длин волн, создаваемых на основе наноразмерных металлических, диэлектрических и магнитных нитевидных кристаллов, инкорпорируемых в ячейки волоконнообразной гибкой полимерной основы метровых площадей для использования в биозащите и системах защиты информации» (2003–2005 гг., № ГР 20033082), Государственных комплексных программ научных исследований «Наноматериалы и нанотехнологии» – «Композиционные наноматериалы и структуры для микроволновой электроники на основе растворосодержащих пористых порошкообразных и органических матриц» (2006–2009 гг., № ГР 20063326), «Влияние электромагнитного импульса на радиоэлектронные компоненты и методы их защиты» (ГБЦ № 06-3095, 2006 г., № ГР 20066217) и импортных контрактов (г. Братислава, Словакия) «Разработка, изготовление и поставка базовых модулей широкодиапазонных поглотителей электромагнитного излучения» (х/д № 05-1060, 2005 г.), «Разработка, изготовление и поставка контейнеров, обеспечивающих защиту электронных паспортов при их хранении и ношении от негласного доступа и электромагнитного излучения большой мощности» (х/д № 08-1197К, 2008 г.), «Разработка, изготовление и поставка интегрированных панелей для подавления электромагнитных и акустических волн» (х/д № 08-1198К, 2008 г.), проектов Фонда фундаментальных исследований: № Т10М-215 «Композиционные влагосодержащие наноструктурированные материалы с повышенной стабильностью свойств для применения в электромагнитных экранах радиочастотного и оптического диапазонов длин волн» от 1.05.2010, № ГР 10-7007; № Т12МВ-035 «Формирование композиционных полимерных наноструктурированных материалов с изменяемыми линейными размерами и управляемыми электромагнитными свойствами для устройств защиты информации от утечки по техническим каналам», № ГР 20122717 от 27.08.2012; №Т10-114 «Оценка радиофизических характеристик образцов водосодержащих радиопоглощающих материалов на основе термопластов»

2010–2012 гг. № ГР 10-1189Б; ОКР шифр «Рама» в рамках Государственной программы прикладных исследований шифр «Компомат», утвержденной постановлением Совета Министров Союзного государства № 46 от 12.12.2012 (2012–2015 гг.).

Цель и задачи исследования

Цель диссертационной работы состоит в установлении закономерностей формирования наноструктурированных композиционных диэлектрических и проводящих материалов на основе пористых волокнистых (полиакрилонитрил, целлюлоза), порошковых (силикагель, цеолит, бентонит) и полимерных (полиакриламид) матриц, заполненных водой и водными растворами электролитов, определении их электрофизических и электромагнитных свойств и создании из них средств электромагнитной защиты биологических и технических объектов.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- провести анализ известных особенностей формирования композиционных материалов на основе пористых волокнистых, порошковых и полимерных матриц методом пропитки водой и водными растворами электролитов, их электромагнитных и оптических свойств в широком диапазоне частот;

- разработать методики получения водосодержащих композиционных материалов и изучения их структурных, электрофизических и электромагнитных свойств;

- установить наличие и роль наноразмерных эффектов и их влияние на взаимодействие водосодержащих композиционных материалов с электромагнитным излучением;

- исследовать закономерности формирования и структурные свойства наноструктурированных композиционных диэлектрических и проводящих материалов на основе пористых волокнистых (полиакрилонитрил, целлюлоза), порошковых (силикагель, цеолит, бентонит) и полимерных (полиакриламид) матриц, получаемых методом пропитки водой и водными растворами электролитов;

- исследовать влияние структурных и электрических параметров отдельных компонентов водосодержащих наноструктурированных композиционных материалов на основе пористых волокнистых, порошковых и полимерных матриц на электромагнитные и оптические свойства этих композитов;

- разработать и исследовать электромагнитные свойства электромагнитных экранов и радиопоглотителей, тканеэквивалентных материалов для имитации электрических свойств биологических объектов, укрывных материалов, оптически маскирующих объекты на отдельных природных фонах, из наноструктурированных композиционных диэлектрических и проводящих материалов на основе пористых волокнистых, порошковых и полимерных матриц, заполненных водой и водными растворами электролитов, и установить температурные режимы их эксплуатации;

- разработать технологию создания влагосодержащих композиционных материалов на основе воды и водных растворов электролитов в пористых матрицах

для создания из них средств электромагнитной защиты биологических и технических объектов.

Научная новизна

Развито новое актуальное научное направление в области нанотехнологий и наноматериалов, включающее исследование закономерностей формирования, свойств и возможностей применения наноструктурированных композиционных влагосодержащих материалов на основе пористых диэлектрических матриц, в рамках которого по специальности 05.16.08 «Нанотехнологии и наноматериалы»:

– установлено преобладающее влияние удельной поверхности пор гидрофильных микропористых матриц на максимальную объемную долю слоев воды толщиной до 3,7 нм, формирующихся на поверхности микропористых волокнистых, порошковых и гелевых матриц при их пропитке водой и водными растворами электролитов, определяющее характер зависимостей диэлектрической проницаемости и удельного электрического сопротивления таких материалов от их влагосодержания;

– развиты модельные представления о диэлектрической проницаемости наноструктурированных композиционных материалов на основе микропористых волокнистых и порошковых матриц, пропитанных водой и водными растворами электролитов, в диапазоне частот 8–12 ГГц, учитывающие вклад диэлектрической проницаемости наноразмерных слоев воды на поверхности пористых матриц и раствора электролита в концентрации 0,1 М–1 М;

– определены механизмы стабилизации величины поглощения электромагнитного излучения диапазона 8–12 ГГц наноструктурированными влагосодержащими композиционными материалами на основе микропористых матриц, пропитанных водными растворами гигроскопичных хлоридов металлов, в наноразмерных слоях воды на поверхности пористых матриц и растворе гидрофильной соли CaCl_2 в пределах $\pm 15\%$ при изменении температуры в диапазоне 258–383 К.

Научная новизна полученных автором результатов в области технологии создания материалов электронной техники по специальности 05.27.06 «Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники» заключается в следующем:

– предложена структурная модель влагосодержащих материалов на основе микропористых матриц, пропитанных водой, и описаны механизмы изменения их удельного электрического сопротивления в зависимости от влагосодержания;

– предложен механизм снижения спектральной яркости волокнистых (машинно-вязаное полиакрилонитрильное полотно и нетканое целлюлозное полотно), порошковых (порошковый и гранулированный силикагель) и полимерных (полиакриламид) матриц, пропитанных водой свыше порогового значения влагосодержания в них, во всем спектральном диапазоне видимого излучения и сохранения неизменной при дальнейшем увеличении водосодержания с 35 до 60 %, за счет уменьшения относительного показателя преломления света

при формировании менисков капиллярной воды на поверхности микропористых матриц, размеры которых коррелируют с длинами волн диапазона 400–1000 нм;

– разработана технология создания влагосодержащих композиционных материалов, основанная на введении воды и водных растворов электролитов в пористые волокнистые, порошковые и полимерные матрицы, структура, влагосодержание и состав раствора в которых определяются требованиями к диэлектрической проницаемости и поглощению электромагнитного излучения, а также обеспечению стабильности этих характеристик в течение длительного времени и при воздействии температур в широком диапазоне.

Положения, выносимые на защиту

1. Максимальная объемная доля наноразмерных слоев воды толщиной до 3,7 нм, формирующихся на поверхности гидрофильных микропористых волокнистых, порошковых и гелевых матрицах при их пропитке водой и водными растворами электролитов, составляет 10–35 мас. % и определяется в первую очередь удельной поверхностью пор матриц, что позволяет путем выбора вида и структуры матрицы управлять величинами диэлектрической проницаемости и удельного электрического сопротивления таких материалов при равномерном распределении пропитывающей жидкости по объему для одинаковой величины влагосодержания микропористых матриц.

2. Величина поглощения электромагнитного излучения от 2,81 до 28,32 дБ/см в диапазоне частот 0,7–140 ГГц влагосодержащими наноструктурированными композиционными материалами определяется в первую очередь влиянием влагосодержания (в диапазоне 5–70 мас.%), затем концентрации раствора электролита в диапазоне 0,1 М–1 М, удельной площади поверхности пористой матрицы (0,0003–542 010,0 м²/кг), определяющим величины диэлектрической проницаемости таких материалов в пределах 2,5–58 и удельного электрического сопротивления 0,004–130 кОм·м (на частоте 1 кГц), что позволило создать на их основе широкополосные электромагнитные экраны и радиопоглотители для электромагнитной защиты биологических и технических объектов, а также тканезквивалентные материалы с регулируемыми электрическими свойствами для имитации электрических свойств биологических объектов.

3. Показан комбинированный механизм стабилизации величины поглощения электромагнитного излучения диапазона 8–12 ГГц наноструктурированными композиционными влагосодержащими материалами при изменении температуры в диапазоне 258–383 К за счет сорбции молекул воды на поверхности микропористых матриц в слоях толщиной до 3,7 нм (в пределах ±60 % относительно значений при нормальной температуре) и в водных растворах гигроскопичных веществ (CaCl₂) (в пределах ±15 %), препятствующих испарению и кристаллизации воды, что позволило расширить диапазон применения электромагнитных экранов и радиопоглотителей на основе таких материалов до 258–383 К на период не менее 5 лет.

4. Снижение спектральной яркости волокнистых (машинно-вязаное полиакрилонитрильное полотно и нетканое прессованное целлюлозное полотно),

порошковых (порошковый и гранулированный силикагель) и полимерных (полиакриламид) матриц, пропитанных водой свыше порогового значения влагосодержания в них (более 35 мас.%), на 0,15–0,25 отн. ед. во всем спектральном диапазоне видимого излучения и дальнейшая стабилизация значения спектральной яркости при увеличении водосодержания до 60 мас. % обеспечивается за счет рассеивания оптического излучения на сформированных на поверхности пористых матриц менисков воды, размеры которых коррелируют с длинами волн диапазона 400–1000 нм, что предложено использовать для имитации оптических характеристик отдельных природных фонов (растительность, пески) с невысокими контрастами яркости (–0,049) – 0,2 в диапазоне длин волн 400–1000 нм для создания укрывных материалов, скрывающих технические объекты от обнаружения в микроволновом и оптическом диапазонах длин волн.

5. Наноструктурированные влагосодержащие композиционные материалы, полученные введением воды и водных растворов электролитов в микропористые волокнистые, порошковые и полимерные матрицы, могут применяться в качестве конструкционных материалов для электромагнитных экранов и радиопоглотителей, которые отличаются от известных широким рабочим диапазоном частот 0,7–140 ГГц, и возможностью получения величины ослабления излучения до 35 дБ ± 2 дБ, коэффициента отражения (–14,1) – (–5,0) дБ для толщины слоя материала 1,5 мм, а также в качестве тканеэквивалентных материалов для имитации электрических свойств биологических объектов при проведении оценки электрических и магнитных воздействий, с длительным сроком (до 5 лет) и расширенным температурным диапазоном эксплуатации (258–383 К) благодаря высоким диэлектрическим свойствам воды и стабильности электромагнитных свойств за счет наличия наноразмерных слоев воды.

Личный вклад соискателя ученой степени

Все основные результаты, изложенные в диссертационной работе, получены соискателем самостоятельно. Личный вклад соискателя состоит в выборе направления, определении целей и постановке задач исследования, выборе методов исследования, непосредственном участии в проведении экспериментов по формированию материалов, изучению их свойств, разработке средств электромагнитной защиты на их основе, а также обработке, анализе и интерпретации полученных результатов, формулировке выводов.

Выбранная тема потребовала различных междисциплинарных знаний и участия специалистов в различных областях. Автор глубоко признателен своим коллегам и соавторам публикаций, без помощи которых выполнение работы было бы невозможно. Основными соавторами опубликованных работ являются: научный консультант, доктор техн. наук, профессор Л. М. Лыньков, который принимал участие в планировании работ и обсуждении результатов, научные сотрудники канд. техн. наук Т. А. Пулко, канд. хим. наук А. А. Позняк и канд. техн. наук Я. Т. А. Аль-Адеми, принимавшие участие в разработке составов водных растворов электролитов и проведении экспериментов по созданию тканеэквивалентных материалов для имитации электрических свойств биологических объектов, д-р техн. наук Т. В. Борботько, совместно с которым

разрабатывались конструкции гибких радиопоглощающих экранов, канд. техн. наук Х. М. Альлябад, канд. техн. наук А. М. Прудник, Г. А. Пухир, совместно с которыми изготавливались образцы влагосодержащих материалов и проводились измерения их электрофизических характеристик.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Основные положения диссертации обсуждались на XII International Workshop «New Approaches to High-Tech: Nano-Design, Technology, Computer simulations – NDTCS'2008» (Minsk, Belarus, 2008 г.); I Международной научной конференции «Наноструктурные материалы-2008: Беларусь–Россия–Украина» (Минск, Беларусь, 2008 г.); 8-й Международной научно-технической конференции «Новые материалы и технологии : порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка» (Минск, Беларусь, 2008 г.); International Conference «Optical Techniques and Nano-Tools for Material and Life Sciences» (Minsk, Belarus, 2010); XVI, XXI Международных научно-практических конференциях «Физика конденсированного состояния» (Гродно, Беларусь, 2008 г., 2013 г.); International conference «Physics, chemistry and application of nanostructures Nanomeeting-2015» (Minsk, Belarus, 2015); III, VI–VIII, X, XIII, XIV Белорусско-российских научно-технических конференциях «Технические средства защиты информации» (Минск-Нарочь, Браслав, Беларусь, 2005 г., 2008–2010 гг., 2012 г., 2013 г., 2015 г., 2016 г.); XV, XX–XIV Международных Крымских конференциях «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо)» (Севастополь, Крым, 2005 г., 2010–2014 гг.); 16th International conference «Microwaves, radar and wireless communications (MICON 2006)» (Krakow, Poland, 2006 г.); IV Международной научно-технической конференции «Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств» (Новополоцк, Беларусь, 2006 г.); III Международной научно-практической конференции «Государственное регулирование экономики и повышение эффективности деятельности субъектов хозяйствования» (Минск, Беларусь, 2007 г.); XIV, XVIII Международных научно-практических конференциях «Комплексная защита информации» (Могилев, Брест, Беларусь, 2009 г., 2013 г.); V Международной научно-практической конференции «Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация» (Минск, Беларусь, 2009 г.); Международной научно-практической конференции «Метрология-2009» (Минск, Беларусь, 2009 г.); 18th, 19th International Conference «Electromagnetic disturbances EMD 2008, 2009» (Vilnius, Lithuania, 2008 г., Bialystok, Poland, 2009 г.); Международном научно-техническом семинаре «Телекоммуникации: сети и технологии, алгебраическое кодирование и безопасность данных» (Браслав, Беларусь, 2010 г.); XII, XV, XIX Международных научно-технических конференциях «Современные средства связи» (Минск, Беларусь, 2007 г., 2010 г., 2014 г.); VI Международной научно-технической конференции «Медэлектроника-2010» (Минск, Беларусь, 2010 г.); XXXth General Assembly of the International Union of Radio Science (Istanbul, Turkey, 2011 г.); XI Международной научно-практической конференции «Управление информационными ресурсами» (Минск, Беларусь, 2014 г.); Международной научной конференции по военно-техническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, использованию

технологий двойного применения (Минск, Беларусь, 2005 г.); научно-технической семинар «Актуальные вопросы испытаний, стандартизации и сертификации вооружения и военной техники» (Минск, Беларусь, 2007 г.); Международной научно-практической конференции «Современная радиоэлектроника: научные исследования и подготовка кадров» (Минск, Беларусь, 2008 г.).

Научные и практические результаты диссертационной работы используются в рамках выполнения НИОКР в лаборатории химических волокон ОАО «Центральный научно-исследовательский институт комплексной автоматизации легкой промышленности» (ОАО «ЦНИИЛКА», Москва, Российская Федерация), в Центре 1.6 НИЧ БГУИР (Минск, Беларусь), НИЛ 5.3 БГУИР (Минск, Беларусь), внедрены в производство в НПООО «ОКБ ТСП» (Минск, Беларусь). Изделия, отражающие практические результаты диссертационной работы, завоевали дипломы международных специализированных выставок ТИВО-2012, MILEX-2014, «Человек и безопасность-2014, 2015».

Использование результатов диссертационной работы отражено в соответствующих актах, приведенных в приложении к диссертации.

Опубликование результатов диссертации

По результатам исследований, представленных в диссертации, опубликовано 87 работ, в том числе 3 монографии, 22 статьи в научных журналах; 30 статей в сборниках материалов конференций, 22 тезиса докладов, получено 10 патентов Республики Беларусь, из которых 3 патента на изобретение.

Общий объем публикаций по теме диссертации, соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, составляет 81 авторский лист.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, шести глав с выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка и приложений.

Общий объем диссертационной работы составляет 326 страниц, из которых 182 страницы текста, 197 рисунков на 91 странице, 45 таблиц на 16 страницах, библиографический список из 343 источников на 28 страницах, включая 87 собственных публикаций автора, 2 приложения на 9 страницах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В **первой главе** проведен анализ известных особенностей взаимодействия влагосодержащих материалов с электромагнитным излучением и возможностей создания из них средств электромагнитной защиты биологических и технических объектов.

Среди материалов, применяемых в электротехнике и радиоэлектронике для создания электромагнитных экранов и радиопоглотителей, преобладают материалы

с резистивными и магнитными потерями. Диэлектрические потери обеспечиваются в основном за счет введения в диэлектрическую связующую матрицу (без потерь) электропроводящих порошков и создания проводимости в отдельных полимерах. Высокое значение диэлектрической проницаемости и диэлектрических потерь воды в широком диапазоне частот (1–100 ГГц) обуславливают перспективу использования воды при создании широкополосных экранов электромагнитного излучения и радиопоглощающих материалов, тканеэквивалентных материалов для имитации электрических свойств биологических объектов и других применений.

Исследования отдельных групп ученых (Институт синтетических полимерных материалов им. Н. С. Ениколопова РАН (Москва, Российская Федерация); Институт медико-биологических проблем РАН (Москва, Российская Федерация); Центральное конструкторское бюро спецрадиоматериалов (Москва, Российская Федерация) посвящены изучению перспектив применения воды в качестве компонента конструкционных материалов электромагнитных экранов и радиопоглотителей как вещества, обладающего высокими значениями диэлектрической проницаемости и потерь вследствие релаксации ориентационной поляризации в широком диапазоне частот. Однако эти исследования носят отрывочный, несистемный характер.

Особенности взаимодействия воды с электромагнитным излучением изучаются многими областями (СВЧ-влажнометрия, СВЧ-нагрев, биомедицина, дистанционное зондирование, радиолокация и др). Предметом диссертационной работы является обратная задача – установление закономерностей формирования композиционных материалов на основе пористых матриц, заполненных водой и влажными растворами, для получения требуемых электрофизических и электромагнитных характеристик таких композиционных материалов в широком диапазоне частот.

Поскольку вода представляет собой жидкий диэлектрик, ее применение возможно в качестве компонента композиционных материалов, распределенного в твердотельной матрице. Необходима разработка научных принципов, методики и технологии формирования композиционных материалов на основе пористых диэлектрических матриц, пропитанных водой и водными растворами электролитов, что позволит управляемо получать их необходимые электромагнитные характеристики для создания из них средств электромагнитной защиты биологических и технических объектов, тканеэквивалентных материалов для имитации электрических свойств биологических объектов, укрывных материалов для оптического диапазона длин волн.

Во **второй** главе представлены предложенные методики формирования водосодержащих наноструктурированных композиционных материалов и изучения их структурных, электрофизических и электромагнитных свойств.

Моделирование, проведенное в пакете электродинамического моделирования CST MICROWAVE STUDIO характеристик распространения электромагнитных волн через диэлектрик с потерями, дисперсия диэлектрической проницаемости которого описывается моделью Дебая первого порядка, а статическая, оптическая диэлектрическая проницаемости и время релаксации соответствуют справочным значениям для воды ($\epsilon_s = 81$, $\epsilon_\infty = 5,4$, $\tau = 6,0 \cdot 10^{-12}$ с), позволило показать, что на основе такого материала могут быть получены экранирующие материалы со следующими электромагнитными характеристиками: коэффициент передачи электромагнитного

излучения (ЭМИ) $(-61,1) - (-7,4)$ дБ, линейно зависящий от толщины такого материала в диапазоне частот 8–12 ГГц. Для диапазона частот 90–140 ГГц коэффициент передачи ЭМИ составляет менее $-25,5$ дБ.

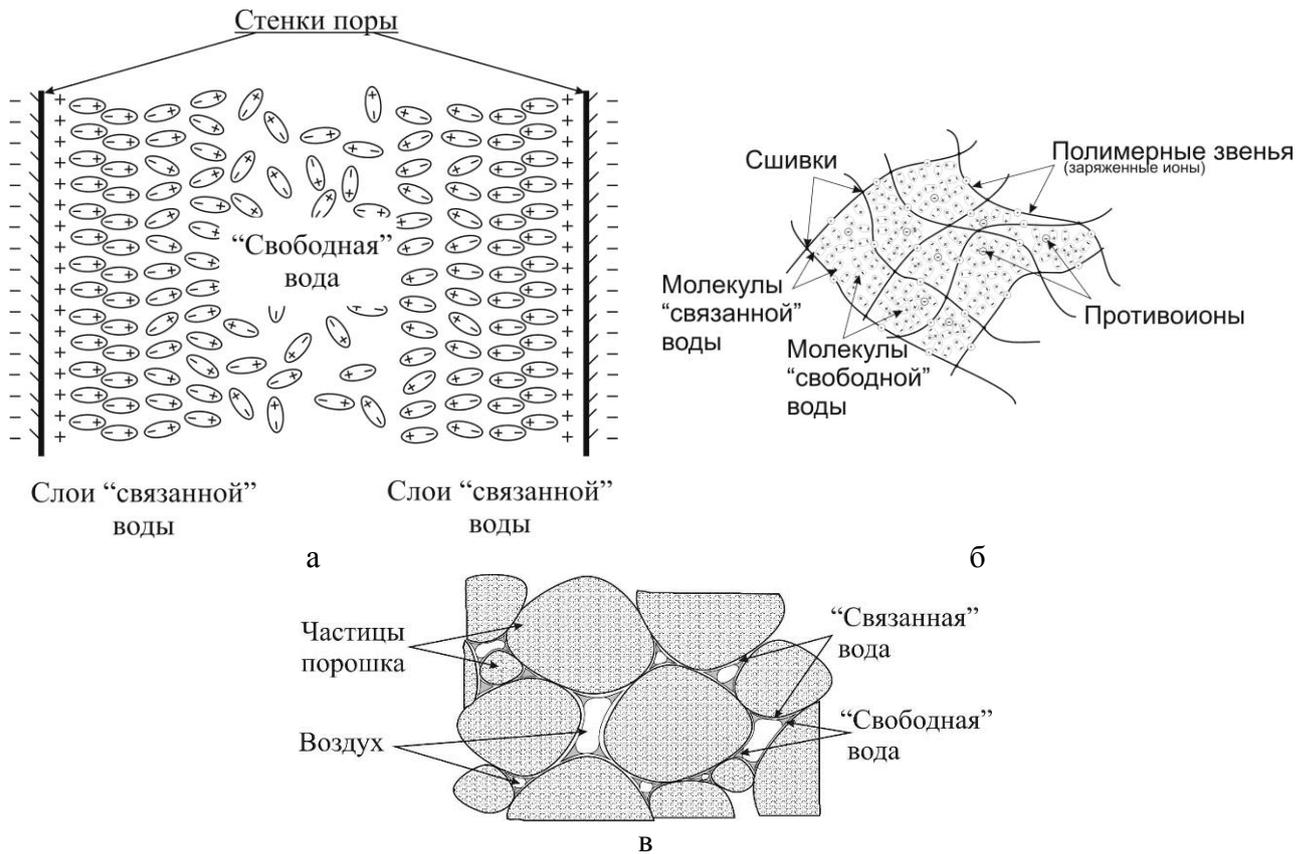
Проведенные теоретические исследования обусловили необходимость разработки методики и технологии формирования композиционных влагосодержащих материалов, которые позволят получать необходимые электрофизические и электромагнитные характеристики для применения в различных областях.

Процессы взаимодействия ЭМИ с гомогенным слоем воды изменяются при участии молекул воды в физических и химических взаимодействиях, например, при пропитке ею различных пористых материалов, а также синтезе коллоидных систем и растворов.

Наибольшее влияние на электрофизические свойства воды оказывают пористые материалы с развитой поверхностью, обладающие высокой водопоглощающей способностью и за счет большой площади границы раздела твердое тело–жидкость воздействующие на молекулы воды и их упорядоченность. К таким материалам можно отнести волокнистые и порошковые пористые материалы, удельная поверхность которых может достигать больших значений, а также органические и неорганические вещества, способные к гелеобразованию, которые были выбраны в качестве объекта исследований (рисунок 1).

Выбор компонентов водных растворов для заполнения пористых матриц обоснован задачами изменения диэлектрической проницаемости и электропроводности воды путем введения дополнительных ионов, изменения смачиваемости материала пористой матрицы для повышения эффективности процесса формирования композиционного материала, а также изменения сорбционных свойств водного раствора для снижения испарения молекул воды из композиционного материала.

Пропитка пористых материалов осуществляется за счет диффузионной и капиллярной проводимости, процессы пропитки капиллярно-пористых материалов жидкостью описываются уравнениями Уошберна и Лапласа, а для сред с неупорядоченной структурой применяется теория Дерягина, использующая закон Дарси. Показано, что пористые тела с меньшим размером пор и высокой смачиваемостью водой обеспечивают наибольшие значения действующих капиллярных сил и позволяют обеспечить наилучшую фиксацию жидкости в пространстве. Для эффективного управления электрофизическими свойствами влагосодержащих композиционных материалов в широких пределах величины удельной пористости и поверхности пор должны быть большими.



а – «идеализированное» схематичное изображение формирования двойного электрического слоя (ДЭС) в поре волокнистой матрицы; **б** – схема формирования ДЭС в гидрогеле; **в** – формы воды в порах порошковых матриц

Рисунок 1. – Формирование двойного электрического слоя и влияние твердой поверхности на свойства воды в порах

В качестве волокнистых матриц для исследований были выбраны полотна, обладающие регулярной и нерегулярной структурой (машинно-вязаное и нетканое полотна) из синтетических (полиакрилонитрил) и натуральных (целлюлоза) волокон с высокими значениями пористости и малым размером пор. Среди известных порошковых сорбентов, обладающих 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, были выбраны цеолиты, силикагель и бентонит. Кроме этого, исследовались гигроскопичные органические полимеры (на основе полиакриламида).

При проведении физического и структурного анализа экспериментальных образцов наноструктурированных композиционных влагосодержащих материалов применялись гравиметрические методы исследования влагосодержания W пористых матриц, сканирующая электронная микроскопия (MIRA TESCAN), оптическая микроскопия (Olimpus MX-50, Nikon Optifot, Метам-Р1), БЭТ-анализ на анализаторе SA 3100 с пределами допустимой погрешности измерений $\pm 5\%$, дериватография (с использованием установки дифференциально-термического анализа с точностью определения температуры ± 2 К).

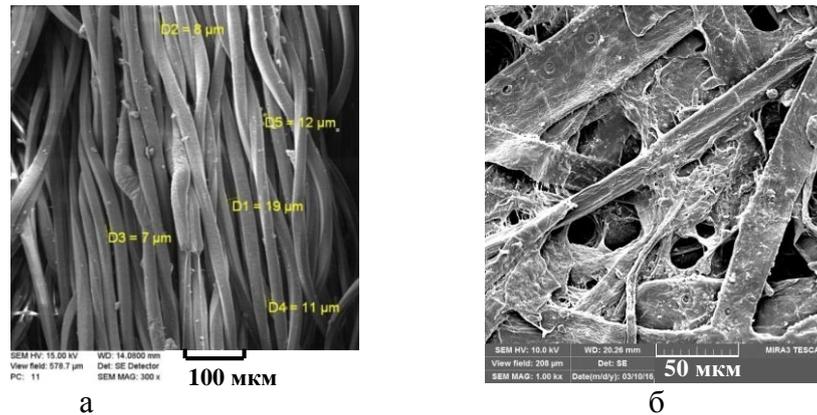
Электромагнитные и электрофизические характеристики экспериментальных образцов влагосодержащих наноструктурированных композиционных материалов изучались, используя стандартные методы электродинамического моделирования, двухзондовый метод измерения электросопротивления с использованием измерителя иммитанса E7-20 с погрешностью измерений $\pm 0,1 \%$), алгоритм Николсона–Росса–Вейра для определения диэлектрической проницаемости в диапазоне частот 8–12 ГГц по экспериментально полученным данным комплексных коэффициентов передачи и отражения ЭМИ от образца, помещенного в волноводную ячейку (с использованием векторного анализатора цепей Anritsu MS4644B с погрешностью $<0,1$ дБ и $<1^\circ$). Методика измерения спектрально-поляризационных характеристик с использованием гониометрической установки Г-5 со спектрорадиометром ПСР-02 позволила получить оптические характеристики композиционных материалов в широком диапазоне углов наблюдения ($(0^\circ-65^\circ)\pm 0,1^\circ$) в диапазоне длин волн от 0,35 до 2,5 мкм с погрешностью 7–12 %. Для исследования характеристик взаимодействия разработанных материалов с электромагнитным излучением в диапазоне частот 0,7–140 ГГц использовалась волноводная измерительная техника, скалярные анализаторы цепей типа P2 с погрешностью измерения ослабления $\pm(0,6+0,06A)$ дБ и КСВН – $\pm(5\cdot\text{КСВН}+6)\%$, измеритель мощности РМ 0,01–39,5. Обработка результатов проводилась с использованием пакетов прикладных программ Matlab, Mathcad, Origin.

Для тестирования эффективности средств электромагнитной защиты биологических и технических объектов по снижению уровня побочных электромагнитных излучений средств компьютерной техники, вычислительной техники, базовых станций сотовой связи использовались апробированные методики с использованием анализатор спектра Agilent E7404, направленная антенна HE 300 (диапазон рабочих частот 700–1700 МГц) и специализированное ПО. Оптическое маскирование объектов оценивалось на гониометрической установке Гемма со спектрополяриметром по контрастности по сравнению со справочными характеристиками природных фонов. Для тестирования возможности имитации электрических свойств биологических объектов разработанные материалы применялись для оценки влияния импульсного магнитного поля с магнитотерапевтическим индуктором (до 0,8 Тл) по ранее апробированной методике. Испытания на огнестойкость проводились в соответствии с НПБ 80–2003 «Материалы текстильные. Методы испытания на воспламеняемость». Для контроля температуры при проведении экспериментов использовался тепловизор MobIR M4 8–12 мкм с разрешением 0,12 °С.

В третьей главе приведены результаты исследований закономерностей формирования и структурных свойств наноструктурированных композиционных диэлектрических и проводящих материалов на основе пористых волокнистых (полиакрилонитрил, целлюлоза), порошковых (силикагель КСКГ, синтетические цеолиты NaX, NaA, KA, бентонит БЗ) и гелевых (полиакриламид) матриц, получаемых методом пропитки водой и водными растворами электролитов. Обобщены механизмы формирования наноструктурированных композиционных влагосодержащих материалов для различных видов пористых матриц – волокнистых, порошковых и гелевых.

Методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) получены изображения исследуемых волокнистых, порошковых и полиакриламидных матриц (рисунки 2, 4, 5),

позволившие оценить их структурные параметры – размеры пор, пористость, удельную поверхность (таблицы 1–2).



а – машинно-вязаное полотно (МВП) из синтетических волокон, увеличение 300 раз;
б – нетканое целлюлозное полотно (НЦП), увеличение 1000 раз

Рисунок 2. – СЭМ-изображения структуры исследуемых волокнистых матриц

Таблица 1. – Параметры структуры волокнистых матриц

Вид матрицы	Кажущаяся плотность $\rho_{\text{каж}}$, кг/м ³	Пористость П, %
МВП	544,037	62,5 – 68,0
НЦП	726,950	54,1 – 59,0

Как показали результаты геометрического моделирования в программном пакете 3D MAX и расчеты соответственно диапазону краевых углов смачиваемости водой исследованных волокнистых матриц (45° – 65°), жидкость в пространстве между волокнами представляет собой вытянутые объемные включения сложной формы (рисунок 3) с радиусом менисков жидкости, образующихся на поверхности раздела трех фаз при полном заполнении волокнистой матрицы водой, в диапазонах $(140\text{--}203) \times 10^{-6}$ м и $(12,5\text{--}23,4) \times 10^{-6}$ м.

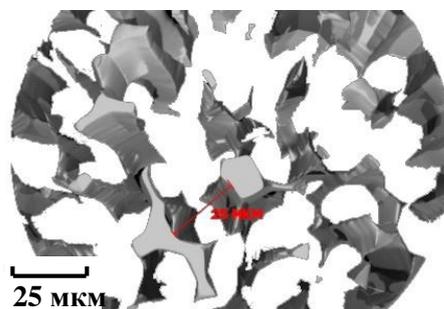


Рисунок 3. – Схематическое изображение геометрии локальных объемов воды, формируемых в поровом пространстве волокнистых материалов, по результатам моделирования

Исследовалось влияние пропитки пористой матрицы водным раствором электролита на формирование слоев свободной и связанной воды в порах. Методом

ядерного гамма-резонанса (ЯГР) исследовалось состояние атомов железа в водных растворах FeCl_3 в концентрациях (1 М) и (3,8 М) в измерительной ячейке в виде раствора и введенных в пористые матрицы из НЦП в объемных процентах 15,7–30 об.% (таблица 2).

Таблица 2. – Результаты исследований мессбауэровских спектров образцов № 2–№ 4

№ образца	Компонента	Состояние иона железа	IS, мм/с	QS, мм/с	Соотношение площадей A, %
№ 2	D1	Немагнитное Fe^{3+}	0,37	0,59	65
№ 3	D1	Немагнитное Fe^{3+}	0,37	0,51	47
№ 4	D1	Немагнитное Fe^{3+}	0,37	0,55	66
№ 2	D2	Немагнитное Fe^{3+}	0,36	0,88	35
№ 3	D2	Немагнитное Fe^{3+}	0,38	0,8	53
№ 4	D2	Немагнитное Fe^{3+}	0,39	0,93	34

Для обоих растворов и для образца НЦП с 30 об. % концентрацией раствора 1 М сигналы отсутствовали. Основное отличие наблюдается для образцов по вкладу площади компонент аппроксимирующей функции D1 и D2 в спектры: так, для образца № 3 с большим содержанием водного раствора FeCl_3 и большей концентрацией FeCl_3 доля компоненты D1 составляет 47 %, а для образцов № 2 и № 4, с большим объемным содержанием водного раствора FeCl_3 преобладает компонента D1 (65–66 %). Образец № 3 характеризуется большей долей компоненты D2 (53 %), что вызывает увеличение интенсивности дублета и уменьшение квадрупольного расстояния. Это может быть связано с тем, что гигроскопичная целлюлозная матрица сорбирует молекулы воды, формируя связанную воду, тем самым ионы Fe «вытесняются» из слоев связанной воды. Такое объяснение согласуется с результатами других авторов о пониженной растворяющей способности слоев связанной воды.

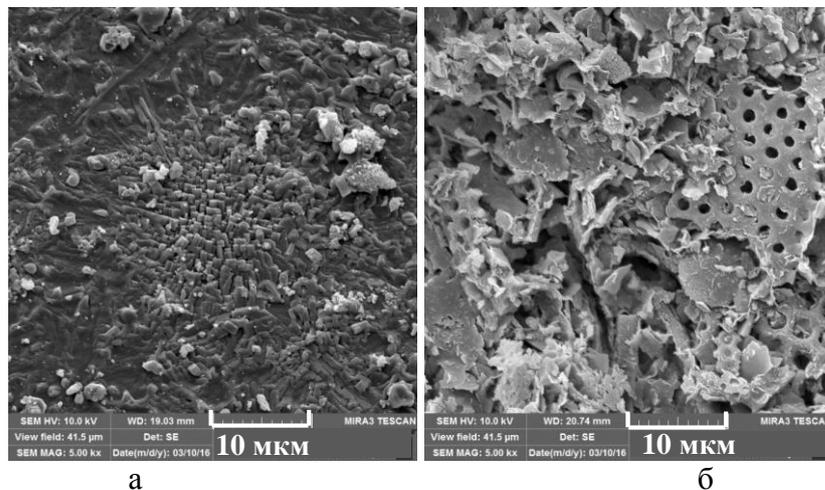
Показано, что удельная поверхность образцов порошковых матриц, определенная методом Брунауэра–Эммета–Теллера (БЭТ), варьируется в широких пределах (17 016,0–542 010,0 м²/кг), наибольшей удельной поверхностью обладают образцы цеолита NaX (таблица 3). Из результатов СЭМ получены размеры структурных элементов исследуемых порошковых матриц: сотни нанометров – единицы микрометров. Показано, что поры в матрицах образованы расстояниями между частицами порошка и их структурными элементами (рисунок 4).

Из СЭМ-изображений видно, что размер пор гидрогелей варьируется в зависимости от степени их сшивки и наполнения водой и может составлять единицы – десятки микрометров (рисунок 5). Пористость гидрогелей составляет 75–85 %.

Гравиметрические исследования сорбционных свойств показали, что наибольшей гигроскопичностью из исследованных волокнистых, порошковых и гелевых матриц обладает полиакриламидный гидрогель, влагосодержание которого снижается с максимального до равновесного значения 21...25 мас. % за время до 140 суток.

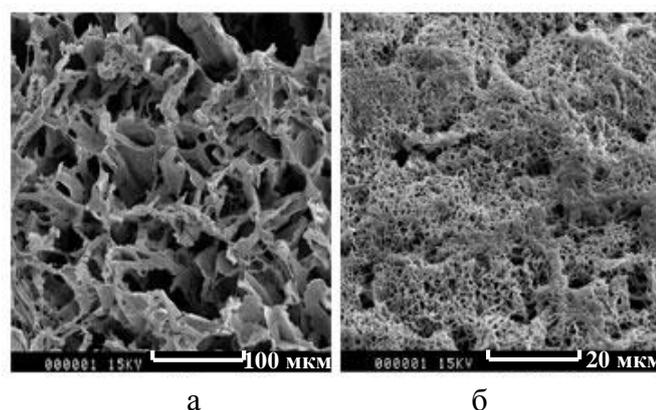
Таблица 3. – Результаты определения удельной поверхности образцов

Состав образца	Силикагель, порошок.	Силикагель гранул.	Бентонит порошок.	Цеолит порошок.	Цеолит гранул.	Цеолит NaA	Цеолит NaX	Цеолит KA
Средний размер частиц, $\times 10^{-6}$ м	220	3 000	170	200	2 000	220	215	220
Насыпная плотность, кг/м ³	460,1		982,1	668,0		760,18	726,08	760,2
$S_{уд}$, м ² /кг	123 240,0	122 410	78 250	128 670	133 620	17 016,0	542 010,0	29 116,0



а – силикагель; б – цеолит

Рисунок 4. – СЭМ-изображение поверхности частиц порошковых матриц, увеличение 5000 раз



а – увеличение 300 раз; б – увеличение 1500 раз

Рисунок 5. – Микрофотографии пористой структуры полиакриламидного гидрогеля с различным водосодержанием

Порошковые матрицы достигли равновесного значения влагосодержания (6,19 мас.%) за 20 суток. Влагосодержание волокнистых матриц, пропитанных водой, значительно снизилось за относительно небольшой период времени (до равновесных

значений влажности за 1,5 суток). Наибольшей гигроскопичностью из исследованных растворов органических и неорганических соединений обладают водные растворы хлоридов металлов (рисунок 6). Результаты гравиметрических исследований показали, что, используя предложенные водные растворы хлоридов с различными катионами (CaCl_2 , MgCl_2 , ZnCl), можно стабилизировать влагосодержание пористых матриц на заданном уровне.

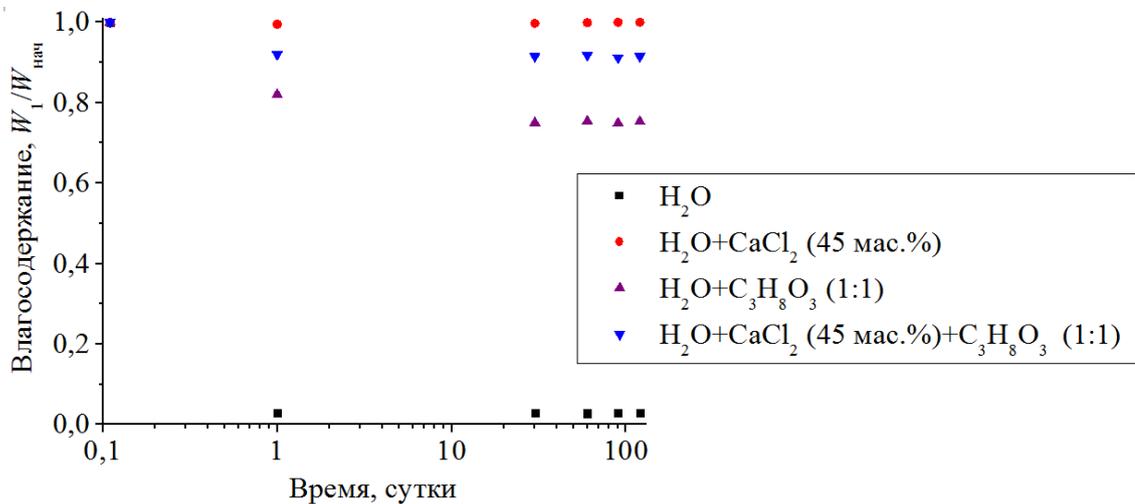
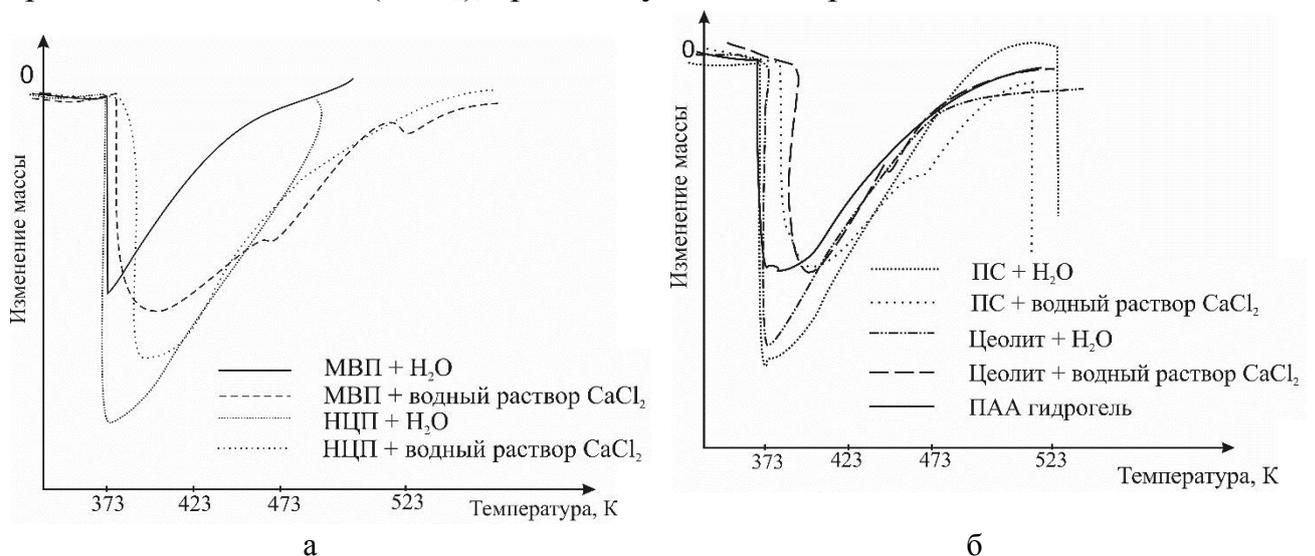


Рисунок 6. – Динамика влагосодержания волокнистой матрицы, заполненной гигроскопичными водными растворами

Показано, что температуры фазовых превращений воды в порошковых и волокнистых матрицах, определенные методом дифференциального термического анализа (ДТА) (рисунок 7), определяются сорбцией молекул воды на поверхности микропористых матриц в слоях толщиной до 3,7 нм и в водных растворах гигроскопичных веществ (CaCl_2), препятствующих испарению воды.



а – волокнистые матрицы; б – порошковые матрицы

Рисунок 7. – Термограмма ДТА пористых матриц, заполненных водой и водным раствором CaCl_2 45 мас.%

Температура пиков дегидратации пористых матриц коррелирует с их удельной площадью поверхности. Пики дегидратации волокнистых матриц, пропитанных водой,

соответствуют температурам 373,5–374 К, для порошковых матриц температура повышается до 375 К для силикагеля и 377 К для цеолита NaX. Введение гигроскопичной соли CaCl_2 в состав водного раствора приводит к повышению температуры фазового перехода воды на 7...16 К (см. рисунок 7), что превышает температуру кипения 45 мас.% водного раствора CaCl_2 (385 К) и свидетельствует о комбинированном влиянии гигроскопичности водного раствора и сорбции молекул воды в наноразмерных слоях на поверхности пористой матрицы.

В четвертой главе приведены результаты исследований наличия и роли наноразмерных эффектов в пористых матрицах, пропитанных водой и водными растворами, и их влияния на электрофизические и электромагнитные характеристики водосодержащих композиционных материалов.

Показано, что характер зависимости диэлектрической проницаемости от массовой доли воды в пористой матрице нелинейный, на кривой могут быть выделены участки с различным наклоном, что связано с преобладающим влиянием воды в слоях «связанной» и «свободной» воды на общую диэлектрическую проницаемость полученных образцов. Расчетная зависимость диэлектрической проницаемости от влагосодержания оказывается выше экспериментальной, если модель учитывает заполненность пористой матрицы только «свободной» водой (рисунок 8). Экспериментально установлены величины порогового влагосодержания, соответствующие пороговому возрастанию диэлектрической проницаемости для синтетического машинно-вязаного полотна (10 мас.%) и целлюлозного нетканого полотна (15 мас.%) (рисунок 9).

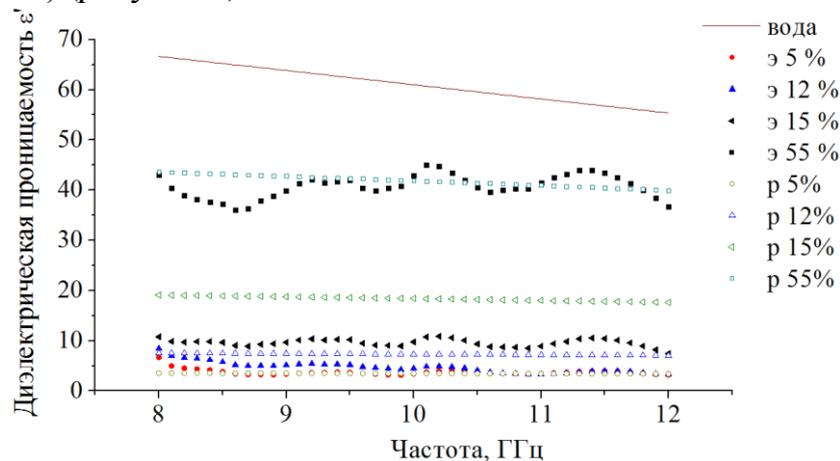
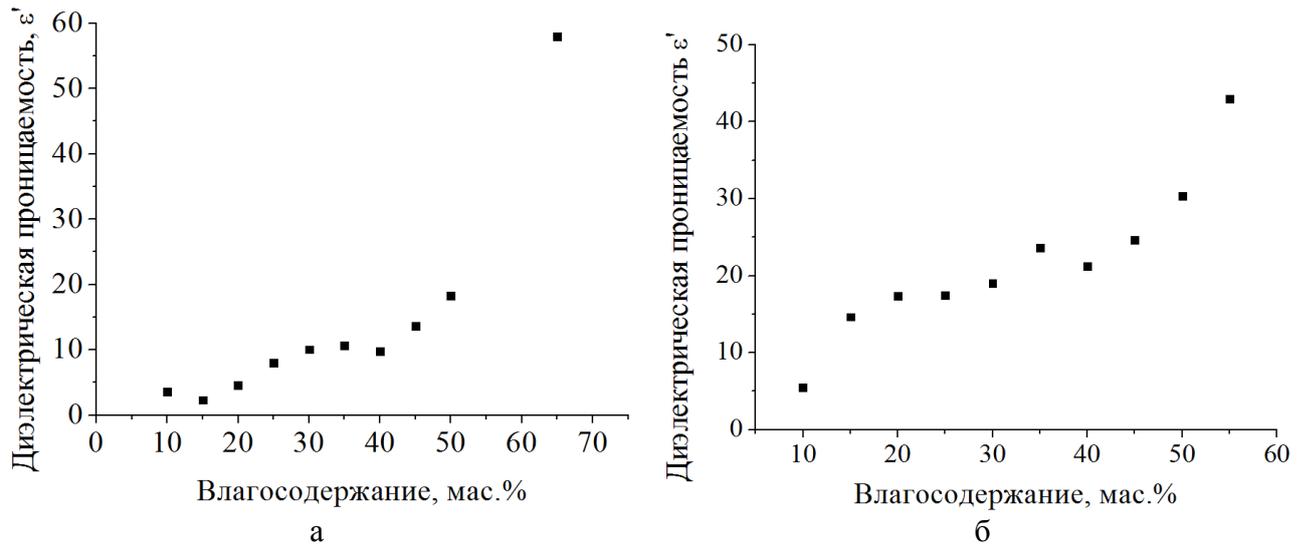


Рисунок 8. – Сравнение частотных зависимостей диэлектрической проницаемости влагосодержащих материалов с объемным влагосодержанием W – рассчитанных p $W\%$ и экспериментально полученных ε $W\%$ для образцов МВП с различным влагосодержанием



а – машинно-вязаное синтетическое полотно; б – нетканое целлюлозное полотно

Рисунок 9. – Зависимость диэлектрической проницаемости влагосодержащих волоконистых матриц на частоте 10 ГГц от массовой доли воды

Предложена модель, основанная на рефракционной модели закона смесей, использующая экспериментально определенную точку порогового изменения диэлектрических свойств влагосодержащего материала и учитывающая диэлектрические свойства слоев «связанной» и «свободной» воды в качестве компонентов $\epsilon_{\text{вод}}$, которая позволяет достаточно точно аппроксимировать экспериментальные зависимости диэлектрической проницаемости от влагосодержания с учетом доли связанной воды в общей модели диэлектрической проницаемости наноструктурированных композиционных влагосодержащих материалов (рисунок 10):

$$\begin{aligned} \epsilon' &= W_{\text{об}} \cdot \epsilon'_{\text{связ}} + (\Pi - W_{\text{об}}) \cdot \epsilon'_{\text{возд}} + (1 - \Pi) \cdot \epsilon'_{\text{вол}} \text{ при } W_{\text{об}} < W_{\text{cross}}; \\ \epsilon' &= W_{\text{cross}} \cdot \epsilon'_{\text{связ}} + (W_{\text{об}} - W_{\text{cross}}) \cdot \epsilon'_{\text{своб}} + (\Pi - W_{\text{об}}) \cdot \epsilon'_{\text{возд}} + \\ &+ (1 - \Pi) \cdot \epsilon'_{\text{вол}} \text{ при } W_{\text{об}} > W_{\text{cross}}, \end{aligned}$$

где W_{cross} – величина влагосодержания, при которой наблюдается резкое изменение диэлектрических свойств влажного материала; $W_{\text{об}}$ – объемная доля воды в наноструктурированном композиционном материале; $\epsilon'_{\text{своб}}$, $\epsilon'_{\text{связ}}$, $\epsilon'_{\text{возд}}$, $\epsilon'_{\text{вол}}$ – величины диэлектрической проницаемости свободной и связанной форм воды, воздуха и материала волокон соответственно; Π – пористость матрицы.

Вследствие вытеснения ионов раствора из слоев связанной воды предложено при пропитке пористых матриц водными растворами в модели в качестве $\epsilon'_{\text{своб}}$ использовать выражение для диэлектрической проницаемости водного раствора используемого электролита $\epsilon'_{\text{раств}}$, а в качестве компонента $\epsilon'_{\text{связ}}$ – выражение для связанной воды:

$$\begin{aligned} \epsilon' &= W_{\text{об}} \cdot \epsilon'_{\text{связ}} + (\Pi - W_{\text{об}}) \cdot \epsilon'_{\text{возд}} + (1 - \Pi) \cdot \epsilon'_{\text{вол}} \text{ при } W_{\text{об}} < W_{\text{cross}}; \\ \epsilon' &= W_{\text{cross}} \cdot \epsilon'_{\text{связ}} + (W_{\text{об}} - W_{\text{cross}}) \cdot \epsilon'_{\text{раств}} + (\Pi - W_{\text{об}}) \cdot \epsilon'_{\text{возд}} + \\ &+ (1 - \Pi) \cdot \epsilon'_{\text{вол}} \text{ при } W_{\text{об}} > W_{\text{cross}}. \end{aligned}$$

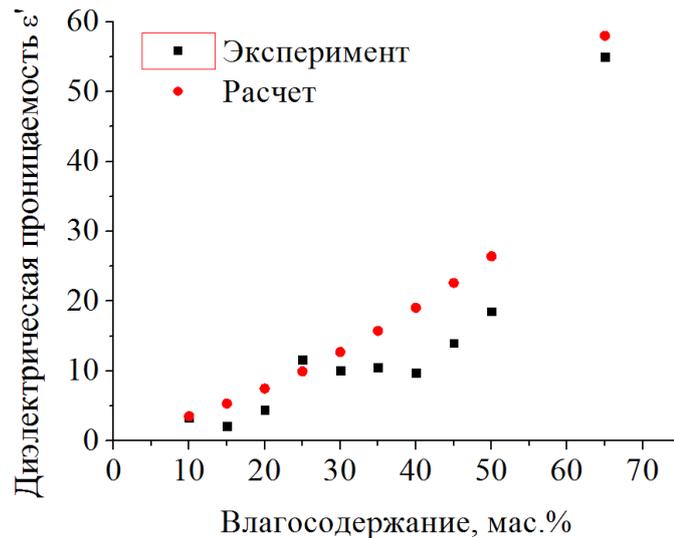


Рисунок 10. – Результаты экспериментальных исследований и расчета диэлектрической проницаемости волокнистых материалов с разным влагосодержанием (приведено для частоты 10 ГГц)

На основании анализа пористой структуры матриц удельная объемная доля связанной воды в материале $v_{\text{связ.воды}}$ может быть определена исходя из его удельной площади поверхности пор $S_{\text{уд.пов.вол}}$, толщины слоя связанной воды $d_{\text{связ.воды}}$ и влагосодержания W :

$$v_{\text{связ.воды}} = \frac{S_{\text{уд.пов.вол}} \cdot d_{\text{связ.воды}}}{V_{\text{воды}}} = \frac{S_{\text{уд.пов.вол}} \cdot d_{\text{связ.воды}}}{m_{\text{воды}} / \rho_{\text{воды}}} = \frac{S_{\text{уд.пов.вол}} \cdot d_{\text{связ.воды}}}{m_{\text{воды}} / \rho_{\text{воды}}} = \frac{(S_{\text{уд.пов.вол}} \cdot d_{\text{связ.воды}}) \cdot (1 - W)}{W \cdot m_{\text{мат}} \cdot \rho_{\text{воды}}}$$

На основании анализа параметров пористой структуры волокнистых матриц композиционных материалов и значения порогового влагосодержания определена толщина слоев связанной воды, которая для МВП составила 3,7 нм. Показано, что из измерений удельной поверхности пор пористой матрицы (методом БЭТ или другим) и характеристик гигроскопичности ее материала может быть рассчитана точка порогового изменения диэлектрических свойств влагосодержащей матрицы, заполненной водой.

Экспериментально установлены пороговые значения влагосодержания, соответствующие изменению характера зависимости диэлектрической проницаемости силикагелевой и цеолитовой (≈ 40 мас. %) порошковых матриц от влагосодержания композиционного материала, которые соответствуют началу образования слоев «свободной» («капиллярной») воды и приводит к изменению характера зависимости поглощения ЭМИ от влагосодержания композиционного материала (рисунок 11). Как видно из таблицы 3, величины удельной поверхности образцов близки. Особенности пористой структуры бентонита и его склонность к набуханию обуславливают относительно равномерную зависимость коэффициента поглощения ЭМИ от влагосодержания, при этом значения меньше, чем для цеолита, что обусловлено преимущественным нахождением воды в связанном состоянии в порах бентонита.

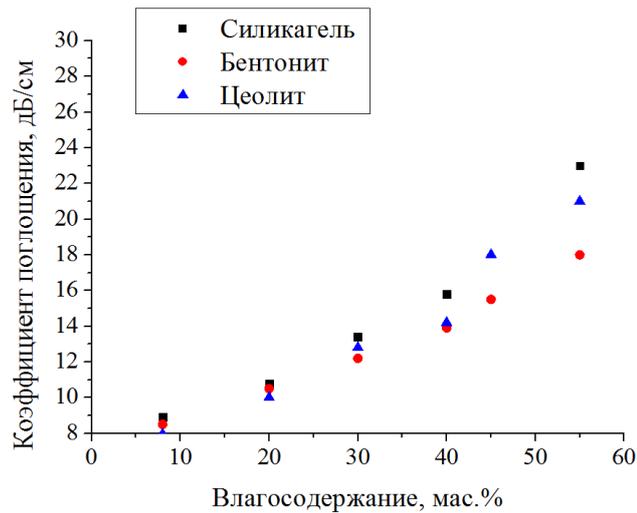
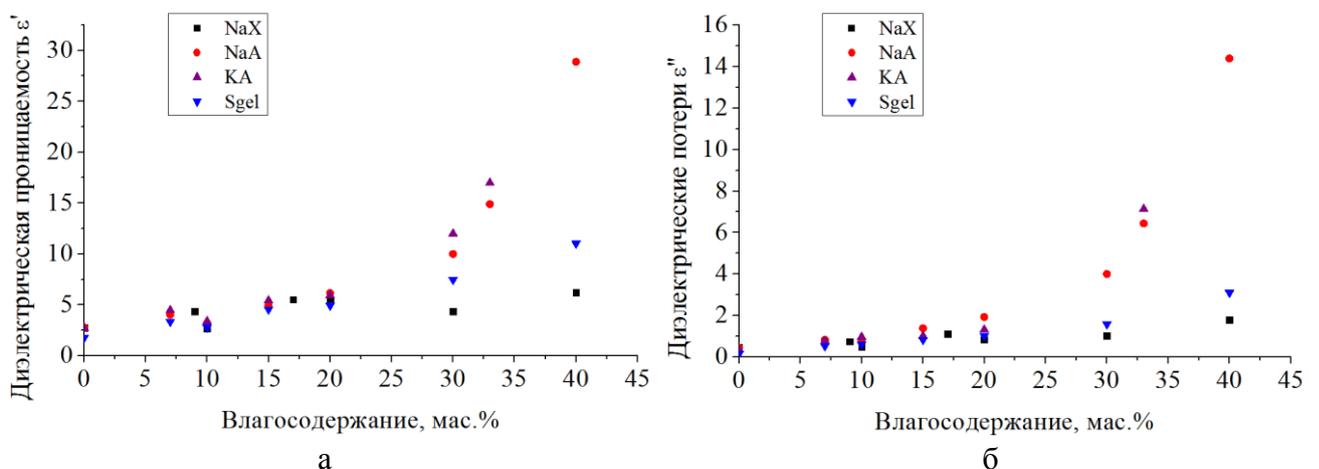


Рисунок 11. – Зависимость коэффициента поглощения ЭМИ порошковыми материалами (среднее значение), пропитанными водой, от влагосодержания на частоте 10 ГГц

Показано (рисунок 12), что скорость возрастания величины комплексной диэлектрической проницаемости больше коррелирует с величиной удельной поверхности, чем с видом катиона, так как для цеолитов с разными катионами, но близкими значениями удельной площади поверхности характеристики диэлектрической проницаемости близки.



а – диэлектрическая проницаемость; б – диэлектрические потери

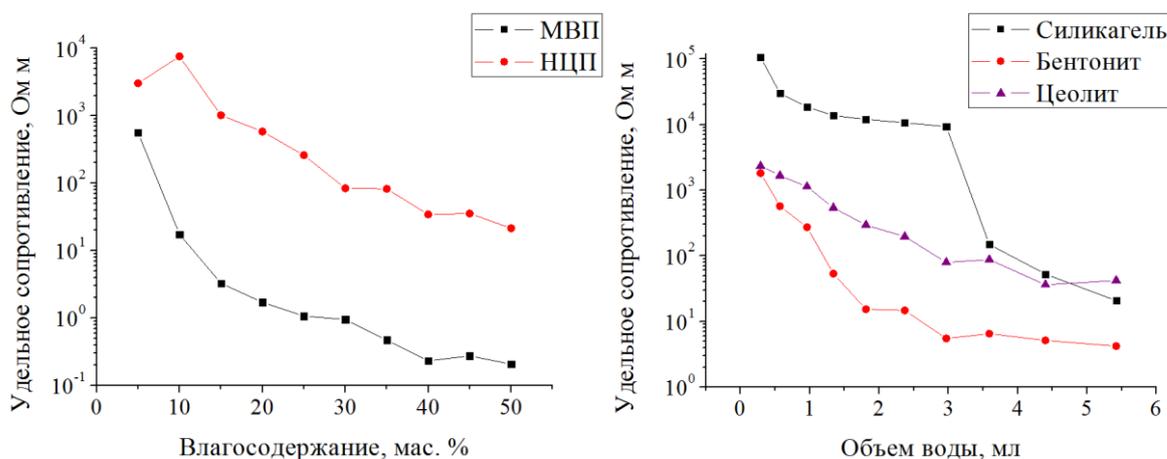
Рисунок 12. – Зависимость диэлектрических характеристик образцов влагосодержащего порошкового цеолита от объемного влагосодержания на частоте 10 ГГц

Для образцов на основе цеолитов NaA и KA скорость возрастания диэлектрической проницаемости увеличивается, начиная с величин влагосодержания вблизи 15–20 об.%. Пороговое значение влагосодержания для образца силикагеля находится в диапазоне 20–30 об.%. Величина диэлектрической проницаемости NaX монотонно возрастает в диапазоне влагосодержания 0–40 об.% и составляет наименьшую величину из всех исследованных образцов, что связано с намного большей по сравнению с остальными материалами удельной площадью поверхности (см. таблицу 3).

Зависимости диэлектрических потерь от влагосодержания повторяют характеристики для диэлектрической проницаемости.

Показано, что в зависимости от структурных параметров пористой матрицы, влагосодержания и состава раствора можно получить величины диэлектрической проницаемости наноструктурированных композиционных влагосодержащих материалов в диапазоне 2,5–58,0. Поглощение электромагнитного излучения предложенными влагосодержащими наноструктурированными композиционными материалами составляет от 2,81 до 28,32 дБ/см, что позволяет предложить их для создания электромагнитных экранов и радиопоглотителей, работоспособных в диапазоне частот 0,7–140 ГГц.

Экспериментально установлены пороговые значения влагосодержания, при которых наблюдается изменение удельного сопротивления для волокнистых матриц и которые соответствуют пороговым значениям, полученным для зависимости диэлектрической проницаемости (10 и 15 мас.% для МВП и НЦП). Показано, что удельное сопротивление наноструктурированных композиционных влагосодержащих материалов в диапазоне частот 50 ГГц–1 МГц также определяется долей наноразмерных слоев воды, структурой и гигроскопичностью матрицы, величиной ее влагосодержания (рисунок 13), что позволило получить наноструктурированные композиционные материалы с удельным электрическим сопротивлением 0,004–130 кОм·м (на частоте 1 кГц).



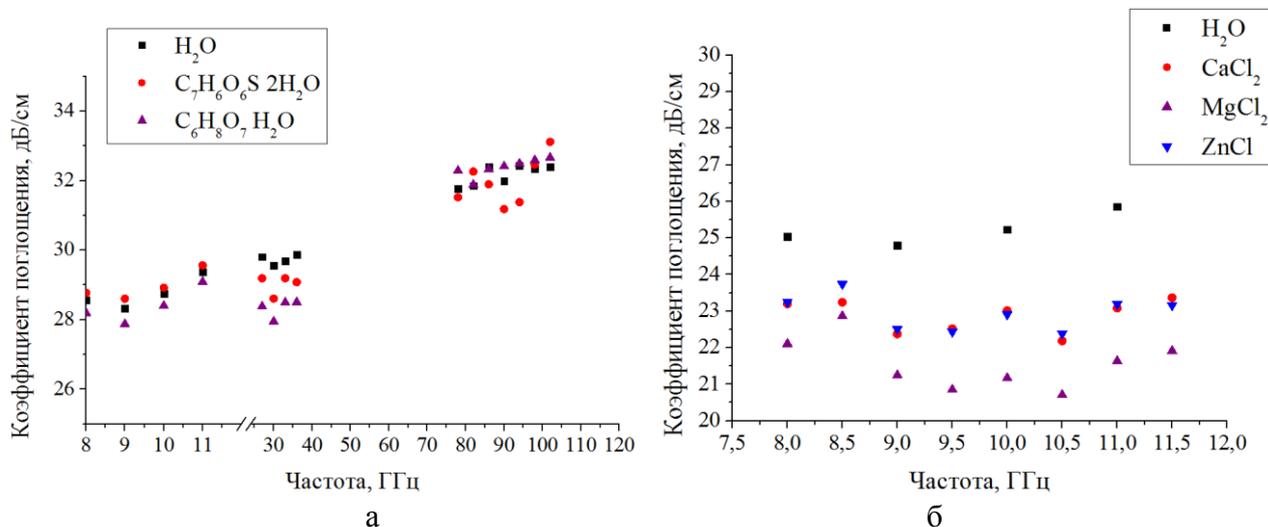
а – волокнистые матрицы; б – порошковые матрицы

Рисунок 13. – Сравнение удельного сопротивления волокнистых матриц (показано для частоты 50 Гц)

В пятой главе исследовано влияние состава, структурных и электрических параметров отдельных компонентов водосодержащих наноструктурированных композиционных материалов на основе пористых волокнистых, порошковых и полимерных матриц на электромагнитные и оптические свойства этих композитов.

Показано, что поглощение ЭМИ пористыми матрицами при одинаковом влагосодержании определяется в первую очередь структурными и физическими параметрами матрицы, влияющими на долю наноразмерных слоев воды. Результаты исследований влияния разбавленных (0,1 М–1 М) растворов кислот, ПАВ и спиртов на

поглощение ЭМИ (рисунок 14), свидетельствуют о преобладании влияния диэлектрических потерь воды на взаимодействие водных растворов органических соединений с ЭМИ (рисунок 14, а). Больше влияние на поглощение ЭМИ оказывают водные растворы электролитов вследствие увеличения электропроводности (рисунок 14, б).



а – водные растворы кислот; б – водные растворы хлоридов с различными катионами

Рисунок 14. – Частотные характеристики поглощения ЭМИ волокнистыми матрицами, пропитанными различными водными растворами с W_{max}

Показано, что ширина рабочей полосы частот поглощения ЭМИ наноструктурированными композиционными влагосодержащими материалами составляет 139,3 ГГц (0,7–140 ГГц) (рисунок 15).

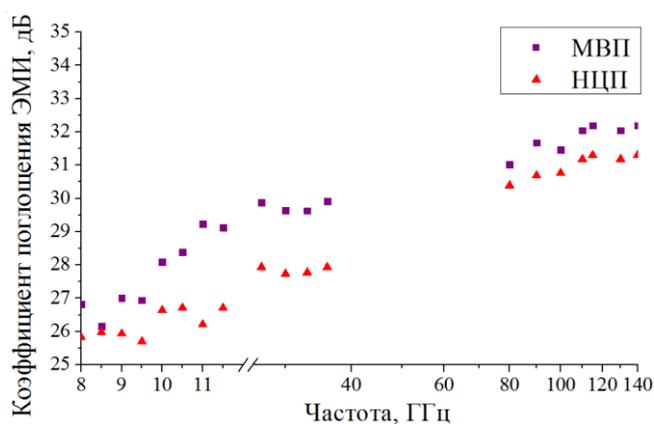


Рисунок 15. – Частотная зависимость поглощения ЭМИ волокнистыми матрицами толщиной $1,5 \cdot 10^{-3}$ м с W_{max}

Экспериментальными измерениями и расчетами показано, что величина ослабления ЭМИ влагосодержащими образцами остается относительно постоянной ($\pm 3\%$) и увеличивается с частотой падающего излучения, относительной толщиной слоя воды (влагосодержания образца) и электромагнитных свойств раствора в диапазоне значений непрерывной мощности $(1-5) \cdot 10^{-3}$ Вт (10 ГГц) (рисунок 16) до импульсной мощности $20 \cdot 10^3$ Вт (частота 37 ГГц) (рисунок 17).

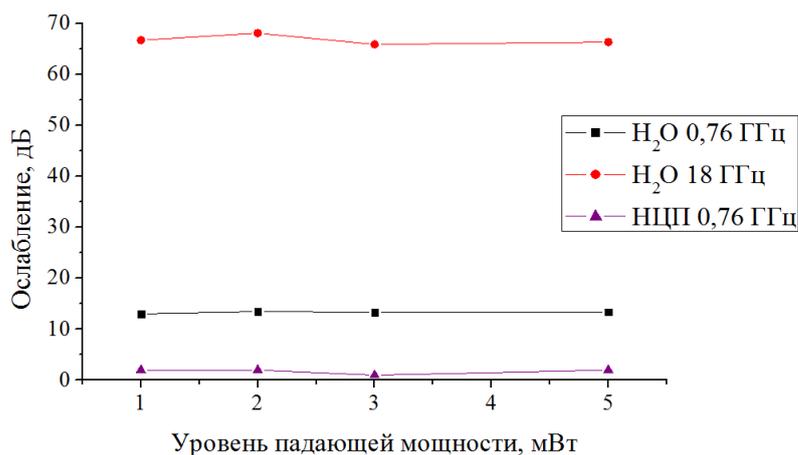


Рисунок 16. – Зависимость ослабления ЭМИ слоем воды толщиной ($d=10 \cdot 10^{-3}$ м) и НЦП ($d=1,5 \cdot 10^{-3}$ м) с W_{\max} в зависимости от уровня мощности ЭМИ ($(1...5) \cdot 10^{-3}$ Вт)

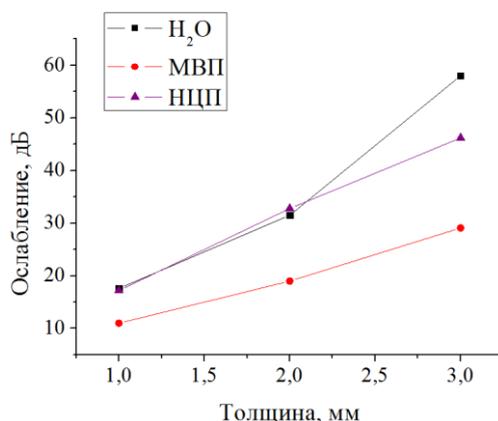


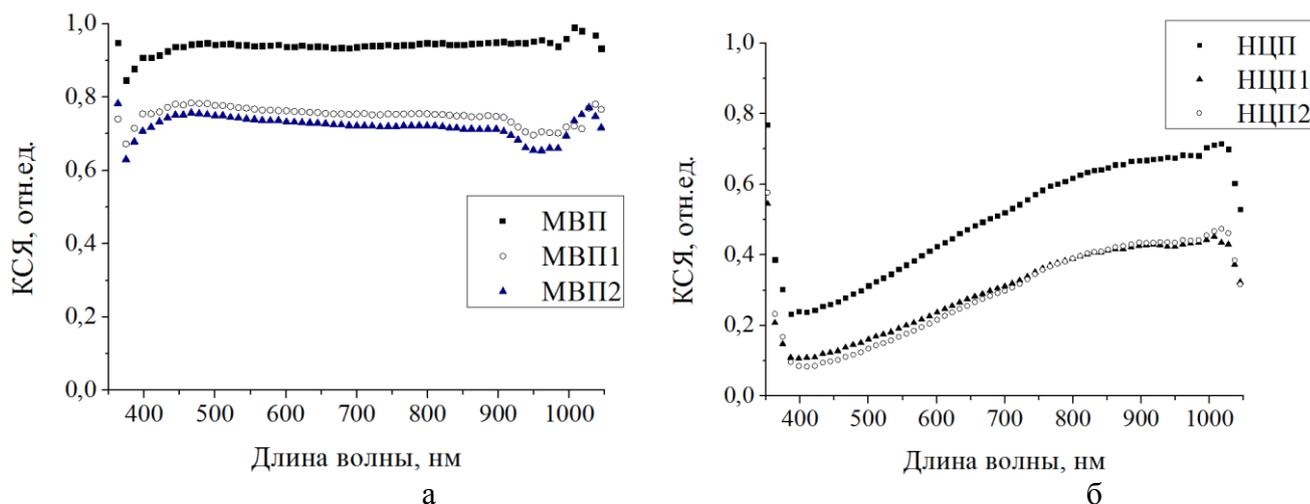
Рисунок 17. – Зависимость ослабления импульсного ЭМИ водосодержащими образцами с W_{\max} от толщины образца

Показано, что изменение температуры воды при ее облучении СВЧ-излучением с плотностью потока мощности 10 мВт/см^2 (предельно допустимая мощность излучения радиоэлектронных устройств) составляет $0,0036 \text{ К/с}$, что недостаточно для влияния температурной дисперсии диэлектрической проницаемости на характеристики поглощения ЭМИ.

Электромагнитные характеристики влагосодержащих наноструктурированных композиционных материалов на основе пористых волокнистых, порошковых и гелевых матриц определяются комплексным влиянием структуры пористой матрицы, доли водного раствора электролита в матрице и концентрации электролита в водном растворе.

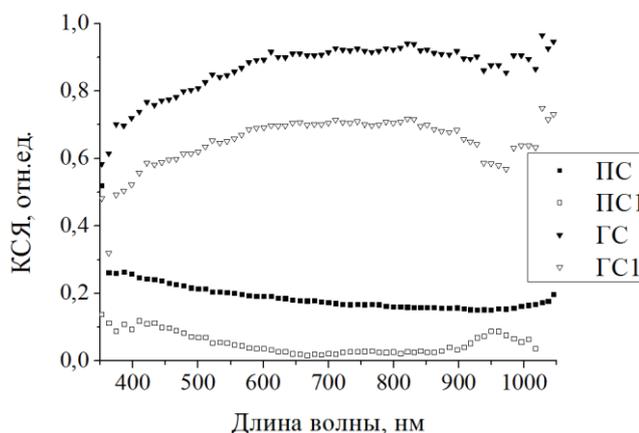
Показано, что пропитка пористых матриц водой свыше $35 \text{ мас.}\%$ приводит к формированию на поверхности пористых матриц менисков капиллярной (свободной) воды, размеры которых коррелируют с длинами волн диапазона $400\text{--}1000 \text{ нм}$, что приводит к равномерному снижению коэффициента спектральной яркости (КСЯ) на $0,1\text{--}0,25 \pm 0,005$ отн. ед. для исследованных волокнистых и порошковых матриц, рассеивающих падающее оптическое излучение при сохранении характера кривой КСЯ (рисунки 18–19). В диапазоне значений влагосодержания $35 \text{ мас.}\%\text{--}60 \text{ мас.}\%$ характеристика КСЯ от влагосодержания не зависит. Индикатриса рассеяния света наноструктурированным композиционным влагосодержащим материалом изменяется

вследствие увеличения равномерности рассеяния света водой и приобретает зеркальный характер.



1 – влагосодержание 35 мас.%; 2 – влагосодержание 60 мас. %;
 а – машинно-вязаное полотно; б – нетканое целлюлозное полотно

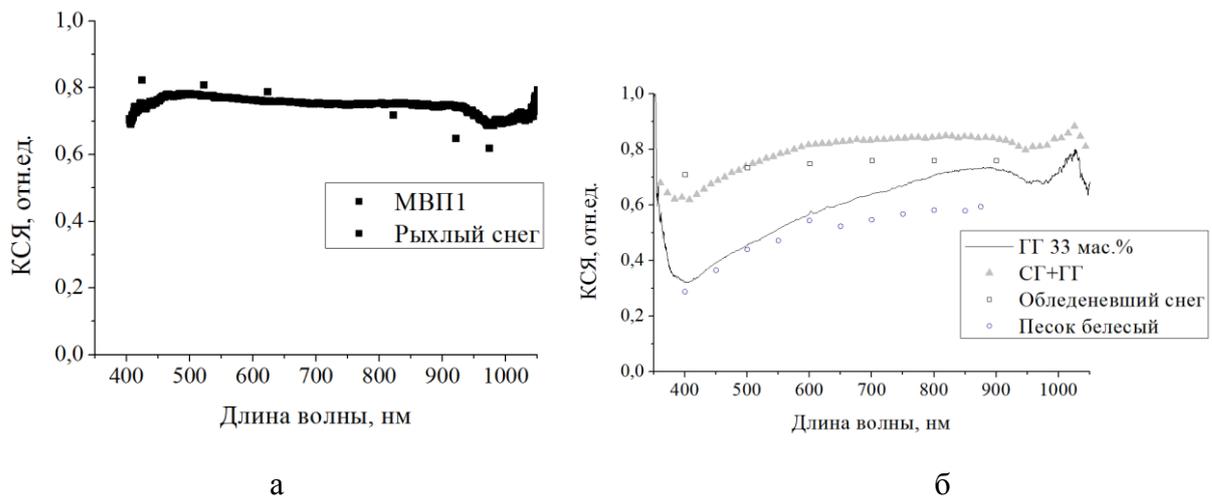
Рисунок 18. – Зависимости КСЯ влагосодержащих волокнистых матриц от длины волны при угле наблюдения 0°



ПС – порошковый силикагель; ГС – гранулированный силикагель;
 1 – силикагель с влагосодержанием 30 мас.%

Рисунок 19. – Зависимости КСЯ порошковых матриц от длины волны при угле наблюдения 0°

Установленную зависимость КСЯ от влагосодержания пористых матриц предложено применять при формировании влагосодержащих композиционных материалов для создания укрывных материалов, оптически маскирующих объекты на различных природных фонах (снег, пески, водные объекты) (рисунок 20).



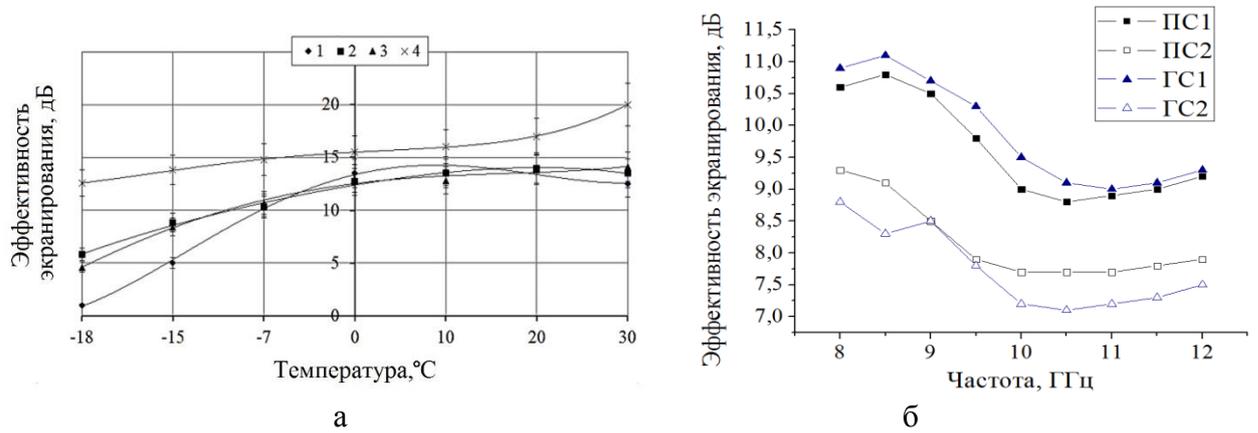
а – образец машинно-вязаного синтетического полотна МВП1 с влажностью 35 мас.%; б – образец гидрогеля с влажностью 36%

Рисунок 20. – Сравнительные характеристики КСЯ в видимом диапазоне при угле наблюдения 0°

В шестой главе приведены результаты разработки и исследования электромагнитных экранов и радиопоглотителей, тканезквивалентных материалов для имитации электрических свойств биологических объектов, укрывных материалов из наноструктурированных композиционных диэлектрических и проводящих материалов на основе пористых волокнистых, порошковых и гелевых матриц, заполненных водой и водными растворами электролитов.

Разработаны технологические инструкции формирования наноструктурированных композиционных влажностержащих материалов на основе волокнистых, порошковых и полимерных матриц путем их пропитки водой и водными растворами электролитов (ТИ № ГЛЮИ.01160.00001, ГЛЮИ.01160.00002, ГЛЮИ.01160.00003). Определены режимы формирования, концентрации и состав компонентов, позволяющие получать заданные значения электрофизических и эксплуатационных характеристик таких материалов.

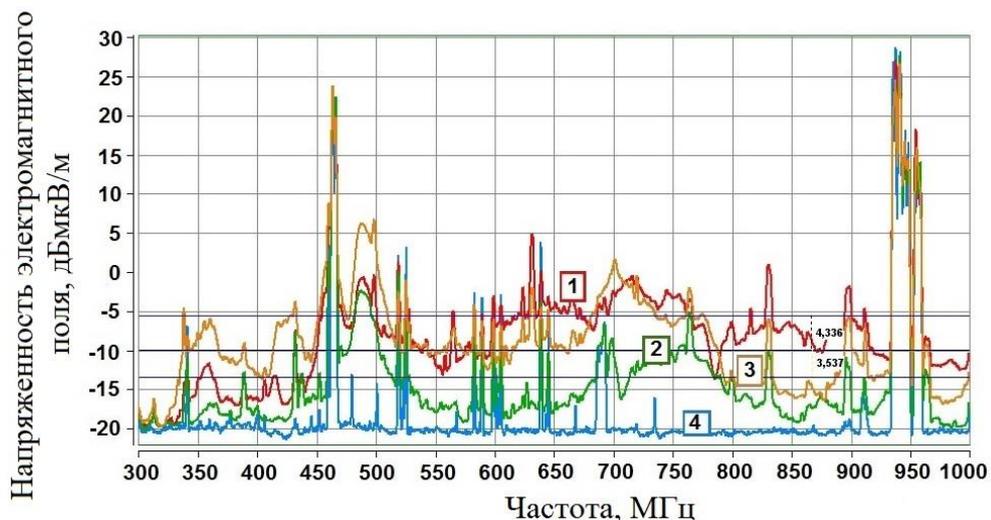
Показано, что величина поглощения ЭМИ диапазона 8–12 ГГц наноструктурированными композиционными влажностержащими материалами, содержащими предложенные гигроскопичные водные растворы (например CaCl_2 с концентрацией 45 мас.%), при изменении температуры в диапазоне 258–383 К стабилизируется в пределах $\pm 60\%$ относительно значений при нормальной температуре за счет сорбции молекул воды на поверхности микропористых матриц в слоях толщиной до 3,7 нм и в пределах $\pm 15\%$ относительно значений при нормальной температуре за счет сорбции молекул воды в водных растворах гигроскопичных веществ (CaCl_2), препятствующих испарению и кристаллизации воды. Это позволяет расширить температурный диапазон применения электромагнитных экранов и радиопоглотителей на основе таких материалов до 258–383 К (рисунок 21) и на период не менее 5 лет.



а – диапазон температур 255–303 К: 1 – вода; 2 – водный раствор глицерина 2:1; 3 – 20 %-ный раствор NaCl; 4 – минеральный рассол (гомельское месторождение);
б – диапазон температур 303–353 К: ПС – порошковые, ГС – гранулированные силикагелевые матрицы, заполненные водным раствором CaCl₂, 1 – до и 2 – после нагрева

Рисунок 21. – Эффективность экранирования ЭМИ наноструктурированными композиционными влагосодержащими материалами в условиях воздействия температуры в диапазоне 255–353 К

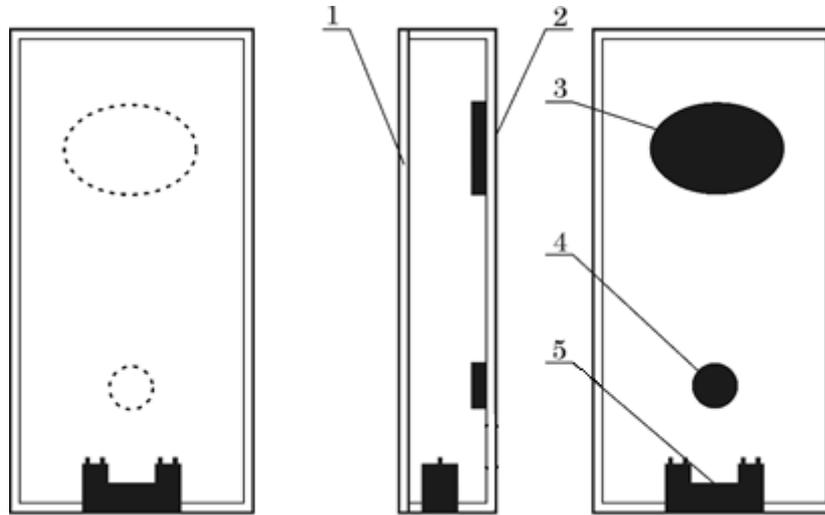
На основе разработанных наноструктурированных композиционных влагосодержащих материалов предложены средства защиты организма человека от побочных электромагнитных излучений средств вычислительной техники в виде защитных ширм, перегородок, чехлов. Тестирование эффективности данных средств в соответствии с ГОСТ 50842-95 показало, что предложенный материал толщиной 1,5 мм обеспечивает эффективность экранирования ЭМИ 4–12 дБ в диапазоне частот 0,7–6 ГГц (рисунок 22).



1 – электромагнитный фон в помещении; **2** – электромагнитное излучение при включенном компьютере в отсутствие экранирующих материалов (боковая крышка открыта); **3** – электромагнитное излучение при включенном компьютере в отсутствие экранирующих материалов (боковая крышка закрыта); **4** – панель сотового поликарбоната, заполненная водой

Рисунок 22. – Спектральные характеристики электромагнитного излучения вблизи ПК

Разработаны конструкции чехлов для защиты организма пользователя мобильных телефонов (рисунок 23). В результате математического моделирования и натуральных экспериментов показано, что уровень мощности ЭМИ сотового телефона может быть снижен на 6 дБ при использовании в качестве экранирующей вставки влагосодержащего волокнистого материала (толщина 1,5 мм).



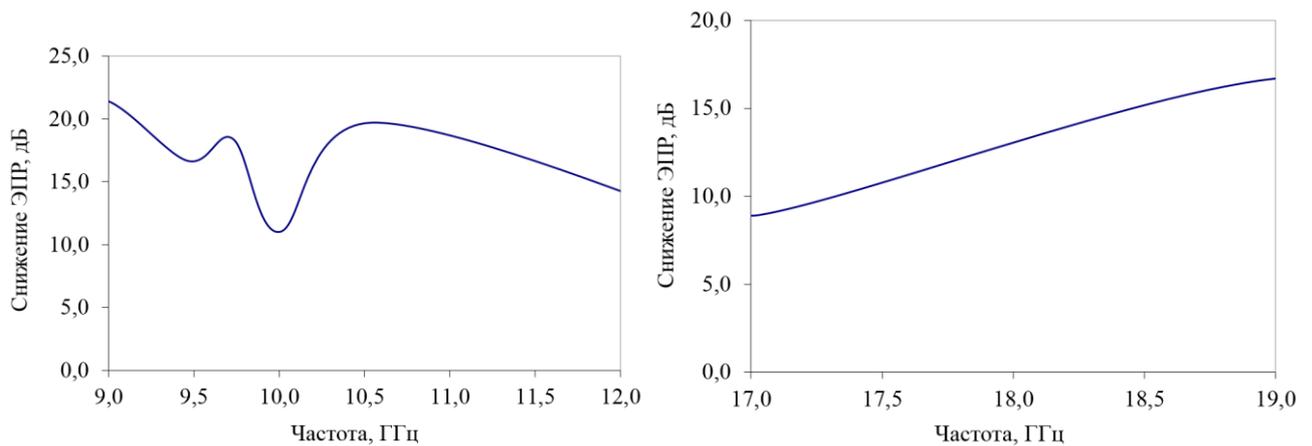
1 – оптически прозрачный слой; 2 – наноструктурированный композиционный влагосодержащий материал;
3, 4, 5 – встроенные микрофон, динамик и разъем для подключения к мобильному телефону

Рисунок 23. – Схема защитного чехла для мобильного телефона для эксплуатации в режиме разговора

Исследования уровня ЭМИ базовой станции сотовой связи в здании на расстоянии 20 м от базовой станции показали снижение уровня ЭМИ на 6–16 дБ для частоты 1870 МГц, а для частоты 940 МГц – на 4 дБ. Предложены жесткие оптически прозрачные конструкции элементов экранов ЭМИ для снижения излучения средств регистрации и отображения информации, ослабление ЭМИ которой для толщины 7,8 мм составляет 35 дБ на частоте 10 ГГц. Снижение яркости изображения при этом не превышает 5 %.

Для защиты средств обработки и хранения информации от внешних электромагнитных воздействий, в том числе высокой мощности, предложены защитные конструкции на основе разработанных материалов. Прозрачное устройство обеспечивает ослабление высокоинтенсивных электромагнитных излучений не менее 10 дБ по мощности в диапазоне частот 0,7–120,0 ГГц, при этом светопропускание образцов с корпусом из органического стекла составляет не менее 96 %.

Многослойная конструкция радиопоглотителя ЭМИ на основе разработанных влагосодержащих наноструктурированных композиционных материалов толщиной 50 мм позволяет снизить отражательную способность металлической пластины в 1200 раз и более за счет рассеивания и поглощения энергии ЭМИ. Как видно из результатов измерений, применение пятислойной конструкции радиопоглотителя позволяет снизить ЭПР металлической пластины на 4–20 дБ и более эффективно в низком диапазоне частот (рисунок 24).



а б
 а – 0,26×0,26 м для частотного диапазона 9–12 ГГц;
 б – 0,20×0,20 м для частотного диапазона 17–19 ГГц

Рисунок 24. – Снижение ЭПР металлической пластины при применении пятислойного радиопоглотителя

Показано, что результаты исследования влияния импульсного магнитного поля на образцы наноструктурированных композиционных влагосодержащих материалов (таблица 4) для значений расстояния между индуктором и образцом от 5 до 20 мм хорошо согласуются с литературными данными по моделированию воздействия магнитного поля на биологические ткани человека, что позволило предложить такие материалы в качестве тканеэквивалентных для имитации электрических свойств тканей человека для натурной *in situ* оценки силы магнитных и электрических воздействий, а также при разработке фантомов биологических тканей и организма.

Таблица 4. – Плотность тока в образцах

Образец	Плотность тока, А/м ²			
	5 мм	10 мм	15 мм	20 мм
НЦП, Н ₂ О, 26 мас. %	2356,9	2087,5	1851,9	1683,5
МВП, Н ₂ О, 18 мас. %	240,61	231,81	176,06	178,99
НЦП, Н ₂ О, 12 мас. %	168,2	152,91	155,96	110,09

Показано, что применение водного раствора хлористого кальция для пропитки пористых матриц позволяет увеличить их огнестойкость до 60–230 с за счет поглощения дополнительного количества тепла на разрыв связей молекул воды с ионами гигроскопичной соли. Прогорание образца из порошкового силикагеля на целлюлозной подложке не происходило более 720 с за счет коксообразования порошка силиката.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Установлено, что максимальная объемная доля слоев воды толщиной до 3,7 нм, формирующихся на поверхности гидрофильных микропористых волокнистых, порошковых и гелевых матрицах при их пропитке водой и водными растворами электролитов, составляет 10–35 мас. % и определяется в первую очередь удельной поверхностью пор матриц, что позволяет путем выбора вида и структуры матрицы управляемо изменять величины диэлектрической проницаемости и удельного электрического сопротивления таких материалов при одинаковой величине влагосодержания микропористых матриц и обеспечить равномерное распределение пропитывающей жидкости по их объему; для описания характеристики диэлектрической проницаемости в зависимости от влагосодержания предложена модель, позволяющая учесть влияние структурных параметров матрицы, с подтверждением данного эффекта для характеристики удельного электрического сопротивления [3, 5, 7, 29, 30, 55, 61].

2. Установлено, что поглощение электромагнитного излучения влагосодержащими наноструктурированными композиционными материалами на основе пористых волокнистых, порошковых и полимерных матриц определяется комплексным влиянием структуры пористой матрицы, доли водного раствора электролита в матрице и концентрации электролита в водном растворе, при этом показано, что варьирование влагосодержания пористой матрицы в диапазоне 5–70 мас.%, концентрацией раствора в диапазоне 0,1 М–1 М, позволяет получить величины диэлектрической проницаемости в пределах 2,5–58,0 и удельного электрического сопротивления 0,004–130 кОм·м (на частоте 1 кГц) для различных пористых матриц, а величина поглощения электромагнитного излучения такими влагосодержащими наноструктурированными композиционными материалами может изменяться от 2,81 до 28,32 дБ/см, что позволило создать на их основе электромагнитные экраны с ослаблением $(10–35) \pm 2$ дБ, коэффициентом отражения от $(-14,0$ до $-5,0)$ дБ $\pm 1,2$ дБ, рабочий диапазон частот которых расширен до 0,7–140 ГГц, а также тканезквивалентные материалы для имитации электрических свойств биологических объектов [1, 2, 3, 6, 9, 10, 12, 13, 16, 21, 22, 26, 27, 32, 36, 44, 45, 47, 48, 56, 58, 60, 63, 70].

3. Показано, что величина поглощения электромагнитного излучения диапазона 8–12 ГГц наноструктурированными композиционными влагосодержащими материалами при изменении температуры в диапазоне 258–383 К может быть стабилизирована за счет комбинированного механизма сорбции молекул воды на поверхности микропористых матриц в слоях толщиной до 3,7 нм (в пределах ± 60 % относительно значений при нормальной температуре) и в водных растворах гигроскопичных веществ (CaCl_2) (в пределах ± 15 %), препятствующих испарению и кристаллизации воды, что позволяет расширить диапазон применения электромагнитных экранов на основе таких материалов до 258–383 К на период не менее 5 лет [3, 4, 11, 15, 17, 24, 25, 31, 37, 51, 62, 76, 84].

4. Установлено, что спектральная яркость волокнистых (машинно-вязаное полиакрилонитрильное полотно и нетканое прессованное целлюлозное полотно), порошковых (порошковый и гранулированный силикагель) и полимерных (полиакриламид) матриц, пропитанных водой свыше порогового значения влагосодержания в них (более 35 мас.%), снижается на 0,15–0,25 отн. ед. во всем спектральном диапазоне видимого излучения и остается практически неизменной при дальнейшем увеличении водосодержания до 60 мас.% за счет формирования на поверхности пористых матриц менисков капиллярной воды, размеры которых коррелируют с длинами волн диапазона 400–1000 нм, а индикатриса рассеяния света приобретает зеркальный характер с увеличением яркости излучения с углом отражения 45° . Установлено, что спектральная яркость полученных влагосодержащих материалов коррелирует с оптическими характеристиками отдельных природных фонов, что позволяет рекомендовать указанные композиционные материалы для имитации отдельных видов растительности и песка с невысокими контрастами яркости ((–0,049)–(+0,2)) в диапазоне длин волн 400–1000 нм [1, 24, 35, 40, 69].

5. Разработана технология создания влагосодержащих композиционных материалов (ТИ № ГЛЮИ.01160.00001, ГЛЮИ.01160.00002, ГЛЮИ.01160.00003), основанная на введении воды и водных растворов электролитов в пористые волокнистые, порошковые и полимерные матрицы, структура, влагосодержание и состав раствора в которых определяются требованиями к диэлектрической проницаемости и поглощению электромагнитного излучения, а также обеспечению стабильности этих характеристик в течение длительного времени и при воздействии температур в широком диапазоне [3, 5, 15, 18, 19, 20, 28, 34, 38, 39, 47, 49, 51, 52, 64, 71, 72, 86, 87].

6. Разработаны и защищены четырьмя патентами Республики Беларусь широкополосные экранирующие и радиопоглощающие материалы на основе наноструктурированных композиционных материалов с водными растворами гигроскопичных солей в пористых волокнистых, порошковых и полимерных матрицах и определены их предельные значения ослабления, поглощения и отражения электромагнитного излучения в диапазоне частот 0,7–140 ГГц, масса которых составляет до 3 кг на 1 м^2 при толщине 1,5 мм [1, 3, 23, 41, 46, 50, 53, 54, 57, 60, 65, 67, 68, 73, 74, 77, 78, 80, 82].

7. Разработаны широкополосные радиопоглощающие материалы на основе одно- и многослойных влагосодержащих композиционных материалов, позволяющие снижать эффективную поверхность рассеяния наземных объектов на 4–20 дБ в диапазоне частот 9–11 ГГц и 17–19 ГГц [1, 7, 8, 33, 66].

8. Разработаны и защищены пятью патентами Республики Беларусь электромагнитные экраны для защиты пользователей источников электромагнитного излучения (устройства и базовые станции сотовой связи, персональный компьютер, в том числе ноутбук и др.), позволяющие снизить уровень электромагнитного излучения в защищаемой области пространства на 10–20 дБ, а также защитные чехлы для средств обработки и хранения информации для предотвращения повреждения информации путем внешних электромагнитных воздействий, в том числе высокой интенсивности, и снижения побочного электромагнитного излучения средств

обработки информации для повышения защищенности информации от утечки по электромагнитному каналу [1, 13, 14, 42, 43, 59, 79, 81, 83, 85].

9. Разработаны тканеэквивалентные материалы для имитации электрических свойств биологических объектов для оценки эффектов воздействия электрических и магнитных полей на биологические ткани организма человека с возможностью получения удельного электрического сопротивления в пределах 0,004–130 кОм·м (на частоте 1 кГц) [2, 9, 75].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Результаты, полученные в диссертационной работе, представляют значительный интерес для науки и практики, предназначены для применения в научно-исследовательских лабораториях, конструкторских бюро, предприятиях-изготовителях специальных материалов, работающих в сфере обеспечения электромагнитной защиты технических и биологических объектов от нежелательного воздействия бытовых и промышленных источников электромагнитного излучения, обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронных устройств, снижения радиолокационной заметности технических объектов. Результаты работы использованы для расчета электрофизических и электромагнитных параметров композиционных водосодержащих материалов; формирования конструкций электромагнитных экранов и радиопоглотителей, включающих композиционные водосодержащие материалы, с требуемыми характеристиками эффективности экранирования, отражения, рабочего диапазона частот, а также эксплуатационными параметрами; оценки влияния эксплуатационных параметров (влажности) на электромагнитные характеристики электромагнитных экранов и радиопоглотителей; получения тканеэквивалентных материалов для оценки эффектов воздействия электрических и магнитных полей на биологические ткани организма человека; создания укрывных материалов, оптически маскирующих технические объекты под отдельные виды природных фонов.

Результаты, представленные в диссертационной работе, использованы при выполнении НИОКР в лаборатории химических волокон ОАО «Центральный научно-исследовательский институт комплексной автоматизации легкой промышленности» (ОАО «ЦНИИЛКА», Москва, Российская Федерация), при этом разработанные технологические процессы формирования широкодиапазонных экранирующих и радиопоглощающих материалов на основе влагосодержащих композитов использованы для получения экранирующих и радиопоглощающих материалов, обладающих широкодиапазонной характеристикой поглощения электромагнитного излучения СВЧ-диапазона (0,1–17,0 ГГц), высокой стабильностью ($\pm 10\%$) экранирующих характеристик в течение длительного (свыше 5 лет) срока и в диапазоне температур $(-15) - (+60)^\circ\text{C}$, а также гибкостью, небольшим весом и технологичностью. В Центре 1.6 НИЧ БГУИР (Минск, Беларусь) в рамках выполнения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по контракту № 14CX1051-МВУ1124-1135К (Китайская Народная Республика) результаты моделирования взаимодействия

электромагнитного излучения с композиционными материалами, обладающими диэлектрическими потерями в диапазоне СВЧ, использованы для получения требуемых характеристик коэффициента передачи и отражения электромагнитного излучения в заданном диапазоне частот диэлектрическими подложками с поглощающими элементами. Экономический эффект (52993,7 руб. (28 384,4 усл. ед.) за 2017 г.) получен за счет минимизации количества натуральных экспериментов. В НИЛ 5.3 БГУИР в рамках выполнения НИОКР по научно-технической программе Союзного государства использованы технологические инструкции формирования композиционных влагосодержащих материалов для электромагнитных экранов на основе тканых и нетканых волокнистых материалов, разработанные на основе установленных закономерностей формирования влагосодержащих композиционных материалов на основе диэлектрических волокнистых матриц, пропитанных водой и водными растворами электролитов, зависимости их электромагнитных свойств от параметров формирования, состава и концентраций компонентов, что позволило создать конструкции электромагнитных экранов, обеспечивающие величину ослабления электромагнитного излучения $(10-35) \text{ дБ} \pm 2 \text{ дБ}$ в диапазоне частот $0,7-140 \text{ ГГц}$ при толщине экранов $1,5 \text{ мм}$. Композиционные материалы на основе пористых диэлектрических матриц, заполненных водными растворами, внедрены в производство в НПООО «ОКБ Техносоюзпроект» в качестве элементов радиомаскирующих конструкций, что позволило получить снижение величины коэффициента отражения в диапазоне $1-10 \text{ ГГц}$ до $-15 \text{ дБ} \pm 1,2 \text{ дБ}$. Результаты использования и внедрения подтверждены соответствующими актами, копии которых представлены в приложениях.

Список публикаций соискателя ученой степени

Монографии

1. Пассивные технические средства обеспечения информационной безопасности от утечки по электромагнитному, оптическому и акустическому каналам / Х. М. Альлябад, Т. А. Пулко, Н. В. Насонова, Л. М. Лыньков ; под общ. ред. Л. М. Лынькова. – Минск : Бестпринт, 2010. – 225 с.
2. Водосодержащие имитаторы биологических тканей для защиты человека от электромагнитных излучений / Я. Т. А. Аль-Адеми, М. В. Давыдов, Н. В. Насонова, А. М. Прудник, Т. А. Пулко, Т. В. Борботько, Л. М. Лыньков ; под ред. Л. М. Лынькова. – Минск : Бестпринт, 2014. – 187 с.
3. Водосодержащие капиллярно-пористые экраны электромагнитного излучения. Теория и практика / Н. Н. Гринчик, Н. В. Насонова, Л. М. Лыньков, У. М. Харма. – Минск : Бестпринт, 2016. – 238 с.

Статьи в научных журналах

4. Колбун, Н. В. Исследование состояния влаги в пористых средах на основе силикагеля при их низкотемпературной обработке / Н. В. Колбун, Ф. Н. Занг, Л. М. Лыньков // Доклады БГУИР. – 2006. – № 1 (13). – С. 59–62.
5. Колбун, Н. В. Использование композитных сред с порошкообразными сорбентами для экранов электромагнитного излучения / Н. В. Колбун, Х. М. Альлябад, Л. М. Лыньков // Вестник военной академии Республики Беларусь. – 2008. – № 2 (19). – С. 71–74.
6. Никитенко, К. В. Измерение диэлектрической проницаемости композитных материалов на СВЧ / К. В. Никитенко, Т. А. Пулко, Н. В. Колбун // Доклады БГУИР. – 2008. – Т. 6, № 8. – С. 64–67.
7. Simulation of electromagnetic radiation passing through liquid-containing nanostructured materials / N. V. Kolbun, T. V. Borbotko, A. A. Kazeka, A. M. Proudnik, L. M. Lynkou // Proc. of SPIE. – 2009. – Vol. 7377-0A.
8. Allebad, H. Electromagnetic shielding structure to reduce the free space reflectivity of objects / H. Allebad, V. Kizimenko, N. Kolbun // Przegląd elektrotechniczny (Electrical Review). – 2010. – R. 86, № 3. – P. 8–10.
9. Композиционные влагосодержащие структуры для имитации биологической ткани / Т. А. Пулко, Н. В. Насонова, М. В. Давыдов, А. Н. Осипов, Л. М. Лыньков // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2011. – № 3. – С. 9–15.
10. Исследование влияния природы и концентрации различных наполнителей гибких экранов электромагнитного излучения на их экранирующие характеристики в СВЧ диапазоне: I. Растворы кислот и солей калия / С. В. Галушка, М. А. Альхамруни, Н. В. Насонова, А. А. Позняк // Доклады БГУИР. – 2012. – № 5(67). – С. 110–115.
11. Температурная зависимость экранирующих свойств полимерных гидрогелей / Ю. В. Смирнов, Я. Т. А. Аль-Адеми, Т. А. Пулко, Н. В. Насонова, Л. М. Лыньков // Доклады БГУИР. – 2012. – № 6 (68). – С. 25–29.
12. Исследование влияния природы и концентрации различных наполнителей гибких экранов электромагнитного излучения на их экранирующие характеристики в СВЧ диапазоне: II. Растворы хлоридов, сульфатов и комбинированные растворы

солей / С. В. Галушка, М. А. Альхамруни, Н. В. Насонова, А. А. Позняк // Доклады БГУИР. – 2012. – № 8 (70). – С. 50–56.

13. Разработка защитных экранов электромагнитного излучения на основе огнестойких материалов для экранирующих помещений / М. Ш. Махмуд, Т. В. Борботько, Н. В. Насонова, Л. М. Лыньков // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2012. – № 11. – С. 66–71.

14. Влагосодержащие экраны для защиты пользователей бытовых и промышленных СВЧ-источников / Я. Т. А. Аль-Адеми, Т. А. Пулко, М. В. Давыдов, Н. В. Насонова, Л. М. Лыньков // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2013. – № 4. – С. 50–56.

15. Влияние температуры на экранирующие характеристики водосодержащих материалов / Н. В. Насонова, Я. Т. А. Аль-Адеми, Т. А. Пулко, Л. М. Лыньков // Известия НАН Б. Сер. Физико-техн. науки. – 2013. – № 3. – С. 117–122.

16. Насонова, Н. В. Влияние влажности на экранирующие характеристики радиопоглощающих материалов / Н. В. Насонова, Т. А. Пулко, Я. Т. А. Аль-Адеми, А. А. А. Ахмед, Л. М. Лыньков // Вестник ГГТУ. – 2013. – № 2 (53). – С. 86–91.

17. Пухир, Г. А. Стабильность экранирующих характеристик влагосодержащих материалов при фазовом переходе воды / Г. А. Пухир, Н. В. Насонова, Л. М. Лыньков // Труды МАИ [Электронный ресурс]. – 2013. – № 67. – С. 1–15. – Режим доступа: <https://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=41569>. – Дата доступа: 05.12.2013.

18. Композиционные материалы с проводящими и диэлектрическими компонентами для экранирования электромагнитного излучения СВЧ-диапазона / Е. С. Белоусова, Н. В. Насонова, Т. А. Пулко, Л. М. Лыньков // Вестник ПГУ. Сер. Прикладные науки. – 2014. – № 3. – С. 62–66.

19. Характеристики ослабления и отражения электромагнитных волн материалами на основе сшитого полимерного гидрогеля / Я. Т. А. Аль-Адеми, Ю. В. Смирнов, Т. А. Пулко, Н. В. Насонова // Доклады БГУИР. – 2014. – № 4 (82). – С. 93–98.

20. Shielding Properties of Electromagnetic Radiation Absorbers with Geometrical and Structure Heterogeneities / L. M. Lyn'kov, N. V. Nasonova, M. Sh. Mahmood, H. A. Pukhir, O. V. Voiprav // Eng. &Tech. J. – Part A. – 2014. – Vol. 32, № 12. – P. 2891–2903.

21. Методика оценки воздействия импульсных магнитных полей на ткани организма человека / Н. В. Насонова, Я. Т. А. Аль-Адеми, М. Г. Давыдов, Т. А. Пулко, Л. М. Лыньков // Приборы. – 2014. – № 12 (174). – С. 45–48.

22. Широкодиапазонные конструкции экранов электромагнитного излучения на основе влагосодержащей целлюлозы / Я. Т. А. Аль-Адеми, А. А. А. Ахмед, Т. А. Пулко, Н. В. Насонова, Л. М. Лыньков // Труды МАИ [Электронный ресурс]. – 2014. – № 77. – С. 1–15. – Режим доступа: <https://www.mai.ru/upload/iblock/679/6790ee3847ae80d7e97a14321b89ba66.pdf>. – Дата доступа: 05.12.2013.

23. Ахмед, А. А. А. Отделочные панели для создания экранированных помещений на основе наноструктурированных композиционных материалов / А. А. А. Ахмед, Н. В. Насонова, Т. А. Пулко, Л. М. Лыньков // Нанотехнологии в

строительстве: научный электронный журнал. – М. : ЦНТ «НаноСтроительство». – 2015. – Т. 7., № 5. – С. 43–57.

24. Исследование влияния влажности на оптические характеристики тканых материалов с наноструктурированным ферромагнитным микропроводом / А. А. А. Ахмед, Я. Т. А. Аль-Адеми, Н. В. Насонова, Т. А. Пулко, Л. М. Лыньков // Доклады БГУИР. – 2016. – № 1 (95). – С. 89–94.

25. Пухир, Г. А. Тепловые эффекты в наноструктурированных композиционных влагосодержащих материалах при воздействии повышенных температур / Г. А. Пухир, Н. В. Насонова // Доклады БГУИР. – 2017. – № 1 (103). – С. 71–76.

Статьи в сборниках материалов конференций

26. Влияние природы растворных наполнителей на характеристики гибких радиопоглощающих покрытий / В. А. Богуш, О. И. Зубаревич, Н. В. Колбун, Л. М. Лыньков, А. А. Позняк // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2005) : материалы 15-й Междунар. Крымской конф., Севастополь, 12–16 сент. 2005 г. – Севастополь : Вебер, 2005. – С. 637–639.

27. Novel composite shielding materials for supression of microwave radiation / V. Bogush, T. Borbot'ko, N. Kolbun, L. Lynkov // Microwaves, radar and wireless communications (MICON 2006) : proceedings of the 16th International conference, Krakow, Poland, 22–24 may, 2006. – Krakow, 2006. – Vol. 2. – P. 345–348.

28. Колбун, Н. В. Электромагнитные свойства водосодержащего силикагеля / Н. В. Колбун, Ф. Н. Занг // Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств: сб. материалов IV Междунар. науч.-техн. конф., Новополюцк, 25–26 мая 2006 г. : в 2-х томах. – Новополюцк : ПГУ, 2006. – Т. 1. – С. 130–134.

29. Композиционные материалы, поглощающие электромагнитные излучения радиочастотного диапазона / В. А. Богуш, С. Э. Саванович, Т. В. Борботько, Н. В. Колбун // Новые материалы и технологии : порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка : материалы докл. 8-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, Беларусь, 27–28 мая 2008 г. – Минск : Институт порошковой металлургии ГНПО ПМ, 2008. – С. 71–76.

30. Simulation of electromagnetic radiation passing through liquid-containing nanostructured materials / N. Kolbun, T. Borbotko, A. Kazeka, L. Lynkov // New Approaches to High-Tech: Nano-Design, Technology, Computer simulations – NDTCS'2008 : proceedings of XII International Workshop, Minsk, Belarus, 23–27 June 2008. – Minsk : BSUIR, 2008. – P. 45-49.

31. Stabilization of shielding efficiency of electromagnetic radiation shields based on liquid-containing composite materials / N. Kolbun, T. Pulko, A. Proudnik, L. Lynkov // Electromagnetic disturbances EMD 2008 : proceedings of the 18th International Conference, Vilnius, Lithuania, 25–26 September 2008. – Vilnius, 2008. – P. 191–194.

32. Применение низкотемпературных методов для создания наноструктурных силикатных материалов с радиопоглощающими и радиозэранирующими свойствами / В. Е. Гайшун, Н. В. Колбун, Л. М. Лыньков, Д. Л. Коваленко // Наноструктурные

материалы-2008: Беларусь–Россия–Украина : материалы I Междунар. науч. конф., Минск, 22–25 апреля, 2008 г. – Минск, 2008. – С. 639.

33. Electromagnetic shielding structure to reduce the free space reflectivity of objects / H. Allebad, I. Grabar, V. Kizimenko, N. Kolbun // Electromagnetic disturbances EMD-2009 : proceedings of the 19th International Conference, Bialystok, Poland, 23–25 September 2009. – Bialystok, 2009. – P. 5–8.

34. Microwave radiation shielding effectiveness of composite liquid-containing materials in dependence on hygroscopic properties of the compounds / N. Kolbun, T. Pulko, L. Lynkov // Electromagnetic disturbances EMD-2009 : proceedings of the 19th International Conference, Bialystok, Poland, 23–25 September 2009. – Bialystok, 2009. – P. 98–103.

35. Pulko, T. Solution composition influence on the optical characteristics of liquid-containing composite materials / T. Pulko, P. Safrankov, N. Nasonova // Optical Techniques and Nano-Tools for Material and Life Sciences: International Conference, Minsk, 15–19 June 2010 / Institute of Physics of National Academy of Sciences of Belarus ; ed. : N. S. Kazak. – Minsk, 2010. – P. 80–84.

36. Пухир, Г. А. Экранирующие характеристики материалов на основе сорбирующих компонентов с различной степенью влагосодержания / Г. А. Пухир, Н. В. Насонова // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2010) : материалы XX Междунар. Крымской конф., Севастополь, 13–17 сентября 2010 г. / СевНТУ ; редкол. : П. П. Ермолов [и др.]. – Севастополь : Вебер, 2010. – С. 944–945.

37. Пулко, Т. А. Эффективность экранирования ИК-излучений влагосодержащими композиционными материалами / Т. А. Пулко, Н. В. Насонова, А. Х. Абдулькадер // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии : материалы XX Междунар. Крымской конф., Севастополь, 13–17 сентября 2010 г. / СевНТУ ; редкол. : П. П. Ермолов [и др.]. – Севастополь : Вебер, 2010. – С. 940–942.

38. Пулко, Т. А. Повышение огнестойкости влагосодержащих экранирующих материалов / Т. А. Пулко, Н. В. Насонова // Телекоммуникации: сети и технологии, алгебраическое кодирование и безопасность данных : материалы докл. Междунар. науч.-техн. семинара, 20–24 сентября 2010 г. / БГУИР ; редкол. : В. К. Конопелько [и др.]. – Браслав, 2010. – С.87–88.

39. Пулко, Т. А. Электромагнитные свойства влагосодержащих композиционных материалов при пониженных температурах / Т. А. Пулко, Н. В. Насонова // Телекоммуникации: сети и технологии, алгебраическое кодирование и безопасность данных : материалы докл. Междунар. науч.-техн. семинара, 20–24 сентября 2010 г. / БГУИР ; редкол.: В. К. Конопелько [и др.]. – Браслав, 2010. – С.14–15.

40. Сафранков, П. И. Спектральные характеристики матриц с растворными включениями / П. И. Сафранков, Т. А. Пулко, Н. В. Насонова // Современные средства связи: материалы XV Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 28–30 сентября 2010 г. / ВГКС ; редкол. : А. О. Зеневич [и др.]. – Минск, 2010. – С. 97–98.

41. Пулко, Т. А. Защита от электромагнитного излучения базовых станций сотовой связи с использованием композиционных экранирующих материалов / Т. А. Пулко, Н. В. Насонова // Медэлектроника-2010 : сб. науч. ст. VI Междунар. науч.-

техн. конф., Минск, 8–9 декабря 2010 г. / БГУИР ; редкол. : В. С. Улащик [и др.]. – Минск, 2010. – С. 173–175.

42. Пулко, Т. А. Эффективность экранирования электромагнитного излучения сотового телефона водосодержащими экранирующими материалами / Т. А. Пулко, Н. В. Насонова, А. А. Казека // Медэлектроника-2010 : сб. науч. ст. VI Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 8–9 декабря 2010 г. / БГУИР ; редкол. : В. С. Улащик [и др.]. – Минск, 2010. – С. 157–159.

43. Пулко, Т. А. Способ снижения электромагнитного излучения системных блоков персональных компьютеров / Т. А. Пулко, Н. В. Насонова, А. А. Казека // Медэлектроника-2010 : сб. науч. ст. VI Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 8–9 декабря 2010 г. / БГУИР ; редкол. : В. С. Улащик [и др.]. – Минск, 2010. – С. 157–159.

44. Исследование экранирующих характеристик композитов на основе различных сорбирующих компонентов / Г. А. Пухир, Н. В. Насонова, М. Ш. Махмуд, Л. М. Лыньков // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2011) : материалы XXI Междунар. Крымской конф., Севастополь, 12–16 сентября 2011 г. / СевНТУ ; редкол. : П. П. Ермолов [и др.]. – Севастополь : Вебер, 2011. – С. 273–274.

45. Pukhir, H. A. Researching of ferromagnetic inclusions influence on protecting properties of shielding composite materials with dielectric and magnetic structure elements / H. A. Pukhir, N. V. Nasonova // Proceedings of XXXth General Assembly of the International Union of Radio Science [Electronic resource] (CD-ROM), Istanbul, Turkey, 13–20 August 2011. – Istanbul, 2011.

46. Пухир, Г. А. Экраны электромагнитного излучения на основе органических и минеральных компонентов для защиты различных объектов в СВЧ-диапазоне / Г. А. Пухир, Н. В. Насонова, М. Ш. Махмуд // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2012) : материалы XXII Междунар. Крымской конф., Севастополь, 10–14 сентября 2012 г. : в 2 т. / СевНТУ ; редкол. : П. П. Ермолов [и др.]. – Севастополь : Вебер, 2012. – С. 796–797.

47. Электромагнитные свойства воды, связанной межфазными взаимодействиями / И. А. Грабарь, Н. В. Насонова, Т. А. Пулко, Л. М. Лыньков // Физика конденсированного состояния : материалы XXI Междунар. науч.-практ. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Гродно, 18–19 апр. 2013 г. / ГрГУ им. Я. Купалы. – Гродно : ГрГУ, 2013. – С. 173–175

48. Влияние конденсированных состояний на огнезащитные свойства экранирующих материалов / Д. Н. Лисовский, Я. Т. А. Аль-Адеми, Т. А. Пулко, Н. В. Насонова // Физика конденсированного состояния : материалы XXI Междунар. науч.-практ. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Гродно, 18–19 апр. 2013 г. / ГрГУ им. Я. Купалы. – Гродно : ГрГУ, 2013. – С. 193–194

49. Насонова, Н. В. Композиционные экранирующие ЭМИ материалы с диэлектрическими и магнитными включениями / Н. В. Насонова, Я. Т. А. Аль-Адеми, А. А. Ахмед, Л. М. Лыньков // Комплексная защита информации КЗИ-2013, Брест, 21–24 мая 2013 г. – 2013. – С.33–34.

50. Пухир, Г. А. Использование органических влагоудерживающих компонентов в качестве основы экранирующих конструкций СВЧ-диапазона /

Г. А. Пухир, Н. В. Насонова, Т. А. Пулко // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2013) : материалы XXIII Междунар. Крымской конф., Севастополь, 9–13 сентября 2013 г. / СевНТУ ; редкол. : М. П. Батура [и др.]. – Севастополь : Вебер, 2013. – С. 718–719.

51. Пухир, Г. А. Экранирующие характеристики волокнистых органических влагосодержащих материалов в условиях воздействия повышенных температур / Г. А. Пухир, Н. В. Насонова, П. И. Походня // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2014) : материалы XXIV Междунар. Крымской конф., Севастополь, 7–13 сентября 2014 г. / СевНТУ ; редкол. : д-р техн. наук, проф. М. П. Батура [и др.]. – Севастополь, 2014. – С. 718–719.

52. Водосодержащие нанокompозитные экраны электромагнитного излучения, работоспособные при пониженных температурах / Н. В. Гвоздева, Н. В. Насонова, А. А. Позняк, Г. А. Пухир, А. А. Твердовский // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2014) : материалы XXIV Междунар. Крымской конф., Севастополь, 7–13 сентября 2014 г. / СевНТУ ; редкол. : д-р техн. наук, проф. М. П. Батура [и др.]. – Севастополь, 2014. – С. 758–760.

53. Гибкие многослойные экранирующие конструкции для СВЧ-техники / Я. Т. А. Аль-Адеми, А. А. А. Ахмед, Т. А. Пулко, Н. В. Насонова, Л. М. Лыньков // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии : материалы XXIV Междунар. Крымской конф., Севастополь, 7–13 сентября 2014 г. / СевНТУ ; редкол. : д-р техн. наук, проф. М. П. Батура [и др.]. – Севастополь, 2014. – С. 998 – 999.

54. Экраны электромагнитного излучения на основе тканых и нетканых материалов / А. А. А. Ахмед, А. П. Кулаженко, В. С. Дунчик, Т. А. Пулко, Н. В. Насонова // Управление информационными ресурсами : материалы XI Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 12 декабря 2014 г. / Академия управления при Президенте Респ. Беларусь ; редкол. : А. В. Ивановский [и др.]. – Минск, 2014. – С. 153–154.

55. Nasonova, N. V. Nanosized forms of water, incorporated into porous matrices / N. V. Nasonova, T. A. Pulko, L. M. Lynkov // Physics, chemistry and application of nanostructures Nanomeeting-2015 : Proceedings of international conference, Minsk, Belarus, May 26-29, 2015. – Minsk, 2015. – P. 111–114.

Тезисы докладов

56. Влияние растворных наполнителей гибких радиопоглощающих материалов на эффективность подавления электромагнитного канала утечки информации / В. А. Богуш, О. И. Зубаревич, Н. В. Колбун, А. А. Позняк // Технические средства защиты информации : материалы докл. и кратк. сообщ. III Белорус.-российск. науч.-техн. конф., Минск – Нарочь, 23 – 27 мая 2005. – Минск, 2005. – № 5. – С. 28–29.

57. Терех, И. С. Влияние импульсного электромагнитного излучения на влагосодержащие капиллярно-пористые материалы / И. С. Терех, Л. М. Лыньков, Н. В. Колбун // Технические средства защиты информации : материалы докл. и кратк. сообщ. III Белорус.-российск. науч.-техн. конф., Минск – Нарочь, 23 мая – 27 мая 2005. – Минск, 2005. – № 5. – С. 55–56.

58. Исследование свойств гетерогенных радиопоглощающих материалов / Л. М. Лыньков, Т. В. Борботько, Н. В. Колбун, Ф. Н. Занг, И. С. Терех // Тез. докл.

Международ. науч. конф. по военно-техническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного применения. – Минск : ГУ «Бел ИСА», 2005. – С. 42–43.

59. Применение дисперсионных жидкостных сред для снижения электромагнитного излучения средств телекоммуникаций / Н. В. Колбун, Т. А. Пулко, Х. М. Альлябад, Л. М. Лыньков // Современные средства связи : материалы XII Международ. науч.-техн. конф., Минск, 25–29 сентября 2007 г. / ВГКС ; редкол. : А. О. Зеневич [и др.]. – Минск : Бестпринт, 2007. – С. 50–51.

60. Исследование эффективности влагосодержащих экранов электромагнитного излучения / Н. В. Колбун, Т. А. Пулко, Х. М. Альлябад, Л. М. Лыньков // Актуальные вопросы испытаний, стандартизации и сертификации вооружения и военной техники : материалы науч.-техн. семинара, Минск, 13 ноября 2007 г. / УО ВАРБ. – Минск, 2007. – С. 29–31.

61. Альлябад, Х. М. Особенности взаимодействия дисперсных жидких сред с электромагнитным излучением / Х. М. Альлябад, Н. В. Колбун // Физика конденсированного состояния : сб. тез. докл. конф., Гродно, апрель, 2008 г. – Гродно, 2008.

62. Пулко, Т. А. Стабильность экранирующих свойств влагосодержащих поглотителей электромагнитного излучения / Т. А. Пулко, Н. В. Колбун // Физика конденсированных сред ФКС XVI : сб. тез. докл., Гродно, 23–25 апреля 2008 г. : в 2 ч. – Гродно, 2008. – Ч. 2. – С. 184–185.

63. Пулко, Т. А. Исследование экранирующих свойств негерметизированных силикагелевых материалов / Т. А. Пулко, Н. В. Колбун // Современная радиоэлектроника: научные исследования и подготовка кадров : сб. материалов (по итогам работы МНПК), Минск, 23–24 апреля 2008 г. : в 3 ч. – Минск : МГВРК, 2008. – Ч. 1. – С. 66–68.

64. Пулко, Т. А. Стабилизация влагосодержания и экранирующих ЭМИ свойств влагосодержащих силикагелевых материалов / Т. А. Пулко, Н. В. Колбун, Л. М. Лыньков // Технические средства защиты информации : материалы докл. и кратк. сообщ. VI Белорус.-российск. науч.-техн. конф., Минск – Нарочь, 21–22 мая 2008 г. – Минск : БГУИР, 2008. – С. 80.

65. Колбун, Н. В. Влагосодержащие дисперсные системы для экранирования ЭМИ с различными наполнителями / Н. В. Колбун, Х. М. Альлябад, Л. М. Лыньков // Технические средства защиты информации : материалы докл. и кратк. сообщ. VI Белорус.-российск. науч.-техн. конф., Минск – Нарочь, 21–22 мая 2008 г. – Мн. : БГУИР, 2008. – С. 79.

66. Исследование отражающей способности влагосодержащих материалов градиентной структуры / Г. А. Пухир, Л. С. Пинчук, В. А. Банный, Н. В. Колбун // Технические средства защиты информации : материалы VII Белорус.-российск. науч.-техн. конф., Минск – Нарочь, 23–24 июня 2009 г. – Минск : БГУИР, 2009. – С. 89.

67. Электрические свойства поглощающих ЭМИ влагосодержащих композиционных материалов / Т. А. Пулко, Н. В. Насонова, А. Н. Осипов, М. В. Давыдов // Технические средства защиты информации : материалы VIII Белорус.-

российск. науч.-техн. конф., Браслав, 24–28 мая 2010 г. / Мин. обр. РБ, Гос. центр безопасности инф. ; редкол. : В. Ф. Голиков [и др.]. – Минск, 2010. – С. 111.

68. Пулко, Т. А. Выбор растворных наполнителей влагосодержащих экранирующих материалов для защиты информационных объектов от воздействия электромагнитных излучений / Т. А. Пулко, Г. А. Пухир, Н. В. Насонова // Технические средства защиты информации : материалы VIII Белорус.-российск. науч.-техн. конф., Браслав, 24–28 мая 2010 г. / Мин. обр. РБ, Гос. центр безопасности инф. ; редкол. : В. Ф. Голиков [и др.]. – Минск, 2010. – С. 76.

69. Пулко, Т. А. Исследование оптических свойств влагосодержащих синтетических материалов при пониженных температурах / Т. А. Пулко, Н. В. Насонова // Современные средства связи : материалы XV Междунар. науч.-тех. конф., Минск, 28–30 сентября 2010 г. / ВГКС ; редкол. : А. О. Зеневич [и др.]. – Минск, 2010. – С. 93.

70. Материалы для экранов ЭМИ на основе волокнистых матриц / М. Аль-Махди, Г. А. Власова, Н. В. Насонова, Л. М. Лыньков // Технические средства защиты информации : тез. докл. X Белорусско-российской науч.-техн. конф., Минск, 29–30 мая 2012 г. – Минск : БГУИР, 2012. – С. 63

71. Грабарь, И. А. Моделирование радиопоглощающих свойств многослойных конструкций экранов ЭМИ / И. А. Грабарь, Н. В. Насонова // Технические средства защиты информации: тез. докл. X Белорус.-российск. науч.-техн. конф., Минск, 29–30 мая 2012 г. – Минск : БГУИР, 2012. – С. 65.

72. Электромагнитные свойства водосодержащих полимерных материалов с магнитными и диэлектрическими включениями / И. А. Грабарь, Н. В. Насонова, Ю. Г. Щерба, Т. А. Пулко, Ю. В. Смирнов // Технические средства защиты информации : тез. докл. XI Белорус.-российск. науч.-техн. конф., Минск, 5–6 июня 2013 г. – Минск : БГУИР, 2013. – С. 68

73. Радиопоглощающий материал на основе композиционного материала с магнитодиэлектрическими потерями / Н. В. Насонова, Я. Т. А. Аль-Адеми, А. А. А. Ахмед, Л. М. Лыньков // Технические средства защиты информации : тез. докл. XI Белорус.-российск. науч.-техн. конф., Минск, 5–6 июня 2013 г. – Минск : БГУИР, 2013. – С. 71

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

75. Имитаторы для оценки воздействия импульсных магнитных полей на ткани человека / С. М. Г. Гобад, Н. В. Насонова, Я. Т. А. Аль-Адеми, М. Г. Давыдов, Т. А. Пулко // Технические средства защиты информации : тез. докл. XIII Белорус.-российск. науч.-техн. конф., Минск, 4–5 мая 2015 г. – Минск : БГУИР, 2015. – С. 61–62.

76. Пухир, Г. А. Исследование тепловых эффектов в образцах композиционных материалов на основе силикагеля и измельченной древесины посредством дифференциального термического анализа / Г. А. Пухир, Н. В. Насонова // Технические

средства защиты информации : тез. докл. XIV Белорус.-российск. науч.-техн. конф., Минск, 25–26 мая 2016 г. – Минск : БГУИР, 2016. – С. 38–39.

77. Грабарь, И. А. Влияние влагосодержания волокнистых материалов на их диэлектрическую проницаемость / И. А. Грабарь, Н. В. Насонова // Технические средства защиты информации : тез. докл. XIV Белорус.-российск. науч.-техн. конф., Минск, 25–26 мая 2016 г. – Минск : БГУИР, 2016. – С. 53.

Патенты

78. Поглотитель электромагнитного излучения : полез. модель ВУ 1516 / Л. М. Лыньков, Т. В. Борботько, Н. В. Колбун. – Оpubл. 30.09.2004.

79. Устройство защиты человека от электромагнитного воздействия радиотелефонов : полез. модель ВУ 2102 / Л. М. Лыньков, Т. В. Борботько, Н. В. Колбун. – Оpubл. 02.05.2005.

80. Поглотитель электромагнитного излучения : пат. ВУ 10141 / Л. М. Лыньков, Т. В. Борботько, Н. В. Колбун. – Оpubл. 28.02.2006.

81. Устройство защиты человеческого организма от воздействия электромагнитного излучения средств отображения информации : полез. модель ВУ 2501 U / Л. М. Лыньков, Т. В. Борботько, В. А. Богущ, А. М. Прудник, Н. В. Колбун. – Оpubл. 01.11.2005.

82. Поглотитель электромагнитной энергии излучения : полез. модель ВУ 5137 / Л. М. Лыньков, Н. В. Колбун, Т. В. Борботько, Т. А. Пулко, Х. М. Альлябад, А. А. Позняк. – Оpubл. 16.12.2008.

83. Устройство для защиты цифровых камер от высокоинтенсивного электромагнитного излучения : полез. модель ВУ 5353 / Л. М. Лыньков, Н. В. Колбун, В. В. Аксёнов. – Оpubл. 01.04.2009.

84. Тепловой экран : полез. модель ВУ 6986 / Л. М. Лыньков, Н. В. Насонова, Т. В. Борботько, Т. А. Пулко, А. Х. Абдулькадер. – Оpubл. 28.02.2011.

85. Устройство защиты организма от воздействия электромагнитного излучения мобильных телефонов : полез. модель ВУ 9096 / Л. М. Лыньков, Т. В. Борботько, Н. В. Насонова, Т. А. Пулко, Ю. В. Смирнов, Я. Т. А. Аль-Адеми. – Оpubл. 30.04.2013.

86. Способ модифицирования текстиля : пат. ВУ 19894 / Л. С. Пинчук, В. А. Гольдаде, Н. В. Насонова. – Оpubл. 28.02.2016.

87. Способ получения радиопоглощающего полимерного материала : пат. ВУ 20097 / Л. С. Пинчук, В. А. Гольдаде, Н. В. Насонова. – Оpubл. 30.04.2016.

РЭЗІЮМЭ

Насонава Наталля Віктараўна

Нанаструктураваныя кампазіцыйныя матэрыялы на аснове порыстых дыэлектрычных матрыц, запоўненых воднымі растворамі

Ключавыя словы: нанаструктураваныя кампазіцыйныя матэрыялы, вільгацеўтрымліваючыя матэрыялы, электрычныя характарыстыкі, паглынаныя, стабільнасць, электрамагнітны экран, радыёпаглынальнік, тканеэквівалентныя матэрыялы, тэхналогія фарміравання матэрыялаў.

Мэта даследавання заключаецца ў вызначэнні заканамернасцяў фарміравання нанаструктураваных кампазіцыйных дыэлектрычных і праводзячых матэрыялаў на аснове порыстых валакністых (поліакрыланітрыл, цэлюлоза), парашковых (сілікагель, цэаліт, бентаніт) і палімерных (поліакрыламід) матрыц, запоўненых вадой і воднымі растворамі электралітаў, выяўленні іх электрафізічных і электрамагнітных свойстваў і стварэнні з іх сродкаў электрамагнітнай абароны біялагічных і тэхнічных аб'ектаў.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: устаноўлены ўплыў нанапамерных слаёў вады ў мікрапорыстых матрыцах, насычаных вадой і воднымі растворамі электралітаў, на характар залежнасцяў дыэлектрычнай пранікальнасці і ўдзельнага электрычнага супраціўлення такіх матэрыялаў ад іх насычанасці вільгаццю; адаптавана мадэль дыэлектрычнай пранікальнасці нанаструктураваных кампазіцыйных матэрыялаў; вызначаныя механізмы стабілізацыі велічыні паглынання электрамагнітнага выпраменьвання дыяпазона 8–12 ГГц нанаструктураванымі вільгацеўтрымліваючымі кампазіцыйнымі матэрыяламі ў дыяпазоне температур 258–383 К; прапанаваная структурная мадэль вільгацеўтрымліваючых кампазіцыйных матэрыялаў і апісаны механізм змянення іх удзельнага электрычнага супраціўлення ў залежнасці ад насычанасці вільгаццю; прапанаваны механізм зніжэння спектральнай яркасці порыстых матрыц, прапітаных вадой звыш парогавага значэння насычанасці вільгаццю, у дыяпазоне длін хваляў 400–1000 нм; распрацаваная тэхналогія стварэння вільгацеўтрымліваючых кампазіцыйных матэрыялаў, якая дазваляе фарміраваць матэрыялы з патрэбнымі характарыстыкамі дыэлектрычнай пранікальнасці і паглынання электрамагнітнага выпраменьвання, з стабільнасцю гэтых характарыстык на працягу доўгага часу і пры ўплыву температур у дыяпазоне 258–383 К.

Ступень выкарыстання: рэзультаты дысертацыйнай работы выкарыстаныя пры выкананні НДОКР у лабараторыі хімічных валокнаў ААА «ЦНІЛКА» (Масква, РФ), у Цэнтры 1.6 НДЧ БДУІР (Мінск, РБ) пры выкананні кантракту № 14СХ1051-МВУ1124-1135К (з КНР) (эканамічны эфект за 2017 г. – 52993,7 руб.), у НДЛ 5.3 БДУІР (Мінск, РБ), укаранёныя ў вытворчасць у НВААА «ОКБ Тэхнасаюзпраект» (Мінск, РБ).

Вобласць ужывання: інфармацыйная бяспека, абарона арганізму чалавека ад электрамагнітных уздзеянняў, абарона тэхнічных і біялагічных аб'ектаў ад уздзеяння электрамагнітнага выпраменьвання радыёэлектронных сродкаў, электрамагнітная сумяшчальнасць, зніжэнне радыёэлектроннай прыметнасці тэхнічных аб'ектаў.

РЕЗЮМЕ

Насонова Наталья Викторовна

Наноструктурированные композиционные материалы на основе пористых диэлектрических матриц, заполненных водными растворами

Ключевые слова: наноструктурированные композиционные материалы, влагосодержащие материалы, электрические характеристики, поглощение, стабильность, электромагнитный экран, радиопоглотитель, тканезквивалентные материалы, технология формирования материалов.

Цель исследования: установление закономерностей формирования наноструктурированных композиционных диэлектрических и проводящих материалов на основе пористых волокнистых (полиакрилонитрил, целлюлоза), порошковых (силикагель, цеолит, бентонит) и полимерных (полиакриламид) матриц, заполненных водой и водными растворами электролитов, определение их электрофизических и электромагнитных свойств и создание из них средств электромагнитной защиты биологических и технических объектов.

Полученные результаты и их новизна: установлено влияние наноразмерных слоев воды в микропористых матрицах, пропитанных водой и водными растворами электролитов, на характер зависимостей диэлектрической проницаемости и удельного электрического сопротивления таких материалов от их влагосодержания; адаптирована модель диэлектрической проницаемости наноструктурированных влагосодержащих композиционных материалов; определены механизмы стабилизации величины поглощения электромагнитного излучения диапазона 8–12 ГГц наноструктурированными влагосодержащими композиционными материалами в диапазоне температур 258–383 К; предложена структурная модель влагосодержащих композиционных материалов и описан механизм изменения их удельного электрического сопротивления в зависимости от влагосодержания; предложен механизм снижения спектральной яркости пористых матриц, пропитанных водой свыше порогового значения влагосодержания в них, в диапазоне длин волн 400–1000 нм; разработана технология создания влагосодержащих композиционных материалов, позволяющая получать материалы с требуемыми характеристиками диэлектрической проницаемости и поглощения электромагнитного излучения, а также обладающие стабильностью этих характеристик в течение длительного времени и при воздействии температур в диапазоне 258–383 К.

Степень использования: результаты диссертационной работы использованы при выполнении НИОКР в лаборатории химических волокон ОАО «ЦНИИЛКА», Москва, РФ, в Центре 1.6 НИЧ БГУИР (Минск, РБ) при выполнении контракта № 14СХ1051-МВУ1124-1135К (КНР) (экономический эффект за 2017 г. составил 52993,7 руб.), в НИЛ 5.3 БГУИР (Минск, РБ), внедрены в производство в НПООО «ОКБ Техносоюзпроект» (Минск, РБ).

Область применения: защита технических и биологических объектов от воздействия электромагнитного излучения радиоэлектронных средств, электромагнитная совместимость, снижение радиолокационной заметности технических объектов.

SUMMARY

Nasonova Natallia Viktorovna

Nanostructured composite materials on the basis of porous dielectric matrices, impregnated with aqueous solutions

Key words: nanostructured composite materials, liquid-containing materials, electrical characteristics, absorption, stability, electromagnetic shield, radioabsorber, tissue-equivalent material, material formation technology.

Goal of the research is to ascertain the mechanisms of forming nanostructured composite dielectric and conductive materials on the basis of porous fibrous (polyacrylonitrile, cellulose), powder (silicagel, zeolite, bentonite) and polymer (polyacrylamide) matrices, impregnated with water and aqueous solutions of electrolytes, to determine their electrical and electromagnetic characteristics and to develop facilities for electromagnetic protection of biological and technical objects, basing on such composite materials.

Obtained results and their novelty: the impact of nano-scaled layers of water within the microporous matrices, impregnated with water and aqueous solutions of electrolytes, produced onto the permittivity and electrical resistance characteristics of such materials vs their liquid content is determined; the model of nanostructured liquid-containing composite materials permittivity is adopted; the stabilization mechanisms of electromagnetic radiation absorption in the temperature range of 258–383 K within the nanostructured liquid-containing composite materials are described; the structure model of liquid-containing composite materials is suggested and their electrical resistivity dependency on their liquid content is given; spectral brightness decrease mechanism, while the porous matrices are impregnated above a threshold value, is ascertained in the waveband 400–1000 nm; a liquid-containing composite materials manufacturing technology is developed, which allows obtaining materials with the pre-specified characteristics of permittivity and electromagnetic absorption, and ensures the stability of these characteristics for a long period of time and within a temperature range of 258–383 K.

Utilization degree: the obtained results were applied for R&D activity in the Lab of Chemical fibers in OAO «TSNIIKA» (Moscow, Russia), in R&D Center 1.6 of BSUIR (Minsk, Belarus) under the contract № 14CX1051-MBY1124-1135K (China) (the economic effect estimated for 2017 as 52993,7 roubles), in R&D Lab. 5.3 in BSUIR (Minsk, Belarus) and at the enterprise “OKB Technosoyuzproject” (Minsk, Belarus).

Application area: protection of biological and technical objects against the electromagnetic radiation of radioelectronic facilities impact; electromagnetic compatibility; radar visibility of technical objects decrease.

Научное издание

Насонова Наталья Викторовна

**НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ
МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ПОРИСТЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
МАТРИЦ, ЗАПОЛНЕННЫХ ВОДНЫМИ РАСТВОРАМИ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

по специальностям 05.16.08 – Нанотехнологии и наноматериалы,
05.27.06 – Технология и оборудование для производства полупроводников,
материалов и приборов электронной техники

Подписано в печать . Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Отпечатано на ризографе. Усл.печ.л. . Уч.-изд.л. . Тираж . Заказ .

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий
№1/238 от 24.03.2014,
№2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014
ЛИ №02330/264 от 14.04.2014.
220013, Минск, П. Бровки, 6.