

УДК 678.84

DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-2-48-52

*Е.Е. Беспалова¹, Э.К. Кондрашов¹***ОСОБЕННОСТИ КОРРЕКТИРОВКИ РЕЦЕПТУРЫ ПОЖАРОБЕЗОПАСНОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ БЕЗЭХОВЫХ КАМЕР ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ПАРАМЕТРОВ РАДИОПОГЛОЩАЮЩЕГО НАПОЛНИТЕЛЯ**

Описан путь корректировки рецептуры пожаробезопасных радиопоглощающих материалов для безэховых камер при изменении параметров радиопоглощающего волокнистого наполнителя. Способ корректировки основан на представлении дисперсионной характеристики диэлектрической проницаемости вспененного асбеста, наполненного резистивным волокном, в виде формулы Дебая. В зависимости от изменения параметров наполнителя корректируется длина волокна и его объемное содержание.

Ключевые слова: радиопоглощающий материал, безэховая камера, коэффициент отражения, науглероженное волокно.

Fireproof material designed for anechoic chambers composition adjustment path is described when the parameters radar absorbing fiberfill are changed. Adjustment method based on representation of foam asbestos filled resistive fiber permittivity dispersion characteristics in the form of the Debye formula. Depending on changes in the parameters of the fiber length and its volume content are adjusted.

Keywords: radar absorbing material, anechoic chamber, reflectance ratio, carbonized fiber.

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

В соответствии со стратегическими направлениями развития материалов и технологии их переработки на ближайшие 20 лет [1] большое внимание в работах лаборатории будет уделено композиционным [2, 3] и функциональным материалам [4] и их применению в авиа- и ракетостроении. В последние десятилетия широкое применение находят материалы, выполняющие функции поглощения электромагнитной энергии – радиопоглощающие материалы (РПМ). В работе [5] показано, что одним из направлений в создании РПМ является разработка материала для облицовки внутренних поверхностей безэховых камер (БЭК), которые особенно широко стали использоваться в последние десятилетия [6, 7]. С одной стороны, это связано с тенденцией усложнения и увеличения точности антенных измерений и стендовых испытаний радиоконструкций, с другой – широкому внедрению БЭК в технику испытаний новых широкополосных радиопоглощающих материалов и поглотителей электромагнитных волн [8–11]. Для обеспечения обычно требуемой безэховости (-40÷-50 дБ) необходимо, чтобы РПМ для облицовки стен БЭК имел коэффициент отражения (КО) такого же уровня. РПМ с таким низким КО в широкой полосе частот (в миллиметровом, сантиметровом и части дециметрового диапазона длин волн) можно реализовать только с использованием материалов шиповидной формы. Изготовить такой РПМ сложно, требуются специальная оснастка и большие трудозатраты. При специальной конфигурации стен безэховой камеры можно повы-

сить допустимый коэффициент отражения РПМ до величины -30÷-25 дБ, а в ряде случаев – до -20 дБ. В таких РПМ плавное согласование 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.

В конце 80-х – начале 90-х годов прошлого столетия в Москве на «Нагатинском заводе строительных материалов» серийно выпускали РПМ «Саурп» на основе вспененного асбеста, в качестве наполнителя 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 [12], имеющего низкую диэлектрическую проницаемость – позволяет уменьшить относительную диэлектрическую проницаемость ненаполненных слоев градиентного РПМ до величины 1,06–1,08. При этом КО на границе раздела свободного пространства с материалом основы при нормальном падении волны на поверхность не превысит -34 дБ. Благодаря этому можно создать РПМ с КО не выше -30 дБ в широкой полосе частот.

В связи с тем, что БЭК представляет собой замкнутое пространство, к материалам для нее предъявляются повышенные требования по пожарной безопасности. РПМ для БЭК должны быть негорючие или самозатухающие, не выделять при эксплуатации и горении вредных веществ. Попытки создания пожаробезопасных материалов на основе полимерных материалов приводят к усложнению технологии, при этом горючесть снижается, но не устраняется – например, в работе [13]. Применение асбестового волокна решает эти проблемы.

Благодаря строению структуры волокна асбеста (не гладкий цилиндр, а разветвленная структура) после вспенивания отдельные волокна сцепляются друг с другом и нет необходимости введения органического связующего в слои материала, что обеспечивает их негорючесть. Склеивание слоев между собой с помощью клея ПВА не ухудшает заметно степень пожаробезопасности, так как осуществляется не сплошь по границе раздела слоев, а в нескольких точках.

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 [14]. Перспективным для РПМ является применение в качестве поглощающих компонентов углеродных наночастиц и нанотрубок [15–18].

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 используется программа для численной оптимизации многослойных радиопоглощающих структур. В соответствии с этим методом зависимость коэффициента отражения R 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 в заданном диапазоне частот превышение уровня расчетной функции над уровнем заданной (в разумных пределах) на выбранной сетке частот становится минимальным. Аналогичные задачи численно решаются в работах [19, 20]. Оптимизируемыми параметрами для каждого слоя 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). Количество превышение уровня расчетной функции над уровнем заданной оценивается с помощью целевой функции, заданной в многомерном пространстве оптимизируемых параметров. 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 в результате оптимизации к минимуму должна быть сведена функция параметров (целевая функция):

$$FM = \sum_1^n [R(f_i) - E_i], \quad (1)$$

где R – коэффициент отражения на частоте f_i в диапазоне частот $f_1 \dots f_n$.

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 [21]. На следующей итерации по методу Розенброка [22] 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.

Выбор науглероженного волокна невелик. До начала 2000-х годов использовали науглероженное волокно «Углен-ЦШЭ» (ОАО «Химволокно», г. С.-Петербург) с диаметром элементарного волокна 9 мкм и удельным сопротивлением 0,0012 Ом·м и науглероженное волокно «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 выпускается науглероженное волокно «УВЖ-15С Эхо» (Светлогорское ПО «Химволокно», Беларусь) с диаметром элементарного волокна 7 мкм и удельным сопротивлением 0,00003 Ом·м и восстановлено малосерийное производство волокна типа «Углен» во ФГУП «ВИАМ». Поэтому была рассмотрена возможность использования волокна «УВЖ-15С Эхо». С изменением параметров волокна (наполнителя) остальные параметры становятся неоптимальными и необходимо заново их оптимизировать (толщина слоев, концентрация в них наполнителя)

и длина волокна). В данной работе предложен способ изменения длины волокна в зависимости от изменения его удельного сопротивления и диаметра.

В ходе оптимизации многократно вычисляется в заданном диапазоне частот КО оптимизируемой многослойной структуры в соответствии с работой [23]. При этом используют зависимость диэлектрической проницаемости слоев от частоты, рассчитанную по методике, разработанной в ВИАМ с использованием формулы Оделевского для матричных смесей с наполнителем в виде сильно вытянутых эллипсоидов вращения, большая ось которых (l) в сотни или тысячи раз больше малой (d). Такая конфигурация хорошо аппроксимирует реальные элементарные волокна наполнителя длиной l и диаметром d . При ориентации больших осей параллельно вектору напряженности электрического поля облучающей электромагнитной волны, в соответствии с формулой Оделевского эквивалентная относительная диэлектрическая проницаемость смеси равна

$$\epsilon_{\text{эКВ}} = \epsilon_M + \frac{\epsilon_M \cdot K_V}{F \cdot \left(1 + \frac{\epsilon_M}{F \cdot (\epsilon_H - \epsilon_M)} \right)}, \quad (2)$$

где ϵ_M – относительная диэлектрическая проницаемость матрицы; ϵ_H – относительная диэлектрическая проницаемость наполнителя; K_V – объемная концентрация наполнителя; F – коэффициент деполяризации, при $\frac{l}{d} \gg 1$ с большой точностью приближения равный

$$F = \frac{\ln\left(2 \cdot \frac{l}{d}\right)}{\left(\frac{l}{d}\right)^2}. \quad (3)$$

Известно, что относительную комплексную диэлектрическую проницаемость проводника или резистивного материала, которым является наполнитель, можно при принятой зависимости от времени $e^{-i\omega t}$ представить в виде:

$$\epsilon_H = \epsilon'_H + i \frac{\sigma}{\omega \cdot \epsilon_0}, \quad (4)$$

где σ – удельная проводимость наполнителя (удельное сопротивление $\rho = 1/\sigma$); ω – круговая частота, ϵ_0 – абсолютная диэлектрическая проницаемость в вакууме и практически в свободном пространстве.

Для материалов, используемых в качестве наполнителя (науглероженное волокно),

$$\frac{\sigma}{\omega \cdot \epsilon_0} \gg \epsilon'_H \text{ и } \frac{\sigma}{\omega \cdot \epsilon_0} \gg \epsilon_M, \text{ поэтому } \epsilon_H - \epsilon_M \cong i \frac{\sigma}{\omega \cdot \epsilon_0}.$$

Используя соотношения $c_0 = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}}$ и

$$Z_{w0} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120 \cdot \pi \text{ [Ом]}, \text{ а также } \lambda_0 = \frac{c_0 \cdot 2\pi}{\omega},$$

где μ_0 , c_0 , Z_{w0} и λ_0 – соответственно магнитная проницаемость, скорость распространения электромагнитной волны, волновое сопротивление и длина волны в вакууме и практически в свободном пространстве, можно формулу Оделевского представить в виде:

$$\epsilon_{\text{эКВ}} = \epsilon_M + \frac{\epsilon_M \cdot K_V}{F \cdot \left(1 - i \frac{\epsilon_M \cdot \rho}{F \cdot 60 \cdot \lambda_0} \right)}. \quad (5)$$

Введя обозначения:

– диаметр релаксации

$$D = \frac{\epsilon_M \cdot K_V}{F}, \quad (6)$$

– длина волны релаксации

$$\lambda_p = \frac{\epsilon_M \cdot \rho_V}{60 \cdot F}, \quad (7)$$

формулу Оделевского приводим к выражению типа формулы Дебая [24, 25]:

$$\epsilon_{\text{эКВ}} = \epsilon_M + \frac{D}{1 - \left(i \cdot \frac{\lambda_p}{\lambda} \right)}. \quad (8)$$

В реальном материале волокна наполнителя распределяются хаотически – имеются волокна перпендикулярные вектору напряженности электрического поля (они практически не влияют на процесс поляризации материала), большинство волокон не параллельны вектору электрического поля, часть волокон может скручиваться – выражение (8) не учитывает взаимовлияние волокон. Поэтому расчет диэлектрической проницаемости проводили по формуле, аналогичной формуле Дебая при непрерывном спектре времен релаксации (длин волн релаксации) [24–26] с введенными коэффициентами α_1 , α_2 , α_3 по формуле:

$$\epsilon_{\text{эКВ}} = \epsilon_M + \frac{D \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2}{1 - \left(i \cdot \frac{\lambda_p}{\lambda} \right)^{1-\alpha_3}}. \quad (9)$$

В формуле (9) величина λ_p – наиболее вероятная длина волны релаксации.

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.

Таблица 1

Коэффициент деполаризации и наиболее вероятная длина волны релаксации волокна «Углен-9» (диаметр элементарного волокна 9 мкм, удельное сопротивление 0,00008 Ом·м)

Длина волокна, мм	Коэффициент деполаризации $F \cdot 10^6$	Наиболее вероятная длина волны релаксации, см
8,0	8,205	17,22
10,0	5,432	26,02
12,0	3,875	36,47
14,0	2,911	48,56

Таблица 2

Коэффициент деполаризации и наиболее вероятная длина волны релаксации волокна «УВЖ-15С Эхо» (диаметр элементарного волокна 7 мкм, удельное сопротивление 0,00003 Ом·м)

Длина волокна, мм	Коэффициент деполаризации $F \cdot 10^6$	Наиболее вероятная длина волны релаксации, см
8,0	5,156	10,28
10,0	3,409	15,55
12,0	2,430	21,81
14,0	1,824	29,06

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 $1/6$. Выражению (9) соответствует диаграмма Коула–Коула, изображенная на рисунке [24].

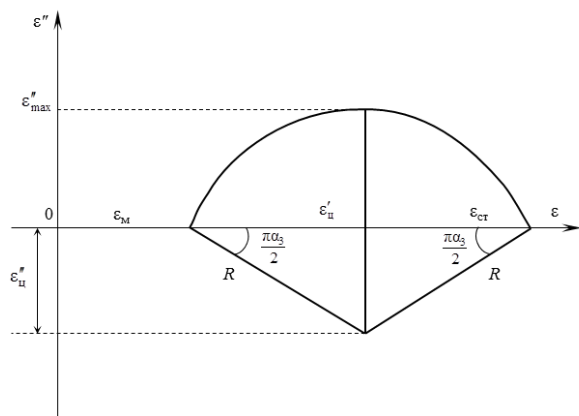


Диаграмма Коула–Коула для спектра времен релаксации: ϵ_m – диэлектрическая проницаемость матрицы (слоя из ненаполненного вспененного асбеста), $\epsilon_{ст}$ – диэлектрическая проницаемость наполненного слоя в статическом режиме; $\epsilon'_c, \epsilon''_c$ – координаты центра дуги окружности диаграммы Коула–Коула.

Мнимая часть эффективной диэлектрической проницаемости ϵ'' растет 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 $\text{Im}(\sqrt{\epsilon})$, равной $\text{Im}(\sqrt{\epsilon \cdot \mu})$ для немагнитных материалов.

Благодаря этому уровень поглощения электромагнитных волн в материале слоя толщиной d , обусловленный множителем $e^{-\frac{2\pi d}{\lambda} \cdot \text{Im}(\sqrt{\epsilon \cdot \mu})}$, с ростом длины волны при $\lambda \leq \lambda_p$ изменяется незначительно, а при дальнейшем росте λ быстро снижается. Поэтому, пользуясь выражениями (3) и (7), желательно выбирать длину волокна при заданном его диаметре и удельном сопротивлении так, чтобы величина λ_p была не менее максимальной длины волны заданного диапазона длин волн. В табл. 1 и 2 приводятся расчетные значения коэффициентов деполаризации и наиболее вероятной длины волны релаксации при различной длине волокна для науглероженного волокна следующих двух типов: «Углен-9» и «УВЖ-15С Эхо».

Сравнивая результаты расчета, приведенные в табл. 1 и 2, видно, что для сохранения величины наиболее вероятной длины волны релаксации при изменении параметров волокна (наполнителя) необходимо изменить длину волокна. При этом изменится величина коэффициента деполаризации, и в соответствии с выражением (6) надо изменить концентрацию.

При максимальной длине волны 30 см целесообразно использовать волокно «Углен-9» длиной 10 мм, а волокно «УВЖ-15С Эхо» – длиной 14 мм. При изменении длины волокна с 10 на 14 мм требуемая объемная концентрация наполнителя сокращается в ~ 2 раза.

Это можно проиллюстрировать на примерах расчетов и измерений коэффициентов отражения многослойных структур. В табл. 3 приведены результаты расчетов и измерений коэффициентов отражения многослойной структуры РПМ на основе вспененного асбеста толщиной 510 мм. Измерения проводились с помощью анализатора цепей фирмы Rohde & Schwarz ZYB-20 и измерительной антенны П6-23.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №8. 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. Гращенко Д.В., Чурсова Л.В. Стратегия развития композиционных и функциональных материалов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №8. С. 231–242.
5. Беляев А.А., Кондрашов С.В., Лепешкин В.В., Романов А.М. Радиопоглощающие материалы //Авиационные материалы и технологии. 2012. №8. С. 348–352.
6. Мицмахер М.Ю., Торгованов В.А. Безэховые камеры СВЧ. М.: Радио и связь. 1982. 129 с.
7. 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.
8. Латыпова А.Ф., Калинин Ю.Е. Анализ перспективных радиопоглощающих материалов //Вестник Воронежского гос. техн. ун-та. 2012. Т. 8. №6. С. 70–76.
9. Радиопоглощающий материал: пат. 2417491 Рос. Федерация; опубл. 27.04.2011.
10. 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.
11. Беляев А.А., Беспалова Е.Е., Романов А.М. Пожаробезопасные радиопоглощающие материалы для безэховых камер //Авиационные материалы и технологии. 2013. №1. С. 53–55.
12. 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.
13. Волков В.П., Зеленецкий А.Н. и др. Получение радиозащитных полимерных материалов пониженной горючести //Пластические массы. 2008. №6. С. 42–46.
14. 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.
15. Акатенков Р.В., Аношкин И.В., Беляев А.А., Битт В.В., Богатов В.А., Дьячкова Т.П., Куцевич К.Е., Кондрашов С.В., Романов А.М., Широков В.В., Хоробров Н.В. Влияние структурной организации углеродных нанотрубок на радиоэкранирующие и электропроводящие свойства нанокомпозитов //Авиационные материалы и технологии. 2011. №1. С. 35–42.
16. Майков В.В., Мызык А.А., Конев А.С., Уймин М.А., Ермаков А.Е., Ринкевич А.Б., Перов Д.В., Кузнецов А.Ю., Мельников В.Н. Разработка радиопоглощающих покрытий на основе полимерной матрицы с новыми нанокомпозитами /В сб. материалов 8-й Межрегиональной отраслевой науч.-технической конф. ОАО «ОКБ „Новатор“». Екатеринбург, Челябинск. 2012. С. 94.
17. Хандогина Е.Н., Владимиров Д.Н. Применение наноматериалов для поглотителей электромагнитных волн /В сб. научных трудов Всероссийской науч. школы для молодежи «Приборное и научно-методическое обеспечение исследований и разработок в области технологий создания биосовместимых материалов». М.: МИСиС. 2010. С. 65.
18. Устименко Л.Г., Хандогина Е.Н., Владимиров Д.Н. Применение наноматериалов для поглотителей электромагнитных волн //Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2009. №2. С. 81–84.
19. 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.
20. Бибиков С.Б., Засовин Э.А., Черепанов А.К., Хмельник Г.И. Математическое моделирование параметров многослойных радиопоглощающих покрытий /В сб. материалов XV Международной науч.-технич. конф. «Радиолокация, навигация, связь». Воронеж. 2009. С. 1585–1595.
21. Корн Г.А., Корн Т.М. Спуск с вычислением координат градиента: Справочник по математике. М.: Наука. 1984. 660 с.
22. Rosenbrock H. N. An automatic method for finding the greatest or least value of a function //The Computer Journal. 1960. V. 3. P. 175–184.
23. Бреховских А.М. Волны в слоистых средах. М.: Наука. 1957. С. 52–56.
24. Орешкин П.Т. Физика полупроводников и диэлектриков. М.: Высшая школа. 1977. С. 380–392.
25. Кинг Р., Смит Г. Антенны в материальных средах. Ч. 1. М.: Мир. 1984. С. 379–384.
26. 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.