



УДК 678.84

DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-3-11-11

**НЕДОСТАТКИ ВОЛНОВОДНЫХ МЕТОДОВ
ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК
РАДИОПОГЛОЩАЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ**

А.М. Романов

кандидат технических наук

А.А. Беляев

Е.Е. Беспалова

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.

НЕДОСТАТКИ ВОЛНОВОДНЫХ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИОПОГЛОЩАЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ

Показано, что результаты измерений коэффициентов отражения радиопоглощающих материалов в волноводе для каждой частоты соответствуют результатам измерений при определенном угле падения при поляризации электрического вектора перпендикулярно плоскости падения и, таким образом, не соответствуют результатам измерения при нормальном падении. Произведена оценка погрешности измерения диэлектрической проницаемости материалов, обусловленной зазором между образцом и стенкой волновода. Приводятся упрощенное выражение для оценки величины относительной ошибки измерения диэлектрической проницаемости и примеры вычисления ошибок для двух случаев.

Ключевые слова: диэлектрическая проницаемость, коэффициент отражения, волновод, вектор электрической индукции, вектор напряженности электрического поля.

A.M. Romanov, A.A. Belyaev, E.E. Bepalova

Disadvantages of waveguide techniques for measurement of radar-absorbing material characteristics

It was shown in the paper that the measurement results of reflection ratios of radar-absorbing materials performed in the waveguide for each frequency corresponded to the results of measurements at a certain angle of incidence in case of polarization of the electric vector perpendicular to the plane of incidence; thus, they do not correspond to the measurements at normal incidence. Material permittivity measurement errors caused by a gap between a specimen and waveguide wall were estimated. A simplified expression for estimation of the relative error of permittivity measurements and some examples of errors calculation for the above two cases are given in the paper.

Keywords: dielectric permittivity, reflection ratio, waveguide, electric induction vector, electric field strength vector.

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 период до 2030 года [1] большое внимание в научных работах уделено композиционным [2, 3] и функциональным материалам [4–6] и их применению в целях авиа- и ракетостроения. В частности, в настоящее время широкое применение находят радиопоглощающие материалы (РПМ), обеспечивающие поглощение электромагнитной энергии. При проектировании РПМ – особенно многослойных и широкополосных – очень важным моментом является определение экспериментальным путем коэффициента отражения (R), диэлектрических и магнитных характеристик отдельных слоев материалов.

Материалы и методы

Электрические и магнитные свойства веществ характеризуются комплексными значениями электрической и магнитной проницаемостей:

$$\varepsilon = \varepsilon' + i\varepsilon'' = |\varepsilon| \exp(i\delta_\varepsilon), \quad (1)$$

где ε' и ε'' – соответственно действительная и мнимая части комплексной диэлектрической проницаемости; δ_ε – угол диэлектрических потерь. (В инженерной практике чаще всего для характеристики способности диэлектрика рассеивать энергию в электрическом поле используют угол диэлектрических потерь, а также тангенс этого угла $\operatorname{tg}\delta_\varepsilon = \varepsilon''/\varepsilon'$.);

$$\mu = \mu' + i\mu'' = |\mu| \exp(i\delta_\mu), \quad (2)$$

где μ' и μ'' – соответственно действительная и мнимая части комплексной магнитной проницаемости; δ_μ – угол магнитных потерь. (Для комплексных величин, изменяющихся по гармоническому закону, зависимость от времени предполагается в виде $e^{-i\omega t}$.)

В данной работе рассматриваются немагнитные материалы, для которых $\mu=1$.

Обычно измерение электрических и магнитных параметров материалов на сверхвысокой частоте основано на исследовании распространения электромагнитных волн в материале или на границе раздела «материал–среда». При этом образцы материалов, как правило, имеют две плоскопараллельные границы. Используются следующие основные методы измерения параметров материалов:

– квазиоптические – основаны на измерении коэффициентов отражения и прохождения электромагнитной волны от слоя материала;

– волноводные – основаны на измерении полного входного сопротивления отрезка волновода с образцом материала;

– резонаторные – основаны на измерении изменения резонансной частоты и добротности резонатора при внесении в резонатор образца материала.

Одним из наиболее простых методов измерения диэлектрических и магнитных свойств материалов является волноводный метод [7–10]. При этом непосредственно в волноводе измеряют распределение величины электрического поля без образца и при наличии измеряемого плоскопараллельного образца в двух различных положениях (например, положения короткого замыкания и холостого хода). По измеренным данным вычисляют комплексный коэффициент R (или импеданс $Z_{вх}$) на входной поверхности образца и приравнивают к нему известное теоретическое выражение, содержащее величины диэлектрической и магнитной проницаемостей. Полученные уравнения решают относительно диэлектрической и магнитной (если материал магнитный) проницаемостей. С помощью волноводных методов часто определяют радиотехнические параметры, характеризующие радиопоглощающий материал [8–17], – модуль коэффициента отражения $|R|$ (по напряженности поля) или коэффициент R по мощности (P) – $R_P = |R|^2$. Определять радиотехнические характеристики таким образом нецелесообразно, так как коэффициент отражения зависит от угла падения волны, а падение волноводной волны основного типа (H_{10}) на образец, находящийся в волноводе (с точки зрения исследования отражающих свойств образца), эквивалентно падению на плоский образец [18] двух плоских волн под углами к поверхности образца, симметричными относительно нормали к образцу. Величина угла падения φ удовлетворяет равенству

$$\sin\varphi = \frac{\lambda_0}{\lambda_{кр0}} = \frac{\lambda_0}{2a}, \quad (3)$$

где λ_0 – длина волны в свободном пространстве; $\lambda_{кр0} = 2a$ – критическая длина волны основного типа, равная удвоенному размеру широкой стенки (a).

С учетом положений работ [8, 18] и принятой зависимости от времени $e^{-i\omega t}$ (рис. 1) комплексная амплитуда вектора напряженности электрического поля в волноводе

равна сумме комплексных амплитуд эквивалент-

ных плоских волн $\vec{E}_1(x, z) = \frac{1}{2} \vec{E}_0 \cdot e^{i \left(\frac{2\pi}{\lambda_{кр}} \cdot x + \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot \cos\varphi \cdot z \right)}$ и $\vec{E}_2(x, z) = \frac{1}{2} \vec{E}_0 \cdot e^{i \left(-\frac{2\pi}{\lambda_{кр}} \cdot x + \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot \cos\varphi \cdot z \right)}$, так как

в соответствии с известной формулой Эйлера $e^{\pm i\alpha} = \cos\alpha \pm i \cdot \sin\alpha$ или $\cos\alpha = \frac{e^{i\alpha} + e^{-i\alpha}}{2}$ и $\sin\alpha = \frac{e^{i\alpha} - e^{-i\alpha}}{2i}$, можно записать $\vec{E}(x, z) = \vec{E}_1(x, z) + \vec{E}_2(x, z)$.

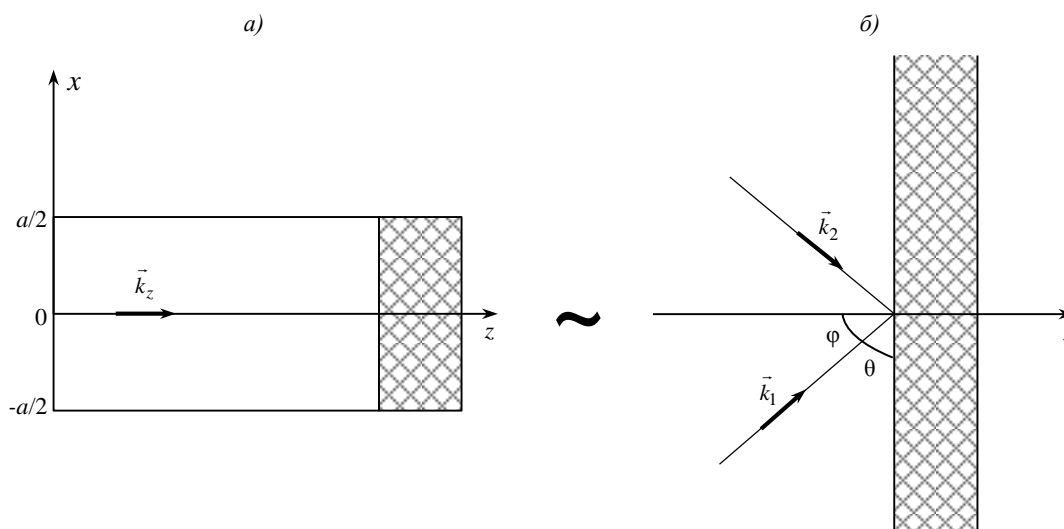


Рис. 1. Волна основного типа \vec{k}_z в волноводе (а) и эквивалентные плоские волны \vec{k}_1 и \vec{k}_2 (б)

Обычно РПМ характеризуют по величине коэффициентов отражения, измеренных при нормальном падении, и их определение по измерениям в волноводе может привести к неправильной трактовке результатов. При измерениях в волноводе с распространяющейся волной только основного типа угол падения эквивалентной плоской волны будет обязательно >30 град и может достигать ~ 90 град. В таблице для стандартного волновода с внутренним сечением 23×10 мм приводятся углы падения эквивалентных плоских волн в зависимости от длины волны и частоты в диапазоне, соответствующем распространению волны только основного типа. Критическая длина волны основного типа равна 46 мм, первого высшего типа: 23 мм.

Зависимость угла падения эквивалентных плоских волн от длины волны и частоты

Длина волны, мм	25	27,5	30	32,5	35	37,5	40	42,5
Частота, ГГц	12	10,91	10	9,23	8,57	8	7,50	7,06
Угол падения, град	33	37	41	45	49	54	61	68

При определении диэлектрических характеристик волноводным методом учитывается волноводный характер волны, так как теоретически он наиболее надежен в применении для изотропных материалов, в которых обеспечивается однородность при из-

готовлении. В соответствии с формулой (3) каждой частоте соответствует свой угол падения. Для анизотропных материалов с незначительной дисперсией можно в диапазоне длин волн – от критической длины волны основного типа до критической длины волны первого высшего типа – провести измерения зависимости диэлектрических параметров от угла падения [8].

В работах [8, 19, 20] анализируются ошибки измерения диэлектрических параметров материала образца, обусловленные неточностью измерения толщины образца и его расстояния от плоскости короткого замыкания. Но эти ошибки свойственны не только волноводному методу.

Заметная ошибка измерений, свойственная волноводному методу, обусловлена неточностью изготовления образца, в результате чего образуется воздушный зазор между широкой стенкой волновода и примыкающей к ней гранью образца (рис. 2). Зазор вблизи узкой стенки не вносит заметной ошибки в измерения, так как величина напряженности электрического поля вблизи узкой стенки близка к 0.

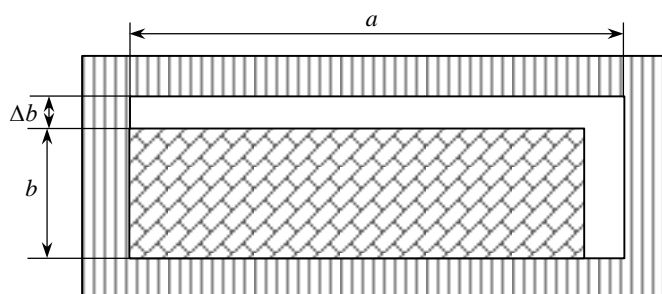


Рис. 2. Схематическое изображение образца из диэлектрика в волноводе с воздушным зазором Δb между широкой стенкой волновода и примыкающей к ней гранью образца в поле волны основного типа

Нормальная к грани образца составляющая вектора индукции электрического поля $D(x) = D_0 \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right)$ непрерывна при переходе через грань поверхности образца [12] и в зазоре вектор индукции равен этой величине в образце (a – размер широкой стенки волновода). Величина вектора электрического поля в образце равна

$$E_{\text{обр}}(x) = \frac{D(x)}{\epsilon_0 \epsilon_{\text{обр}}}, \quad (4)$$

где ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость в вакууме; $\epsilon_{\text{обр}}$ – относительная диэлектрическая проницаемость материала образца.

Величина вектора электрического поля в зазоре равна

$$E_3(x) = \frac{D(x)}{\varepsilon_0}. \quad (5)$$

Величина вектора эффективного электрического поля, определяющая входной импеданс и измеренную величину диэлектрической проницаемости, равна

$$E_{\text{эф}}(x) = \frac{E_3(x) \cdot \Delta b + E_{\text{обр}}(x) \cdot (b - \Delta b)}{b}, \quad (6)$$

где b – размер узкой стенки волновода; Δb – ширина воздушного зазора.

Величина измеренной относительной диэлектрической проницаемости при этом будет равна

$$\varepsilon_{\text{изм}} = \frac{D(x)}{E_{\text{эф}}(x) \cdot \varepsilon_0} = \frac{b}{\Delta b + \frac{b - \Delta b}{\varepsilon_{\text{обр}}}}. \quad (7)$$

Результаты

Из выражения (7) следует, что чем больше измеряемая величина (модуль величины, если она комплексная), тем больше будет влиять на ее значение наличие зазора.

Величина относительной ошибки при этом будет равна

$$\frac{\varepsilon_{\text{обр}} - \varepsilon_{\text{изм}}}{\varepsilon_{\text{обр}}} = 1 - \frac{1}{1 + \frac{\Delta b}{b} \cdot (\varepsilon_{\text{обр}} - 1)}. \quad (8)$$

Если величина $\frac{\Delta b}{b} \cdot (\varepsilon_{\text{обр}} - 1) \ll 1$, то

$$\frac{\varepsilon_{\text{обр}} - \varepsilon_{\text{изм}}}{\varepsilon_{\text{обр}}} \approx \frac{\Delta b}{b} \cdot (\varepsilon_{\text{обр}} - 1). \quad (9)$$

Влияние зазора можно пояснить на следующих примерах (рис. 2): $a=23$ мм, $b=10$ мм, относительная диэлектрическая проницаемость материала измеряемого образца равна 4,0, ширина зазора в первом примере составляет $\Delta b=0,2$ мм, т. е. 2% от размера узкой стенки; во втором примере – $\Delta b=0,4$ мм, т. е. 4% от размера узкой стенки. В первом примере относительная ошибка измерений составит ~6%, во втором: ~12%.

Обсуждение и заключения

Видно, что с помощью полученного выражения можно определить требуемые допуски при изготовлении образца в зависимости от величины допустимых ошибок измерений. Для повышения точности измерений с практической точки зрения необходимо минимизировать величину зазора между образцом материала и широкой стенкой волновода, а для материалов с большой величиной диэлектрической проницаемости целесообразно проводить измерения либо в свободном пространстве, либо в открытых резонаторах. Показано также, что прямое измерение собственно коэффициента отражения от образца материала, помещенного в волновод, является не совсем корректным, так как не учитывает углы падения электромагнитной волны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. 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. №S. С. 348–352.
5. Беляев А.А., Беспалова Е.Е., Романов А.М. Пожаробезопасные радиопоглощающие материалы для безэховых камер //Авиационные материалы и технологии. 2013. №1. С. 53–55.
6. 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.
7. Брандт Л.А. Исследования диэлектриков на сверхвысоких частотах. М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит. 1963. С. 191–201.
8. Широков В.В., Романов А.М. Исследование диэлектрических характеристик стеклосотопласта волноводным методом //Авиационные материалы и технологии. 2013. №4. С. 62–68.
9. Беляев А.А., Широков В.В., Романов А.М. Исследование диэлектрических характеристик монолитных стеклопластиков радиотехнического назначения //Композитный мир. 2014 (в печати).
10. Беспалова Е.Е., Беляев А.А., Романов А.М., Широков В.В. Исследование диэлектрических характеристик слоев многослойного радиопоглощающего материала для безэховых камер на

- основе вспененного асбеста, наполненного науглероженным волокном //Труды ВИАМ. 2014. №8. Ст. 12 (viam-works.ru).
11. 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.
 12. Никольский В.В., Никольская Т.И. Электродинамика и распространение радиоволн. М.: URSS. 2012. С. 44, 163–164.
 13. Бибииков 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.
 14. Корн Г.А., Корн Т.М. Спуск с вычислением координат градиента: Справочник по математике. М.: Наука. 1984. 660 с.
 15. 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.
 16. Бреховских А.М. Волны в слоистых средах. М.: Наука. 1957. С. 52–56.
 17. Оделевский В.И. Расчет обобщенной проводимости гетерогенных структур. 1-матричные двухфазные системы с невытянутыми включениями //ЖТФ. 1951. Т. XXI. №5. С. 668–676.
 18. Фальковский О.И. Техническая электродинамика. СПб.: Лань. 2009. 244 с.
 19. Колосов Ю.А., Левков Ф.Е. Точностные характеристики волноводного метода определения электрических параметров диэлектриков //Вопросы радиоэлектроники. Сер. Общие вопросы радиоэлектроники. 1985. №12. С. 18–33.
 20. Колосов Ю.А., Левков Ф.Е. О волноводном методе определения электрических параметров диэлектриков //Вопросы радиоэлектроники. Сер. Общие вопросы радиоэлектроники. 1986. №1. С. 41–45.

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] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 7–17.
2. Kablov E.N. Himija v aviacionnom materialovedenii [Chemistry aviation materials] //Rossijskij himicheskij zhurnal. 2010. T. LIV. №1. S. 3–4.
3. Kablov E.N. Aviakosmicheskoe materialovedenie [Aerospace materials] //Vse materialy. Jenciklopedicheskij spravocnik. 2008. №3. S. 2–14.
4. 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.

5. 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.
6. Agafonova A.S., Beljaev A.A., Kondrashov Je.K., Romanov A.M. Osobennosti formirovanija 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.
7. Brandt L.A. Issledovanija dijelektrikov na sverhvisokih chastotah [Studies dielectrics at microwave frequencies]. M.: Gos. izd-vo fiz.-mat. lit. 1963. S. 191–201.
8. Shirokov V.V., Romanov A.M. Issledovanie dijelektricheskikh harakteristik steklosotoplasta volnovodnym metodom [Study of the dielectric characteristics of the waveguide method steklosotoplasta] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №4. S. 62–68.
9. Beljaev A.A., Shirokov V.V., Romanov A.M. Issledovanie dijelektricheskikh harakteristik monolitnyh stekloplastikov radiotekhnicheskogo naznachenija [The study of dielectric properties of monolithic fiberglass radio engineering] //Kompozitnyj mir. 2014 (v pečati).
10. Bepalova E.E., Beljaev A.A., Romanov A.M., Shirokov V.V. Issledovanie dijelektricheskikh harakteristik sloev mnogoslojnogo radiopogloshhajushhego materiala dlja bezjehovyh kamer na osnove vspennogo asbesta, napolnennogo nauglerozhennym voloknom [Study of the dielectric characteristics of radar absorbing layers of the multilayer material for anechoic chambers on the basis of foam asbestos filled with carbonized fiber] //Trudy VIAM. 2014. №8. St. 12 (viam-works.ru).
11. 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.
12. Nikol'skij V.V., Nikol'skaja T.I. Jelektrodinamika i rasprostranenie radiovoln [Electrodynamics and Propagation]. M.: URSS. 2012. S. 44, 163–164.
13. Bibikov S.B., Titov A.N., Cherepanov A.K. Sintez materiala s zadannym koeficientom otrzhenija 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 Mezhdunarodnoj nauch.-tehnich. konf. «Radiolokacija. Navigacija. Svjaz'». Voronezh. 2009. S. 1578–1584.
14. 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.
15. 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.
16. Brehovskih A.M. Volny v sloistyh sredah [Waves in layered media]. M.: Nauka. 1957. S. 52–56.

17. Odelevskij V.I. Raschet obobshhennoj provodimosti geterogennyh struktur. 1-matrichnye dvuhfaznye sistemy s nevytjanutymi vkljuchenijami [Calculation of generalized conductivity heterogeneous structures. 1-matrix two-phase system with unstretched inclusions] //ZhTF. 1951. T. XXI. №5. S. 668–676.
18. Fal'kovskij O.I. Tehnicheskaja jelektrodinamika [Technical electrodynamics]. SPb.: Lan'. 2009. 244 s.
19. Kolosov Ju.A., Levkov F.E. Tochnostnye harakteristiki volnovodnogo metoda opredelenija jelektricheskikh parametrov dijelektrikov [Performance characteristics of the waveguide method for determining the parameters of electrical insulators] //Voprosy radioelektroniki. Ser. Obshhie voprosy radioelektroniki. 1985. №12. S. 18–33.
20. Kolosov Ju.A., Levkov F.E. O volnovodnom metode opredelenija jelektricheskikh parametrov dijelektrikov [About waveguide method for determining the electrical parameters of dielectrics] //Voprosy radioelektroniki. Ser. Obshhie voprosy radioelektroniki. 1986. №1. S. 41–45.