

УДК 678.8:628.517.2.699.844

И.Д. Краев¹, Е.М. Шульдешов¹, М.М. Платонов¹, Г.Ю. Юрков¹**ОБЗОР КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, СОЧЕТАЮЩИХ
ЗВУКОЗАЩИТНЫЕ И РАДИОЗАЩИТНЫЕ СВОЙСТВА**

DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-4-60-67

Статья посвящена вопросам создания радиозвукозащитных материалов, рассмотрены области их применения. Описаны основные принципы работы радиотехнических и акустических материалов, приведена их классификация. Оценен мировой уровень существующих радиозвукозащитных материалов, обозначена необходимость использования комплексного подхода при разработке гибридных материалов, позволяющих добиться улучшения акустических и радиотехнических характеристик, уменьшения габарита и массы конструкций. Сделаны выводы о перспективах развития новых гибридных функциональных материалов.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 15.3. «Материалы и покрытия для защиты от ЭМИ, ударных, вибрационных, акустических и электрических воздействий» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Ключевые слова: электромагнитное излучение, шумовое загрязнение, радиотехнические характеристики, акустические свойства, радиозвукозащитные материалы.

This article is devoted to matters of creation of radio and acoustic shielding materials and describes the basic principles of their application. The basic principles of radio and acoustic materials, their classification are provided. The global level of the existing radio sound dampening materials is evaluated, the necessity of comprehensive approach to development of hybrid materials which ensure improvement of the acoustic and radio shielding properties and allow reducing construction dimensions and weight. Conclusions on the future of new hybrid functional materials development are done.

The work is executed within the implementation of the complex scientific direction 15.3. «Materials and coatings for protection against EME, shock, vibrating, acoustic and electric influences» («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].

Keywords: electromagnetic radiation, noise pollution, radio engineering characteristics, acoustic properties, radio and acoustic shielding materials.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

В последние десятилетия наша страна стремится к переходу на шестой технологический уклад, который неразрывно связан с развитием различных отраслей науки, техники и электроники. Происходит активное развитие нового поколения материалов и технологий [1], возрастает роль инновационной политики, значительно влияющей на функционирование всех отраслей экономики [2]. Высокими темпами развивается промышленность, увеличивается количество серийно выпускаемой продукции, соответствующей всем современным стандартам качества. Например, в последнее время происходит все большее замещение металлических материалов композиционными [3]. В том числе композиционные материалы начинают широко использоваться в космонавтике [4] и авиастроении [5]. Научные открытия дают возможность выйти на более высокий уровень развития, получить новый комплекс эксплуатаци-

онных характеристик и свойств [6]. Глобальное влияние фундаментальной и прикладной науки на экономику является залогом развития и благополучия любого государства.

Наряду с этим возникают проблемы негативных побочных воздействий на окружающую среду и человека. Современное общество серьезно озабочено вопросами экологии. Повышенный уровень шума относится к трем основным факторам, массово влияющим на загрязнение окружающей среды и заболеваемость людей [7]. Доказано, что повышенный уровень акустического шума приводит к различным заболеваниям нервной и сердечно-сосудистой систем [8]. В связи с этим во многих странах мира введены нормы по допустимому уровню шума. В черте современных городов и мегаполисов основными видами нежелательного акустического воздействия являются: промышленное и транспортное. Все чаще стандарты акустического комфорта становятся орудиями

конкурентной борьбы. Особенно это относится к снижению транспортного шума, например, снижение шумов автомобильных и авиационных двигателей, наземного и подземного железнодорожного транспорта. В европейских странах экономические затраты на защиту от нежелательных шумов составляют ~1–2% от ВВП, в то время как в России решению данных проблем уделяют недостаточное внимание [9].

С развитием научно-технического прогресса связан еще один вид негативного воздействия, защита от которого в нашей стране встречается крайне редко. Под данным воздействием подразумевается нежелательное электромагнитное излучение (ЭМИ). В ряде иностранных государств приняты требования и нормы по электромагнитной совместимости, распространенные на технические средства, подверженные влиянию всех видов электромагнитных помех и являющихся их источниками. К техническим источникам ЭМИ относятся радиостанции и радары, индукционные и микроволновые печи, высокочастотные сушильные установки, люминесцентные лампы, двигатели, установки для дуговой сварки, цифровые приборы, силовая электроника, ЭВМ и т. д. В связи с возрастающими темпами внедрения во все сферы жизни общества и отрасли экономики микроэлектроники, оборудования информационных технологий и средств радиосвязи, обладающих повышенной чувствительностью к электромагнитным помехам, необходима их защита [10]. Нежелательные ЭМИ также вредны для здоровья человека, в некоторых клинических исследованиях отмечалось, что данный тип воздействия может являться причиной онкологических заболеваний [11].

В настоящее время одним из основных общеизвестных способов снижения нежелательного акустического и электромагнитного воздействия является использование защитных материалов. Хотя акустические и электромагнитные волны обладают различной природой, все чаще можно встретить объекты, подверженные негативному воздействию обоих видов излучения или являющихся их источниками. К таким объектам относятся: токоприемники вагонов монорельсовой железной дороги, серверные помещения и оборудование, электродвигатели и электротранспорт, различные средства связи, телекоммуникации и радиолокации, специальные помещения и устройства, к акустической и электромагнитной безопасности которых выдвинуты особые требования — например, переговорные комнаты и т. д. В связи с этим возникает необходимость создания гибридных материалов, обладающих звуко- и радиозащитными свойствами. Задача данного обзора — дать сводку о современном состоянии существующих радиозвукозащитных материалов (РЗМ). Основное внимание уделено РЗМ, оценены тенденции их развития и сделаны выводы о дальнейших перспективах их использования.

Материалы и методы

Для защиты от нежелательных воздействий (электромагнитных и звуковых), как правило, используются материалы и покрытия следующих типов: поглощающие и изолирующие (экранирующие). Защита объектов экранирующими материалами достигается за счет отражения волн от поверхности материала (экрана). При этом нередко происходит усиление отраженного сигнала за счет интерференции волн. Применение экранирующих материалов целесообразно в случаях возможности корректной работы объектов, являющихся источниками излучения, в условиях повышенного акустического или электромагнитного фона, а также при нахождении защищаемых объектов снаружи защитного экрана. В остальных случаях применяют поглощающие материалы, принцип работы которых основан на переходе энергии колебаний в тепловую энергию. Благодаря чему они обладают низким коэффициентом отражения по сравнению с экранирующими материалами.

В настоящее время в основном разрабатывают материалы, обладающие разными радиотехническими характеристиками, структурой и составом, способные обеспечивать защиту от электромагнитных волн [12], либо звукозащитные материалы и конструкции [13, 14], работоспособные в различных температурных диапазонах, а также методы оценки каждого вида материалов в отдельности. Например, оценку радиопоглощающих материалов возможно провести волноводным методом [15] или в свободном пространстве [16]. Как правило, определяют комплексную диэлектрическую проницаемость [17] и коэффициент отражения [18]. В случае с акустическими материалами существуют стандартные методы исследования материалов с применением серийного оборудования (например, низкочастотный интерферометр) в области частот от 50 до 6400 Гц, а также различные методики, позволяющие расширить измеряемый диапазон в область высоких частот [19]. В связи с этим целесообразно кратко рассмотреть данные типы материалов отдельно.

Радиотехнические материалы делятся на радиоэкранирующие и радиопоглощающие. К *радиоэкранирующим* относятся электропроводящие материалы, как правило, это листы металлов, металлические сетки. Такие материалы находят применение в строительстве в качестве изоляторов оконных и дверных проемов от электромагнитных воздействий определенных радиочастот [20].

Радиопоглощающие материалы встречаются в виде покрытий, непосредственно наносимых на изделия или их элементы как в процессе изготовления, так и в процессе эксплуатации, и в виде конструкций, представляющих собой композиционные структуры, способные нести силовые нагрузки.

Радиопоглощающие покрытия (РПП), как правило, представляют собой композиционные материалы, наполненные функциональными частицами различных составов и морфологии [21]. Матрица таких композиционных материалов должна обладать высокой адгезией к различным типам поверхностей. В зависимости от назначения и условий эксплуатации РПП имеют различный рабочий диапазон частот, могут состоять как из одного слоя, так и из нескольких [22], обладать повышенной гидрофобностью и быть негорючими [23].

Конструкционные радиопоглощающие материалы (КРПМ), как правило, представляют собой композиционные материалы, состоящие из нескольких слоев непроводящих тканей, пропитанных раствором связующего с функциональным наполнителем [24]. Примером такого материала является монолитный стеклопластик радиотехнического назначения [25].

При взаимодействии электромагнитного излучения с радиопоглощающими материалами в последних имеют место поглощение (диэлектрические и магнитные потери), рассеяние (вследствие структурной неоднородности радиопоглощающих материалов) и интерференция радиоволн. Радиопоглощающие материалы с диэлектрическими потерями, как правило, представляют собой композиционные материалы, содержащие функциональный наполнитель, за счет которого энергия электрического поля переходит в тепловую. Под действием внешнего электромагнитного поля в функциональных частицах диэлектрического типа возбуждается электрический ток, который затухает за счет собственного сопротивления частиц, а также переориентации возбужденных частиц наполнителя (диполей) по отношению к направлению вектора напряженности действующего внешнего электрического поля, что приводит к переходу электромагнитной энергии в тепловую. Начиная с 50-х годов прошлого века, в качестве наполнителей диэлектрического типа выступали электропроводящая сажа, позже – углеродные волокна. Как правило, РПМ диэлектрического типа обладают высокими габаритными характеристиками. Для уменьшения их толщины при сохранении или расширении рабочего частотного диапазона, в последнее время в качестве наполнителя используют наноразмерные углеродные частицы [26]. К тому же наночастицы, введенные в матрицу, не только задают радиотехнические характеристики получаемых материалов, но и оказывают армирующее действие, что является еще одной их отличительной особенностью [27].

Интерференционные радиопоглощающие материалы состоят из чередующихся диэлектрических и проводящих слоев, в которых происходит наложение падающих и отраженных электромагнитных волн от электропроводящих слоев в противофазе, что и приводит к затуханию электромагнитного излучения. При этом данные материа-

лы, как правило, узкополосные и настроены на конкретный рабочий диапазон частот.

Градиентные радиопоглощающие материалы диэлектрического типа имеют многослойную структуру с плавным или ступенчатым изменением комплексной диэлектрической проницаемости по толщине, обычно по гиперболическому закону [12]. Внешний (входной или согласующий слой) изготавливают из диэлектрического материала с большим содержанием воздушных включений (например, из пенопласта) с диэлектрической проницаемостью, близкой к единице. Остальные поглощающие слои – из диэлектриков с высокой диэлектрической проницаемостью с поглощающим проводящим наполнителем диэлектрического типа, например – углеродные волокна, углеродные нанотрубки. Условно к градиентным радиопоглощающим материалам относят также материалы с рельефной внешней поверхностью, образуемой выступами в виде шипов, конусов и пирамид, называемые шиповидными радиопоглощающими материалами. Уменьшению коэффициента отражения в них способствует многократное переотражение волн от поверхности шипов, с поглощением части энергии волн при каждом отражении [12].

Комбинированные радиопоглощающие материалы представляют собой сочетание радиопоглощающих материалов градиентного и интерференционного типов. Они отличаются эффективностью действия в расширенном диапазоне волн [28].

Помимо материалов диэлектрического типа широкое применение получили материалы магнитного типа, в которых в качестве наполнителя используются ферромагнитные и ферритовые порошки разных составов и морфологии, основой которых служит триада: железо, кобальт и никель. При взаимодействии электромагнитной волны с наполнителем магнитного типа происходит переориентация магнитных областей (доменов) функциональных частиц в зависимости от вектора магнитной напряженности. Наряду с этим для магнитного наполнителя характерен второй вид потерь, связанный с появлением затухающих вихревых токов при действии на частицы внешнего электромагнитного поля. Такие материалы по сравнению с материалами диэлектрического типа, как правило, обладают меньшей толщиной, что позволяет применять их в качестве покрытий. Технология изготовления композитов с магнитными потерями заключается во введении функциональных порошков в матрицу и последующем их перемешивании и формировании получаемых смесей или термическом разложении металлсодержащих соединений в матрице до получения состава, ослабляющего действие ЭМИ [29].

Для определения состава и структуры РПМ, как правило, проводятся комплексные исследования методами просвечивающей и растровой электронной микроскопии, рентгенофазового анализа, мессбауэровской спектроскопии, электронного

магнитного резонанса и т. д. Исследуются электрофизические и магнитные свойства синтезированных материалов, а также коэффициенты отражения (КО) и прохождения (КП) в различных частотных диапазонах [30]. Отмечено, что радиотехнические характеристики зависят не только от состава и морфологии наполнителя, но и от температурных условий, в которых находится материал [31].

Акустические материалы разделяются на звукоизоляционные и звукопоглощающие. Звукоизоляционные материалы в большинстве случаев представляют собой акустически жесткие монолитные структуры или конструкции со сплошной входной поверхностью, которая отражает большую часть падающей на нее волны. Как правило, используют материалы из металла, бетона, пластика и т. д. Следует отметить, что в ряде случаев, например – в строительстве или авиации, применяют теплозвукоизоляционные материалы, представляющие собой высокопористые пены или пористоволокнистые материалы [32], в которых доминирующую роль играет обеспечение теплоизоляции. Звукоизоляция данных материалов ниже, чем звукоизоляция жестких монолитных материалов.

Звукопоглощающие материалы условно можно разделить на два типа: диссипативные и резонансные [33]. В материалах диссипативного типа звуковая энергия переходит в тепловую за счет трения молекул воздуха в порах, а также трения между воздухом и поверхностью материала. К ним можно отнести пористоволокнистые, открыто пористые, закрыто пористые материалы и т. д. Данные материалы, как правило, эффективны в области средних и высоких частот (от 400 Гц и выше). В области низких частот для достижения высоких показателей звукопоглощения требуется большая толщина материала, которая может достигать нескольких десятков сантиметров. Поэтому для снижения шума на низких частотах в отдельных случаях применяют конструкции, основанные на эффекте резонансного поглощения.

Резонансные поглотители состоят из одного или нескольких слоев, каждый из которых настроен на определенный диапазон частот, в котором наблюдается пик поглощения звука. Слой, как правило, представляет собой перфорированный лист (или акустическую сетку), установленную на определенном расстоянии от жесткой глухой стенки (в случае однослойного материала) или перфорированного листа (или акустической сетки) с иной степенью перфорации (в случае многослойного материала). Входной слой обладает большим процентом перфорации, чем последующие. В ряде случаев, например в звукопоглощающих конструкциях авиационных двигателей, используют ячеистые структуры (например сотопласт), расположенные между перфорированными слоями, позволяющие ограничить продольное распространение звука в межслоевом простран-

стве. Тыльная сторона конструкции, как правило, имеет жесткую глухую стенку. Принцип действия таких конструкций основан на эффектах поглощения и рассеяния излучения резонатором. Падающая волна возбуждает колебания в узкой части резонатора (в качестве которого в данном случае выступает отверстие перфорации), что приводит к снижению энергии за счет трения воздуха. Далее волна, входящая в резонатор, за счет отражения от тыльной жесткой стенки изменяет свою фазу на обратную и, складываясь с поступающей из источника в противофазе волной, гасит ее. Таким образом, настройка резонансной частоты в случае однослойных ЗПК или резонансных частот в случае многослойных ЗПК происходит за счет изменения геометрических параметров, таких как высота сотового наполнителя, процент перфорации, диаметр отверстий и толщина лицевой панели [9].

Вышеописанные материалы находят широкое применение в различных отраслях жизнедеятельности человека – авиастроении, машиностроении, медицине и т. д. Однако существует ряд объектов, в которых необходимо реализовать защиту как от электромагнитных, так и от акустических волн. Данная проблема обуславливает необходимость создания гибридных материалов, сочетающих радиозащитные и звукозащитные свойства. Следует отметить, что существует ряд радиопоглощающих материалов, способных поглощать звук. В таких материалах звукопоглощение осуществляется по остаточному принципу, что не позволяет достичь высоких акустических характеристик. Решение описанной проблемы требует детального исследования особенностей создания гибридных материалов, основанного на изучении волновых процессов различной физической природы, состоящих в том, что единые законы колебаний и волн механического и электромагнитного происхождения являются отражением многочисленных общих черт, объективно присущих этим процессам [34].

В настоящее время уже существует ряд РЗМ, сочетающих как изолирующие свойства от той или иной волны, так и поглощающие. Материалы, способные эффективно поглощать как электромагнитные, так и акустические волны, встречаются достаточно редко.

Существующие РЗМ, как правило, представляют собой либо многослойные структуры, состоящие из чередующихся изолирующих и поглощающих слоев, либо комплекс защитных свойств обеспечивается монослеем материала.

Так, авторы работы [35] описывают многослойную конструкцию материала, состоящего из ферритосодержащих пластин на основе оксидов никеля, цинка, кобальта и железа при определенном соотношении масс. Поверх ферритосодержащих пластин установлены звукопоглощающие панели. Таким образом, радиопоглощающим слоем данного материала являются ферритосодержащие пластины, которые также повышают

коэффициент звукоизоляции, а панели, расположенные поверх пластин, поглощают звук. Существенным недостатком данного материала является его массово-габаритные характеристики.

Аналогичный принцип построения материала описан авторами работы [36], который включает звукопоглощающий слой, выполненный из пористой полимерной матрицы и радиопоглощающий слой, представляющий собой магнитный листовый материал (магнитоласт), с гранулированным, намагниченным ферритовым наполнителем. Авторы рекомендуют в качестве основы для нанесения покрытия использовать подложку из металла или состоящую из металлических элементов. Такое расположение имеет ряд преимуществ. Во-первых, приводит к повышению коэффициента звуко- и радиоизоляции. Во вторых, акустическая и электромагнитная волны, прошедшие через поглощающие слои, отражаются от металлической подложки, что приводит к повторному поглощению в передних слоях.

Поскольку применение экранирующих слоев положительно влияет на акустические и радиотехнические характеристики, они часто используются в РЗМ. Например, в работе [37] описывается многослойная панель, включающая радиопоглощающий, звукозащитный слои и радиоотражающий слой (экранирующий), представляющий собой металлическую сетку, расположенную между ними. Толщина звукозащитного и радиопоглощающего слоев может быть оптимизирована для достижения необходимых характеристик. В данном случае имеет смысл отметить, что металлическая сетка (в отличие от монолитной поверхности металла) отражает только радиоволны.

Подобная конструкция трехслойной звуко-радиопоглощающей панели описана в работе [38], которая также включает радиопоглощающий, звукопоглощающий, радиоотражающий слой.

Поскольку применение металлической сетки не приводит к заметному увеличению коэффициента звукоизоляции, то некоторые авторы используют дополнительный звукоизолирующий слой. Например, в работе [39] описана радиозвукопоглощающая панель, представляющая собой слоистую структуру, включающую следующие защитные слои: облицовочный, радиопоглощающий, радиоотражающий, звукопоглощающий и звукоизолирующий. Порядок расположения слоев представлен со стороны источника излучения. В таком случае радиопоглощающий и радиоэкранирующий слои должны быть акустически прозрачны, что вносит определенные ограничения для радиотехнических материалов.

Монослойные РЗМ представляют собой, как правило, полимерные композиты, содержащие функциональный наполнитель. Например, авторами в работе [40] описан поглотитель для безэховой камеры, обеспечивающий поглощение радиоволн и звука, выполненный в виде частиц графита

или феррита, расположенных в полимерном связующем. В работе [41] описан РЗМ, имеющий поглощающий слой из меламиновой смолы, содержащий наполнитель для поглощения звуко- и радиоволн. В работе [42] описана структура, поглощающая звук, радиоволны и радиационное излучение. Материал состоит из внешнего отражающего слоя и поглощающего слоя. Для эффективного звукопоглощения автор рекомендует применять эпоксидную смолу. При создании данных материалов выбор матрицы необходимо проводить с учетом максимально возможного коэффициента звукопоглощения при минимальном влиянии на радиотехнические характеристики материала, а функциональный наполнитель выбирать таким образом, чтобы было возможно достичь заданных радиотехнических характеристик с минимальным влиянием на параметры, определяющие звукопоглощающие свойства материалов, такие как импеданс, который определяется пористостью, плотностью и т. д. С этой точки зрения оптимальным вариантом является структура, описанная в работе [43], представляющая РЗМ, состоящий из нетканого материала, включающего большое число расположенных определенным образом углеродных и базальтовых волокон. В данном случае функциональный наполнитель в виде углеродных волокон способен поглощать не только электромагнитную, но и акустическую волны.

Интересной интерпретацией является РЗМ, описанный в работе [44], состоящий из радиопоглотителей четырехугольной пирамидальной формы, сделанных из негорючего пеностирола. Звукопоглотитель, составленный из развернутых квадратных и продольных пирамид и волокнистого материала, расположен в радиопоглотителе таким образом, чтобы образовывать ровную поверхность. В результате за счет использования пирамидальной формы материала электромагнитная волна не только поглощается, но и рассеивается, что часто является востребованным для применения в безэховых камерах.

С точки зрения расширения возможности применения РЗМ разрабатываются материалы, поглощающие один тип волн и изолирующие другой. Так, в работе [45] описана звуконепроницаемая радиопоглощающая панель, состоящая из звукопоглощающего материала ячеистой структуры, внутри которой расположен материал, состоящий из арамидных волокон, смешанных с частицами, имеющими радиопоглощающие свойства, скрепленных между собой эпоксидной смолой. В работе [46] описан звукоизолирующий, радиопоглощающий материал на основе смолы и функционального наполнителя. Таким образом, возможно создание материалов с различным сочетанием изолирующих и поглощающих свойств, что позволит достигать лучшего соотношения цены материала с требуемыми характеристиками.

Радиозвукозащитные материалы могут найти применение в различных, порой неожиданных областях. Например, авторы в работе [47] описывают радиопоглощающий звукоизолирующий дорожный экран, состоящий из элементов крепления и панели. Панель имеет оболочку из металлического материала (с открытой лицевой стороной) и поглотитель, обладающий звуко- и радиопоглощающими характеристиками, защищенный лицевой оболочкой, представляющей собой перфорированный лист из радиопрозрачного материала. Следует отметить, что металлическую подложку можно заменить композитным материалом с внутренней металлической прослойкой небольшой толщины.

С точки зрения авторов статьи приоритетными являются композиционные материалы с комплексом защитных свойств, которые обеспечены монослоем наполненной полимерной матрицы. В отличие от многослойных материалов, обладающих рядом недостатков, таких как габарит, необходимость соединения слоев, низкая технологичность изготовления и т. д., при реализации защитных свойств гибридных материалов для максимального снижения нежелательного воздействия необходимо поглощение акустических и электромагнитных волн, а не только экранирование. Появление в последнее время высокотехнологичного оборудования для изготовления волокон и материалов (например – использование метода электроформования) значительно расширяет возможности создания РЗМ и позволяет создавать наноструктурированные композиты – например, такие как приведены в работе [48], где описано защитное покрытие, включающее по меньшей мере два слоя полимерных нановолокон, скрепленных радиопрозрачным материалом. На каждый слой полимерных нановолокон ваку-

умным распылением нанесена пленка из гидрогенизированного углерода с вкрапленными в него частицами ферромагнитного или ферритмагнитного материала.

Результаты и обсуждение

Подавляющее большинство публикаций о РЗМ принадлежит одной из самых высокотехнологичных стран мира – Японии. Спектр вопросов, охватываемый публикациями (от придорожных экранов до узкоспециализированных материалов), демонстрирует, что в перспективе РЗМ могут найти широкое применение в различных сферах жизнедеятельности человека. В нашей стране данной проблеме не уделяют должного внимания, отсутствует комплексный подход при разработке РЗМ. Зачастую РЗМ называют материал, разработанный для поглощения электромагнитных волн, а звуковая волна поглощается ввиду акустической мягкости матрицы.

Для создания эффективных гибридных РЗМ необходимо совмещение в одной матрице радио- и звукопоглощающих свойств. Для этого требуется проведение комплексных исследований по нахождению взаимосвязи между физическими параметрами акустических и электромагнитных волн в средах и на границах сред. Исходя из полученных результатов, следует проводить выбор типа материала, параметров наполнителей и матрицы, удовлетворяющих требуемым характеристикам. В итоге возможно создание широкого спектра РЗМ, применение которых позволит не допустить научного отставания в этой перспективной области материаловедения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №15-38-20717 мол_а_вед.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России // *Металлы Евразии*. 2012. №3. С. 10–15.
3. Каблов Е.Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники // *Вестник Российской академии наук*. 2012. Т. 82. №6. С. 520–530.
4. Каблов Е.Н. *Авиакосмическое материаловедение // Все материалы*. Энциклопедический справочник. 2008. №3. С. 2–14.
5. Каблов Е.Н. *Химия в авиационном материаловедении // Российский авиационный журнал*. 2010. Т. LIV. №1. С. 3–4.
6. Гунаев Г.М., Каблов Е.Н., Алексахин В.М. Модифицирование конструкционных углепластиков углеродными наночастицами // *Российский химический журнал*. 2010. Т. LIV. №1. С. 5–11.
7. Иванов Н.И. Основные направления и проблемы экологической акустики // *Сб. тез. докл. XXVII сессии РАО*. СПб., 2014. С. 11.
8. Кочергина К.А., Жданова Е.А. К вопросу негативного влияния шумовой нагрузки на психофизиологию // *Вектор науки Тольяттинского государственного университета*. 2012. №2. С. 71–74.
9. Иванов Л.И. *Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом*. М.: Университетская книга–Логос. 2008. 424 с.
10. Малков Н.А., Пудовкин А.П. *Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств*. Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2007.
11. Перельмутер В.М., Ча В.А., Чуприкова Е.М. Меди-

- ко-биологические аспекты взаимодействия электромагнитных волн с организмом. Томск: Изд-во Томского политех. ун-та. 2009. 128 с.
12. Беляев А.А., Кондрашов С.В., Лепешкин В.В., Романов А.М. Радиопоглощающие материалы // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 348–352.
 13. Платонов М.М., Железина Г.Ф., Нестерова Т.А. Пористоволокнистые полимерные материалы для изготовления широкодиапазонных ЗПК и исследование их акустических свойств // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2014. №6. Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.07.2015). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-6-9-9.
 14. Фарафонов Д.П., Мигунов В.П. Изготовление пористоволокнистого материала сверхнизкой плотности для звукопоглощающих конструкций авиационных двигателей // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. №4. С. 26–30.
 15. Широков В.В., Романов А.М. Исследование диэлектрических характеристик стеклосотопласта волноводным методом // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. №4. С. 62–68.
 16. Беляев А.А., Романов А.М., Широков В.В., Шульдешов Е.М. Измерение диэлектрической проницаемости стеклосотопласта в свободном пространстве // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2014. №5. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.07.2015). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-5-6-6.
 17. Шульдешов Е.М., Лепешкин В.В., Романов А.М. Метод неразрушающего контроля комплексной диэлектрической проницаемости входных слабо наполненных слоев градиентных радиопоглощающих полимерных композиционных материалов // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2014. №10. Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.07.2015). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-10-11-11.
 18. Шульдешов Е.М., Лепешкин В.В., Романов А.М. Метод неразрушающего контроля коэффициента отражения радиопоглощающих полимерных композиционных материалов // *Контроль. Диагностика (в печати)*.
 19. Шульдешов Е.М., Лепешкин В.В., Платонов М.М., Романов А.М. Метод определения акустических характеристик звукопоглощающих материалов в расширенном до 15 кГц диапазоне частот // *Авиационные материалы и технологии (в печати)*.
 20. Катруша А.Н. Экспериментальные исследования ослабления радиоволн строительными и экранирующими материалами в диапазоне частот 800 МГц–17 ГГц // *Журнал радиоэлектроники*. 2013. №8. С. 4.
 21. Краев И.Д., Образцова Е.П., Юрков Г.Ю. Влияние морфологии магнитного наполнителя на радиопоглощающие характеристики композиционных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №S2. С. 10–14.
 22. Воронин И.В., Горбатов С.А., Науменко В.Ю., Петрунин В.Ф. Многослойные радиопоглощающие наноконпозиционные материалы и покрытия // *Физика и химия обработки материалов*. 2007. №4. С. 5–10.
 23. Пулко Т.А., Махмуд М.Ш., Борботько Т.В., Насонова Н.В., Лыньков Л.М. Разработка защитных экранов электромагнитного излучения на основе огнестойких материалов для экранирующих помещений // *Биомедицинская радиоэлектроника*. 2012. №11. С. 66–71.
 24. Агафонова А.С., Беляев А.А., Кондрашов Э.К., Романов А.М. Особенности формирования монолитных конструкционных радиопоглощающих материалов на основе композитов, наполненных резистивным волокном // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. №3. С. 56–59.
 25. Агафонова А.С., Кондрашов С.В. Особенности технологии изготовления монолитного стеклопластика радиотехнического назначения (МСРТ) // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №1. С. 30–33.
 26. Каблов Е.Н., Кондрашов С.В., Юрков Г.Ю. Перспективы использования углеродсодержащих наночастиц в связующих для полимерных композиционных материалов // *Российские нанотехнологии*. 2013. Т. 8. №3–4. С. 24–42.
 27. Акатенков Р.В., Алексашин В.Н., Аношкин И.В., Бабин А.Н., Богатов В.А., Грачев В.П., Кондрашов С.В., Минаков В.Т., Раков Э.Г. Влияние малых количеств функционализированных нанотрубок на физико-механические свойства и структуру эпоксидных композиций // *Деформация и разрушение материалов*. 2011. №11. С. 35–39.
 28. Латыпова А.Ф., Калинин Ю.Е. Анализ перспективных радиопоглощающих материалов // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2012. Т. 8. №6. С. 70–76.
 29. Фионов А.С., Юрков Г.Ю., Колесов В.В., Панкратов Д.А., Овченков Е.А., Кокшаров Ю.А. Композиционный материал на основе железосодержащих наночастиц для применения в задачах электромагнитной совместимости // *Радиотехника и электроника*. 2012. Т. 57. С. 597–608.
 30. Юрков Г.Ю., Кондрашов С.В., Краев И.Д. Наноконпозиаты на основе полиэтилена высокого давления и наночастиц кобальта: синтез, структура и свойства // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №S2. С. 29–33.
 31. Банный В.А., Пинчук Л.С., Гольдаде В.А. Физико-химические и технологические особенности формирования полимерных композиционных радиопоглощающих материалов // *Материаловедение*. 2007. №6. С. 17–24.
 32. Сытый Ю.В., Сагомонова В.А., Максимов В.Г., Бабашов В.Г. Звукотеплоизолирующий материал градиентной структуры ВТИ-22 // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. №2. С. 47–49.
 33. Железина Г.Ф., Бейдер Э.Я., Раскутин А.Е., Мигунов В.П., Столянков Ю.В. Материалы для звукопоглощающих конструкций самолетов // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2012. №4. С. 12–16.

-
34. Горелик Г.С. Колебания и волны. Введение в акустику, радиофизику и оптику. 2-е изд. М., 1959. 572 с.
 35. Безэховая камера: пат. 2113040 Рос. Федерация; опубл. 10.06.98.
 36. Многослойное звукопоглощающее покрытие: пат. 111061 Рос. Федерация; опубл., 10.12.11.
 37. Radio wave absorbing sound shielding panel: pat. 2002261489 Japan; publ. 13.09.02.
 38. Radio wave/sound wave absorber, radio wave/sound wave absorption panel, and unnecessary radio wave/sound wave suppression method: pat. 2005064401 Japan; publ. 10.03.05.
 39. Radio wave and sound absorbing panel: pat. 2006257762 Japan; publ. 28.09.06.
 40. Chamber whose internal walls are fitted with plastic bodies for the purpose of absorbing electromagnetic waves: pat. DE3811571 A1 FRG; publ. 19.10.89.
 41. Sound wave/radio wave absorber and its manufacturing method: pat. 2004146611 Japan; publ. 20.05.04.
 42. Sound, radio and radiation wave-absorbing, non-reflecting structure and method thereof: pat. 5536910 US; publ. 16.07.96.
 43. Radio wave-sound wave absorbing thermal insulation body: pat. 2006002429 Japan; publ. 05.01.06.
 44. Sound and radio wave absorber: pat. 10041675 Japan; publ. 13.02.98.
 45. Soundproof radio wave absorbing panel: pat. 2005325640 Japan; publ. 24.11.05.
 46. Sound insulating wall material with electromagnetic wave absorbing function: pat. 2006125156 Japan; publ. 18.08.06.
 47. Radio wave absorbing and sound insulating wall for road: pat. 2005061167 Japan; publ. 10.03.05.
 48. Защитное покрытие: пат. 2470967 Рос. Федерация; опубл. 27.12.12. Бюл. №36.
-