



УДК 678.84

DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-11-5-5

**ОСОБЕННОСТИ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЗОНАНСНЫХ
РАДИОПОГЛОЩАЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ
НЕМАГНИТНОГО ТИПА**

А.М. Романов

кандидат технических наук

А.А. Беляев

В.В. Широков

Ноябрь 2014

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.

А.М. Романов¹, А.А. Беляев¹, В.В. Широков¹

ОСОБЕННОСТИ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЗОНАНСНЫХ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ НЕМАГНИТНОГО ТИПА

Рассмотрены вопросы численной оптимизации резонансных узкополосных радиопоглощающих материалов на основе полимерных матриц различной плотности на основе науглероженного волокна «УВЖ-15С Эхо» (Светлогорское ПО «Химволокно», Беларусь) с диаметром элементарного волокна 7 мкм и удельным сопротивлением 0,00003 Ом·м. В результате расчетов для ряда частот сантиметрового и дециметрового диапазона волн определены оптимальные толщина материала, длина и концентрация волокна – наполнителя. Учтены особенности оптимизации резонансных материалов, связанные с неоднозначностью определения оптимизированных параметров. Благодаря этому проведенные расчеты позволяют выбрать тип матрицы по минимальной массе 1 м² материала.

Ключевые слова: резонансный радиопоглощающий материал, четвертьволновый резонанс, электромагнитная волна, науглероженное волокно, оптимизация параметров, целевая функция.

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

PECULIAR FEATURES OF OPTIMIZATION OF RESONANT RADAR-ABSORBING MATERIALS OF NONMAGNETIC TYPE

This article is devoted to numerical optimization of resonant narrow-band radar-absorbing materials based on polymer matrices of different density on a base of carbonized fiber «UVZH-15C Echo» (Svetlogorsk PC«Khimvolokno», Belarus) with a diameter of filament 7 micron and specific resistivity 0,00003 Ohm·m. As a result of calculations, for a number of frequencies of centimeter and decimeter waves optimal material thickness, length and concentration of the fiber – filler were found. Features of resonant materials optimization related to an ambiguity of definition of optimized parame-

ters are taken into account. Because of that, the calculations allow you to select a type of matrix in terms of the minimum mass of 1 m² of the material.

Keywords: *resonant radar-absorbing material, quarter wave resonance, electromagnetic wave, carbonized fiber, optimization of parameters, purpose 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 технологии их переработки на ближайшие 20 лет [1] большое внимание в работах института будет уделено композиционным [2, 3] и функциональным материалам и их применению в авиа- и ракетостроении. В последние десятилетия находят широкое применение материалы, поглощающие энергию падающей на них электромагнитной волны – радиопоглощающие материалы (РПМ). Важнейшим из их применений является обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) на борту летательных аппаратов (ЛА). В настоящее время на ЛА расположено большое количество блоков радиоэлектронной аппаратуры с антеннами, в результате чего одни блоки могут вносить помехи в работу других блоков, снижая надежность их работы, что может нарушить безопасность полетов. Проникновение помех может происходить через антенны, по проводам и непосредственно через корпуса электронных блоков. Поэтому проблема обеспечения ЭМС на борту ЛА становится чрезвычайно актуальной и ей посвящено большое количество научно-технических публикаций – например работы [4–7]. В них в основном описана природа возникновения взаимных помех и методы их измерений. К техническим мерам обеспечения ЭМС относятся: экранирование, разнос взаимно мешающих средств, установка электрических и пространственных фильтров, применение радиопоглощающих материалов [8].

Материалы и методы

По своим спектральным характеристикам РПМ могут быть подразделены на широкодиапазонные с перекрытием частотного диапазона (отношение максимальной к минимальной частоте) от 2 до 20 и более и узкодиапазонные с перекрытием частотного диапазона ± 3 –10% относительно центральной (резонансной) частоты диапазона. Ши-

рокодиапазонные РПМ обычно выполняются в виде многослойных градиентных структур. Минимально достижимый уровень их коэффициента отражения (КО) в заданном диапазоне частот определяется их толщиной и диэлектрической проницаемостью входного слоя. Если относительная диэлектрическая проницаемость входного слоя равна $\epsilon_{\text{вх}}$ (у входного слоя она практически действительна), то в широкой полосе частот трудно сделать коэффициент отражения РПМ ниже величины КО на границе раздела воздуха и входного слоя, равном в соответствии с работой [9] для немагнитных РПМ при нормальном падении на поверхность

$$R_{\text{вх}} = \frac{1 - \sqrt{\epsilon_{\text{вх}}}}{1 + \sqrt{\epsilon_{\text{вх}}}}. \quad (1)$$

Узкодиапазонные РПМ обычно бывают резонансными, у которых на частоте резонанса напряженности поля волны, отраженной от наружной поверхности, и напряженности поля волны, вошедшей в РПМ, отраженной от металлического экрана и вышедшей наружу, находятся в противофазе. На рис. 1 схематически изображены пути этих волн.

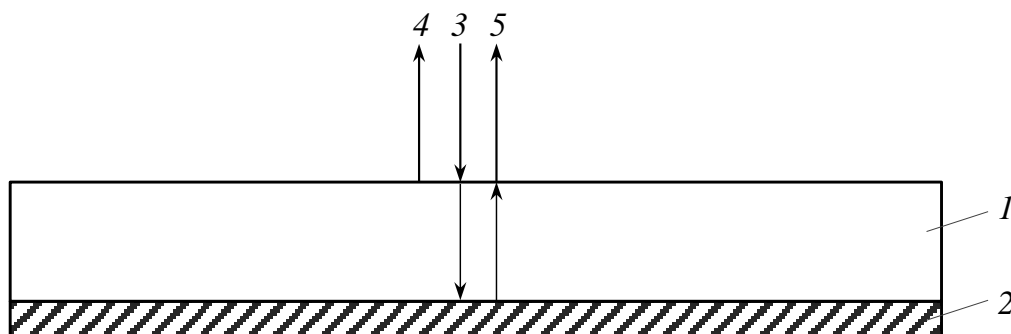


Рисунок 1. Пути падающей и отраженных волн:

1 – радиопоглощающий материал (РПМ); 2 – металлический экран; 3 – падающая волна; 4 – волна, отраженная от внешней поверхности РПМ; 5 – волна, прошедшая в РПМ, отраженная от металлического экрана и вышедшая наружу

В настоящее время разработаны методы синтеза РПМ в заданном диапазоне частот с заданным уровнем коэффициентов отражения, например в работе [10].

В ВИАМ разработаны метод и программа оптимизации параметров РПМ, при которых материал имеет наименьшие коэффициенты отражения (КО) на сетке частот в заданном диапазоне. В соответствии с этим методом зависимость коэффициента отражения от частоты f представлена в виде многопараметрической функции F :

$$R(f)=F(f; p_1, p_2, \dots p_n),$$

где $p_1, p_2, \dots p_n$ – n параметров.

Численная оптимизация заключается в том, что в соответствии с программой расчета определяются оптимальные параметры, при которых минимизируется целевая функция.

Оптимизируемыми параметрами для каждого слоя (в случае многослойного материала) являются диэлектрическая проницаемость матрицы (не наполненной радиопоглощающим наполнителем), объемное содержание радиопоглощающего наполнителя, толщина слоев при заданной суммарной толщине, конфигурация наполнителя (для волокна – отношение длины к диаметру). В качестве целевой функции выбрана сумма превышений коэффициента отражения над заданным уровнем в определенных точках частотного диапазона. Так, если на сетке частот $f_1 \dots f_n$ заданные уровни коэффициента отражения обозначены $E_1 \dots E_n$, то целевая функция равна

$$FM = \sum_1^n [R(f_i) - E_i], \quad (2)$$

где $R(f_i)$ – коэффициент отражения на частоте f_i в диапазоне частот от f_1 до f_n .

При этом в сумме учитываются только положительные члены, отрицательные приравниваются к 0. В общем случае задача оптимизации решается с помощью ряда итераций. На каждой итерации численно определяется направление градиента целевой функции в многомерном пространстве параметров [11]. На следующей итерации по методу Розенброка [12] координатная сетка параметров преобразуется путем поворота осей таким образом, что направление градиента предыдущей итерации становится одним из направлений в преобразованной системе координат параметров, а остальные направления ортогонализируются относительно этого направления. В ходе оптимизации многократно вычисляется в диапазоне частот КО оптимизируемой многослойной структуры в соответствии с работой [13]. При этом используют зависимость диэлектрической проницаемости слоев от частоты, рассчитанную по методике, разработанной в ВИАМ с использованием формулы Оделевского для смесей [14–17], которую при используемых концентрациях нетрудно привести к выражению типа формулы Дебая для диэлектрической проницаемости [18, 19], обусловленной поляризационным процессом типа релаксации. Расчет диэлектрической проницаемости проводили по формуле, аналогичной формуле Дебая при непрерывном спектре времен релаксации (длин волн релаксации) [18–20], с введенными коэффициентами α_1, α_2 и α_3 :

$$\varepsilon_{\text{экв}} = \varepsilon_{\text{м}} + \frac{D \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2}{1 + \left(i \cdot \frac{\lambda_{\text{р}}}{\lambda} \right)^{1 - \alpha_3}}, \quad (3)$$

где $\varepsilon_{\text{м}}$ – относительная диэлектрическая проницаемость матрицы; λ – длина волны в свободном пространстве; диаметр релаксации

$$D = \frac{\varepsilon_{\text{м}} \cdot K_{\text{в}}}{F}, \quad (4)$$

$K_{\text{в}}$ – объемная концентрация наполнителя; наиболее вероятная длина волны релаксации

$$\lambda_{\text{р}} = \frac{\varepsilon_{\text{м}} \cdot \rho_{\text{в}}}{60 \cdot F}, \quad (5)$$

$\rho_{\text{в}}$ – удельное сопротивление наполнителя.

Коэффициент деполаризации вычисляется по формуле:

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

где l и d – длина и диаметр волокна соответственно (при $\lambda \ll \lambda_{\text{р}}$: $\varepsilon_{\text{экв}} \approx \varepsilon_{\text{м}}$).

Коэффициент α_1 приближенно учитывает ориентацию вектора напряженности электрического поля относительно направления волокон и 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. Экспериментально определено, что для данного материала α_3 близок к $1/6$. Диаграмма Коула–Коула, изображенная на рис. 2 [16, 18], наглядно иллюстрирует поведение эквивалентной диэлектрической проницаемости в диапазоне частот в соответствии с выражением (3).

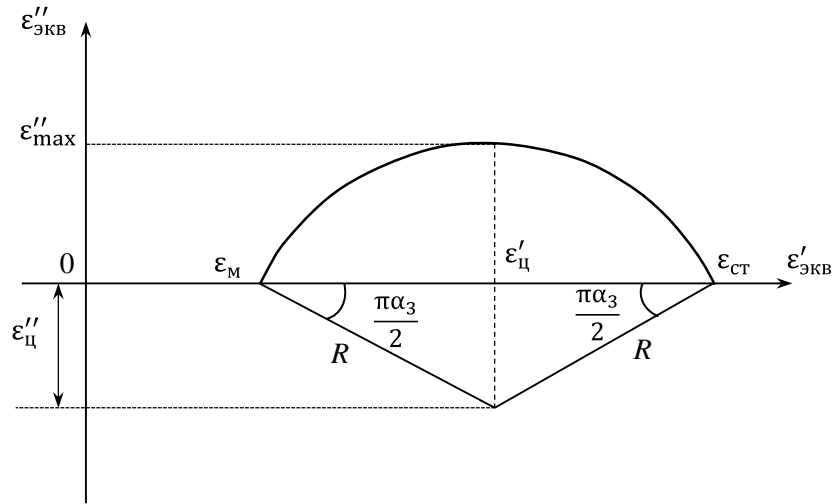


Рисунок 2. Диаграмма Коула–Коула для спектра времен релаксации: ε_M – диэлектрическая проницаемость матрицы (основы РПМ, ненаполненной радиопоглощающим волокном); $\varepsilon_{ст}$ – диэлектрическая проницаемость наполненной матрицы в статическом режиме; $\varepsilon'_{ц}$, $\varepsilon''_{ц}$ – координаты центра дуги окружности диаграммы Коула–Коула

Мнимая часть эффективной диэлектрической проницаемости ε'' растёт с ростом длины волны λ от значений, значительно меньших наиболее вероятной длины волны релаксации λ_p , достигает максимума ε''_{max} при $\lambda = \lambda_p$ и при дальнейшем росте длины волны падает. То же самое можно сказать о характере изменения величины $(\sqrt{\varepsilon})''$, равной $(\sqrt{\varepsilon \cdot \mu})''$ для немагнитных материалов.

Благодаря этому уровень поглощения электромагнитных волн в материале слоя толщиной d , обусловленный множителем $e^{-\frac{2\pi d}{\lambda}(\sqrt{\varepsilon \cdot \mu})''}$, с ростом длины волны при $\lambda \leq \lambda_p$ изменяется незначительно, а при дальнейшем росте λ быстро снижается. Поэтому, пользуясь выражениями (5) и (6), желательно так выбирать длину волокна при заданном его диаметре и удельном сопротивлении, чтобы величина λ_p была не менее максимальной длины волны заданного диапазона длин волн.

В работах авторов обычно проводилась оптимизация многослойных градиентных широкополосных структур [21, 22]. Но для обеспечения ЭМС не всегда целесообразно применять широкодиапазонные РПМ. Вблизи приборов, работающих на определенных частотах, может оказаться более целесообразным применять узкополосные резонансные РПМ. Эти РПМ должны быть эффективны на определенной частоте. Их можно оптимизировать для достижения определенного уровня КО на резонансной частоте. Но в силу их узкодиапазонности положение резонанса будет чрезвычайно критично к технологическим параметрам при изготовлении. Это затруднит их воспроизводимость в про-

изводстве. Поэтому при оптимизации РПМ резонансного типа задавали желательный уровень КО не на одной резонансной частоте, а в узкой полосе частот. Так, для РПМ немагнитного типа (при желательном уровне КО – не более -10 дБ) на резонансной частоте в процессе оптимизации задавали желательный уровень не выше -15 дБ на резонансной частоте и не более -10 дБ в полосе частот $\pm 5\%$ относительно резонансной частоты; оптимизировали толщину РПМ, длину волокна-наполнителя, его объемную концентрацию. Особенность оптимизации РПМ резонансного типа заключается в том, что оптимальная толщина при заданной резонансной частоте определяется неоднозначно – минимум целевой функции в узкой полосе частот вблизи резонансной частоты достигается при толщинах, соответствующих электрической толщине, близкой к нечетному числу четверти длины волны в материале, т. е. для немагнитных материалов при величине электрической толщины

$$T_{эл} = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot t \cdot \operatorname{Re}(\sqrt{\varepsilon_{экв}}) \approx n \cdot \frac{\pi}{2}, \quad (7)$$

где t – физическая толщина РПМ; λ – длина волны в вакууме; $\varepsilon_{экв}$ – эквивалентная относительная диэлектрическая проницаемость РПМ; $n=1, 3, 5$.

Значение $n=1$ соответствует минимальной необходимой толщине РПМ. При ошибке задания начального значения толщины можно в результате оптимизации получить завышенное значение толщины, соответствующее $n \neq 1$. Поэтому в программе оптимизации предусмотрен контроль величины левой части уравнения (7).

Результаты

В табл. 1–5 приводятся результаты численной оптимизации параметров немагнитных РПМ резонансного типа и их спектральные характеристики для двух матриц – эпоксидной смолы со стеклянными микросферами и связующего на основе эпоксидной смолы без микросфер. В этих таблицах ε_m – относительная диэлектрическая проницаемость матрицы, равная 1,8 – для связующего с микросферами и 3,0 – для связующего без микросфер; K_v – объемная концентрация волокна наполнителя (в данном случае «УВЖ-15С Эхо» с диаметром элементарного волокна 7 мкм и удельным сопротивлением 0,00003 Ом·м); l – длина резки волокна-наполнителя; t – толщина РПМ. Для контроля достижения минимального значения оптимальной толщины РПМ вычисляли значение $T_{эл} \cdot 2/\pi$, которое соответствует оптимальной физической толщине, равной ~ 1 . Если величина $T_{эл} \cdot 2/\pi$ близка к 3,5 и более, то оптимальная величина выбрана почти в 3,5 раз более минимальной. В табл. 1–5 приводится вычисленная величина $T_{эл} \cdot 2/\pi$ для каждой частоты.

Таблица 1

**Численная оптимизация параметров немагнитных РПМ
на резонансной частоте 500 МГц**

ϵ_m	K_v	l	t	Масса 1 м ² , кг	F , МГц	КО, дБ	$T_{эл} \cdot 2/\pi$
		мм					
1,8	0,001	7	23,1	14,46	450,0	-6,75	0,91
					462,5	-8,85	0,93
					475,0	-11,65	0,96
					487,5	-15,18	0,98
					500,0	-17,73	1,00
					512,5	-16,01	1,03
					525,0	-13,00	1,05
					537,5	-10,64	1,07
					550,0	-8,89	1,10
3,0	0,001	5	24	28,8	450,0	-7,51	0,92
					462,5	-10,22	0,95
					475,0	-14,33	0,97
					487,5	-21,56	1,00
					500,0	-23,39	1,02
					512,5	-16,04	1,041
					525,0	-12,13	1,07
					537,5	-9,70	1,09
					550,0	-8,603	1,11

Таблица 2

**Численная оптимизация параметров немагнитных РПМ
на резонансной частоте 1000 МГц**

ϵ_m	K_v	l	t	Масса 1 м ² , кг	F , МГц	КО, дБ	$T_{эл} \cdot 2/\pi$
		мм					
1,8	0,00037	7	20	12	900	-11,08	0,93
					925	-13,50	0,96
					950	-16,53	0,98
					975	-20,10	1,00
					1000	-22,17	1,02
					1025	-20,15	1,05
					1050	-17,20	1,07
					1075	-14,83	1,09
					1100	-13,02	1,11
3	0,00045	5	18,5	22,2	900	-11,01	0,94
					925	-13,86	0,96
					950	-17,86	0,99
					975	-23,76	1,00
					1000	-25,14	1,03
					1025	-19,61	1,06
					1050	-15,89	1,08
					1075	-13,40	1,10
					1100	-11,62	1,12

Таблица 3

**Численная оптимизация параметров немагнитных РПМ
на резонансной частоте 3000 МГц**

ϵ_m	K_v	l	t	Масса 1 м ² , кг	F , МГц	КО, дБ	$T_{эл} \cdot 2/\pi$
		мм					
1,8	0,001	4,2	6,5	3,9	2700	-9,52	0,92
					2775	-11,19	0,94
					2850	-13,04	0,96
					2925	-14,96	0,98
					3000	-16,56	1,00
					3075	-17,18	1,02
					3150	-16,59	1,04
					3225	-15,32	1,07
					3300	-13,94	1,09
3,0	0,001	3,2	6,2	7,4	2700	-9,00	0,91
					2775	-10,68	0,93
					2850	-12,64	0,95
					2925	-14,80	0,97
					3000	-16,85	1,00
					3075	-17,94	1,02
					3150	-17,42	1,04
					3225	-15,92	1,06
					3300	-14,29	1,08

Таблица 4

**Численная оптимизация параметров немагнитных РПМ
на резонансной частоте 6000 МГц**

ϵ_m	K_v	l	t	Масса 1 м ² , кг	F , МГц	КО, дБ	$T_{эл} \cdot 2/\pi$
		мм					
1,8	0,001	3,5	4,1	2,4	5400	-12,60	0,95
					5550	-14,48	0,97
					5700	-16,45	0,99
					5850	-18,19	1,01
					6000	-19,06	1,03
					6150	-18,67	1,07
					6300	-17,45	1,07
					6450	-16,04	1,09
					6600	-14,71	1,11
3,0	0,001	2,8	3,7	4,4	5400	-10,75	0,92
					5550	-12,71	0,94
					5700	-14,86	0,96
					5850	-16,87	0,98
					6000	-17,88	1,00
					6150	-17,30	1,04
					6300	-15,81	1,04
					6450	-14,20	1,06
					6600	-12,77	1,08

**Численная оптимизация параметров немагнитных РПМ
на резонансной частоте 10000 МГц**

ϵ_m	K_v	l	t	Масса 1 м ² , кг	F , МГц	КО, дБ	$T_{эл} \cdot 2/\pi$
		мм					
1,8	0,001	2,4	2,6	1,56	9000	-8,46	0,89
					9250	-9,78	0,91
					9500	-11,32	0,93
					9750	-13,34	0,95
					10000	-15,37	0,98
					10250	-18,22	1,00
					10500	-22,24	1,02
					10750	-29,30	1,04
					11000	-42,01	1,06
3,0	0,001	2,5	2,7	3,24	9000	-14,78	0,97
					9250	-17,17	0,99
					9500	-19,84	1,01
					9750	-22,07	1,03
					10000	-22,26	1,05
					10250	-20,50	1,07
					10500	-18,37	1,10
					10750	-16,53	1,12
					11000	-15,00	1,14

Обсуждение и заключения

Анализируя приведенные в таблицах результаты оптимизации, видно, что применение микросфер в эпоксидной матрице РПМ иногда приводит к незначительному увеличению толщины, но всегда сопровождается уменьшением массы РПМ в >2 раз. Также видно, что все оптимизируемые параметры соответствуют четвертьволновому резонансу (величина $T_{эл} \cdot 2/\pi$ близка к 1), т. е. выбраны минимальные толщины. Для всех резонансных частот в полосе частот $\pm 5\%$ от резонансной КО не превышает -10 дБ, а на резонансных частотах КО – не более -15 дБ.

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. Дорошевич А.А., Гальперин В.Е. Электромагнитная совместимость судовых технических средств: Учебник. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского ГМТУ. 2005. С. 68–78.
5. Кириллов В.Ю. Расчет параметров импульсных электромагнитных помех (ЭМП) в ближней и дальней зонах /В сб. докл. VI НТК ЭМС ТС и БО (ЭМС-2000). СПб. 2000. С. 134–137.
6. Сахаров К.Ю., Туркин В.А., Михеев О.В., Сухов А.В., Лафишев М.А., Ерашев Д.И. Аппаратура для мониторинга электромагнитного излучения в сверхкоротком импульсном диапазоне длительностей //Технологии ЭМС. 2011. №4(39). С. 58–61.
7. 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.
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. Никольский В.В., Никольская Т.И. Электродинамика и распространение радиоволн. М.: URSS. 2012. С. 163–164.
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. докл. XV Международной науч.-технич. конф. «Радиолокация. Навигация. Связь». Воронеж. 2009. С. 1578–1584.
11. Корн Г.А., Корн Т.М. Спуск с вычислением координат градиента: Справочник по математике. М.: Наука. 1984. 660 с.
12. Rosenbrock Н.Н. An automatic method for finding the greatest or least value of a function //The Computer Journal. 1960. V. 3. P. 175–184.
13. Бреховских А.М. Волны в слоистых средах. М.: Наука. 1957. С. 52–56.
14. Оделевский В.И. Расчет обобщенной проводимости гетерогенных структур. 1-матричные двухфазные системы с невытянутыми включениями //ЖТФ. 1951. Т. XXI. №5. С. 668–676.
15. Salski В. The extension of the Maxwell Garnett mixing rule for dielectric composites with nonuniform orientation of ellipsoid inclusions //Progress In Electromagnetics Research Letters. 2012. V. 30. P. 173–184.

16. Широков В.В., Романов А.М. Исследование диэлектрических характеристик стеклосотопласта волноводным методом //Авиационные материалы и технологии. 2013. №4. С. 62–68.
17. 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).
18. Орешкин П.Т. Физика полупроводников и диэлектриков. М.: Высш. школа. 1977. С. 380–392.
19. Кинг Р., Смит Г. Антенны в материальных средах. Ч. 1. М.: Мир. 1984. С. 379–384.
20. Хмельник Г.И., Бибииков С.Б. Статистический анализ зависимости параметров распределения Дебая от удельных сопротивлений слоев многослойного РПП//Технологии электромагнитной совместимости. 2012. №4 (43). С. 45–51.
21. 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.
22. 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.

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 [Chemicals in 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. Doroshevich A.A., Gal'perin V.E. Jelektromagnitnaja sovместimost' sudovyh tehniceskikh sredstv [EMC marine hardware]: Uchebnik. SPb.: Izd-vo Sankt-Peterburgskogo GMTU. 2005. С. 68–78.

5. Kirillov V.Ju. Raschet parametrov impul'snyh jelektromagnitnyh pomeh (JeMP) v blizhnej i dal'nej zonah [Calculation of parameters of pulsed electromagnetic interference (EMI) in the near and far field] /V sb. dokl. VI NTK JeMS TS i BO (JeMS-2000). SPb. 2000. S. 134–137.
6. Saharov K.Ju., Turkin V.A., Miheev O.V., Suhov A.V., Lafishev M.A., Erashev D.I. Ap-paratura dlja monitoringa jelektromagnitnogo izluchenija v sverhkorotkom impul'snom dia-pazone dlitel'nostej [Apparatus for monitoring the electromagnetic radiation in the ultra-short pulse duration range] //Tehnologii JeMS. 2011. №4(39). S. 58–61.
7. 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 jelektro-magnitnoj sovmestivosti [Development of materials and coatings used for the testing of radio and electromagnetic compatibility] //Voprosy oboronnoj tehniki. Ser. «Tehnicheskie sredstva protivodejstvija terrorizmu». 2013. №5–6. S. 56–64.
8. Lushina M.V., Parshin S.G., Rzhevskij 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. Nikol'skij V.V., Nikol'skaja T.I. Jelektrodinamika i rasprostranenie radiovoln [Electrodynamics and Propagation]. M.: URSS. 2012. S. 163–164.
10. Bibikov S.B., Titov A.N., Cherepanov A.K. Sintez materiala s zadannym koefefficientom ot-razhenija 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. dokl. XV Mezhduna-rodnoj nauch.-tehnič. konf. «Radiolokacija. Navigacija. Svjaz'». Voronezh. 2009. S. 1578–1584.
11. Korn G.A., Korn T.M. Spusk s vychisleniem koordinat gradient [Descent from the calculation of the coordinates of the gradient]: Spravochnik po matematike. M.: Nauka. 1984. 660 s.
12. Rosenbrock H.H. An automatic method for finding the greatest or least value of a function //The Computer Journal. 1960. V. 3. P. 175–184.
13. Brehovskih A.M. Volny v sloistyh sredah [Waves in Layered Media]. M.: Nauka. 1957. S. 52–56.
14. Odelevskij V.I. Raschet obobshhennoj provodivosti geterogennyh struktur. 1-matrichnye dvuhfaznye sistemy s nevytjanutymi vkljuchenijami [Calculation of the generalized conductivity of heterogeneous structures. 1-matrix two-phase systems with unstretched inclusions] //ZhTF. 1951. T. XXI. №5. S. 668–676.

15. Salski B. The extension of the Maxwell Garnett mixing rule for dielectric composites with nonuniform orientation of ellipsoid inclusions //Progress In Electromagnetics Research Letters. 2012. V. 30. P. 173–184.
16. Shirokov V.V., Romanov A.M. Issledovanie dijelektricheskikh harakteristik steklostoplasta volnovodnym metodom [Investigation of the dielectric characteristics of the glass-honeycomb by waveguide method] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №4. S. 62–68.
17. Beljaev A.A., Agafonova A.S., Antipova E.A., Botanogova E.D. Konstrukcionnyj radiopogloshhajushhij 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).
18. Oreshkin P.T. Fizika poluprovodnikov i dijelektrikov [Physics of semiconductors and dielectrics]. M.: Vyssh. shkola. 1977. S. 380–392.
19. King R., Smit G. Antenny v material'nyh sredah [Antennas in material media]. Ch. 1. M.: Mir. 1984. S. 379–384.
20. Hmel'nik G.I., Bibikov S.B. Statisticheskij analiz zavisimosti parametrov raspredelenija Debaja ot udel'nyh soprotivlenij sloev mnogoslojnogo RPP [Statistical analysis of the dependence of the distribution parameters of the Debye resistivity layers of the multilayer RPP] //Tehnologii jelektromagnitnoj sovmestivosti. 2012. №4 (43). S. 45–51.
21. Agafonova A.S., Beljaev A.A., Kondrashov Je.K., Romanov A.M. Osobennosti formirovaniya monolitnykh konstrukcionnykh radiopogloshhajushhikh materialov na osnove kompozitov, napolnennykh rezistivnym voloknom [Features of the formation of monolithic structural radar absorbing materials based on composites filled with resistive fiber] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №3. S. 56–59.
22. Bespalova E.E., Kondrashov Je.K. Osobennosti korrekcirovki receptury pozharobezopasnogo materiala dlja bezjehovykh kamer pri izmenenii parametrov radiopogloshhajushhego napolnitelja [Features correct formulation fireproof material for anechoic chambers when changing the radar absorbing filler] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2014. №2. S. 48–52.