



УДК 678.84

DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-3-7-7

РАДИОПОГЛОЩАЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОЙ МОЩНОСТИ

Е.Е. Беспалова

А.А. Беляев

В.В. Широков

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

Е.Е. Беспалова¹, А.А. Беляев¹, В.В. Широков¹

РАДИОПОГЛОЩАЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОЙ МОЩНОСТИ

Разработаны огнестойкий радиопоглощающий материал на основе неорганических волокон для облицовки безэховых камер, в которых проводят радиотехнические испытания в широком диапазоне частот, а также радиопоглощающие материалы и покрытия для защиты технических средств от мощных электромагнитных воздействий.

Ключевые слова: *радиопоглощающий материал, электромагнитная волна, безэховая камера, науглероженное волокно, оптимизация параметров, целевая функция.*

E.E. Besspalova, A.A. Belyaev, V.V. Shirokov

RADAR-ABSORBING MATERIALS FOR PROTECTION AGAINST HIGH POWER MICROWAVE RADIATION

This article is dedicated to the creation of fire-resistant radar-absorbing material based on inorganic fibers with the purpose to lining of anechoic chambers intended for different tests within a wide frequency range; radar absorbing materials and coatings for protection of hardware against high power electromagnetic influence were developed as well.

Keyword: *radar-absorbing material, electromagnetic wave, anechoic chamber, carbonized fiber, optimization of parameters, objective function.*

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 соответствии со стратегическими направлениями развития материалов и технологий их переработки на ближайшие 20 лет [1] большое внимание в работах послед-

них лет уделено композиционным [2, 3] и функциональным материалам [4, 5], а также их применению в авиа- и ракетостроении. В целях нормального функционирования летательных аппаратов и соблюдения безопасности полетов большое внимание уделяется электромагнитной совместимости (ЭМС) технических средств. Понятие ЭМС возникло еще в начале развития радиотехники и имело узкое смысловое значение – выбор частотного диапазона. В настоящее время под ЭМС понимается способность устройств функционировать с заданным качеством в определенной электромагнитной обстановке (ЭМО), не создавая при этом недопустимых электромагнитных помех другим техническим средствам и недопустимых электромагнитных воздействий на биологические объекты.

Основными источниками мощных электромагнитных помех (МЭМП) являются грозовые разряды, радиоэлектронные средства (мощные радиопередающие средства и радиолокационные станции), высоковольтные линии передачи, контактная сеть железных дорог, а также высоковольтные установки для научных исследований и технологических целей. Причем радиоэлектронные средства (РЭС) могут быть и объектами неблагоприятного воздействия МЭМП, и их источниками (например, радиопередающие средства), т. е. использоваться в качестве системы радиоподавления, создания организованных помех либо эти помехи создаются непосредственно в результате функционирования РЭС.

Несоблюдение требований ЭМС при проектировании, монтаже и эксплуатации военной и авиационной техники, объектов энергетики, связи и другого назначения приводит к нарушениям в работе этих объектов с серьезными экономическими последствиями.

Мощные радиопомехи охватывают достаточно широкий спектр частотного диапазона (от десятков герц до десятков гигагерц) и являются гармоническими сигналами, модулированными по амплитуде и частоте [6].

Как правило, основными источниками мощного электромагнитного излучения любых РЭС является антенна, направленно или ненаправленно излучающая поток электромагнитной энергии в окружающее пространство. Антенны радиолокационных станций (РЛС) в этом отношении наиболее опасные источники мощного излучения, так как обладают свойством концентрировать электромагнитную энергию в определенном направлении (имеют высокий коэффициент направленного действия, который может достигать значений порядка десятков тысяч).

Уже проведена огромная исследовательская и практическая работа, которая нашла отражение, прежде всего, в создании нормативной базы в области ЭМС в таких

международных организациях, как МЭК, СИСПР и др. В настоящее время продолжают интенсивно проводиться исследовательские работы: расширяется методическая база и создаются все более совершенные средства защиты от электромагнитных возмущений. Неотъемлемым элементом при проведении испытаний на стадии разработки, юстировки и стандартизации антенных и радиокомплексов, а также прочих радиотехнических устройств являются безэховые камеры (БЭК) [7]. Широкому внедрению БЭК в технику испытаний безусловно способствовала разработка новых широкополосных радиопоглощающих материалов (РПМ) и поглотителей электромагнитных волн [8–12], а также теории и методов проектирования БЭК [13, 14].

Проблеме ЭМС на борту летательных аппаратов и наземных объектах посвящены многие научные труды, где описаны в основном природа взаимных помех и методы их измерений. К техническим мерам обеспечения ЭМС относят: экранирование, рациональное пространственное размещение узлов и схем системы, установка электрических и пространственных фильтров, применение радиопоглощающих материалов [15–17].

Материалы и методы

Мощные излучения современных радиолокационных передатчиков создают опасность воздействия в весьма разнообразных ситуациях.

Сверхвысокочастотные поля представляют опасность для людей и окружающих объектов. В мощном СВЧ-поле происходит значительное поглощение энергии тканями организма и в связи с этим – повышение температуры тела. Пороговое значение плотности потока мощности величиной 5 Вт/см^2 соответствует полю СВЧ такого уровня, при котором возможно возгорание паров топлива. При испытаниях в БЭК есть опасность возгорания при излучении потока электромагнитной энергии высокой мощности и локализации в одной точке. Особенно опасны ситуации тестирования и эксплуатации антенн РЛС.

Многие производители радиопоглощающих материалов выпускают специальные поглотители для БЭК, в которых предполагаются испытания радиотехнических устройств высокой мощности излучения. Например, компания Emerson & Cuming Microwave Products, занимающая передовые позиции по разработке радиопоглощающих материалов более 60 лет, предлагает поглотители высокой мощности для задач, в которых используется высокая энергию излучения:

– ECCOSORB HFX-18-НС – полые, пирамидальной формы блоки с низкой плотностью размером 61×61 см и общей высотой ~45 см изготовлены с использованием углеродного покрытия;

– ECCOSORB HFX-18-НС имеет удельную мощность поглощения 1,5 Вт/см² или 15 кВт/м² (что в ~10 раз выше по сравнению со стандартным пирамидальным абсорбером ECCOSORB VHP-18-NRL на основе пенополиуретана); такие значения гарантированы без принудительного воздушного охлаждения/принудительной циркуляции воздуха, однако, в случае принудительного охлаждения значения поглощаемой мощности могут быть увеличены до 3 Вт/см² или 30 кВт/м². Частотный диапазон материала ECCOSORB® HFX-НС составляет от 750 МГц до 40 ГГц;

– ECCOSORB SPY изготовлен из прочной пены с открытыми ячейками, что позволяет циркулировать воздуху, повышающему удельную мощность поглощения – не менее 0,8 Вт/см² или 8 кВт/м² (что в ~2 раза выше по сравнению со стандартным пенообразным пирамидальным абсорбером ECCOSORB VHP). Частотный диапазон ECCOSORB®SPY-NRL составляет от 400 МГц до 90 ГГц.

Материалы ECCOSORB HT-98 и ECCOSORB HT-99, изготовленные из пенокерамики, можно применять при значительно более высокой мощности излучения, чем в случае поглотителей на основе полимерных матриц. Рабочая температура этих материалов от -60 до 350°C, коэффициент отражения (по мощности) составляет 2% в диапазоне от 2,6 до 26 ГГц для ECCOSORB HT-98 и 2% в диапазоне от 1 до 26 ГГц для ECCOSORB HT-99. Блоки этих материалов изготовлены таким образом, что при максимальной мощности излучения принудительное воздушное охлаждение рассеивает образующееся тепло. Так, при мощности 1,24 Вт/см² температура поглотителя не превышает 93°C, при 2,32 Вт/см² она будет не более 150°C, а при 3,1 Вт/см² – не более 200°C.

Французским производителем SIEPEL представлены поглотители серии АНР, специально предназначенные для облицовки мест, в которых предполагается высокая плотность мощности (от 2 Вт/см² и выше для незатухающих гармонических волн), а также применения в таких областях, как телекоммуникации/беспроводная связь, спутниковая связь, автомобильная и оборонная промышленность и т. д. Благодаря специальной открытой структуре эти поглотители могут выдерживать высокие температуры, возникающие при воздействии полей высокой напряженности.

Поглотители серии АНР обычно используют для облицовки «горячих точек» в безэховых камерах, в которых ожидается высокая концентрация энергии. Изготавлива-

ют их из сотовой фенольной матрицы. Блоки поглотителя целиком покрыты углеродным раствором, обеспечивающим им свойства поглощения электромагнитных волн, а их полая открытая структура создает пассивное воздушное охлаждение. В системах с высокими требованиями к поглощению энергии, в которых плотность мощности для незатухающих гармонических волн превышает 2 Вт/см^2 , через поглотители серии АНР можно пропускать сжатый воздух для повышения их устойчивости к мощности.

Характеристики поглотителя серии АНР:

Матрица	сотовая фенольная
Пропиточные средства	углеродный раствор, связующее вещество
Цвет	черный (неокрашенный)
Рабочие температуры	от -70 до +200°С
Максимально допустимая мощность (с возможностью повышения за счет принудительной вентиляции)	2 Вт/см^2 .
Способ крепления –	приклеивается на любую плоскую и чистую поверхность.

На примере передовых мировых разработчиков можно заметить, что основными тенденциями при создании радиопоглощающих материалов и покрытий для защиты технических средств от мощных электромагнитных воздействий являются:

- использование материалов с открытыми порами или ячеистой структуры, что позволяет воздуху циркулировать;
- возможность принудительного охлаждения, что позволяет повысить значения поглощаемой мощности до 3 Вт/см^2 (30 кВт/м^2);
- поиск термостойкого огнестойкого пропитывающего состава для предотвращения возгорания в случае локализации направленной энергии.

В ВИАМ разработан ряд материалов на основе неорганических волокон (базальтового, асбестового, кварцевого и др.) для облицовки БЭК, обладающих низким коэффициентом отражения – не более -30 дБ в диапазоне частот от 1 до 40 ГГц. Особое внимание уделяли пожаробезопасности материала – все выпускаемые в ВИАМ радиопоглощающие материалы для БЭК соответствуют АП-25 и являются негорючими или самозатухающими [7, 18].

Для обеспечения повышенных требований по пожаробезопасности, стойкости к воздействию электромагнитного излучения высокой мощности потока (локализации направленного потока), при разработке материалов для облицовки безэховых камер

выбрано направление создания многослойного волокнистого материала (мат или войлок) из термостойкого негорючего волокна – например, используют базальтовые, кварцевые, асбестовые или стеклянные волокна. Применение указанных волокон позволяет сохранять прочностные и диэлектрические характеристики при повышенных температурах. Для обеспечения заданной степени горючести разрабатываемого материала (снижение скорости распространения пламени и уменьшение размера прожога) необходимо обеспечить фиксацию волокон в структуре без применения органических связующих. Можно использовать свойство волокон асбеста фибриллировать и связываться без дополнительных связующих агентов, в качестве упрочняющих элементов могут быть использованы прутки или проволока, выполненные из диэлектрического материала. В системе также может быть использован адгезив для скрепления между собой волокон и слоев материала – фенольная, акриловая или латексная смолы [19, 20].

Для малого значения коэффициента отражения (КО) плотность РПМ вблизи его поверхности должна быть небольшой (желательно $\leq 100 \text{ кг/м}^3$), что обеспечивает величину относительной диэлектрической проницаемости ненаполненной матрицы на входе $\leq 1,2$. Плотность материала и концентрация поглотителя возрастают в направлении от входной плоскости РПМ, для того чтобы проникающие в него радиоволны поглощались с минимальными отражениями внутри материала.

Для достижения малого значения КО в широком секторе углов падения радиоволн на материал (от 0 до 75 град), в достаточно широком диапазоне длин волн предложен вариант создания немагнитного радиопоглощающего материала градиентного типа. Такие материалы обычно представляют собой многослойную структуру, обеспечивающую заданное изменение диэлектрической проницаемости в толще материала. Задача состояла в построении алгоритма для определения диэлектрической проницаемости слоев многослойной структуры с заданной диэлектрической проницаемостью среды [21, 22], причем структура может быть не только диэлектрически неоднородной, но и геометрически неоднородной. Материал собирают по принципу конструктора под требования заказчика, что позволяет решать задачи по обеспечению уровня безэховости, безопасности, экономичности и эргономичности в камере. Геометрически неоднородную структуру изготавливают, вырезая из многослойной структуры «клинья» или «пирамиды», и ее реальная диэлектрическая проницаемость может быть одинакова во всех слоях или изменяться от слоя к слою. Эквивалентная геометрически однородная многослойная структура позволяет использовать аппарат для расчета КО многослойной структуры из плоскопараллельных слоев.

Коэффициент отражения по мощности (ρ_P) определяют как отношение потоков мощности отраженной и падающей волны:

$$\rho_P = |\rho_E|^2 = |\rho_H|^2, \quad (1)$$

где ρ_E , ρ_H – коэффициенты отражения по напряженности электрического и магнитного полей соответственно.

Коэффициент отражения чаще всего выражают в дБ:

$$\rho_{дБ} = 101g(\rho_P) = 201g(|\rho_E|). \quad (2)$$

Величина КО по напряженности электрического поля на границе раздела двух немагнитных сред при прохождении волны из среды с относительной диэлектрической проницаемостью ϵ_1 в среду с относительной диэлектрической проницаемостью ϵ_2 определяется по формуле:

$$\rho'_{E_0} = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}}. \quad (3)$$

При вычислении КО многослойной структуры величина диэлектрической проницаемости в каждом слое влияет на формирование КО всей структуры, так как от соотношения диэлектрической проницаемости слоев зависят характеристики отражения и прохождения на границе раздела слоев, величина поглощения электромагнитной волны и соотношение фаз при интерференции волн, отраженных от различных границ раздела слоев [8, 9].

Расчет КО многослойных структур производят с помощью известных рекуррентных формул перехода от входной комплексной нормированной проводимости $(j-1)$ -го слоя ($Y_{вх_{j-1}}$) к входной комплексной нормированной проводимости j -го слоя ($Y_{вх_j}$). В безэховых камерах покрытие располагают обычно на металлической внутренней поверхности. Если эта поверхность неметаллическая, то для улучшения экранирующего действия и соответствия расчетным характеристикам с тыльной стороны РПМ (эта сторона обращена в сторону, противоположную источнику излучения) наносят имитатор металлического экрана. Этот имитатор металлического экрана может быть реализован с помощью фольги, металлической сети, металлизированной ткани.

Поскольку содержание углеродсодержащих волокон на 1,5–2 порядка меньше, чем основного наполнителя, можно рассматривать среду с неорганическими волокнами как матрицу с наполнителем и применять для расчета диэлектрической проницаемости формулу Оделевского для матричных смесей (4), выведенную для случая, когда диполи параллельны вектору напряженности статического электрического поля. Формула распространяется на случай переменного электромагнитного поля.

В основу расчета реальной диэлектрической проницаемости смеси по формуле Оделевского положена зависимость ее от геометрических размеров радиопоглощающего наполнителя в виде резистивных диполей, их объемной концентрации и диэлектрических характеристик для матричных смесей

$$\varepsilon = \varepsilon_m \cdot \left[1 + \frac{k \cdot (\varepsilon_n - \varepsilon_m)}{(1 - k/V) \cdot F \cdot (\varepsilon_n - \varepsilon_m) + \varepsilon_m} \right], \quad (4)$$

где ε_m – диэлектрическая проницаемость матрицы; ε_n – диэлектрическая проницаемость наполнителя, равная

$$\varepsilon_n = 1 + i \cdot \frac{60\lambda}{\rho}, \quad (5)$$

λ – длина волны, см; ρ – удельное сопротивление волокна, Ом·см; F – коэффициент деполяризации, который для диполей длиной l и диаметром d ($l > d$) равен

$$F = \frac{\ln\left(\frac{2l}{d}\right) - 1}{\left(\frac{l}{d}\right)^2}, \quad (6)$$

k – объемная концентрация наполнителя; V – критическая концентрация наполнителя, выше которой частицы контактируют друг с другом:

$$V = \frac{[3F \cdot (1 - F)]^{0,6}}{\left(4F \cdot \sqrt{\frac{1}{d}} + \frac{1 - F}{\sqrt{\frac{1}{d}}}\right)^{0,6}}. \quad (7)$$

При помощи методики расчета и метода оптимизации структуры смоделированы и изготовлены материалы для безэховых камер типа ВРБ и ВРМ-13.

Для материала типа ВРБ-3-80 проведены полигонные испытания для определения критериев и пороговых уровней радиочастотного сигнала, воздействие которого могло бы привести к изменению радиопоглощающих свойств. Исследуемый материал располагали на расстоянии 1 м перед антенной, излучающей радиосигнал на частоте 0,8 ГГц в импульсном режиме с длительностью импульсов 0,6 мкс, частотой повторения 500 Гц, импульсной мощностью 150 кВт. Радиотехнические характеристики измеряли до и по-

сле воздействия излучения в течение 2 ч с каждой стороны. Измерения свойств материала проводили в безэховой камере с помощью векторного анализатора цепей Agilent Technologies PNA и измерительных антенн.

В результате испытаний в диапазоне частот 0,6–1,0 ГГц среднее значение величины затухания после воздействия СВЧ-сигнала большой мощности стало не более -21,43 дБ (до воздействия – не более -22,04 дБ), в диапазоне частот 0,8–18,0 ГГц – не более -34,81 дБ (до воздействия – не более -34,43 дБ), в диапазоне частот 18,0–40,0 ГГц – не более -43,93 дБ (до воздействия – не более -44,88 дБ). Полученные результаты находятся в пределах погрешности измерений, поэтому можно сделать вывод, что воздействие СВЧ-излучения импульсной мощностью до 150 кВт не оказывает влияния на радиотехнические характеристики.

Результаты

Расчет широкополосных радиопоглощающих покрытий, эффективных в СВЧ-диапазоне, проводили по указанным формулам (4–7). В ходе проведенной работы установлена хорошая сходимость экспериментальных данных с расчетными.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 7–17.
2. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2008. №3. С. 2–14.
3. Каблов Е.Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники //Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82. №6. С. 520–530.
4. Доспехи для «Бурана». Материалы и технологии ВИАМ для МКС «Энергия–Буран» /Под общ. ред. Е.Н. Каблова М.: Фонд «Наука и жизнь». 2013. 128 с.
5. Беляев А.А., Кондрашов С.В., Лепешкин В.В., Романов А.М. Радиопоглощающие материалы //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 348–352.
6. Никольский В.В., Никольская Т.И. Электродинамика и распространение радиоволн. М.: URSS. 2012. С. 163–164.
7. Беляев А.А., Беспалова Е.Е., Романов А.М. Пожаробезопасные радиопоглощающие материалы для безэховых камер //Авиационные материалы и технологии. 2013. №1. С. 53–55.
8. 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.

9. Бибиков С.Б., Прокофьев М.В., Куликовский К.Э., Журавлев В.А. Разработка материалов и покрытий, используемых для проведения радиотехнических испытаний и обеспечения электромагнитной совместимости //Вопросы оборонной техники. Сер. «Технические средства противодействия терроризму». 2013. №5–6. С. 56–64.
10. Бибиков С.Б., Титов А.Н., Черепанов А.К. Синтез материала с заданным коэффициентом отражения в широком диапазоне частот и углов падения /В сб. трудов XV Международной науч.-технич. конф. «Радиолокация, навигация, связь». Воронеж. 2009. С. 1578–1584.
11. Бибиков С.Б., Засовин Э.А., Черепанов А.К., Хмельник Г.И. Математическое моделирование параметров многослойных радиопоглощающих покрытий /В сб. трудов XV Международной науч.-технич. конф. «Радиолокация, навигация, связь». Воронеж. 2009. С. 1585–1595.
12. Латыпова А.Ф., Калинин Ю.Е. Анализ перспективных радиопоглощающих материалов //Вестник Воронежского государственного технического ун-та. 2012. Т. 8. №6. С. 70–76.
13. Мицмахер М.Ю., Торгованов В.А. Безэховые камеры СВЧ. М.: Радио и связь. 1982. 129 с.
14. Маслов М.Ю., Семаков Л.М., Скачков Д.В. Испытательная безэховая камера диапазона 1200 МГц //Телекоммуникации и транспорт. 2009. Спец. вып. «Технологии информационного общества». С. 123–125.
15. 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 (viam-works.ru).
16. 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.
17. Радиопоглощающий материал: пат. 2417491 Рос. Федерация; опубл. 27.04.2011.
18. 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.
19. Гращенко 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.
20. Волков В.П., Зеленецкий А.Н. и др. Получение радиозащитных полимерных материалов пониженной горючести //Пластические массы. 2008. №6. С. 42–46.
21. Широков В.В., Романов А.М. Исследование диэлектрических характеристик стеклосотопласта волноводным методом //Авиационные материалы и технологии. 2013. №4. С. 62–68.

22. Бе́ляев А.А., Широков В.В., Романов А.М. Особенности оптимизации резонансных радиопоглощающих материалов немагнитного типа //Труды ВИАМ. 2014. №11. Ст. 05 (viam-works.ru).

REFERENCES LIST

1. Kablov E.N. Strategicheskie napravlenija razvitija materialov i tehnologij ih perera-botki na period do 2030 goda [Strategic directions of development of materials and technologies to process them for the period up to 2030] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 7–17.
2. Kablov E.N. Aviakosmicheskoe materialovedenie [Aerospace materials] //Vse materialy. Jenciklopedicheskij spravocnik. 2008. №3. S. 2–14.
3. Kablov E.N. Materialy i himicheskie tehnologii dlja aviacionnoj tehniki [Materials and chemical technologies, aircraft] //Vestnik Rossijskoj akademii nauk. 2012. T. 82. №6. S. 520–530.
4. Dospehi dlja «Burana». Materialy i tehnologii VIAM dlja MKS «Jenergija–Buran» [Armor for «Buran». Materials and technologies for the ISS VIAM «Energia–Buran»] /Pod obshh. red. E.N. Kablova M.: Fond «Nauka i zhizn'». 2013. 128 s.
5. Beljaev A.A., Kondrashov S.V., Lepeshkin V.V., Romanov A.M. Radiopogloshhajushhie materialy [Radio-absorbing materials] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 348–352.
6. Nikol'skij V.V., Nikol'skaja T.I. Jelektrodinamika i rasprostranenie radiovoln [Electrodynamics and propagation]. M.: URSS. 2012. S. 163–164.
7. Beljaev A.A., Bespalova E.E., Romanov A.M. Pozharobezopasnye radiopogloshhajushhie materialy dlja bezjehovyh kamer [Fireproof materials for radio-anechoic chambers] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №1. S. 53–55.
8. Lushina M.V., Parshin S.G., Rzhetskij A.A. Sovremennye jekranirujushhie i radiopogloshhajushhie materialy [Modern shielding and radio absorbing materials] //Sistemy upravlenija i obrabotka informacii. 2011. №22. S. 208–214, 223.
9. Bibikov S.B., Prokof'ev M.V., Kulikovskij K.Je., Zhuravlev V.A. Razrabotka materialov i pokrytij, ispol'zuemyh dlja provedenija radiotekhnicheskikh ispytanij i obespechenija jelektromagnitnoj sovmestivosti [Development of materials and coatings used for testing of radio and electromagnetic compatibility] //Voprosy oboronnoj tehniki. Ser. «Tehnicheskie sredstva protivodejstvija terrorizmu». 2013. №5–6. S. 56–64.
10. Bibikov S.B., Titov A.N., Cherepanov A.K. Sintez materiala s zadannym kojefficientom otrazhenija v shirokom diapazone chastot i uglov padenija [Synthesis of a material with a specified reflectivity in a wide range of frequencies and angles of incidence] /V sb. trudov XV Mezhdunarodnoj nauch.-tehnic. konf. «Radiolokacija, navigacija, svjaz'». Voronezh. 2009. S. 1578–1584.
11. Bibikov S.B., Zasovin Je.A., Cherepanov A.K., Hmel'nik G.I. Matematicheskoe modelirovanie parametrov mnogoslojnyh radiopogloshhajushhh pokrytij [Mathematical modeling of radar pa-

- rameters of multilayer coatings] /V sb. trudov XV Mezhdunarodnoj nauch.-tehnič. konf. «Radio-
lokacija, navigacija, svjaz'». Voronezh. 2009. S. 1585–1595.
12. Latypova A.F., Kalinin Ju.E. Analiz perspektivnyh radiopogloshhajushhih materialov [Analysis of
promising radar absorbing materials] //Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tehničeskogo
un-ta. 2012. T. 8. №6. S. 70–76.
 13. Micmaher M.Ju., Torgovanov V.A. Bezjehovye kamery SVCh [Microwave anechoic chambers].
M.: Radio i svjaz'. 1982. 129 s.
 14. Maslov M.Ju., Semakov L.M., Skachkov D.V. Ispytatel'naja bezjehovaja kamera diapazona 1200
MGc [Anechoic chamber test range 1200 MHz] //Telekommunikacii i transport. 2009. Spec. vyp.
«Tehnologii informacionnogo obshhestva». S. 123–125.
 15. Beljaev A.A., Agafonova A.S., Antipova E.A., Botanogova E.D. Konstrukcionnyj radiopogloshha-
jushhij material trehslojnoj struktury s soglasujushhim sloem [Structural radar-absorbing material
is a three-layer structure with a matching layer] //Trudy VIAM. 2013. №7. St. 02 (viam-works.ru).
 16. Agafonova A.S., Beljaev A.A., Kondrashov Je.K., Romanov A.M. Osobennosti formirovaniya
monolitnyh konstrukcionnyh radiopogloshhajushhih materialov na osnove kompozitov, napolnen-
nyh rezistivnym voloknom [Features of formation of monolithic structural radar absorbing materi-
als based composites filled with resistive fiber] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №3.
S. 56–59.
 17. Radiopogloshhajushhij material [Radar-absorbing material]: pat. 2417491 Ros. Federacija; opubl.
27.04.2011.
 18. Bespalova E.E., Kondrashov Je.K. Osobennosti korrekcirovki receptury pozharobezopasnogo ma-
teriala dlja bezjehovyh kamer pri izmenenii parametrov radiopogloshhajushhego napolnitelja [Fea-
tures adjustments recipe fireproof material for anechoic chambers when changing the radar absorb-
ing filler] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2014. №2. S. 48–52.
 19. Grashhenkov D.V., Shhetanov B.V., Tinjakova E.V., Shheglova T.M. O vozmozhnosti
ispol'zovanija kvarcevogo volokna v kachestve svjazujushhego pri poluchenii legkovesnogo tep-
lozashhitnogo materiala na osnove volokon Al_2O_3 [The possibility of using a silica fiber as a binder
in the preparation of a lightweight heat-fiber-based material Al_2O_3] //Aviacionnye materialy i
tehnologii. 2011. №4. S. 8–14.
 20. Volkov V.P., Zeleneckij A.N. i dr. Poluchenie radiozashhitnyh polimernyh materialov ponizhennoj
gorjuchesti [Study of the dielectric characteristics of the waveguide method steklosotoplasta]
//Plasticheskie massy. 2008. №6. S. 42–46.
 21. Shirokov V.V., Romanov A.M. Issledovanie dijelektricheskikh harakteristik steklosoto-plasta
volnovodnym metodom [Study of the dielectric characteristics of the waveguide method
steklosotoplasta] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №4. S. 62–68.

22. Beljaev A.A., Shirokov V.V., Romanov A.M. Osobnosti optimizacii rezonansnyh radiopogloshhajushih materialov nemagnitnogo tipa [Features optimization resonance absorbing materials such as non-magnetic] //Trudy VIAM. 2014. №11. St. 05 (viam-works.ru).