
Научная статья

УДК 678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-4-75-83

РАДИОПОГЛОЩАЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ ПОНИЖЕННОЙ ПЛОТНОСТИ (обзор)

Е.Е. Беспалова¹, А.А. Беляев¹, К.Л. Девин¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Рассмотрены вопросы создания радиопоглощающих полимерных композиционных материалов диэлектрического типа пониженной плотности. Приведены основные характеристики ряда разработанных отечественных и зарубежных вспененных радиопоглощающих материалов (РПМ), описаны технологии их получения и сферы применения, а также рассмотрены особенности РПМ для использования в безэховых камерах. Приведены характеристики РПМ пониженной плотности, разработанные в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Ключевые слова: радиотехнические материалы, радиопоглощающие материалы, пористые материалы, полимерные композиционные материалы, пониженная плотность, материалы для безэховых камер, поглотители электромагнитных волн

Для цитирования: Беспалова Е.Е., Беляев А.А., Девин К.Л. Радиопоглощающие материалы пониженной плотности (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 4 (110). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-4-75-83.

Scientific article

LOW DENSITY RADIO ENGINEERING MATERIALS (review)

Е.Е. Bespalova¹, А.А. Belyaev¹, К.Л. Devin¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. The article is devoted to the creation of radio-absorbing polymer composite materials of a dielectric type of reduced density. The main characteristics of a number of developed domestic and foreign foamed radio-absorbing materials are given, the technologies for their production, the scope of application are described and the features of radio-absorbing materials for use in anechoic camera are considered. The characteristics of the reduced density radio-absorbing materials developed at the Kurchatov Institute Research Center – VIAM are given.

Keywords: radio engineering materials, radio absorbing materials, porous materials, polymer composite materials, the lowered density, materials for anechoic camera, absorbers of electromagnetic waves

For citation: Bespalova E.E., Belyaev A.A., Devin K.L. Low density radio engineering materials (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 4 (110), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-4-75-83.

Введение

Современный уровень развития техники характеризуется высокой интеграцией разнообразной радиоэлектронной аппаратуры в едином функциональном объеме, что требует комплексного подхода для решения вопросов электромагнитной совместимости. Вместе с тем необходимо также решение вопросов в части облицовки помещений и стендов, предназначенных для проведения испытаний на электромагнитную совместимость, тестирования и настройки радиоэлектронной аппаратуры. Одним из эффективных способов решения указанных задач является применение полимерных композиционных материалов, в том числе радиопоглощающих материалов (РПМ) [1–3].

Радиопоглощающие материалы могут быть разделены по принципу взаимодействия с электромагнитным излучением (материалы диэлектрического и магнетодиэлектрического типов), а также по рабочему частотному диапазону (материалы узко- и широкополосные). Материалы с диэлектрическими потерями, поглощающие падающую электромагнитную волну в широком диапазоне частот, наиболее подходят для решения указанных ранее задач. В настоящее время разработана широкая номенклатура РПМ, представляющих собой полимерные композиционные материалы, состоящие из диэлектрической матрицы и проводящего наполнителя. Кроме того, РПМ условно можно разделить на конструкционные панели (стекло-, органопластик и др.), эластичные панели или листовый материал (на основе пенополиуретана, волокнистые маты, асбокартон и др.) и объемные блоки (пирамидальной или конусообразной формы, с трубчатой структурой и др.). Одновременно с необходимым уровнем значений коэффициента отражения РПМ должны удовлетворять требованиям по массогабаритным параметрам [4–7]. В этом плане особый интерес представляют РПМ пониженной плотности на основе вспененной или пористой матрицы. Такие материалы представляют собой гетерогенную систему с органической или неорганической матрицей и с введенными в их состав диспергированными проводящими частицами [8, 9]. Основными наполнителями РПМ диэлектрического типа являются углеродсодержащие материалы (сажа, углеродные или науглероженные волокна, нанотрубки, графит и др.).

Добиться в материале оптимального поглощения электромагнитных волн при минимальном их отражении от внешней границы раздела сред можно благодаря изменению в структуре материала диэлектрической проницаемости по экспоненциальному закону. Изменение реализуется путем применения неоднородных или многослойных структур, в которых действительная и мнимая части диэлектрической проницаемости обычно изменяются плавно или по ступенчатому закону соответственно, увеличиваясь от внешнего слоя к металлическому экрану (подложке) [10, 11]. Добиться изменения диэлектрической проницаемости возможно за счет неоднородного распределения в объеме материала в целом или послойно проводящего наполнителя, а также благодаря использованию различных объемных геометрических форм [12]. Радиопоглощающие материалы в виде объемных форм в основном находят применение для облицовки измерительных стендов или внутренних поверхностей безэховых камер, которые служат для проведения измерений и испытаний радиоэлектронного оборудования. Чаще всего такие поглотители состоят из пирамидальных радиопоглощающих элементов, способных поглощать падающее на их поверхность электромагнитное излучение с высокой эффективностью в широком диапазоне частот – от десятков мегагерц до десятков гигагерц. Для обеспечения безэховости в рабочей зоне $\sim(-60\div-45)$ дБ необходимо применение РПМ в виде объемных форм с уровнями отражения как минимум того же порядка. Проблема разработки малоотражающего материала для безэховых камер – это, по существу, проблема разработки переходного слоя с активными потерями, который при небольшой толщине осуществлял бы согласование свободного пространства

с полупространством, где электромагнитное поле отсутствует (например, с областью, ограниченной идеальным экраном) [13].

К РПМ малой плотности не предъявляются жесткие требования по прочностным характеристикам и стойкости к внешним воздействующим факторам. Однако в связи с тем, что безэховые камеры представляют собой помещения, в которых может находиться персонал, к выбору материалов предъявляют жесткие требования по горючести и дымовыделению. Кроме того, поскольку безэховые камеры по своей сути являются изолированными помещениями и могут быть значительных объемов, к РПМ предъявляют дополнительные требования, такие как отсутствие выделений вредных соединений при эксплуатации, удобство при монтаже и эксплуатации, минимальные габариты и масса, возможность использования в помещениях с определенным классом чистоты, а также минимальная стоимость.

В зависимости от технологии изготовления РПМ пониженной плотности могут иметь вариации значений электрофизических свойств. Технологии переработки РПМ позволяют получать как объемные, так и листовые материалы различных конфигурации и плотности. В качестве матриц для таких материалов часто используют пенопласты, пенорезины и поропласты (с закрытой и открытой пористостью), полученные путем вспенивания или порообразования полимерных композиций. Плотность материала определяется природой наполнителя, его формой и размером частиц, а также плотностью упаковки [14–18]. Основным преимуществом РПМ с пониженной плотностью и малыми значениями относительной диэлектрической проницаемости является возможность обеспечения минимальных значений отражения падающей электромагнитной волны от поверхностного слоя материала [19].

При разработке РПМ пониженной плотности главными задачами становятся расширение рабочего диапазона частот и снижение плотности материала без ухудшения радиотехнических характеристик.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 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») [20–22].

Радиопоглощающие материалы на основе вспененных матриц

В настоящее время для создания облегченных РПМ в качестве матрицы широко применяют пенополиуретан, обеспечивающий механические и эксплуатационные свойства материала и фиксирующий распределение частиц различных дисперсных электропроводящих наполнителей в его объеме. Исходные компоненты для получения пенополиуретана выпускают серийно, их разнообразное сочетание позволяет получать материал с различными технологическими характеристиками, отвечающими заданным требованиям. Пенополиуретан легко формовать как в виде листов (для получения РПМ малой толщины), необходимых для размещения на защищаемых поверхностях и обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронной аппаратуры, так и в виде пирамид для монтажа на стенах безэховых камер. Высота пирамид может достигать 1 м (в редких случаях – и более), рабочий диапазон электромагнитного излучения таких материалов обычно составляет от 100 МГц до 100 ГГц. Возможно также изготовление РПМ для безэховых камер в виде плоских матов различной толщины. Характеристики некоторых листовых поглотителей приведены в работе [23].

Радиопоглощающие материалы на полиуретановой основе сочетают такие эксплуатационные особенности, как пониженная плотность, гибкость и высокая адгезия к различным поверхностям. Отечественные и зарубежные разработки РПМ направлены

на улучшение технологических и эксплуатационных свойств материалов, в том числе на придание им огнестойкости.

Радиопоглощающий материал марки «Мох», разработанный в ООО НПП «Радиострим», представляет собой пирамидальные блоки из пенополиуретана с распределенным в объеме нанодисперсным наполнителем [24].

Материал выпускают в двух модификациях:

- одно- или многослойные листовые конструкции толщиной от 20 до 90 мм с коэффициентом отражения $\sim(-15\div-20)$ дБ в диапазоне длин волн от 0,3 до 10,0 см (3–100 ГГц);
- пирамидальные конструкции высотой от 250 до 500 мм с коэффициентами отражения $-30\div-40$ дБ в диапазоне длин волн от 0,3 до 50,0 см (0,6–100 ГГц) (рис. 1).



Рис. 1. Пирамидальный радиопоглощающий материал марки «Мох», разработанный в ООО НПП «Радиострим»

Материал может быть изготовлен во влагозащищенном или трудногорючем исполнении с использованием специальной пропитки.

Радиопоглощающие материалы марок АМФ-5, АМФ-10, АМР-20, АМР-30, АМР-45, АМР-60 и АМР-100, разработанные в ООО НПК «ТЕСАРТ», представляют собой диэлектрические панели пирамидального или плоского типа, изготовленные из эластичного пенополиуретана с углеродным наполнителем. На рис. 2 представлен материал серии АМР.



Рис. 2. Пирамидальный радиопоглощающий материал серии АМР, разработанный в ООО НПК «ТЕСАРТ»

Радиопоглощающие материалы пропитаны огнезащитным составом и соответствуют группе горючести Г1 по ГОСТ 30244–94. Возможен также выпуск материалов, соответствующих группе горючести Г4 [25].

Высота панелей материалов плоского типа варьируется от 50 до 1000 мм, значения коэффициента отражения: $\sim(-20\div-50)$ дБ в диапазоне рабочих частот от 0,2 до 100,0 ГГц.

Материалы марки C-RAM AR в виде листов и марки C-RAM SFC в виде пирамидальных конструкций, разработанные компанией Cuming Microwave Corporation (США), выполнены на основе вспененных полиуретанов и рассчитаны на средние значения плотностей потока падающей мощности СВЧ-излучения и температуры. Радиопоглощающие материалы отличаются гибкостью, малой массой и хорошими радиофизическими характеристиками. Для материала марки C-RAM AR коэффициент отражения составляет не более -20 дБ на частотах от 5 ГГц и более (рис. 3, а), а для пирамидального материала марки C-RAM SFC – не более $-45\div-50$ дБ при соотношении толщины материала и максимальной длины волны как $1/6$ к $1/5$ (рис. 3, б). Данные материалы являются хорошей основой для обеспечения высокого уровня безэховости испытательных камер [26].

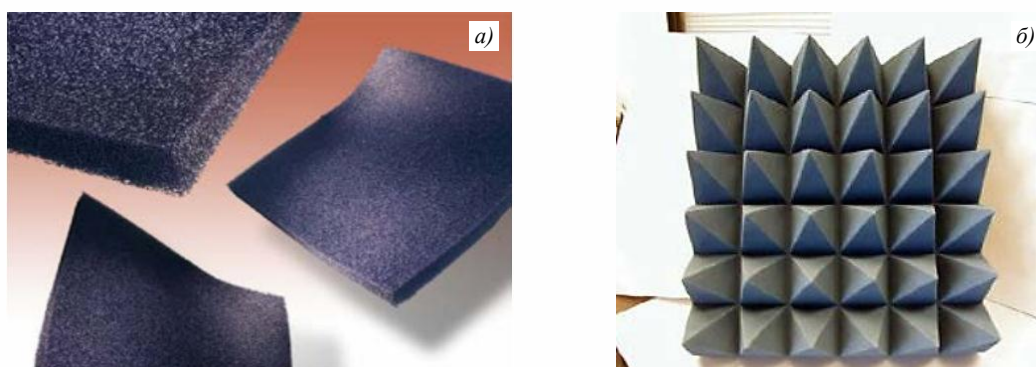


Рис. 3. Радиопоглощающие материалы марки C-RAM серий AR (а) и SFC (б), разработанные компанией Cuming Microwave Corporation (США)

Пирамидальный РПМ облегченного типа серии PF производства компании Frankonia (Германия) изготовлен из пенополиуретана. Материал получают путем литья пеноблока с его последующей резкой. Диапазон рабочих частот – от 30 МГц до 100 ГГц. Мощность поля, при которой может работать материал, 200 мВт/см^2 . Высота пирамид варьируется от 80 до 1000 мм. Внешний вид блока пирамидального материала серии PF представлен на рис. 4 [27].

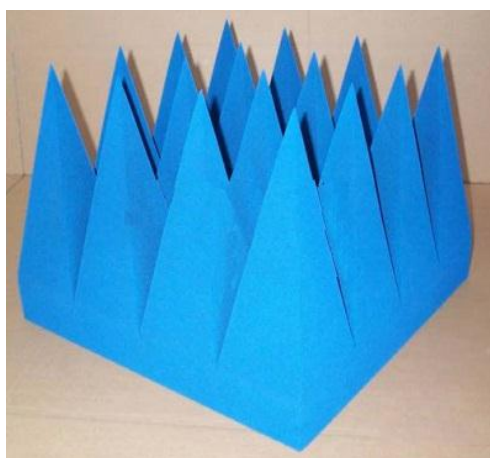


Рис. 4. Пирамидальный радиопоглощающий материал серии PF производства компании Frankonia (Германия)

В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработан большой ассортимент РПМ пониженной плотности, работоспособных в широком диапазоне частот. Материалы представляют собой структуру с одним или несколькими слоями из вспененной матрицы на основе неорганического волокна (асбест, базальт) либо закрытоячеистого пенополиуретана с распределенным в объеме углеродсодержащим наполнителем. Действительная часть диэлектрической проницаемости неорганической матрицы без введенного поглощающего наполнителя достигает значений 1,03 и зависит в том числе от плотности: для плит на основе вспененного асбеста средняя плотность составляет от 20 до 35 кг/м³, а на основе вспененного базальта – от 20 до 40 кг/м³. Это обстоятельство, а также подбор геометрических размеров и проводимости поглощающего наполнителя позволяют достигать минимального уровня коэффициента отражения от передней границы раздела сред «свободное пространство–материал», что, в свою очередь, ведет к увеличению уровня поглощения падающей электромагнитной волны в материале.

Радиопоглощающие материалы выпускают в виде калиброванных плит (листов) толщиной от 5 до 50 мм и размером до 600×1200 мм. Разработанные материалы имеют значения коэффициента отражения на рабочих частотах в диапазоне от 1 до 40 ГГц не более –25 дБ и могут использоваться для обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронной аппаратуры. Поскольку к материалам для безэховых камер предъявляются более жесткие требования по уровню коэффициента отражения – не более –40 дБ, то для обеспечения заданного уровня коэффициента плиты из РПМ с различным содержанием поглощающего наполнителя собирают в многослойные блоки. Конструктивное исполнение РПМ для безэховых камер в виде плоскостойких геометрически однородных по площади конструкций позволяет управлять направлением отраженной волны (в результате – степенью безэховости) путем конфигурирования на стенах безэховой камеры. Плоские панели РПМ также имеют значительно меньший уровень диффузного рассеяния электромагнитной волны по сравнению с пирамидальными и другими объемными формами. Это обстоятельство делает их конкурентоспособными по сравнению с РПМ на основе объемных форм.

Заключения

Радиопоглощающие материалы пониженной плотности, разработанные в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, имеют характеристики на уровне зарубежных аналогов, а их разнообразие по составу, массогабаритным показателям, радиофизическим свойствам и назначению дает возможность подобрать оптимальный вариант материала при решении задач электромагнитной совместимости радиоэлектронной аппаратуры или при расчете и проектировании безэховых камер. Вариативность предлагаемых РПМ пониженной плотности позволяет достаточно быстро разрабатывать новые материалы, отвечающие специальным требованиям по радиофизическим характеристикам.

Список источников

1. Железина Г.Ф., Соловьева Н.А., Макрушин К.В., Рысин Л.С. Полимерные композиционные материалы для изготовления пылезащитного устройства перспективного вертолетного двигателя // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 1 (50). С. 58–63. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-58-63.
2. Каблов Е.Н. Тенденции и ориентиры инновационного развития России: сб. науч.-информ. материалов. М.: ВИАМ, 2015. С. 530–538.
3. Девин К.Л., Агафонова А.С., Соколов И.И. Перспективы применения радиопоглощающих материалов для обеспечения электромагнитной совместимости бортового радиоэлектронного оборудования // *Труды ВИАМ*. 2020. № 8 (90). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 22.11.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-94-100.

4. Михайлин Ю.А. Специальные полимерные композиционные материалы. СПб.: Научные основы и технологии, 2014. С. 171–450.
5. Бойправ О.В., Лобунов В.В., Лыньков Л.М., Аль-Машатт Е.А.А. Исследование взаимодействия электромагнитного излучения инфракрасного диапазона длин волн с радиопоглопителями на основе металлсодержащих элементов // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 2 (59). С. 89–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-89-94.
6. Беспалова Е.Е., Беляев А.А., Широков В.В. Радиопоглощающие материалы для СВЧ-излучения высокой мощности // *Труды ВИАМ*. 2015. № 3. Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.03.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-3-7-7.
7. Ковнеристый Ю.К., Лазарева И.Ю., Раваев А.А. Материалы, поглощающие СВЧ-излучение. М.: Наука, 1982. 164 с.
8. Беляев А.А., Беспалова Е.Е., Романов А.М. Пожаробезопасные радиопоглощающие материалы для безэховых камер // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. № 1. С. 53–55.
9. Беляев А.А., Агафонова А.С., Антипова Е.А., Ботаногова Е.Д. Конструкционный радиопоглощающий материал трехслойной структуры с согласующим слоем // *Труды ВИАМ*. 2013. № 7. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 22.11.2021).
10. Беспалова Е.Е., Кондрашов Э.К. Особенности корректировки рецептуры пожаробезопасного материала для безэховых камер при изменении параметров радиопоглощающего наполнителя // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. № 2. С. 48–52. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-2-48-52.
11. Михайлин Ю.А. Волокнистые полимерные композиционные материалы в технике. СПб.: Научные основы и технологии, 2013. 720 с.
12. Мицмакер М. Ю., Торгованов В.А. Безэховые камеры СВЧ. М.: Радио и связь, 1982. С. 89–95.
13. Богущ В.А., Борботько Т.В., Гусинский А.В. и др. Электромагнитные излучения. Методы и средства защиты. Минск: Бестпринт, 2003. 401 с.
14. Мийченко И.П. Технология полуфабрикатов полимерных материалов. СПб.: Научные основы и технологии, 2012. 373 с.
15. Волков В.П., Зеленецкий А.Н., Сизова М.Д. и др. Получение радиозащитных полимерных материалов пониженной горючести // *Пластические массы*. 2008. № 6. С. 42–46.
16. Гращенков Д.В., Щетанов Б.В., Тинякова Е.В., Щеглова Т.М. О возможности использования кварцевого волокна в качестве связующего при получении легковесного теплозащитного материала на основе волокон Al_2O_3 // *Авиационные материалы и технологии*. 2011. № 4. С. 8–14.
17. Аристова Е.Ю., Денисова В.А., Дрожжин В.С. и др. Композиционные материалы с использованием полых микросфер // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 1 (50). С. 52–57. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-52-57.
18. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: учеб. пособие / под ред. А.А. Берлина. 3-е испр. изд. СПб.: Профессия, 2011. С. 298–301.
19. Бибииков С.Б., Смольникова О.Н., Прокофьев М.В. Диэлектрические свойства и СВЧ-проводимость пористых радиопоглощающих материалов // *Радиотехника*. 2011. № 3. С. 62–76.
20. 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.
21. Каблов Е.Н. Роль химии в создании материалов нового поколения для сложных технических систем // Тез. докл. XX Менделеевского съезда по общей и прикладной химии. Екатеринбург: УрО РАН, 2016. С. 25–26.
22. Каблов Е.Н., Семенова Л.В., Петрова Г.Н., Ларионов С.А., Перфилова Д.Н. Полимерные композиционные материалы на термопластичной матрице // *Известия высших учебных заведений. Сер.: Химия и химическая технология*. 2016. Т. 59. № 10. С. 61–71.
23. Лушина М.В., Паршин С.Г., Ржевский А.А. Современные экранирующие и радиопоглощающие материалы // *Системы управления и обработка информации*. 2011. № 22. С. 208–214, 223.
24. Радиопоглощающие материалы типа «Мох» // ООО НПП «Радиострим». URL: <http://www.radiostrim.ru/220-moh.htm> (дата обращения: 27.11.2020).

25. Радиопоглощающий материал // ООО НПК «ТЕСАРТ». URL: <http://https://tesart.ru/products/item/amp/> (дата обращения: 27.11.2020).
26. Emerson and Cuming_Microwave products // ЭлекТрейд-М. URL: http://eltrm.ru/editor/upload-files/Cuming_Microwave.pdf (дата обращения: 27.11.2020).
27. РПМ Frankonia PF пенного типа // ООО «Вилком холдинг». URL: http://radio.vilcom.ru/products/radiopoglosshaushie_materialy/549 (дата обращения: 27.11.2020).

References

1. Zhelezina G.F., Solovyeva N.A., Makrushin K.V., Rysin L.S. Polymer composite materials for manufacturing engine air particle separation of advanced helicopter engine. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 1 (50), pp. 58–63. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-58-63.
2. Kablov E.N. *Trends and guidelines for Russia's innovative development*: Collection scientific-inform. materials. Moscow: VIAM, 2015, pp. 530–538.
3. Devin K.L., Agafonova A.S., Sokolov I.I. Prospects for the use of radio-absorbing materials to ensure electromagnetic compatibility of avionics. *Trudy VIAM*, 2020, no. 8 (90), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 22, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-94-100.
4. Mikhailin Yu.A. *Special polymer composite materials*. St. Petersburg: Nauchnye osnovy i tekhnologii, 2014, pp. 171–450.
5. Boiprav O.V., Lobunov V.V., Lynkov L.M., Al-Mashat E.A.A. Research of interaction of infrared wave-length range electromagnetic radiation with radio-absorbent materials based on metal-containing elements. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 2 (59), pp. 89–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-89-94.
6. Bespalova E.E., Belyaev A.A., Shirokov V.V. Radar-absorbing materials for protection against high power microwave radiation. *Trudy VIAM*, 2015, no. 3, paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 17, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-3-7-7.
7. Kovneristy Yu.K., Lazareva I.Yu., Ravaev A.A. *Materials that absorb microwave radiation*. Moscow: Nauka, 1982, 164 p.
8. Belyaev A.A., Bespalova E.E., Romanov A.M. Fireproof radio absorbing materials for anechoic cameras. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2013, no. 1, pp. 53–55.
9. Belyaev A.A., Agafonova A.S., Antipova E.A., Botanogova E.D. Constructional radio absorbing material of three-layered structure with approval layer. *Trudy VIAM*, 2013, no. 7, paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 22, 2021).
10. Bespalova E.E., Kondrashov E.K. Features of updating of a composition of a fireproof material for anechoic chambers when changed of parameters radio absorbing filler. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2014, no. 2, pp. 48–52. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-2-48-52.
11. Mikhailin Yu.A. *Fibrous polymeric composite materials in engineering*. St. Petersburg: Nauchnye osnovy i tekhnologii, 2013. 720 p.
12. Mitsmakher M. Yu., Torgovanov V.A. *Anechoic microwave chambers*. Moscow: Radio i svyaz, 1982, pp. 89–95.
13. Bogush V.A., Borbotko T.V., Gusinsky A.V. etc. *Electromagnetic radiation*. Methods and means of protection. Minsk: Bestprint, 2003, 401 p.
14. Miychenko I.P. *Technology of semi-finished products of polymeric materials*. St. Petersburg: Nauchnye osnovy i tekhnologii, 2012, 373 p.
15. Volkov V.P., Zelenetsky A.N., Sizova M.D. Obtaining radioprotective polymeric materials of low combustibility. *Plasticheskiye massy*, 2008, no. 6, pp. 42–46.
16. Grashchenkov D.V., Shchetanov B.V., Tinyakova E.V., Shcheglova T.M. About possibility of use of quartz fiber as lightweight heat-protective material binding at receiving on the basis of Al₂O₃ fibers. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2011, no. 4, pp. 8–14.
17. Aristova E.Yu., Denisova V.A., Drozhzhin V.S. et al. Composite materials using hollow microspheres. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 1 (50), pp. 52–57. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-52-57.
18. *Polymer composite materials: structure, properties, technology*: textbook. Ed. A.A. Berlin. 3rd ed. St. Petersburg: Professiya, 2011, pp. 298–301.
19. Bibikov S.B., Smolnikova O.N., Prokofiev M.V. Dielectric properties and microwave conductivity of porous radio-absorbing materials. *Radiotekhnika*, 2011, no. 3, pp. 62–76.

20. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnyye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
21. Kablov E.N. The role of chemistry in the creation of new generation materials for complex technical systems. *Reports XX Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry*. Ekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2016, pp. 25–26.
22. Kablov E.N., Semenova L.V., Petrova G.N., Larionov S.A., Perfilova D.N. Polymer composite materials on a thermoplastic matrix. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy, ser.: Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*, 2016, vol. 59, no. 10, pp. 61–71.
23. Lushina M.V., Parshin S.G., Rzhovsky A.A. Modern shielding and radio-absorbing materials. *Sistemy upravleniya i obrabotka informatsii*, 2011, no. 22, pp. 208–214, 223.
24. *Radar-absorbing materials like "Moss"*. Available at: <http://www.radiostrim.ru/220-moh.htm> (accessed: November 27, 2020).
25. *Radio-absorbing material*. Available at: <http://https://tesart.ru/products/item/amp/> (accessed: November 27, 2020).
26. *Emerson and Cuming Microwave products*. Available at: http://eltn.ru/editor/upload-files/Cuming_Microwave.pdf (accessed: November 27, 2020).
27. *RPM Frankonia PF foam type*. Available at: http://radio.vilcom.ru/products/radiopogloshaushie_materialy/549 (accessed: November 27, 2020).

Информация об авторах

Беспалова Елена Евгеньевна, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Беляев Алексей Алексеевич, ведущий инженер-конструктор, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Девин Константин Леонидович, заместитель начальника лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Elena E. Bepalova, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Alexey A. Belyaev, Leading Design Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Konstantin L. Devin, Deputy Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 22.12.2021; одобрена и принята к публикации после рецензирования 13.01.2022.

The article was submitted 22.12.2021; approved and accepted for publication after reviewing 13.01.2022