



УДК 678.84

DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-8-12-12

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК СЛОЕВ МНОГОСЛОЙНОГО
РАДИОПОГЛОЩАЮЩЕГО МАТЕРИАЛА
ДЛЯ БЕЗЭХОВЫХ КАМЕР НА ОСНОВЕ ВСПЕНЕННОГО
АСБЕСТА, НАПОЛНЕННОГО НАУГЛЕРОЖЕННЫМ
ВОЛОКНОМ**

Е.Е. Беспалова

А.А. Беляев

А.М. Романов

кандидат технических наук

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, А.М. Романов¹, В.В. Широков¹

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЛОЕВ
МНОГОСЛОЙНОГО РАДИОПОГЛОЩАЮЩЕГО МАТЕРИАЛА
ДЛЯ БЕЗЭХОВЫХ КАМЕР НА ОСНОВЕ ВСПЕНЕННОГО АСБЕСТА,
НАПОЛНЕННОГО НАУГЛЕРОЖЕННЫМ ВОЛОКНОМ**

Проведены экспериментальные исследования диэлектрических характеристик слоев многослойного радиопоглощающего материала, предназначенного для облицовки безэховых камер. Результаты измерений на трех частотах сравниваются с результатами расчетов. Анализ сравнения измеренных и расчетных характеристик показал их близкое совпадение и подтвердил правильность выбора эмпирических коэффициентов в формулах расчета диэлектрической проницаемости вспененного асбеста, наполненного науглероженным волокном.

Ключевые слова: радиопоглощающий материал, безэховая камера, науглероженное волокно, комплексная относительная диэлектрическая проницаемость.

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

**INVESTIGATION OF THE DIELECTRIC CHARACTERISTICS
OF DESIGNED FOR ANECHOIC CHAMBERS LAMINATED RADAR
ABSORBING MATERIAL LAYERS BASED WITH CARBONIZED FIBER
FILLED FOAM ASBESTOS**

Experimental investigation of the dielectric characteristics of designed for lining of anechoic chambers laminated radar absorbing material layers is performed. The results of measurements on 3 frequencies are compared with the results of calculations. Analysis comparing the measured and calculated characteristics showed close agreement and confirmed the selection of empirical coefficients in the formulas for the calculation of the permittivity of the foam asbestos filled with carbonized fiber.

Keywords: radar absorbing material, anechoic chamber, carbonized fiber, complex relative permittivity.

¹ Федеральное 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 уделяется композиционным [2, 3] и функциональным материалам и их применению в авиа- и ракетостроении. В частности, в последнее время широкое применение находят материалы, обеспечивающие поглощение электромагнитной энергии – радиопоглощающие материалы (РПМ). В работе [4] показано, что одним из направлений при создании РПМ является разработка таких материалов для облицовки внутренних поверхностей безэховых камер (БЭК), которые стали широко использоваться в последние десятилетия [5, 6]. С одной стороны, это связано с тенденцией усложнения и увеличения точности антенных измерений и стендовых испытаний радиокomплексов, с другой – с широким внедрением БЭК в технику для испытаний новых широкополосных радиопоглощающих материалов и поглотителей электромагнитных волн [7–10]. Обычно для обеспечения требуемой безэховости (-40÷-50 дБ) необходимо, чтобы РПМ для облицовки стен БЭК имел коэффициент отражения (КО) такого же уровня. Радиопоглощающий материал с таким низким КО в широкой полосе частот (в миллиметровом, сантиметровом и части дециметрового диапазона длин волн) может быть создан только в форме шипов. Изготовить такой РПМ достаточно сложно, так как требуются специальная оснастка и применение ручного труда. При специальной конфигурации стен безэховой камеры можно снизить требования к допустимому коэффициенту отражения РПМ до величин порядка -30÷-25 дБ, а в ряде случаев – и до -20 дБ. В таких РПМ плавное согласование со свободным пространством достигается обычно путем градиентности диэлектрической проницаемости по толщине материала. При этом величина относительной диэлектрической проницаемости изменяется от значения, близкого к 1 на входе, до больших значений (десятки) действительной и мнимой части в слое, примыкающем к поверхности камеры. Градиентность достигается благодаря многослойности структуры материала с изменением от слоя к слою содержания радиопоглощающего наполнителя.

Материалы и методы

В конце 80-х – начале 90-х годов XX века в г. Москве на Нагатинском заводе строительных материалов серийно выпускали РПМ «Саурп» на основе вспененного асбеста, в качестве поглощающего наполнителя в котором использовали науглероженное волокно «Углен-ЦШЭ». Коэффициент отражения этого материала в диапазоне частот >1,5 ГГц не превышал -20 дБ. Применение вспененного неорганического волокна в качестве основы РПМ (особенно кварцевого волокна [11], имеющего низкую диэлектри-

ческую проницаемость) позволяет уменьшить относительную диэлектрическую проницаемость ненаполненных слоев градиентного РПМ до величины 1,06–1,08. Значение КО на границе раздела свободного пространства с материалом основы при нормальном падении волны на поверхность в данном случае не превысит -34 дБ, поэтому можно создать РПМ с КО не выше -30 дБ в широкой полосе частот.

Так как БЭК представляет собой замкнутое пространство, то к материалам для нее предъявляются повышенные требования по пожарной безопасности – они должны быть негорючими или самозатухающими, а также при эксплуатации и горении не выделять вредных веществ. При создании пожаробезопасных материалов на основе полимерных материалов очень усложняются технологии их изготовления, но горючесть при этом снижается, хотя полностью и не устраняется, что показано в работе [12]. Применяя неорганические волокна, например вспененный асбест, можно решить эти проблемы.

В настоящее время налажено мелкосерийное производство слоев радиопоглощающего материала на основе вспененного хризотилового асбеста в ВЭТЦ ФГУП «ВИАМ» (г. Воскресенск Московской области). Благодаря тому что волокна асбеста имеют разветвленную структуру, после вспенивания отдельные из них сцепляются друг с другом и нет необходимости вводить органическое связующее. Это обеспечивает негорючесть такого материала. При склеивании слоев между собой с помощью клея ПВА степень пожаробезопасности не ухудшается, так как клей наносится только в нескольких точках, а не по всей границе раздела слоев. При этом многослойный РПМ остается пожаробезопасным.

В качестве радиопоглощающего наполнителя используют резистивное волокно, например науглероженное волокно типа «Углен». При соотношении его длины к диаметру более нескольких сотен его необходимая объемная концентрация составляет сотые и десятые доли процента [13].

Радиотехнические характеристики (коэффициент отражения в определенном диапазоне частот) многослойной градиентной структуры существенно зависят от общей толщины материала, числа слоев, толщины отдельных слоев, характеристик радиопоглощающего наполнителя. Наполнитель характеризуется геометрической формой и электродинамическими характеристиками (для резистивного волокна – диаметр, длина и удельное сопротивление).

В ВИАМ разработана и эффективно используется программа для численной оптимизации многослойных радиопоглощающих структур; аналогичные задачи решаются в работах [14, 15]. Оптимизируемые параметры для каждого слоя – диэлектрическая про-

ницаемость матрицы (не наполненной радиопоглощающим наполнителем), объемное содержание радиопоглощающего наполнителя, толщина слоев при заданной суммарной толщине, конфигурация наполнителя (для волокна – это отношение длины к диаметру).

Выбор науглероженного волокна – радиопоглощающего наполнителя – невелик. До начала 2000-х годов использовали науглероженные волокна: «Углен-ЦШЭ» (ОАО «Химволокно», г. С.-Петербург) с диаметром элементарного волокна 9 мкм и удельным сопротивлением 0,0012 Ом·м, а также «Углен-9» (ОАО «Химволокно», г. С.-Петербург и ОАО «Могилевский завод искусственного волокна», Беларусь) с диаметром элементарного волокна 9 мкм и удельным сопротивлением 0,00008 Ом·м. В настоящее время серийно выпускается науглероженное волокно «УВЖ-15С Эхо» (Светлогорское ПО «Химволокно», Беларусь) с диаметром элементарного волокна 7 мкм и удельным сопротивлением 0,00003 Ом·м. Мелкосерийное производство волокон типа «Углен-9» и «Углен-ЦШЭ» организовано в ВЭТЦ ФГУП «ВИАМ».

Алгоритм моделирования и оптимизации многослойной структуры РПМ для БЭК содержит выражения для расчета комплексной относительной диэлектрической проницаемости слоев в широком диапазоне частот. В этих выражениях используют формулу Дебая для непрерывного спектра времен релаксации [16–19], в которой имеются коэффициенты, определяемые эмпирически, присущие конкретным материалам и технологиям. Для определения этих коэффициентов необходимо провести измерения диэлектрической проницаемости образцов материала из слоев РПМ (в данном случае вспененного асбеста) при различном содержании волокна, например наполнителя «УВЖ-15С Эхо». В данной работе приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований диэлектрической проницаемости вспененного асбеста, наполненного науглероженным волокном «УВЖ-15С Эхо» длиной 10 мм. Метод расчета относительной комплексной диэлектрической проницаемости вспененного асбеста, наполненного науглероженным волокном «УВЖ-15С Эхо», приведен в работе [19]. В соответствии с этим методом эквивалентная относительная комплексная диэлектрическая проницаемость смеси $\epsilon_{\text{эКВ}}$, в которой вспененный асбест представляет собой матрицу, наполненную науглероженным волокном «УВЖ-15С Эхо», вычисляется по формуле:

$$\epsilon_{\text{эКВ}} = \epsilon_{\text{м}} + \frac{D \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2}{1 + \left(i \cdot \frac{\lambda_{\text{р}}}{\lambda} \right)^{1-\alpha_3}}, \quad (1)$$

где $\epsilon_{\text{м}}$ – относительная диэлектрическая проницаемость матрицы; D – диаметр релаксации

$$D = \frac{\epsilon_{\text{м}} \cdot K_{\text{v}}}{F}, \quad (2)$$

наиболее вероятная длина волны релаксации

$$\lambda_p = \frac{\varepsilon_m \cdot \rho_v}{60 \cdot F}, \quad (3)$$

где λ – длина волны в свободном пространстве; K_v – объемная концентрация наполнителя; ρ_v – удельное сопротивление наполнителя; F – коэффициент деполяризации, равный

$$F = \frac{\ln\left(2 \cdot \frac{l}{d}\right)}{\left(\frac{l}{d}\right)^2}, \quad (4)$$

где l и d – длина и диаметр волокна соответственно.

Коэффициент α_1 , приближенно учитывающий ориентацию вектора напряженности электрического поля относительно направления волокон, равен: 0,333 – при хаотической ориентации волокна; 0,5 – при ориентации волокна в плоскости, параллельной вектору напряженности электрического поля; 1 – при ориентации волокна в направлении вектора напряженности электрического поля.

Эмпирический коэффициент α_2 , определяемый экспериментально для конкретного материала и конкретной технологии, учитывает необходимость увеличения требуемой реальной концентрации по сравнению с теоретической, обратно пропорционален необходимому увеличению и для рассматриваемого материала равен $\sim 0,5$.

Эмпирический коэффициент α_3 , определяемый экспериментально для конкретного материала и конкретной технологии, учитывает разброс длины волны релаксации.

С учетом этих коэффициентов – при предположении хаотической ориентации волокна (поглощающего наполнителя) – проведены расчеты комплексной относительной диэлектрической проницаемости. Измерения проводили:

- на частотах 1,5 и 3,0 ГГц – волноводным методом в режимах короткого замыкания и холостого хода;
- при разрешении неоднозначности измерений – в соответствии с работами [20, 21];
- на частоте 10 ГГц – с помощью определения комплексного коэффициента прохождения [22].

Результаты

В табл. 1–3 сравниваются средние расчетные и экспериментальные значения диэлектрической проницаемости при различной частоте. Для каждой величины объемной концентрации K_v волокна (наполнителя) измерения проводили не менее чем на трех образцах. Отклонение результатов от среднего значения не превышает 10%. Для каждого образца измерения проводили при направлении вектора напряженности электрического поля параллельно (E_{\parallel}) и перпендикулярно (E_{\perp}) направлению движения образца на кон-

вейере при вспенивании волокна асбеста. (В таблицах ϵ^I , ϵ^{II} – действительная и мнимая части комплексной диэлектрической проницаемости соответственно.)

Таблица 1

Диэлектрическая проницаемость на частоте 1,5 ГГц

| $K_v, \%$ | E_{\parallel} | | E_{\perp} | | Среднее по поляризации | | Расчетные значения | |
|----------------------|-----------------|-----------------|--------------|-----------------|------------------------|-----------------|--------------------|-----------------|
| | ϵ^I | ϵ^{II} | ϵ^I | ϵ^{II} | ϵ^I | ϵ^{II} | ϵ^I | ϵ^{II} |
| 0 | 1,050 | 0 | 1,050 | 0 | 1,050 | 0 | 1,050 | 0 |
| $1,40 \cdot 10^{-4}$ | 1,069 | 0,028 | 1,061 | 0,026 | 1,065 | 0,027 | 1,080 | 0,025 |
| $3,70 \cdot 10^{-4}$ | 1,121 | 0,043 | 1,068 | 0,036 | 1,095 | 0,040 | 1,136 | 0,044 |
| $8,75 \cdot 10^{-4}$ | 1,250 | 0,111 | 1,215 | 0,095 | 1,232 | 0,103 | 1,222 | 0,098 |
| $1,40 \cdot 10^{-3}$ | 1,523 | 0,305 | 1,352 | 0,185 | 1,437 | 0,245 | 1,381 | 0,229 |
| $4,38 \cdot 10^{-3}$ | 1,925 | 0,455 | 1,871 | 0,407 | 1,898 | 0,431 | 2,051 | 0,632 |
| $6,00 \cdot 10^{-3}$ | 2,851 | 0,873 | 2,340 | 0,731 | 2,595 | 0,802 | 2,515 | 0,841 |
| $1,55 \cdot 10^{-2}$ | 3,352 | 1,735 | 3,146 | 1,433 | 3,249 | 1,594 | 3,654 | 1,703 |
| $3,70 \cdot 10^{-2}$ | 7,931 | 6,051 | 6,612 | 5,113 | 7,272 | 5,590 | 8,143 | 5,132 |

Таблица 2

Диэлектрическая проницаемость на частоте 3,0 ГГц

| $K_v, \%$ | E_{\parallel} | | E_{\perp} | | Среднее по поляризации | | Расчетные значения | |
|----------------------|-----------------|-----------------|--------------|-----------------|------------------------|-----------------|--------------------|-----------------|
| | ϵ^I | ϵ^{II} | ϵ^I | ϵ^{II} | ϵ^I | ϵ^{II} | ϵ^I | ϵ^{II} |
| 0 | 1,045 | 0,001 | 1,045 | 0,001 | 1,045 | 0,001 | 1,050 | 0 |
| $1,40 \cdot 10^{-4}$ | 1,062 | 0,021 | 1,057 | 0,014 | 1,059 | 0,017 | 1,070 | 0,018 |
| $3,70 \cdot 10^{-4}$ | 1,113 | 0,051 | 1,064 | 0,039 | 1,088 | 0,045 | 1,108 | 0,050 |
| $8,75 \cdot 10^{-4}$ | 1,166 | 0,100 | 1,152 | 0,086 | 1,159 | 0,093 | 1,168 | 0,097 |
| $1,40 \cdot 10^{-3}$ | 1,521 | 0,365 | 1,350 | 0,185 | 1,440 | 0,275 | 1,364 | 0,226 |
| $4,38 \cdot 10^{-3}$ | 1,613 | 0,529 | 1,443 | 0,376 | 1,528 | 0,452 | 1,629 | 0,524 |
| $6,00 \cdot 10^{-3}$ | 2,466 | 1,011 | 1,866 | 0,591 | 2,166 | 0,801 | 2,322 | 0,828 |
| $1,55 \cdot 10^{-2}$ | 3,199 | 2,001 | 2,982 | 1,867 | 3,091 | 1,934 | 3,410 | 1,990 |

Таблица 3

Диэлектрическая проницаемость на частоте 10,0 ГГц

| $K_v, \%$ | E_{\parallel} | | E_{\perp} | | Среднее по поляризации | | Расчетные значения | |
|----------------------|-----------------|-----------------|--------------|-----------------|------------------------|-----------------|--------------------|-----------------|
| | ϵ^I | ϵ^{II} | ϵ^I | ϵ^{II} | ϵ^I | ϵ^{II} | ϵ^I | ϵ^{II} |
| 0 | 1,042 | 0,003 | 1,042 | 0,001 | 1,042 | 0,002 | 1,045 | 0 |
| $1,40 \cdot 10^{-4}$ | 1,042 | 0,021 | 1,042 | 0,010 | 1,042 | 0,015 | 1,045 | 0,011 |
| $3,70 \cdot 10^{-4}$ | 1,052 | 0,038 | 1,044 | 0,028 | 1,048 | 0,033 | 1,052 | 0,031 |
| $8,75 \cdot 10^{-4}$ | 1,084 | 0,034 | 1,065 | 0,026 | 1,076 | 0,030 | 1,091 | 0,042 |
| $1,40 \cdot 10^{-3}$ | 1,125 | 0,210 | 1,082 | 0,120 | 1,103 | 0,115 | 1,121 | 0,115 |
| $4,38 \cdot 10^{-3}$ | 1,340 | 0,601 | 1,230 | 0,355 | 1,285 | 0,478 | 1,322 | 0,405 |
| $6,00 \cdot 10^{-3}$ | 1,582 | 1,005 | 1,368 | 0,565 | 1,474 | 0,785 | 1,440 | 0,622 |
| $1,55 \cdot 10^{-2}$ | 1,615 | 1,935 | 1,448 | 0,809 | 1,532 | 1,372 | 1,626 | 1,270 |

Обсуждение и заключения

Анализ экспериментальных исследований комплексной относительной диэлектрической проницаемости (табл. 1–3) вспененного асбеста, наполненного науглероженным волокном «УВЖ-15С Эхо», показал, что при вспенивании на конвейере асбеста, волокна наполнителя приобретают некоторую преимущественную ориентацию вдоль направления движения конвейера, что приводит к некоторой анизотропии величины составляющих комплексной диэлектрической проницаемости. Отклонения значений

этих составляющих от средней величины могут достигать до 20% от среднего значения. При проектировании радиопоглощающих материалов на основе наполненного вспененного асбеста, следует учитывать эту особенность. Расчеты коэффициентов отражения слоев проводили при следующих значениях эмпирических коэффициентов в выражении (1): $\alpha_1=0,333$, $\alpha_2=0,45$, $\alpha_3=1/12$. Анализируя результаты, приведенные в табл. 1–3, видно, что расчетные значения отличаются от измеренных (усредненных по поляризациям) в пределах 10–15%. Так как при расчете радиотехнических характеристик РПМ в расчетные формулы величина диэлектрической проницаемости входит под корнем квадратным, то вносимая ошибка будет в 2 раза меньше, чем ошибка при вычислении величины диэлектрической проницаемости, что вполне достаточно для практического применения.

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. Химия в авиационном материаловедении //Российский химический журнал. 2010. Т. LIV. №1. С. 3–4.
3. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2008. №3. С. 2–14.
4. Беляев А.А., Кондрашов С.В., Лепешкин В.В., Романов А.М. Радиопоглощающие материалы //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 348–352.
5. Мицмахер М.Ю., Торгованов В.А. Безэховые камеры СВЧ. М.: Радио и связь. 1982. 129 с.
6. Маслов М.Ю., Семаков Л.М., Скачков Д.В. Испытательная безэховая камера диапазона 30–1200 МГц //Телекоммуникации и транспорт. 2009. Спец. вып. «Технологии информационного общества». С. 123–125.
7. Латыпова А.Ф., Калинин Ю.Е. Анализ перспективных радиопоглощающих материалов //Вестник Воронежского гос. техн. ун-та. 2012. Т. 8. №6. С. 70–76.
8. Радиопоглощающий материал: пат. 2417491 Рос. Федерация; опубл. 27.04.2011.
9. Бибииков 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. Беляев А.А., Беспалова Е.Е., Романов А.М. Пожаробезопасные радиопоглощающие материалы для безэховых камер //Авиационные материалы и технологии. 2013. №1. С. 53–55.
11. 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.
12. Волков В.П., Зеленецкий А.Н. и др. Получение радиозащитных полимерных материалов пониженной горючести //Пластические массы. 2008. №6. С. 42–46.
13. 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.
14. Бибиков С.Б., Титов А.Н., Черепанов А.К. Синтез материала с заданным коэффициентом отражения в широком диапазоне частот и углов падения /В сб. материалов 15-й Международной науч.-технич. конф. «Радиолокация, навигация, связь». Воронеж. 2009. С. 1578–1584.
15. Бибиков С.Б., Засовин Э.А., Черепанов А.К., Хмельник Г.И. Математическое моделирование параметров многослойных радиопоглощающих покрытий /В сб. материалов 15-й Международной науч.-технич. конф. «Радиолокация, навигация, связь». Воронеж. 2009. С. 1585–1595.
16. Орешкин П.Т. Физика полупроводников и диэлектриков. М.: Высш. школа. 1977. С. 380–392.
17. Кинг Р., Смит Г. Антенны в материальных средах. Ч. 1. М.: Мир. 1984. С. 379–384.
18. Хмельник Г.И., Бибиков С.Б. Статистический анализ зависимости параметров распределения Дебая от удельных сопротивлений слоев многослойного РПП //Технологии электромагнитной совместимости. 2012. №4 (43). С. 45–51.
19. 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. 48–71.

20. Широков В.В., Романов А.М. Исследование диэлектрических характеристик стеклосотопласта волноводным методом //Авиационные материалы и технологии. 2013. №4. С. 62–68.
21. Беляев А.А., Широков В.В., Романов А.М. Исследование диэлектрических характеристик монолитных стеклопластиков радиотехнического назначения //Композитный мир. 2014 (в печати).
22. Беляев А.А., Романов А.М., Широков В.В., Шульдешов Е.М. Измерение диэлектрической проницаемости стеклосотопласта в свободном пространстве //Труды ВИАМ. 2014. №5. Ст. 06 (viam-works.ru).

REFERENCES LIST

1. Kablov E.N. Strategicheskie napravlenija razvitija materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 goda [Strategic directions of development of materials and technologies to process them for the period up to 2030] //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 7–17.
2. Kablov E.N. Himija v aviacionnom materialovedenii [Chemistry aviation materials] //Rossijskij himicheskij zhurnal. 2010. T. LIV. №1. С. 3–4.
3. Kablov E.N. Aviakosmicheskoe materialovedenie [Aerospace Materials] //Vse materialy. Jenciklopedicheskij spravocnik. 2008. №3. С. 2–14.
4. Beljaev A.A., Kondrashov S.V., Lepeshkin V.V., Romanov A.M. Radiopogloshhajushhie materialy [Radio-absorbing materials] //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 348–352.
5. Мичмаер М.Ю., Торгованов В.А. Беззеховые камеры СВЧ [Microwave anechoic chambers]. М.: Радио и связь'. 1982. 129 с.
6. Maslov M.Ju., Semakov L.M., Skachkov D.V. Ispytatel'naja bezzehovaja kamera diapazona 30–1200 MGc [Anechoic test range 30-1200 MHz] //Telekommunikacii i transport. 2009. Spec. vyp. «Технологии информационного общества». С. 123–125.
7. Latypova A.F., Kalinin Ju.E. Analiz perspektivnyh radiopogloshhajushhih materialov [Analysis of promising absorbing materials] //Vestnik Voronezhskogo gos. tehn. un-ta. 2012. T. 8. №6. С. 70–76.
8. Radiopogloshhajushhij material [Radar absorbing material]: pat. 2417491 Ros. Federacija; opubl. 27.04.2011.
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 jel-

- ektromagnitnoj sovmestivosti [Development of materials and coatings used for radio testing and electromagnetic compatibility] //Voprosy oboronnoj tehniki. Ser. «Tehnicheskie sredstva protivodejstvija terrorizmu». 2013. №5–6. S. 56–64.
10. Beljaev A.A., Bepalova 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.
 11. 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.
 12. Volkov V.P., Zeleneckij A.N. i dr. Poluchenie radiozashhitnyh polimernyh materialov ponizhennoj gorjuchesti [Getting radioprotective reduced flammability of polymeric materials] //Plasticheskie massy. 2008. №6. S. 42–46.
 13. Agafonova A.S., Beljaev A.A., Kondrashov Je.K., Romanov A.M. Osobennosti formirovaniya monolitnyh konstrukcionnyh radiopogloshhajushhih materialov na osnove kompozitov, napolnennyh rezistivnym voloknom [Features of formation of monolithic structural radar absorbing materials based composites filled with resistive fiber] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №3. S. 56–59.
 14. Bibikov S.B., Titov A.N., Cherepanov A.K. Sintez materiala s zadannym koefitsientom ota-zhenija 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. materialov 15-j Mezhdunarodnoj nauch.-tehnic. konf. «Radiolokacija, navigacija, svjaz'». Voronezh. 2009. S. 1578–1584.
 15. Bibikov S.B., Zasovin Je.A., Cherepanov A.K., Hmel'nik G.I. Matematicheskoe modelirovanie parametrov mnogoslojnyh radiopogloshhajushhih pokrytij [Mathematical modeling of radar parameters of multilayer coatings] /V sb. materialov 15-j Mezhdunarodnoj nauch.-tehnic. konf. «Radiolokacija, navigacija, svjaz'». Voronezh. 2009. S. 1585–1595.
 16. Oreshkin P.T. Fizika poluprovodnikov i dijelektrikov [Physics of semiconductors and dielectrics]. M.: Vyssh. shkola. 1977. S. 380–392.
 17. King R., Smit G. Antenny v material'nyh sredah [Antennas in material media]. Ch. 1. M.: Mir. 1984. S. 379–384.

18. Hmel'nik G.I., Bibikov S.B. Statisticheskij analiz zavisimosti parametrov raspredelenija Debaja ot udel'nyh soprotivlenij sloev mnogoslojnogo RPP [Statistical analysis of the relationship of the distribution parameters of the Debye resistivity layers of the multi-layer RPP] //Tehnologii jelektromagnitnoj sovmestivosti. 2012. №4 (43). S. 45–51.
19. Bepalova E.E., Kondrashov Je.K. Osobennosti korrekcirovki receptury pozharobezopasnogo materiala dlja bezjehovyh kamer pri izmenenii parametrov radiopogloshhajushhego napolnitelja [Features corrections recipe fireproof material for anechoic chambers when the parameters radar absorbing filler] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2014. №2. S. 48–71.
20. Shirokov V.V., Romanov A.M. Issledovanie dijelektricheskikh harakteristik steklosotoplasta volnovodnym metodom [Investigation of the dielectric characteristics of the waveguide method steklosotoplasta] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №4. S. 62–68.
21. Beljaev A.A., Shirokov V.V., Romanov A.M. Issledovanie dijelektricheskikh harakteristik monolitnyh stekloplastikov radiotekhnicheskogo naznachenija [Investigation of the dielectric characteristics of monolithic GRP radiotechnical destination] //Kompozitnyj mir. 2014 (v pečati).
22. Beljaev A.A., Romanov A.M., Shirokov V.V., Shul'deshov E.M. Izmerenie dijelektricheskoj pronicaemosti steklosotoplasta v svobodnom prostranstve [Measurement of the permittivity in free space steklosotoplasta] //Trudy VIAM. 2014. №5. St. 06 (viam-works.ru).