УДК 537.531:621.039.537

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ ЭКРАНОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ПОРОШКОВЫХ, НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ И ПЛЕНОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Л.М. ЛЫНЬКОВ, В.А. БОГУШ, Т.В БОРБОТЬКО,
Н.В. НАСОНОВА, Е.С. БЕЛОУСОВА, О.В. БОЙПРАВ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 15 февраля 2019

Аннотация. Представлены основные результаты исследований, полученные в 2014–2018 гг. в ходе выполнения научно-исследовательских работ по направлению «Материалы, элементы и устройства электронной техники».

Ключевые слова: алюминий, влагосодержащий материал, диоксид титана, керамзит, перлит, экран электромагнитного излучения, углерод.

Abstract. The main research results obtained in 2014–2018 in the direction «Materials, elements and devices of electronic equipment» are presented.

Keywords: aluminum, watercontaining material, titanium dioxide, expanded clay, perlite, electromagnetic radiation shield, carbon.

Doklady BGUIR. 2019, Vol. 120, No. 2, pp. 85-99
New technologies for creation of electromagnetic radiation shields based on modified powder, nanostructured and film materials
L.M. Lynkou, V.A. Bogush, T.V. Borbot'ko,
N.V. Nasonova, E.S. Belousova, O.V. Boiprav

Введение

В 2014–2018 гг. в Белорусском государственном университете информатики и радиоэлектроники проводились работы по совершенствованию и развитию исследований по созданию экранов электромагнитного излучения (ЭМИ) для различных сфер применения (радиоэкология, технические средства защиты информации, скрытие радиоэлектронных средств от обнаружения в микроволновом диапазоне и т. п.). В результате Н. В. Насоновой защищена докторская диссертация (2018 г.). Работы выполнялись в рамках программ Союзного государства, Фонда фундаментальных исследований, государственных программ Республики Беларусь, хозяйственных договоров, а также на инициативных началах. Кандидатские диссертации по данной тематике защищены О. В. Бойправ (2017 г.), Е. С. Белоусовой (2015 г.), А. А. Ахмедом (2015 г.), Я. Т. А. Аль-Адеми (2015 г.), М. Р. Неамахом (2014 г.).

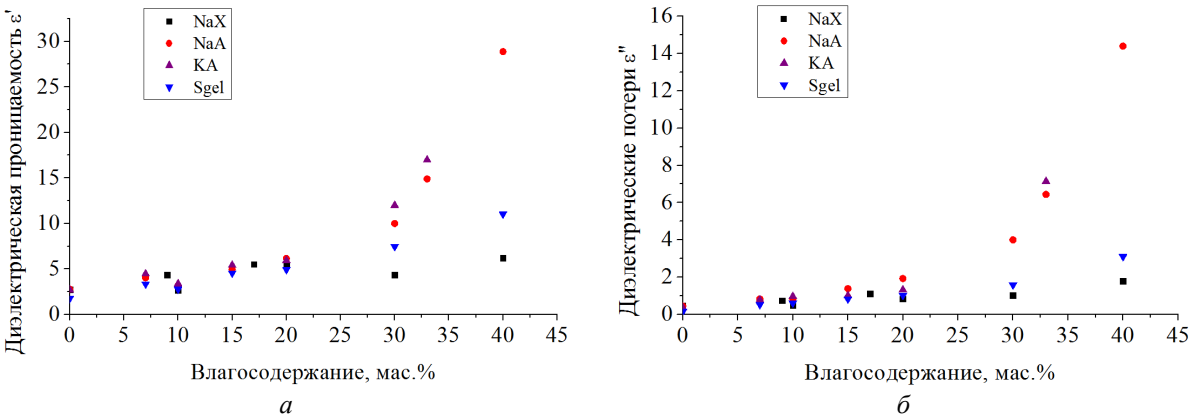
Экраны ЭМИ на основе влагосодержащих материалов

Применение воды в качестве материала с высокими значениями диэлектрической проницаемости и диэлектрических потерь создает перспективу создания новых электромагнитных экранов и радиопоглотителей и повышения эффективности существующих, рабочая область частот которых занимает широкий диапазон – от 1 до 140 ГГц [1].

Для расширения возможностей применения воды она вводится в состав композиционных материалов путем пропитки диэлектрических пористых матриц, в качестве которых используются машинно-вязаное и нетканое полотна из синтетических (полиакрилонитрил) и натуральных (целлюлоза) волокон, порошковые сорбенты (цеолиты, силикагель и бентонит) и гигроскопичный органический полимер (на основе полиакриламида). Механические свойства композиционного материала в основном задаются видом и параметрами матрицы. Электромагнитные характеристики таких материалов определяются содержанием воды или водного раствора в матрице, использованием в составе водного раствора органических компонентов и солей металлов, а также структурными параметрами пористой матрицы. Эксплуатационные характеристики, включающие стабильность радиопоглощающих свойств при воздействии температур в диапазоне –15…+110 °С, регулируются за счет синтеза водных растворов с гигроскопичными компонентами. Введение в состав раствора органических компонентов и солей металлов предоставляет дополнительные возможности изменения электрических свойств влагосодержащих материалов путем введения дополнительных ионов, а также повышения эффективности процесса заполнения пористой матрицы за счет изменения смачиваемости материала [1, 2].

Электродинамическое моделирование характеристик распространения электромагнитных волн через диэлектрик с потерями (CST MICROWAVE STUDIO) показало, что экранирующие материалы на основе воды и водных растворов могут обеспечить ослабление ЭМИ до 7,4 дБ в диапазоне частот 1…12 ГГц и не менее 25,5 дБ в диапазоне частот 90…140 ГГц при толщине материала 1 мм [1]. Различные принципы конструирования радиопоглотителей позволяют получать на основе влагосодержащих композиционных материалов требуемые частотные зависимости ослабления и коэффициента отражения ЭМИ в соответствии с техническими требованиями. Введение в состав композиционного материала компонентов с магнитными свойствами позволяет дополнительно повысить эффективность радиопоглощения [3]. Величина ослабления линейно зависит от толщины влагосодержащего материала. На основе влагосодержащих композиционных материалов разработаны электромагнитные экраны и радиопоглотители толщиной от 1,5 до 10 мм, обеспечивающие ослабление ЭМИ (10…35) ±2 дБ, коэффициент отражения (–14,0…–5,0)±1,2 дБ, рабочий диапазон частот которых составляет 0,7…140 ГГц, эффективно поглощающие как непрерывное ЭМИ мощностью от 1 мВт, так и ЭМИ с импульсной мощностью 20 кВт [1].

Высокая удельная поверхность применяемых пористых матриц (300–540 000 $м^2$/кг) обусловливает необходимость учета вклада связанной воды в модели общей диэлектрической проницаемости влагосодержащих композиционных материалов. Экспериментально установлено, что доля связанной воды в пористых матрицах может достигать до 40 масс.% (для цеолита NaX) и определяет характер зависимости диэлектрической проницаемости и удельного электрического сопротивления влагосодержащего материала от влагосодержания (рис. 1) [1].



а *б*

Рис. 1. Зависимость диэлектрических характеристик образцов влагосодержащего порошкового цеолита и силикагеля от влагосодержания на частоте 10 ГГц: *а* – диэлектрическая проницаемость; *б* – диэлектрические потери

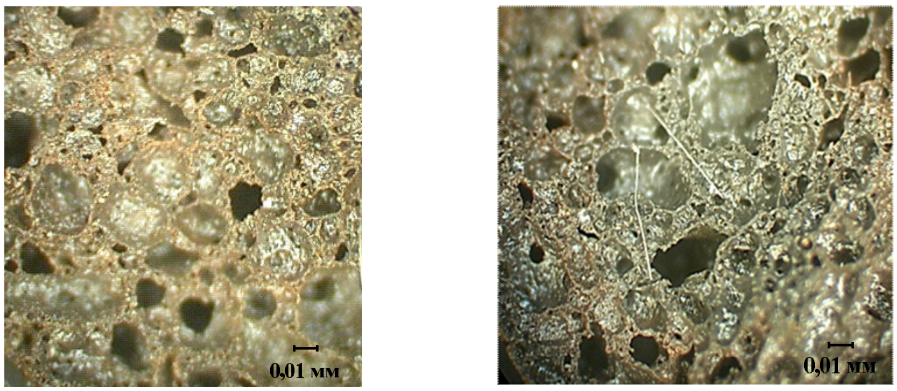
В зависимости от вида и структуры матрицы и величины ее влагосодержания (5…70 масс.%), вида и концентрации раствора (0,1…1 М) можно получить величину диэлектрической проницаемости влагосодержащего композиционного материала от 2,5 до 58 в диапазоне частот 8…12 ГГц [4].

Величина поглощения ЭМИ диапазона 8…12 ГГц композиционными влагосодержащими материалами с влагосодержанием до 70 масс.% составляет до 28,32 дБ/см и определяется частотной дисперсией воды. В стабилизации величины поглощения ЭМИ в пределах ±15 % при изменении температуры от –15 до 110 °С важную роль играет комбинированный механизм сорбции молекул воды на поверхности микропористых матриц и в водных растворах гигроскопичных веществ ($CaCl_2$, $MgCl_2$, ZnCl), что позволяет расширить диапазон применения электромагнитных экранов на основе таких материалов [1].

На основе разработанных влагосодержащих композиционных материалов предложены различные конструкции радиопоглотителей для применения в различных областях – уменьшения эффективной поверхности рассеяния наземных объектов на 4–20 дБ в диапазоне частот 9…11 ГГц и 17…19 ГГц, снижения уровня ЭМИ радиоэлектронных устройств на организм человека на 10…20 дБ в диапазоне частот 0,7…6,0 ГГц [5].

Исследования электрических свойств влагосодержащих композиционных материалов в диапазоне частот от 50 Гц до 1 МГц показали, что, регулируя технологические параметры таких материалов, можно получать удельное электрическое сопротивление от 0,004 кОм·м до 130 кОм·м (на частоте 1 кГц), что коррелирует с электрическими свойствами различных биологических тканей организма – мышц, кожи, мозга и др. [6]. Это позволило предложить их в качестве электрических эквивалентов биологических тканей человека для натурной оценки силы магнитных и электрических воздействий и создания фантомов организма человека [7].

Для формирования влагосодержащих конструкций экранов ЭМИ предложено использовать керамзит, характеризующийся размером фракций 1…2 мм (размер пор 0,02…0,04 мм) и 2…4 мм (размер пор 0,01…0,02 мм) (рис. 2), пропитываемый водным раствором хлорида натрия с концентрацией растворенного вещества 20 %. Установлено, что влагосодержание такого материала зависит от размера пор, а также от методов его пропитки. Предложено пропитку такого материала выполнять методами иммерсионного смачивания и под вакуумом, что позволяет получать материал с влагосодержанием, варьируемым в пределах 27…42 %, за счет варьирования параметров технологических режимов, что оказывает существенное влияние на коэффициенты отражения и передачи конструкций экранов ЭМИ, изготавливаемых на его основе.



а *б*

Рис. 2. Микрофотография поверхности керамзита:
а – размер фракций 1…2 мм; *б* – размер фракций 2…4 мм

Применение в качестве растворного наполнителя хлорида натрия позволяет синтезировать электролит с диэлектрической проницаемостью порядка 23, причем диэлектрические потери раствора имеют незначительную зависимость от температуры, что позволяет создавать конструкции экранов ЭМИ, характеризующиеся стабильностью своих характеристик в интервале температур –50…+50 °С. Увеличение концентрации ионов натрия и хлора в растворе приводит к увеличению его электропроводности, которая снижается

при уменьшении подвижности ионов раствора. Механизм ослабления ЭМИ обуславливается вращательным движением диполей воды, имеющих постоянный дипольный момент порядка $6{,}2 \cdot 10^{-30}$ Кл. Установлено, что на ослабление ЭМИ указанного электролита влияет его вязкость, определяющая подвижность ионов растворенного в нем хлорида натрия и диполей воды.

Показано, что увеличение вязкости электролита в интервале $1{,}6 \cdot 10^{-3}$…$59{,}1 \cdot 10^{-3}$ Па·с, вводимого в поры керамзита, приводит к увеличению коэффициента отражения конструкции экрана ЭМИ с –19,4 до –0,4 дБ и снижению коэффициента передачи с –5 до –28,6 дБ в диапазоне частот 0,9…17 ГГц. Установлено, что в диапазоне частот 0,9…3 ГГц снижение значений коэффициента отражения обусловлено в большей степени влиянием ионной проводимости раствора хлорида натрия, а в диапазоне частот 3…17 ГГц – дипольно-релаксационной поляризацией молекул воды в вязкой среде [8, 9].

Также обоснована перспективность использования сфанговых мхов и влагосодержащих иглопробивных полотен для получения эффективных экранов ЭМИ [10, 11]. Экраны на основе указанных материалов могут характеризоваться значениями коэффициентов отражения и передачи ЭМИ в диапазоне частот 0,7…17 ГГц соответственно –10 и –18 дБ.

Разработанные конструкции экранов являются перспективными для их применения при решении задач радиолокационной заметности вооружения и военной техники за счет снижения дальности ее обнаружения, а также решения задач, связанных с защитой информации от утечки по электромагнитному каналу за счет ослабления побочного ЭМИ средств вычислительной техники

Экраны ЭМИ на основе оксидосодержащих порошкообразных материалов

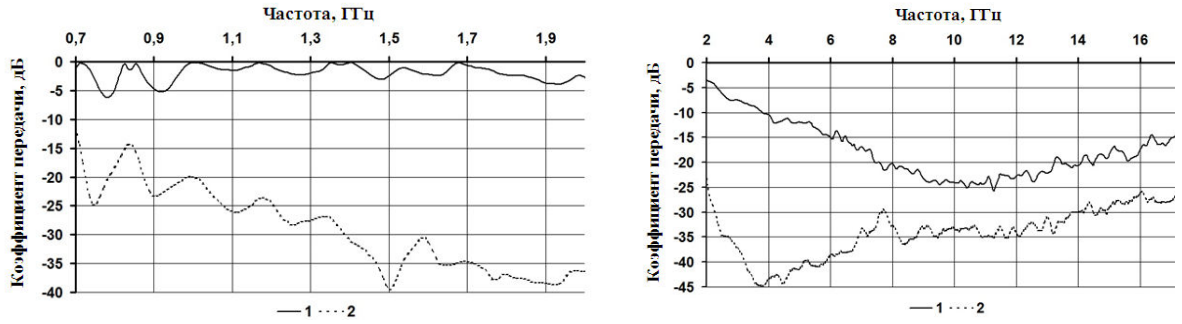
Предложены многослойные экраны ЭМИ на основе порошкообразного диоксида титана. Поверхностный (согласующий) слой таких экранов изготовлен из целлюлозы и борной кислоты. Второй слой, который является поглощающим, представляет собой композиционный материал, полученный путем равномерного распределения диоксида титана в целлюлозном связующем. Третий слой, являющийся отражающим, также представляет собой композиционный материал с целлюлозным связующим и проводящим наполнителем в виде опилок железа и алюминия. Предложенные многослойные экраны характеризуются низкими значениями коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне частот 0,7…17 ГГц, которые изменяются в пределах –20…–50 дБ, что обусловлено наличием в составе этих экранов проводящих компонентов. Резонансное значение коэффициента отражения ЭМИ предложенных экранов составляет –20 дБ. Частота, соответствующая этому значению, зависит от толщины слоев многослойного экрана ЭМИ, а также от соотношения компонентов этих слоев [12].

Для изготовления недорогостоящих экранирующих ЭМИ строительных материалов предложено использовать порошкообразные отходы плавки чугуна, основным компонентом которых является оксид трехвалентного железа [13]. На основе этих отходов, портландцемента и керамзитового пористого гравия получены радиоэкранирующие строительные материалы в форме кирпичей, номинальные размеры которых составляют 250×120×65 мм, а масса – 3,6 кг (рис. 3).



Рис. 3. Внешний вид радиоэкранирующего строительного материала

Установлено, что у строительных конструкций, выполненных из разработанных радиоэкранирующих кирпичей, значения коэффициентов передачи ЭМИ в диапазоне частот 0,7…17 ГГц ниже на 10…35 дБ, чем у конструкций из силикатных кирпичей (рис. 4).



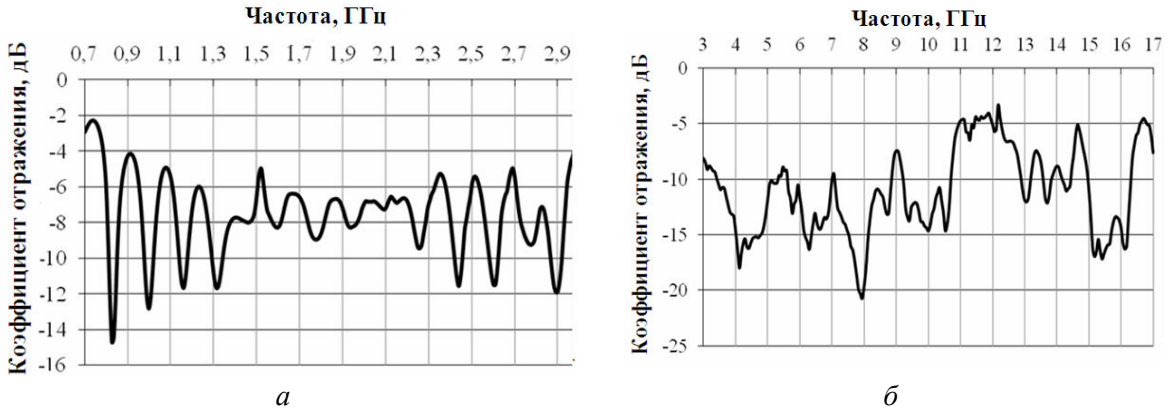
а *б*

Рис. 4. Частотные зависимости коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне 0,7…2 ГГц (*а*) и 2…17 ГГц (*б*) строительной конструкции из силикатных кирпичей (кривые 1) и из разработанных радиоэкранирующих кирпичей на основе порошкообразных отходов плавки чугуна (кривые 2)

Обоснована перспективность использования порошкообразного перлита для изготовления эффективных и технологичных экранов ЭМИ, характеризующихся невысокой массой [14, 15]. Получены композиты на основе порошкообразного перлита и строительных материалов (цемент, гипс). Такие композиты предназначены для изготовления отделочных модулей (рис. 5) для стен экранируемых помещений. Масса 1 м^2 этих модулей составляет 5 кг, величины их коэффициентов отражения и передачи ЭМИ в диапазоне частот 0,7…17 ГГц изменяются в пределах –5…–20 дБ (рис. 6) и –15…–25 дБ соответственно [16, 17].



Рис. 5. Внешний вид модуля на основе порошкообразного перлита для отделки стен экранируемых помещений



а *б*

Рис. 6. Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 0,7…3 ГГц (*а*) и 3…17 ГГц (*б*) модуля на основе порошкообразного перлита для отделки стен экранируемых помещений

Наноструктурированные углеродосодержащие экраны ЭМИ

Многие годы учеными велись исследования способов построения пассивных средств защиты информации. Было установлено, что для экранирования ЭМИ наиболее эффективными являются конструкции, основанные на композиционных материалах. Создание таких материалов осуществляется путем подбора концентрации порошкообразного наполнителя и связующего с учетом желаемых свойств и характеристик. Углеродосодержащие компоненты являются наиболее распространенным материалом для создания экранов электромагнитного излучения. В зависимости от вида углерода (технический углерод, уголь), отличающихся структурой и свойствами, возможно получение экранов ЭМИ, применяемых для разных частотных диапазонов [18–20].

Среди требований, которые предъявляются к экранам электромагнитного излучения, присутствуют не только значения коэффициентов отражения и передачи, но и свойства легкости, гибкости и прочности. Поэтому разработаны экраны электромагнитного излучения на основе водных растворов $CaCl_2$ или $MgCl_2$ [21], способных сохранять коллоидное состояние за счет присутствия и удержания в них связанной воды кристаллогидратами $CaCl_2 \cdot 6H_2O$ и $MgCl_2 \cdot 6H_2O$. На основе полученных растворов сформированы пластичные экраны с характеристикой ослабления ЭМИ при толщине экрана 3…4 мм более 35 дБ, коэффициент отражения изменяется в пределах –5,3…–5,9 дБ в диапазоне частот 8…12 ГГц. Использование данного композиционного материала на поверхности объектов специального назначения позволяет скрыть их на фоне торфяных сфагновых или подзолистых почв.

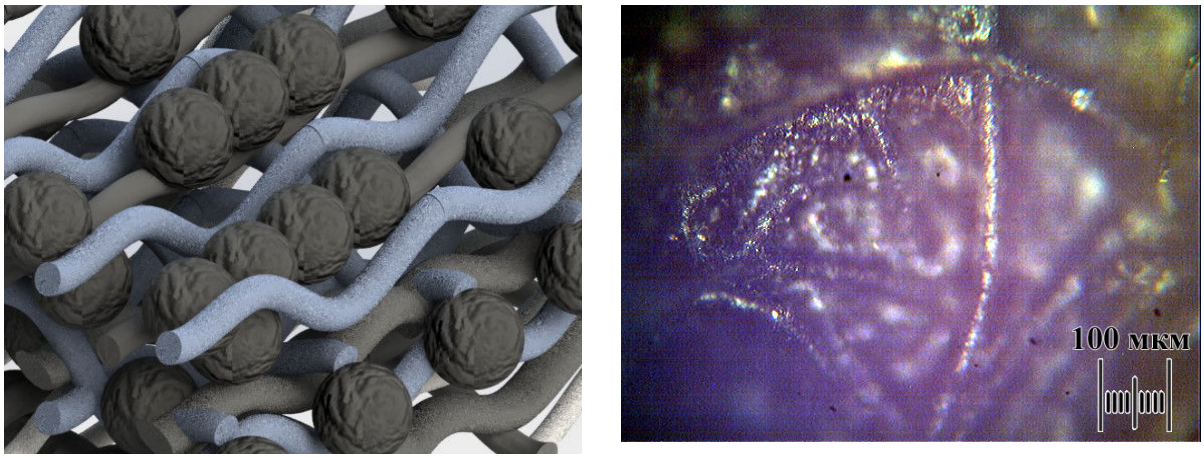
Получены красочные покрытия для маскировки средств военной техники на основе композиционной шунгитосодержащей краски [22, 23] с добавлением порошков титаномагнетита и диоксида титана. Данные покрытия обладают свойством устойчивости к открытому пламени за счет их вспенивания, что объясняется образованием в составе покрытий ортоклаза (до 63 масс.%), кремния (до 4 масс.%) и сохранением рутила и оксида циркония, и характеризуются коэффициентом отражения электромагнитного излучения –10…–13,5 дБ в диапазоне частот 8…12 ГГц.

Проведено экспериментальное обоснование физико-химических процессов, происходящих в структуре природного углеродосодержащего минерала, шунгита, при его термообработке в разных средах [19]. Доказано, что термообработка порошков шунгита в вакууме при температуре 900 ºС приводит к образованию ортоклаза с содержанием до 13 %. При термообработке порошкообразного шунгита в атмосфере хлорида аммония содержание ортоклаза увеличивается до 21 %, при этом наибольшее значение содержания ортоклаза (68 %) получено при термообработке на воздухе (900 ºС). В результате проведенных исследований замечено сохранение содержания наноразмерных многослойных фуллереноподобных глобул при термообработке в вакууме и снижение их содержания до нулевых значений при термообработке в среде хлорида аммония и на воздухе в сочетании с переходом диоксида кремния в ортоклаз.

Созданы конструкции отделочных панелей для электромагнитного экранирования СВЧ-источников и обеспечения экологической защиты обслуживающего персонала и пользователей персональных компьютеров на основе композиционного покрытия с добавлением порошкообразного древесного угля [20] с различными связующими компонентами. Нанесение разработанного композиционного покрытия на поверхность конструкции с неоднородностями приводит к уменьшению ЭМИ в среднем до –18 дБ в диапазоне частот 2…17 ГГц.

Разработана методика инкорпорирования частиц углерода в состав нетканых синтетических полотен методом пропитки [24]. Благодаря хаотичному расположению волокон синтетического полотна частицы углерода проникают вглубь материала за счет полного погружения полотна в водный углеродосодержащий раствор. Таким образом, возможно создавать волокнистые материалы, содержащие частицы углерода и характеризующиеся низким коэффициентом отражения и передачи при небольшой толщине, которые обладают гибкостью и прочностью. При этом порошок технического углерода не статичен в структуре волокнистого материала, что отражается на изменении экранирующих характеристик. Дальнейшие исследования были направлены на решение задачи закрепления порошка технического углерода в составе волокнистого материала.

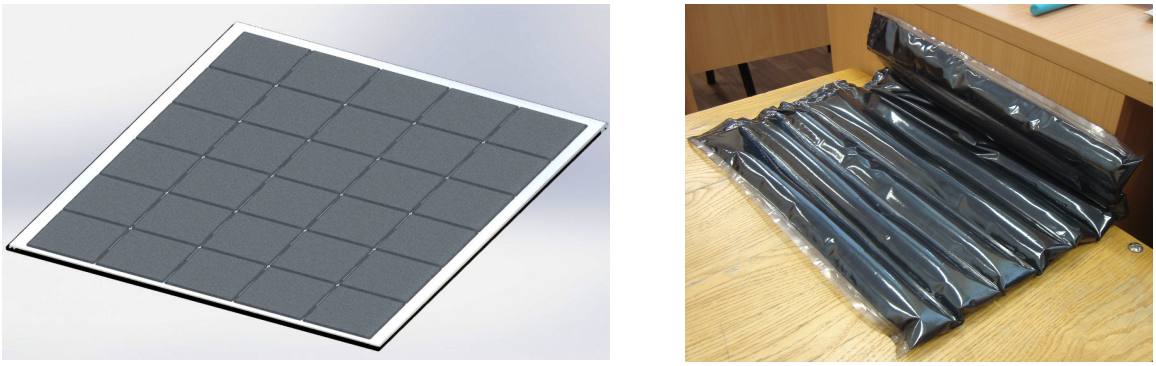
Предложено использование углеродосодержащих клеевых составов для закрепления частиц углерода в составе волокнистых или вспененных материалов [24]. Данные материалы обладают низким коэффициентом отражения (порядка –14 дБ) и коэффициентом передачи (–10 дБ) в диапазоне частот 8–12 ГГц, что объясняется глубоким прохождением частиц углерода в структуру материала, его закреплением на волокнах виде агломератов и заполнением пустого пространства углеродосодержащим материалом (рис. 7).



а *б*

Рис. 7. Структура (*а*) и микрофотография (*б*) поверхности синтетического материала, пропитанного углеродосодержащим клеевым составом

Разработаны гибкие конструкции защитных экранов ЭМИ на основе углеродсодержащих порошковых наполнителей методом индивидуальной сборки с использованием клеевых основ (рис. 8). Данный экран представляет собой матрицу из полиэтиленовых ячеек, содержащих порошковый наполнитель. Ячейки размещались на поверхности двухслойного лавсан-полиэтиленового полотна.



а *б*

Рис. 8. Вариант исполнения гибких конструкций защитных экранов ЭМИ на основе углеродсодержащих порошковых наполнителей:
а – схематическое изображение; *б* – внешний вид

Впервые предложено использование композитных материалов на основе порошков технического углерода для создания эластичных конструкций экранов ЭМИ, обладающих коэффициентом отражения порядка – 15 дБ, коэффициентом передачи до –40 дБ в диапазоне частот 0,7… 17 ГГц. Такие экраны характеризуются равномерной зависимостью коэффициента спектральной яркости (0,027 отн. ед.) в диапазоне длин волн 400…900 нм, что коррелирует со значением коэффициентов для влажных почв серовато-бурого цвета. Это позволяет рекомендовать такие конструкции экранов ЭМИ для использования в целях создания имитаторов природных сред для скрытия от микроволновых и оптических средств обнаружения [25].

Предложены твердотельные конструкции экранов ЭМИ на основе композитов из технического углерода, измельченной древесины, порошков диоксида титана, перлита в разных соотношениях, образующих бетонные панели, характеризующиеся массой 1 кг/м^2,

коэффициентом отражения – 7…–10 дБ, коэффициентом передачи –17 дБ в диапазоне частот 0,7…17 ГГц [26].

Проведен комплекс исследований по изучению изменения свойств огнестойких красок при введении порошков технического углерода и диоксида титана. Установлено, что при воздействии открытого пламени на поверхности, покрытые данной краской, образуется кокс, содержащий рутил. При этом частотные характеристики коэффициентов отражения и передачи в диапазоне частот 0,7–17 ГГц изменяются на 10 %. Рекомендуется использование таких углеродосодержащих красок для нанесения на различные поверхности систем защиты от обнаружения средств технической разведки, эксплуатируемых в условиях открытого пламени.

Разработаны новые конструкции экранов ЭМИ с гибким основанием, на поверхности которых размещены объемные контейнеры, наполненные технических углеродом с различными добавками. Масса модуля экрана размером 1 м^2 составляет 1,3 кг. Коэффициент отражения в диапазоне частот 0,7…17 ГГц отличается при расположении экранов относительно излучаемой антенны и составляет –5…–15 дБ при вертикальном размещении, –15…–35 дБ – при горизонтальном [27].

Конструкции экранов ЭМИ на основе алюминия и его оксидов

Разработана и апробирована методика получения эластичных экранов ЭМИ из фольги на основе алюминия и его оксидов. Эта методика включает в себя следующие этапы.

1. Формирование чехла, предназначенного для заполнения элементами из фольги, обеспечивающими ослабление энергии ЭМИ. Материал чехла – сетчатое полиэстеровое полотно с плотностью 50…70 г/м^2 и размером отверстий 2…3 мм.

2. Раскрой фольги на фрагменты. Габаритные размеры фрагментов должны быть сопоставимы с длиной электромагнитных волн в диапазоне частот, в котором изготавливаемый экран должен характеризоваться наибольшей эффективностью.

3. Равномерное распределение внутри чехла полученных элементов из фольги.

4. Разделение чехла, заполненного элементами из фольги, на ячейки путем ниточного соединения его передней и задней стенок вдоль направлений, условно образуемых параллельными линиями. Соединение должно быть реализовано таким образом, чтобы сечение ячеек в плоскости, параллельной поверхности экрана, характеризовалось квадратной формой. Длина, ширина и высота ячеек должны выбираться, исходя из критерия Рэлея.

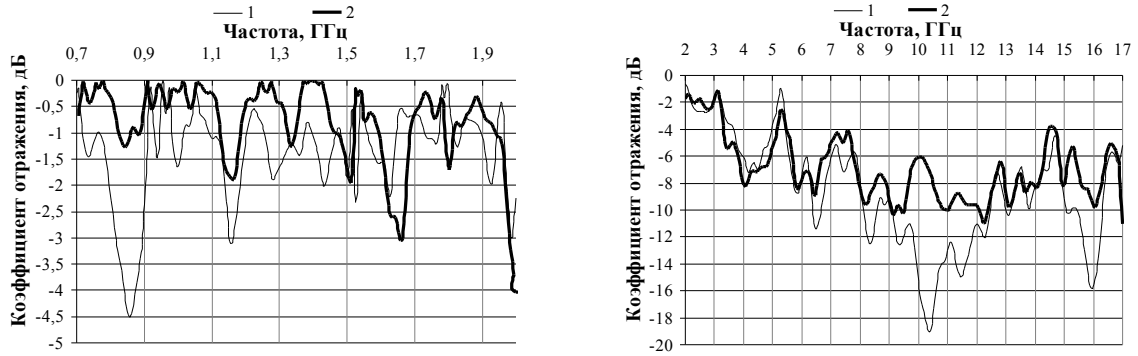
Установлено, что масса 1 м^2 эластичных экранов ЭМИ, получаемых в соответствии с предложенной методикой, составляет не более 0,6 кг, высота ячеек – не более 10 мм.

На рис. 9 представлено фото образца экрана ЭМИ, полученного в соответствии с предложенной методикой.



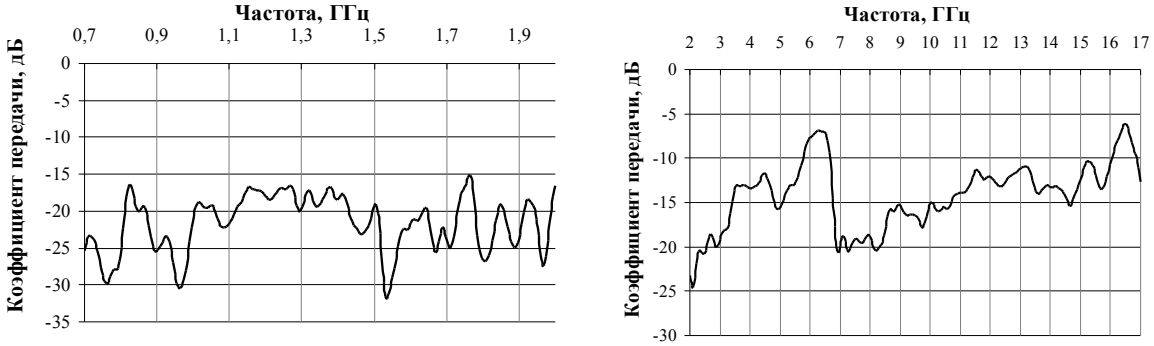
Рис. 9. Фото образца эластичного экрана ЭМИ

На рис. 10, 11 представлены частотные зависимости коэффициентов отражения и передачи ЭМИ в диапазоне 2…17 ГГц эластичного экрана на основе алюминиевой фольги.



а *б*

Рис. 10. Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 0,7…2 ГГц (*а*) и 2…17 ГГц (*б*) эластичного экрана на основе алюминиевой фольги (1) и закрепленного на металлической пластине эластичного экрана на основе алюминиевой фольги (2)



а *б*

Рис. 11. Частотные зависимости коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне 0,7…2 ГГц (*а*) и 2…17 ГГц (*б*) эластичного экрана на основе алюминиевой фольги

Из рис. 10 и 11 следует, что величины коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 0,7…17 ГГц эластичного экрана на основе алюминиевой фольги изменяется в пределах от –2 до –19 дБ при величинах коэффициента передачи ЭМИ –7…–30 дБ. Минимальное значение коэффициента отражения ЭМИ такого экрана при высоте его ячейки 10 мм соответствует частоте 10,5 ГГц. Закрепление рассматриваемого экрана на металлической пластине приводит к снижению на 0,5…4 дБ значений ее коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 0,7…2 ГГц и на 2…10 дБ в диапазоне частот 2…17 ГГц.

Разработана методика получения тонких эластичных экранов ЭМИ на основе алюминиевой фольги, характеризующихся гиротропными свойствами. Она включает в себя следующие этапы.

1. Формирование диэлектрической подложки из гибкого полимерного материала.

2. Нанесение на обе поверхности диэлектрической подложки полосковых киральных элементов, изготовленных из самоклеящейся фольги. Каждый из таких элементов должен представлять собой разомкнутый квадрат, одна из сторон которого имеет разрыв и пересекается под углом 90° в граничных точках этого разрыва с двумя параллельными линиями, длина которых в 2 раза меньше длины стороны квадрата. Полосковые киральные элементы, нанесенные на одну из поверхностей подложки, должны быть повернуты на 180° относительно элементов, нанесенных на другую поверхность.

На рис. 12 представлено фото фрагмента экрана ЭМИ с гиротропными свойствами, изготовленного в соответствии с разработанной методикой. Гиротропность свойств экрана, изготовленного в соответствии с предложенной методикой, обеспечивается в диапазоне частот 0,7…17 ГГц. Это обусловлено тем, что размеры частей полосковых киральных элементов такого экрана, а также расстояние между этими элементами и их частями сопоставимы с длиной электромагнитных волн в указанном диапазоне частот.

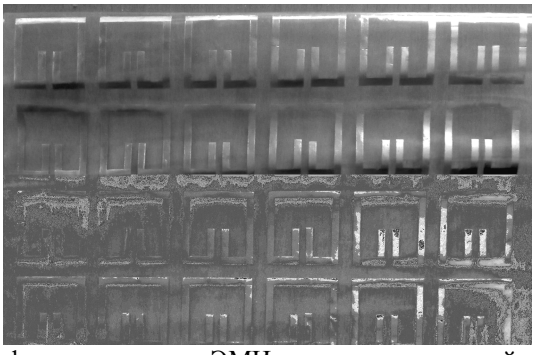
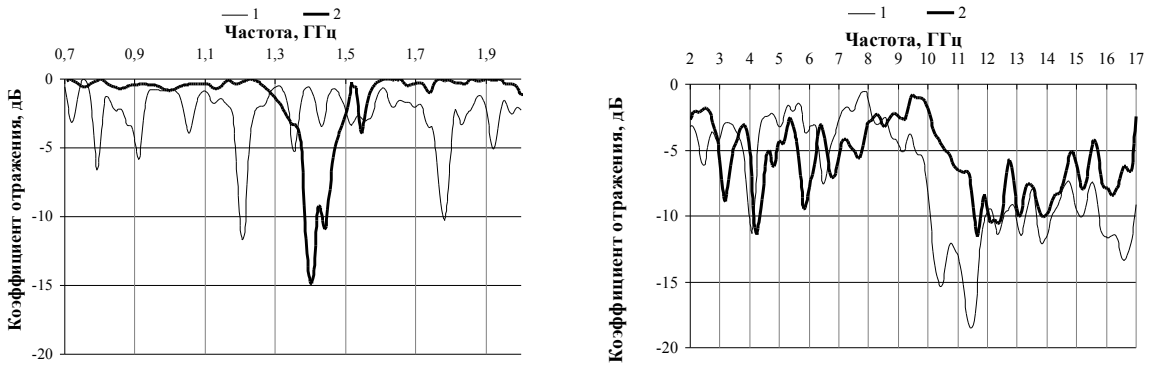


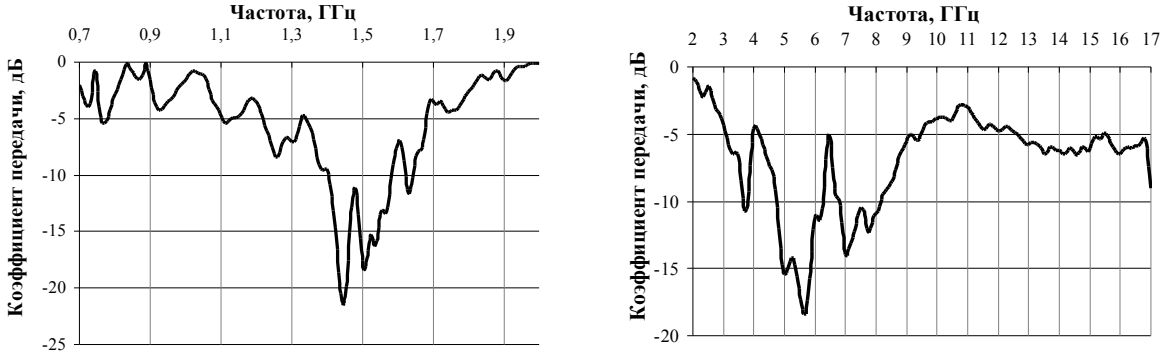
Рис. 12. Фото фрагмента экрана ЭМИ с гиротропными свойствами

На рис. 13, 14 представлены частотные зависимости коэффициентов отражения и передачи ЭМИ в диапазоне частот 0,7…17 ГГц экрана с гиротропными свойствами, изготовленного в соответствии с разработанной методикой.



а *б*

Рис. 13. Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 0,7…2 ГГц (*а*) и 2…17 ГГц (*б*) тонкого эластичного экрана с гиротропными свойствами (1) и закрепленного на металлической пластине тонкого эластичного экрана с гиротропными свойствами (2)



а *б*

Рис. 14. Частотные зависимости коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне 0,7…2 ГГц (*а*) и 2…17 ГГц (*б*) тонкого эластичного экрана с гиротропными свойствами

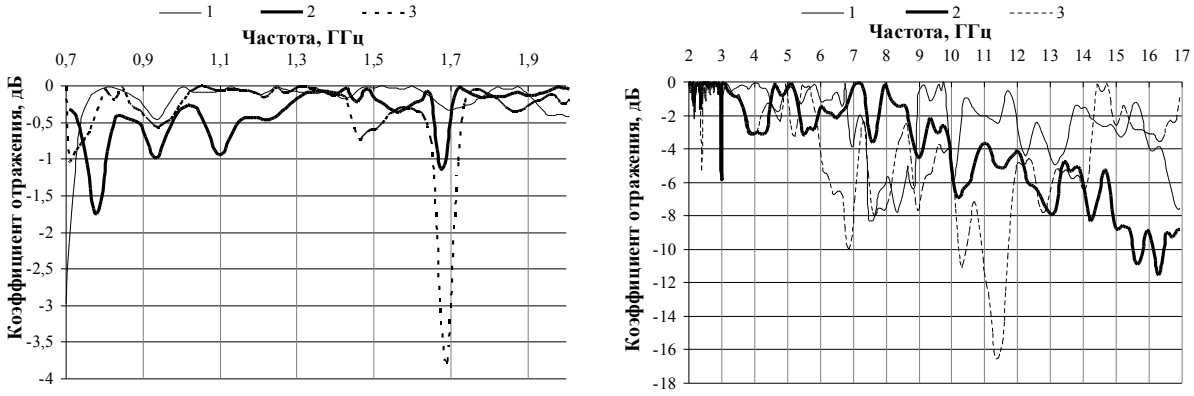
Из рис. 14 следует, что минимальное значение коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 0,7…17 ГГц экрана с гиротропными свойствами составляет –15 дБ и соответствует частотам, длина электромагнитных волн на которых эквивалента геометрическим размерам частей полосковых киральных элементов либо расстоянию между этими элементами или их частями. Количество резонансных частот в диапазоне 0,7…17 ГГц (частот, на которых регистрируется минимальное значение коэффициента отражения ЭМИ) предлагаемого экрана с гиротропными свойствами – 20, что свидетельствует о его широкополосности по сравнению с аналогами. Это обусловлено тем, что его полосковые киральные элементы характеризуются другой конфигурацией и состоят из большего количества частей по сравнению с аналогами [28].

Экспериментально обосновано, что дополнительное снижение значений коэффициента отражения ЭМИ экранов на основе алюминиевых материалов возможно путем нанесения на поверхность последних слоя оксида алюминия методом пористого анодирования в гальваностатическом режиме с постоянной плотностью тока. Определено, что толщина слоя анодного оксида алюминия, который может быть сформирован на поверхности фольгированных материалов с применением указанного метода, составляет 10…25 мкм. На рис. 15 представлены микрофотографии поверхности и скола фольги, содержащей слой оксида алюминия.

а *б*

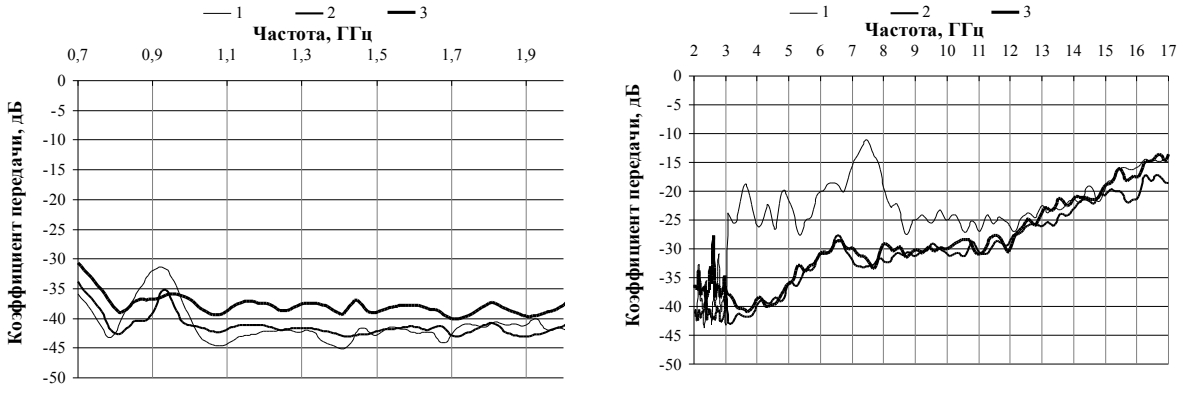
Рис. 15. Микрофотография поверхности (*а*) и скола (*б*) фольги, содержащей слой оксида алюминия

На рис. 16, 17 представлены частотные зависимости коэффициентов отражения и передачи фольги, содержащей слой анодного оксида алюминия, в зависимости от толщины последнего.



а *б*

Рис. 16. Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 0,7…2 ГГц (*а*) и 2…17 ГГц (*б*) фольги, содержащей слой оксида алюминия толщиной 10 мкм (кривая 1), 15 мкм (кривая 2) и 25 мкм (кривая 3)



а *б*

Рис. 17. Частотные зависимости коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне частот 0,7…2 ГГц (*а*) и 2…17 ГГц (*б*) фольги, содержащей слой оксида алюминия толщиной 10 мкм (кривая 1), 15 мкм (кривая 2) и 25 мкм (кривая 3)

Из рис. 16 и 17 следует, что величины коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 0,7…17 ГГц фольги, содержащей слой оксида алюминия толщиной 10 мкм, 15 мкм и 25 мкм соответственно изменяются в пределах от –0,1 до –7 дБ, от –0,1 до –12 дБ и от –0,1 до –17 дБ. Значения коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне частот 0,7…3 ГГц такой фольги независимо от толщины последнего – от –30 до –45 дБ. В диапазоне частот 3…17 ГГц величина указанного параметра для образцов, на поверхность которых нанесен слой анодного оксида алюминия толщиной 15–25 мкм, изменяется в пределах от –15 до –40 дБ. Установлено, что уменьшение в 2 раза толщины слоя оксида алюминия на поверхности фольги приводит к увеличению на 5…20 дБ значения ее коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне частот 2…11 ГГц [29, 30].

Модификация материалов для экранов ЭМИ с использованием метода химического осаждения металлов из водных растворов

Экспериментально обоснована возможность улучшения эффективности экранирования волокнистых и порошкообразных (силикагель, перлит, активированный уголь) материалов путем включения в их состав металлических частиц с использованием метода химического осаждения металлов (никеля или меди) из водных растворов [31]. Установлено снижение на 3…6 дБ значений коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 8…12 ГГц (при использовании металлического отражателя) ткани с наноструктурированным ферромагнитным микропроводом в результате химического осаждения из водных растворов частиц никеля и меди на поверхность ее волокон [32, 33].

Определено, что в результате модификации состава порошкообразного активированного угля путем химического осаждения в его поры никеля и меди обеспечивается снижение с –2 до –10…–14 дБ значений его коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 8…12 ГГц (при использовании металлического отражателя). При модификации аналогичным образом состава порошкообразного перлита можно обеспечить снижение с –7,5…–12,5 до –9,5…–14 дБ значений его коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 8…12 ГГц [34]. Также определено, что с использованием метода химического осаждения металлов из водных растворов можно обеспечивать варьирование экранирующих свойств порошкообразных и волокнистых материалов в оптическом диапазоне длин волн [35].

Список литературы

1. Водосодержащие капиллярно-пористые экраны электромагнитного излучения. Теория и практика / Н.В. Насонова [и др.]. Минск: Бестпринт, 2016. 238 с.
2. Влияние влажности на экранирующие характеристики радиопоглощающих материалов / Н.В. Насонова [и др.] // Вестник ГГТУ. 2013. № 2 (53). С. 86–91.
3. Shielding Properties of Electromagnetic Radiation Absorbers with Geometrical and Structure Heterogeneities / L.M. Lyn'kov [et al.] // Eng. & Tech. J. Part A. 2014. Vol. 32, № 12. P. 2891–2903.
4. Влияние температуры на экранирующие характеристики водосодержащих материалов / Н.В. Насонова [и др.] // Изв. Нац. акад. наук Беларуси. 2013. № 3. С. 117–122.
5. Влагосодержащие экраны для защиты пользователей бытовых и промышленных СВЧ-источников / под ред. Л.М. Лынькова // Биомедицинская радиоэлектроника. 2013. № 4. С. 50–56.
6. Композиционные влагосодержащие структуры для имитации биологической ткани / Т.А. Пулко [и др.] // Биомедицинская радиоэлектроника. 2011. № 3. С. 9–15.
7. Методика оценки воздействия импульсных магнитных полей на ткани организма человека / Н.В. Насонова [и др.] // Приборы. 2014. № 12 (174). С. 45–48.
8. Саванович С.Э., Борботько Т.В. Влияние вязкости водного раствора хлорида натрия, введенного в поры керамзита на его радиопоглощающие свойства // Изв. Нац. акад. наук Беларуси. 2016. № 2. С. 115–119.
9. Саванович С.Э., Борботько Т.В. Влияние размера пор влагосодержащего керамзита на его радиоэкранирующие характеристики // Матер. 13-й Междунар. науч.-техн. конф. «Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка». Минск, 16–18 мая, 2018 г. С. 337–339.
10. Богуш В.А. Композиционные влагосодержащие экраны электромагнитного излучения на основе сфагновых мхов // Докл. БГУИР. 2016. № 1 (95). С. 104–106.
11. Богуш В.А. Модифицирование водными растворами углеродосодержащих иглопробивных полотен для экранов электромагнитного излучения // Докл. БГУИР. 2016. № 3 (97). С. 95–98.

12. Молодечкин М.О., Богуш В.А. Методика формирования и характеристики композиционного поглотителя электромагнитного излучения СВЧ-диапазона на основе диоксида титана // Докл. БГУИР. 2015. № 4 (90). С. 109–115.
13. Экран электромагнитного излучения: пат. 9661 Респ. Беларусь / Л.М. Лыньков, О.В. Бойправ, Т.В. Борботько, В.Б. Соколов; дата публ.: 30.10.2013.
14. Бойправ О.В., Лыньков Л.М., Борботько Т.В. Влияние влагосодержания на электродинамические параметры порошкообразного перлита // Изв. Нац. акад. наук Беларуси. 2014. № 4. С. 9–13.
15. Бойправ О.В., Борботько Т.В. Влияние размера фракций влагосодержащего порошкообразного перлита на его значения проводимости // Докл. БГУИР. 2016. № 1 (95). С. 71–75.
16. Бойправ О.В., Лыньков Л.М., Борботько Т.В. Влияние температуры на характеристики отражения и передачи электромагнитного излучения перлитосодержащих экранов // Электронный журнал «Труды МАИ». 2014. № 75.
17. Бойправ О.В., Лыньков Л.М., Борботько Т.В. Экраны электромагнитного излучения на основе влагосодержащего порошкообразного перлита // Вестн. Полоцкого гос. ун-та. 2014. № 11. С. 75–80.
18. Комбинированные материалы для имитации естественных сред в видимом и инфракрасном диапазонах длин волн для систем защиты информации / Л.М. Лыньков [и др.]. Минск: Бестпринт, 2014. 159 с.
19. Электромагнитные экраны на основе наноструктурированных углеродосодержащих материалов / Е.С. Белоусова [и др.]. Минск: Бестпринт, 2018. 317 с.
20. Пулко Т.А., Айад Х.А.Э., Белоусова Е.С. Влияние состава композиционных покрытий на основе порошкообразного древесного угля на экранирование электромагнитных излучений // Докл. БГУИР. 2016. № 3 (90). С. 103–108.
21. Белоусова Е.С., Мохамед А.М.А., Аль-Адеми Я.Т.А. Гибкие углеродосодержащие поглотители электромагнитного излучения на основе волокнистых материалов // Докл. БГУИР. 2017. № 2 (104). С. 63–68.
22. Бойправ О.В., Белоусова Е.С. Влияние термообработки открытым пламенем перлитосодержащих конструкций экранов на их характеристики отражения и передачи электромагнитного излучения // Докл. БГУИР. 2016. № 6 (100). С. 80–85.
23. Белоусова Е.С., Бойправ О.В., Лыньков Л.М. Композиционные огнестойкие краски с углеродосодержащими компонентами для экранирования электромагнитного излучения // Вестн. Полоцкого гос. ун-та. 2017. № 11. С. 47–51.
24. Гибкие экраны электромагнитного излучения на основе углеродосодержащих клеевых составов / Е.С. Белоусова [и др.] // Докл. БГУИР. 2017. № 8 (110). С. 73–78.
25. Белоусова Е.С., Мохамед А.М.А., Касанин С.Н. Композиционные материалы на основе технического углерода и гидрогеля для скрытия объектов от средств технической разведки // Докл. БГУИР. 2016. № 1 (95). С. 64–70.
26. Белоусова Е.С., Мохамед А.М.А., Лыньков Л.М. Углеродосодержащие бетоны на основе измельченной древесины // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. 2015. Т. 7, № 3. С. 43–49.
27. Способ изготовления электромагнитного экрана и электромагнитный экран, изготовленный этим способом: пат. 21980 Респ. Беларусь / Л.М. Лыньков, О.В. Бойправ, Е.С. Белоусова, Т.В. Борботько, Д.В. Столер; дата публ.: 30.06.2018.
28. Электромагнитный экран с гиротропными свойствами: пат. 11795 Респ. Беларусь / Л.М. Лыньков, О.В. Бойправ, Н.В. Богуш; дата публ.: 30.10.2018.
29. Boiprav O.V., Lynkou L.M., Mukhurov N.I. Electromagnetic radiation shields based on anodic aluminum oxide // Dokl. BGUIR. 2018. № 7 (117). P. 159–161.
30. Электромагнитный экран на основе анодного оксида алюминия: пат. 11818 Респ. Беларусь / Л.М. Лыньков, О.В. Бойправ, Н.И. Мухуров; дата публ.: 30.10.2018.
31. Экраны электромагнитного излучения на основе магнитных материалов. Технологии. Конструкции. Применения / В.А. Богуш [и др.]. Минск: Бестпринт, 2016. 223 с.
32. Бойправ О.В., Ахмед А.А.А., Лыньков Л.М. Влияние химического осаждения никеля из водных растворов на характеристики отражения и ослабления электромагнитного излучения полиэфирной экранирующей ткани с вложением наноструктурного ферромагнитного микропровода // Докл. БГУИР. 2014. № 7 (85). С. 44–47.
33. Бойправ О.В., Ахмед А.А.А., Лыньков Л.М. Характеристики отражения и передачи электромагнитного излучения полиэфирной экранирующей ткани с вложением наноструктурного ферромагнитного микропровода, содержащей кластеры меди // Докл. БГУИР. 2015. № 3 (89). С. 49–52.
34. Бойправ О.В., Борботько Т.В. Радиопоглощающие свойства никелированного порошкообразного перлита // Вестн. Полоцкого гос. ун-та. 2016. № 3. С. 100–106.
35. Богуш В.А. Оптические свойства волокнистых и порошкообразных материалов с наноструктурированными проводящими покрытиями // Докл. БГУИР. 2016. № 4 (98). С. 93–97.

References

1. Vodosoderzhashhie kapilljarno-poristye jekrany jelektromagnitnogo izluchenija. Teorija i praktika / N.V. Nasonova [i dr.]. Minsk: Bestprint, 2016. 238 s. (in Russ.)

2. Vlijanie vlazhnosti na jekranirujushhie harakteristiki radiopogloshhajushhih materialov / N.V. Nasonova [i dr.] // Vestnik GGTU. 2013. № 2 (53). S. 86–91. (in Russ.)
3. Shielding Properties of Electromagnetic Radiation Absorbers with Geometrical and Structure Heterogeneities / L.M. Lyn'kov [et al.] // Eng. & Tech. J. Part A. 2014. Vol. 32, № 12. P. 2891–2903.
4. Vlijanie temperatury na jekranirujushhie harakteristiki vodosoderzhashhih materialov / N.V. Nasonova [i dr.] // Izv. Nac. akad. nauk Belarusi. 2013. № 3. S. 117–122. (in Russ.)
5. Vlagosoderzhashhie jekrany dlja zashhity pol'zovatelej bytovyh i promyshlennyh SVCh-istochnikov / pod red. L. M. Lyn'kova // Biomedicinskaja radiojelektronika. 2013. № 4. S. 50–56. (in Russ.)
6. Kompozicionnye vlagosoderzhashhie struktury dlja imitacii biologicheskoj tkani / T.A. Pulko [i dr.] // Biomedicinskaja radiojelektronika. 2011. № 3. S. 9–15. (in Russ.)
7. Metodika ocenki vozdejstvija impul'snyh magnitnyh polej na tkani organizma cheloveka / N.V. Nasonova [i dr.] // Pribory. 2014. № 12 (174). S. 45–48. (in Russ.)
8. Savanovich S.Je., Borbot'ko T.V. Vlijanie vjazkosti vodnogo rastvora hlorida natrija, vvedennogo v pory keramzita na ego radiopogloshhajushhie svojstva // Izv. Nac. akad. nauk Belarusi. 2016. № 2. S. 115–119. (in Russ.)
9. Savanovich S.Je., Borbot'ko T.V. Vlijanie razmera por vlagosoderzhashhego keramzita na ego radiojekranirujushhie harakteristiki // Mater. 13-j Mezhdunar. nauch.-tehn. konf. «Novye materialy I tehnologii: poroshkovaja metallurgija, kompozicionnye materialy, zashhitnye pokrytija, svarka». Minsk, 16–18 maja, 2018 g. S. 337–339. (in Russ.)
10. Bogush V.A. Kompozicionnye vlagosoderzhashhie jekrany jelektromagnitnogo izluchenija na osnove sfagnovyh mhov // Dokl. BGUIR. 2016. № 1 (95). S. 104–106. (in Russ.)
11. Bogush V.A. Modificirovanie vodnymi rastvorami uglerodosoderzhashhih igloprobivnyh poloten dlja jekranov jelektromagnitnogo izluchenija // Dokl. BGUIR. 2016. № 3 (97). S. 95–98. (in Russ.)
12. Molodechkin M.O., Bogush V.A. Metodika formirovanija i harakteristiki kompozicionnogo poglotitelja jelektromagnitnogo izluchenija SVCh-diapazona na osnove dioksida titana // Dokl. BGUIR. 2015. № 4 (90). S. 109–115. (in Russ.)
13. Jekran jelektromagnitnogo izluchenija: pat. 9661 Resp. Belarus' / L.M. Lyn'kov, O.V. Boiprav, T.V. Borbot'ko, V.B. Sokolov; data publ.: 30.10.2013. (in Russ.)
14. Boiprav O.V., Lyn'kov L.M., Borbot'ko T.V. Vlijanie vlagosoderzhanija na jelektrodinamicheskie parametry poroshkoobraznogo perlita // Izv. Nac. akad. nauk Belarusi. 2014. № 4. S. 9–13. (in Russ.)
15. Boiprav O.V., Borbot'ko T.V. Vlijanie razmera frakcij vlagosoderzhashhego poroshkoobraznogo perlita na ego znachenija provodimosti // Dokl. BGUIR. 2016. № 1 (95). S. 71–75. (in Russ.)
16. Boiprav O.V., Lyn'kov L.M., Borbot'ko T.V. Vlijanie temperatury na harakteristiki otrazhenija i peredachi jelektromagnitnogo izluchenija perlitosoderzhashhih jekranov // Jelektronnyj zhurnal «Trudy MAI». 2014. № 75. (in Russ.)
17. Boiprav O.V., Lyn'kov L.M., Borbot'ko T.V. Jekrany jelektromagnitnogo izluchenija na osnove vlagosoderzhashhego poroshkoobraznogo perlita // Vestn. Polockogo gos. un-ta. 2014. № 11. S. 75–80. (in Russ.)
18. Kombinirovannye materialy dlja imitacii estestvennyh sred v vidimom i infrakrasnom diapazonah dlin voln dlja sistem zashhity informacii / L.M. Lyn'kov [i dr.]. Minsk: Bestprint, 2014. 159 s. (in Russ.)
19. Jelektromagnitnye jekrany na osnove nanostrukturirovannyh uglerodosoderzhashhih materialov / E.S. Belousova [i dr.]. Minsk: Bestprint, 2018. 317 s. (in Russ.)
20. Pulko T.A., Ajad H.A.Je., Belousova E.S. Vlijanie sostava kompozicionnyh pokrytij na osnove poroshkoobraznogo drevesnogo uglja na jekranirovanie jelektromagnitnyh izluchenij // Dokl. BGUIR. 2016. № 3 (90). S. 103–108. (in Russ.)
21. Belousova E.S., Mohamed A.M.A., Al'-Ademi Ja.T.A. Gibkie uglerodosoderzhashhie poglotiteli jelektromagnitnogo izluchenija na osnove voloknistyh materialov // Dokl. BGUIR. 2017. № 2 (104). S. 63–68. (in Russ.)
22. Boiprav O.V., Belousova E.S. Vlijanie termoobrabotki otkrytym plamenem perlitosoderzhashhih konstrukcij jekranov na ih harakteristiki otrazhenija i peredachi jelektromagnitnogo izluchenija // Dokl. BGUIR. 2016. № 6 (100). S. 80–85. (in Russ.)
23. Belousova E.S., Boiprav O.V., Lyn'kov L.M. Kompozicionnye ognestojkie kraski s uglerodosoderzhashhimi komponentami dlja jekranirovanija jelektromagnitnogo izluchenija // Vestn. Polotskogo gos. un-ta. 2017. № 11. S. 47–51. (in Russ.)
24. Gibkie jekrany jelektromagnitnogo izluchenija na osnove uglerodosoderzhashhih kleevyh sostavov / E.S. Belousova [i dr.] // Dokl. BGUIR. 2017. № 8 (110). S. 73–78. (in Russ.)
25. Belousova E.S., Mohamed A.M.A., Kasanin S.N. Kompozicionnye materialy na osnove tehnicheskogo ugleroda i gidrogelja dlja skrytija ob#ektov ot sredstv tehnicheskoj razvedki // Dokl. BGUIR. 2016. № 1 (95). S. 64–70. (in Russ.)
26. Belousova E.S., Mohamed A.M.A., Lyn'kov L.M. Uglerodosoderzhashhie betony na osnove izmel'chennoj drevesiny // Nanotehnologii v stroitel'stve: nauchnyj internet-zhurnal. 2015. T. 7, № 3. S. 43–49. (in Russ.)
27. Sposob izgotovlenija jelektromagnitnogo jekrana i jelektromagnitnyj jekran, izgotovlennyj jetim sposobom:

pat. 21980 Resp. Belarus' / L.M. Lyn'kov, O.V. Boiprav, E.S. Belousova, T.V. Borbot'ko, D.V. Stoler; data publ.: 30.06.2018. (in Russ.)
28. Jelektromagnitnyj jekran s girotropnymi svojstvami: pat. 11795 Resp. Belarus' / L.M. Lyn'kov, O.V. Boiprav, N.V. Bogush; data publ.: 30.10.2018. (in Russ.)
29. Boiprav O.V., Lynkou L.M., Mukhurov N.I. Electromagnetic radiation shields based on anodic aluminum oxide // Dokl. BGUIR. 2018. № 7 (117). P. 159–161.
30. Jelektromagnitnyj jekran na osnove anodnogo oksida aljuminija: pat. 11818 Resp. Belarus' / L.M. Lyn'kov, O.V. Boiprav, N.I. Muhurov; data publ.: 30.10.2018. (in Russ.)
31. Jekrany jelektromagnitnogo izluchenija na osnove magnitnyh materialov. Tehnologii. Konstrukcii. Primenenija / V.A. Bogush [i dr.]. Minsk: Bestprint, 2016. 223 s. (in Russ.)
32. Boiprav O.V., Ahmed A.A.A., Lyn'kov L.M. Vlijanie himicheskogo osazhdenija nikelja iz vodnyh rastvorov na harakteristiki otrazhenija i oslablenija jelektromagnitnogo izluchenija polijefirnoj jekranirujushhej tkani s vlozheniem nanostrukturnogo ferromagnitnogo mikroprovoda // Dokl. BGUIR. 2014. № 7 (85). S. 44–47. (in Russ.)
33. Boiprav O.V., Ahmed A.A.A., Lyn'kov L.M. Harakteristiki otrazhenija i peredachi jelektromagnitnogo izluchenija polijefirnoj jekranirujushhej tkani s vlozheniem nanostrukturnogo ferromagnitnogo mikroprovoda, soderzhashhej klastery medi // Dokl. BGUIR. 2015. № 3 (89). S. 49–52. (in Russ.)
34. Boiprav O.V., Borbot'ko T.V. Radiopogloshhajushhie svojstva nikelirovannogo poroshkoobraznogo perlita // Vestn. Polockogo gos. un-ta. 2016. № 3. S. 100–106. (in Russ.)
35. Bogush V.A. Opticheskie svojstva voloknistyh i poroshkoobraznyh materialov s nanostrukturirovannymi provodjashhimi pokrytijami // Dokl. BGUIR. 2016. № 4 (98). S. 93–97. (in Russ.)

Сведения об авторах

Лыньков Л.М., д.т.н., профессор, Почетный профессор БГУИР, заместитель главного редактора научного журнала «Доклады БГУИР».

Богуш В.А., д.ф.-м.н., профессор, ректор Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Борботько Т.В., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой защиты информации Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Насонова Н.В., д.т.н., доцент, доцент кафедры защиты информации Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Белоусова Е.С., к.т.н., доцент, доцент кафедры защиты информации Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Бойправ О.В., к.т.н., доцент, доцент кафедры защиты информации Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Lynkou L.M., D.Sci, professor, Honorary professor of BSUIR, deputy editor-in-chief of the scientific journal «Doklady BGUIR».

Bogush V.A., D.Sci, professor, rector of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Borbot'ko T.V., D.Sci, professor, head of the department of information protection of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Nasonova N.V., D.Sci, associate professor, associate professor of the department of information protection of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Belousova E.S., PhD, associate professor, associate professor of the department of information protection of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Boiprav O.V., PhD, associate professor, associate professor of the department of information protection of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-17-293-89-38;
e-mail: leonid@bsuir.by;
Лыньков Леонид Михайлович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka st., 6
Belarusian state university
of informatics and radioelectronics
phone. +375-17-293-89-38;
e-mail: leonid @bsuir.by;
Lynkou Leonid Mikhailovich