



УДК 678.067.5

DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-5-6-6

ИЗМЕРЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ СТЕКЛОСОТОПЛАСТА В СВОБОДНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

А.А. Беляев

А.М. Романов

кандидат технических наук

В.В. Широков

Е.М. Шулдешов

Май 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.А. Беляев¹, А.М. Романов¹, В.В. Широков¹, Е.М. Шульдешов¹

ИЗМЕРЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ СТЕКЛОСОТОПЛАСТА В СВОБОДНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Рассматривается способ измерения диэлектрической проницаемости стеклосотопласта в свободном пространстве. По измеренному комплексному коэффициенту прохождения образца стеклосотопласта вычисляется его диэлектрическая проницаемость. Проводится оценка влияния переотражений между образцом и близко расположенной приемной антенной. Также сравниваются результаты измерений в свободном пространстве с результатами измерений волновым методом.

Ключевые слова: *диэлектрическая проницаемость, комплексный коэффициент прохождения, плоскопараллельный слой диэлектрика, анализатор цепей, стеклосотопласт.*

A.A. Belyaev¹, A.M. Romanov¹, V.V. Shirokov¹, E.M. Shuldeshov¹

MEASUREMENT OF HONEYCOMB GLASS FIBER PLASTICSPERMITTIVITY IN FREE SPACE

In given article a method of measurement of honeycomb glass fiber plastics permittivity in free space is considered. On the measured complex transiting ratio of the honeycomb glass fiber plastics sample its permittivity is calculated. The estimation of influence rereflection between the sample and close located reception aerial is spent. Also comparisons of results of measurements in free space with results of measurements a waveguide method are resulted.

Keywords: *permittivity, complextransiting ratio, plain-parallel dielectric layer, the analyzer of circuits, honeycomb glass fiber plastics.*

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

Среди приоритетных стратегических направлений развития материалов и технологий в статье [1] отмечена разработка полимерных композиционных материалов. Среди задач стратегии развития композиционных и функциональных материалов [2] отмечены компьютерные методы моделирования структуры и свойств материалов при их создании и работе в конструкции. Одной из таких задач является создание материалов для стенок обтекателей и электродинамический расчет таких стенок, например, в работе [3] приведен алгоритм расчета антенного обтекателя в приближении физической оптики. С точки зрения весовых характеристик, широкополосности и широкоугольности работы преимущество имеет стенка обтекателя трехслойной конструкции. Она представляет собой структуру, состоящую из двух тонких обшивок на основе стеклопластика и расположенного между ними облегченного слоя на основе стеклосотопласта. Современная технология изготовления трехслойной структуры [4] позволяет применить бесклеевой способ изготовления с использованием препрегов, что улучшает радиотехнические характеристики структуры за счет отсутствия клеевого слоя. В такой структуре обшивки из стеклопластика обеспечивают прочность при растяжении и изгибе [5–8], в том числе при высоких температурах [9], а стеклосотопласт обеспечивает прочность при сжатии [10].

Сложность расчета такой стенки связана с тем, что – в отличие от других материалов стенки обтекателя – сотопласт представляет собой гетерогенную анизотропную структуру и его эффективная (с точки зрения прохождения электромагнитной волны через слой) диэлектрическая проницаемость зависит от направления падения электромагнитной волны на поверхность слоя сотопласта и поляризации вектора напряженности электрического поля (E) относительно плоскости падения и плоскости склеивания сот. Поэтому для проектирования стенки обтекателя трехслойной конструкции, обеспечивающего при работе совместно с антенной требуемую диаграмму направленности, необходима информация об эффективной диэлектрической проницаемости сотопласта при различных направлениях облучения и поляризации. В работе [11] приведены результаты исследования диэлектрической проницаемости сотопласта ССП-1-4,2 на частоте 3 ГГц (длина волны 10 см) волноводным методом. Однако при относительной простоте и небольших размерах образцов для испытаний возникают следующие проблемы:

- необходимо вырезать образец и подгонять его под размер волновода с точностью до 0,1 мм;

– с точки зрения величины коэффициентов прохождения и отражения процесс падения волноводной волны основного типа в прямоугольном волноводе H_{10} на плоскопараллельный образец эквивалентен процессу распространения в пространстве двух плоских волн, падающих на образец бесконечных размеров и такой же толщины как образец в волноводе, под углом φ при поляризации, перпендикулярной плоскости падения [11]; при этом $\sin\varphi = \lambda_0/\lambda_{кр}$, где λ_0 – длина волны излучения в свободном пространстве; $\lambda_{кр}$ – критическая длина волны основного типа, равная удвоенному размеру широкой стенки волновода. Для волны основного типа $30 < \varphi < 90$ град [10], т. е. возможно исследование диэлектрической проницаемости при падении под углами только для поляризации, перпендикулярной плоскости падения, при ограниченном спектре углов падения, и невозможно провести исследования при нормальном падении.

Поэтому помимо измерений волноводным методом целесообразно проведение исследования диэлектрической проницаемости сотового заполнителя (например ССП-1-4,2) путем измерения комплексного коэффициента прохождения в свободном пространстве, для чего были проведены исследования образцов размером 600×600 мм и толщиной 46 мм при частоте 3,15 ГГц (длина волны 9,52 см).

Схема измерительного стенда представлена на рис. 1. Стенд размещен в безэховой камере. В качестве анализатора цепей использовали векторный анализатор фирмы «Agilent Technologies» модели «PNA-L Network Analyzer» 5230C, в качестве антенн – измерительные рупорные антенны Пб-23 с размером апертуры 340×260 мм. Расстояние между апертурой передающей антенны и образцом ~ 9 м, между апертурой приемной антенны и центром образца 500 мм. При этом можно считать, что образец находится в дальней зоне передающей антенны и участок сферического фронта волны, перехватываемый поверхностью образца, близок к плоскому (для частоты 3,15 ГГц разность фаз облучающего поля между центром образца и его краями не превышает 0,05 длины волны). Поэтому для комплексного коэффициента прохождения $T = |T| \cdot e^{i\theta}$ плоскопараллельного образца, изображенного на рис. 1, справедливо выражение, соответствующее прохождению плоской волны через плоскопараллельный образец при произвольном угле падения φ , для поляризации электрического поля, перпендикулярной и параллельной плоскости падения.

Параметры свободного пространства (по обе стороны вне образца) обозначены индексом 1, а параметры среды образца – индексом 2.

В соответствии с работами [12, 13] выражение для коэффициента прохождения T (в общем случае – комплексного) плоской волны через плоскопараллельный слой толщиной d , расположенный в свободном пространстве, имеет вид

$$T = \frac{T_{12} \cdot T_{21}}{1 - R_{12} \cdot R_{21}} e^{i\beta}, \quad (1)$$

где R_{12} и T_{12} – соответственно коэффициенты отражения и прохождения при входе плоской волны через границу раздела из свободного пространства в образец; R_{21} и T_{21} – соответственно коэффициенты отражения и прохождения при выходе плоской волны через границу раздела из образца в свободное пространство (в общем случае все 4 величины – комплексные); β – в общем случае комплексная величина, действительная часть которой равна величине изменения фазы при прохождении плоской волны через образец, мнимая часть равна декременту затухания при прохождении плоской волны через образец.



Рисунок 1. Схема измерительного стенда

В данной работе для комплексных представлений величин, изменяющихся по гармоническому закону, принята зависимость от времени $e^{-i\omega t}$. Комплексная относительная диэлектрическая и магнитная проницаемости при этом представлены соответственно в виде $\varepsilon = \varepsilon' + i\varepsilon''$ и $\mu = \mu' + i\mu''$. В данной работе рассматриваются немагнитные материалы, для которых $\mu = 1$. При оговоренных условиях в соответствии с работой [10] величина

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{\varepsilon - (\sin\varphi)^2} \cdot d, \quad (2)$$

где λ_0 – длина волны в свободном пространстве; ε – диэлектрическая проницаемость среды образца (в общем случае – комплексная, для сотопласта – эффективная).

С помощью несложных преобразований в соответствии с выражениями, приведенными в работах [10, 12, 14], можно показать, что

$$T = \frac{1 - R_{12}^2}{1 - R_{12}^2 \cdot e^{i2\beta}} e^{i\beta}. \quad (3)$$

В соответствии с работами [10, 14–16] при поляризации вектора электрического поля, перпендикулярного плоскости падения,

$$R_{12} = \frac{\cos\varphi - \sqrt{\varepsilon - (\sin\varphi)^2}}{\cos\varphi + \sqrt{\varepsilon - (\sin\varphi)^2}}, \quad (4)$$

а при поляризации вектора электрического поля, параллельной плоскости падения,

$$R_{12} = \frac{\sqrt{\varepsilon - (\sin\varphi)^2} - \varepsilon \cdot \cos\varphi}{\sqrt{\varepsilon - (\sin\varphi)^2} + \varepsilon \cdot \cos\varphi}. \quad (5)$$

Измерения проводили при углах падения от 0 до 60 град и ориентации вектора напряженности электрического поля параллельно и перпендикулярно плоскости падения на 10 однотипных образцах. Для каждого цикла измерений при нулевом угле падения волны, образец устанавливали на вращающуюся площадку в двух вариантах, когда плоскость склеивания перпендикулярна или параллельна вектору напряженности электрического поля.

Перед измерениями анализатор цепей калибруют при отсутствии образца и измеряемая величина $T_{\text{изм}} = |T_{\text{изм}}| \cdot e^{i\theta_{\text{изм}}}$ является коэффициентом прохождения образца, нормированным относительно коэффициента прохождения $T_{\text{св.пр}}$ для участка свободного пространства, занимаемого образцом. В соответствии с работой [10]

$$T_{\text{св.пр}} = e^{i \frac{360^\circ}{\lambda_0} d \cdot \cos\varphi}. \quad (6)$$

Таким образом,

$$T_{\text{изм}} = \frac{T}{T_{\text{св.пр}}} = \frac{1 - R_{12}^2}{1 - R_{12}^2 \cdot e^{i2\beta}} \cdot \frac{e^{i\beta}}{e^{i \frac{360^\circ}{\lambda_0} d \cdot \cos\varphi}}. \quad (7)$$

Выражения (3) и (7) не учитывают переотражения между антеннами и образцом. Из анализа рис. 1 и его описания можно видеть, что наибольшее влияние могут иметь отражения от приемной антенны, так как образец находится от нее на расстоянии, соизмеримом с размерами приемного рупора и образца (практически в ближней зоне). В то же время образец находится в дальней зоне передающей антенны и при переотражениях электромагнитной волны между ними пространственное рассеивание и влияние переотражений значительно меньше, чем между образцом и приемной антенной [17]. На

рис. 2 изображена в представлении геометрической оптики схема переотражения волны, прошедшей через образец и отраженной приемной антенной, а затем образцом.

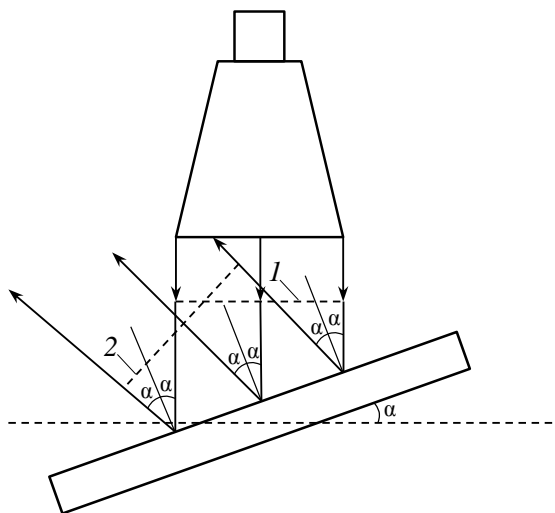


Рисунок 2. Схема переотражения волны между образцом и приемной антенной: 1 – фронт волны, отраженной приемной антенной; 2 – фронт волны, переотраженной образцом

Расчеты показывают, что уже при угле падения 20 град фронт волны, отраженной образцом, проходит мимо антенны. При увеличении угла падения от 0 до 20 град часть площади фронта волны, пересекающая площадь рупора антенны, убывает от всей площади до 0. Поэтому наибольший интерес представляет оценка влияния на коэффициент прохождения переотражений между образцом и приемной антенной при углах падения, близких к нулю ($\varphi < 5$ град). Влияние многократных переотражений между приемной антенной и образцом на комплексный коэффициент прохождения при углах падения, близких к 0, можно учесть с помощью множителя

$$m_a = \frac{1}{1 - R \cdot R_a \cdot e^{i2\gamma}}, \quad (8)$$

$$T_a = T \cdot m_a, \quad (9)$$

где R – коэффициент отражения от образца в свободном пространстве (в зеркальном направлении при ненулевых углах падения); R_a – коэффициент отражения от апертуры приемной антенны; T_a – коэффициент прохождения с учетом переотражений между образцом и приемной антенной; $\gamma = \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot d_{a0}$, d_{a0} – расстояние между образцом и апертурой приемной антенны.

Для волны, отраженной от приемной антенны, образец представляет собой плоско-параллельный отражатель, расположенный в свободном пространстве. Расчетные коэффициенты отражения от него при различных углах падения и ориентации вектора электрического поля приведены в табл. 1. В качестве величины относительной диэлектрической проницаемости ϵ из априорных данных взяты значения от 1,07 до 1,12, а для тангенса угла диэлектрических потерь – величина 0,003. Расчет проводили на частоте 3,15 ГГц, при которой электрическая толщина образца при малых углах падения близка к полуволне.

Таблица 1

**Расчетные значения модулей коэффициентов отражений $|R|$
(коэффициент отражения по напряженности поля E)**

Относительная диэлектрическая проницаемость	Поляризация вектора E относительно площади падения	$ R $ при угле падения волны, град				
		0	5	10	15	20
1,07	Параллельно	0,00017	0,00048	0,00154	0,00321	0,00524
	Перпендикулярно	0,00017	0,00048	0,00164	0,00368	0,00677
1,08	Параллельно	0,00050	0,00017	0,00121	0,00311	0,00545
	Перпендикулярно	0,00050	0,00017	0,00128	0,00357	0,00703
1,10	Параллельно	0,00197	0,00144	0,00024	0,00253	0,00549
	Перпендикулярно	0,00197	0,00146	0,00025	0,00290	0,00500
1,2	Параллельно	0,00396	0,00333	0,00148	0,00146	0,00505
	Перпендикулярно	0,00396	0,00337	0,00157	0,00146	0,00648

Коэффициент отражения от апертуры антенны R_a не превышает -10 дБ, т. е. $|R_a|$ составляет не более $\sqrt{0,1} \approx 0,32$. Таким образом, видно, что для указанного образца $|R| \cdot |R_a| \leq 1$ и аргумент комплексной величины m_a находится в пределах $\pm |R| \cdot |R_a|$. Это максимальная ошибка определения аргумента комплексного коэффициента прохождения $T = |T| \cdot e^{i\theta}$, обусловленная переотражениями между приемной антенной и образцом в представлении геометрической оптики. При $\epsilon = 1,2$ и малых углах падения $|R| \cdot |R_a| \leq 0,000123$ или 0,007 град. Аргумент измеренного коэффициента прохождения составит приблизительно $\theta_{\text{изм}} \cong \frac{360^\circ}{\lambda_0} \cdot \cos\varphi \cdot d \cdot (\sqrt{\epsilon} - 1) = 8,3$ град (при частоте 3,15 ГГц и $\lambda_0 = 9,52$ см), т. е. максимальная ошибка определения θ , обусловленная переотражениями между приемной антенной и образцом, составит 0,085%. Диэлектрическую проницаемость образца можно представить с достаточной точностью для предполагаемой величины образца и при малых углах падения в виде

$$\epsilon \cong 1 + 2 \cdot (\sqrt{\epsilon} - 1). \quad (10)$$

Приблизительно величина $\sqrt{\epsilon} - 1$ при малых углах падения имеет порядок не более 0,1 и пропорциональна аргументу коэффициента прохождения θ , ошибка определения ко-

того не более 0,1%. Таким образом, относительная ошибка определения ε , обусловленная переотражениями между приемной антенной и образцом, с учетом выражения (8) составит не более 0,02%. Для значений $\varepsilon < 1,12$ относительная ошибка будет еще меньше. Поэтому влиянием приемной антенны на результаты определения ε можно пренебречь и величину ε определять по результатам измерений $|T_{\text{изм}}|$ и $\vartheta_{\text{изм}}$ с помощью формулы для свободного пространства (7) с учетом выражений (2)–(5) методом последовательных приближений. В нулевом приближении полагали $R_{12} = R_{12_0} = 0$ и вычисляли ε_0 . Затем, используя значение ε_0 и выражения (4) или (5), вычисляли в первом приближении R_{12_1} . Величины R_{12_1} использовали в уравнении (7) и вычисляли ε_1 и так далее. Второе приближение практически не отличалось от первого.

В табл. 2–5 приведены результаты измерений. Величины, приведенные в табл. 2–5, равны $|\varepsilon| \cong \varepsilon'$. Чувствительность установки не позволяла точно установить величину тангенса угла диэлектрических потерь, но судя по колебаниям модуля измеренного коэффициента отражения можно сказать, что тангенс угла диэлектрических потерь находится в пределах 0,002–0,003. Для каждого угла падения измерения проводились при двух симметричных положениях образца относительно направления распространения электромагнитной волны (+ φ и - φ).

Таблица 2

Результаты измерения относительной диэлектрической проницаемости ε образцов сотопласта ССП-1-4,2 при ориентации вектора напряженности электрического поля E параллельно плоскости падения при углах падения 0, 15 и 30 град

Ориентация плоскости склеивания сот относительно вектора E	Условный номер образца	Значение ε при угле падения волны, град						
		0	15			30		
			+15	-15	Среднее	+30	-30	Среднее
Перпендикулярно	1	1,08	1,10	1,08	1,09	1,12	1,09	1,11
	2	1,07	1,08	1,07	1,08	1,10	1,08	1,09
	3	1,08	1,09	1,09	1,09	1,11	1,09	1,10
	4	1,07	1,08	1,07	1,08	1,10	1,08	1,09
	5	1,08	1,09	1,08	1,08	1,10	1,09	1,10
	6	1,07	1,08	1,08	1,08	1,10	1,10	1,10
	7	1,07	1,08	1,08	1,08	1,10	1,08	1,09
	8	1,08	1,09	1,10	1,09	1,11	1,11	1,11
	9	1,07	1,08	1,08	1,08	1,10	1,10	1,10
	10	1,07	1,08	1,07	1,08	1,11	1,08	1,09
		Общее среднее	1,07	1,08			1,10	
Параллельно	1	1,10	1,11	1,10	1,10	1,13	1,11	1,12
	2	1,10	1,10	1,10	1,10	1,12	1,10	1,11
	3	1,11	1,11	1,10	1,11	1,13	1,11	1,12
	4	1,10	1,11	1,11	1,11	1,13	1,11	1,12
	5	1,10	1,11	1,10	1,10	1,12	1,11	1,11
	6	1,10	1,11	1,11	1,11	1,12	1,13	1,12
	7	1,10	1,11	1,10	1,10	1,12	1,11	1,11
	8	1,10	1,11	1,11	1,11	1,12	1,12	1,12
	9	1,09	1,10	1,10	1,10	1,11	1,12	1,12
	10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,12	1,11	1,11

	Общее среднее	1,10	1,10	1,12
--	---------------	------	------	------

Таблица 3

Результаты измерения относительной диэлектрической проницаемости ϵ образцов сотопласта ССП-1-4,2 при ориентации вектора напряженности электрического поля E параллельно плоскости падения при углах падения 45 и 60 град

Ориентация плоскости склеивания сот относительно вектора E	Условный номер образца	Значение ϵ при угле падения волны, град					
		45			60		
		+45	-45	Среднее	+60	-60	Среднее
Перпендикулярно	1	1,14	1,10	1,12	1,14	1,10	1,12
	2	1,12	1,09	1,10	1,12	1,10	1,11
	3	1,13	1,10	1,11	1,12	1,11	1,12
	4	1,12	1,09	1,10	1,12	1,10	1,11
	5	1,12	1,10	1,11	1,12	1,11	1,12
	6	1,10	1,12	1,11	1,12	1,11	1,12
	7	1,11	1,09	1,10	1,12	1,10	1,11
	8	1,11	1,13	1,12	1,12	1,10	1,11
	9	1,10	1,12	1,11	1,12	1,10	1,11
	10	1,12	1,09	1,11	1,12	1,10	1,11
	Общее среднее	1,11			1,11		
Параллельно	1	1,14	1,12	1,13	1,13	1,12	1,13
	2	1,13	1,11	1,12	1,12	1,12	1,12
	3	1,14	1,11	1,13	1,14	1,11	1,12
	4	1,14	1,12	1,13	1,13	1,12	1,12
	5	1,13	1,12	1,12	1,14	1,12	1,13
	6	1,11	1,14	1,12	1,12	1,12	1,12
	7	1,13	1,12	1,12	1,13	1,12	1,12
	8	1,11	1,13	1,12	1,14	1,11	1,12
	9	1,11	1,13	1,12	1,14	1,12	1,13
	10	1,13	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12
	Общее среднее	1,12			1,12		

Таблица 4

Результаты измерения относительной диэлектрической проницаемости ϵ образцов сотопласта ССП-1-4,2 при ориентации вектора напряженности электрического поля E перпендикулярно плоскости падения при углах падения 0, 15 и 30 град

Ориентация плоскости склеивания сот относительно вектора E	Условный номер образца	Значение ϵ при угле падения волны, град						
		0	15			30		
			+15	-15	Среднее	+30	-30	Среднее
Перпендикулярно	1	1,08	1,08	1,08	1,08	1,09	1,08	1,08
	2	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08
	3	1,07	1,07	1,07	1,07	1,08	1,07	1,08
	4	1,07	1,07	1,07	1,07	1,08	1,07	1,08
	5	1,07	1,08	1,07	1,08	1,08	1,08	1,08
	6	1,08	1,08	1,07	1,08	1,08	1,07	1,08
	7	1,07	1,07	1,07	1,07	1,08	1,07	1,08
	8	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08
	9	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07
	10	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08
	Общее среднее	1,07	1,08			1,08		

Параллельно	1	1,10	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11
	2	1,10	1,11	1,10	1,10	1,11	1,10	1,11
	3	1,09	1,10	1,09	1,09	1,11	1,09	1,10
	4	1,10	1,10	1,10	1,10	1,11	1,10	1,10
	5	1,10	1,10	1,10	1,10	1,11	1,10	1,10
	6	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10
	7	1,10	1,10	1,09	1,10	1,11	1,10	1,10
	8	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10
	9	1,10	1,10	1,09	1,10	1,10	1,09	1,10
	10	1,11	1,12	1,11	1,11	1,12	1,11	1,11
	Общее среднее	1,10	1,10			1,10		

Таблица 5

Результаты измерения относительной диэлектрической проницаемости ϵ образцов сотопласта ССП-1-4,2 при ориентации вектора напряженности электрического поля E перпендикулярно плоскости падения при углах падения 45 и 60 град

Ориентация плоскости склеивания сот относительно вектора E	Условный номер образца	Значение ϵ при угле падения волны, град					
		45			60		
		+45	-45	Среднее	+60	-60	Среднее
Перпендикулярно	1	1,09	1,08	1,08	1,08	1,07	1,08
	2	1,09	1,07	1,08	1,08	1,07	1,08
	3	1,08	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07
	4	1,08	1,07	1,08	1,07	1,07	1,07
	5	1,08	1,08	1,08	1,08	1,07	1,07
	6	1,07	1,08	1,07	1,06	1,07	1,07
	7	1,08	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07
	8	1,08	1,08	1,08	1,07	1,07	1,07
	9	1,07	1,07	1,07	1,06	1,07	1,06
	10	1,08	1,07	1,08	1,08	1,07	1,07
	Общее среднее	1,08			1,07		
Параллельно	1	1,11	1,10	1,11	1,11	1,10	1,10
	2	1,11	1,09	1,10	1,10	1,09	1,10
	3	1,11	1,08	1,09	1,11	1,08	1,09
	4	1,11	1,10	1,10	1,10	1,09	1,09
	5	1,11	1,09	1,10	1,10	1,09	1,09
	6	1,10	1,10	1,10	1,09	1,09	1,09
	7	1,11	1,09	1,10	1,10	1,09	1,09
	8	1,10	1,10	1,10	1,08	1,09	1,09
	9	1,09	1,10	1,10	1,08	1,09	1,09
	10	1,12	1,10	1,11	1,10	1,09	1,10
	Общее среднее	1,10			1,09		

Анализируя результаты, приведенные в табл. 2–5, можно сделать следующие выводы:

– при поляризации вектора напряженности электрического поля E параллельно плоскости падения и ориентации плоскости склеивания перпендикулярно вектору E при нулевом угле падения (табл. 2–3) относительная диэлектрическая проницаемость сотопласта по мере увеличения угла падения от 0 до 60 град возрастает от 1,07 до 1,11; это связано с тем, что при увеличении угла падения угол между плоскостью склеивания и вектором E уменьшается от 90 до 30 град;

– при поляризации вектора напряженности электрического поля E параллельно плоскости падения и ориентации плоскости склеивания параллельно вектору E при нулевом угле падения (см. табл. 2–3) относительная диэлектрическая проницаемость со-

топласта по мере увеличения угла падения от 0 до 60 град слабо возрастает от 1,10 до 1,12 (плоскость склеивания остается параллельной вектору E при всех углах падения);

– при поляризации вектора напряженности электрического поля E перпендикулярно плоскости падения и ориентации плоскости склеивания перпендикулярно вектору E (см. табл. 4–5) величина относительной диэлектрической проницаемости практически не изменяется с ростом угла падения от 0 до 60 град – и находится в пределах от 1,07 до 1,08 (при всех углах падения плоскость склеивания перпендикулярна вектору E);

– при поляризации вектора напряженности электрического поля E перпендикулярно плоскости падения и ориентации плоскости склеивания параллельно вектору E (см. табл. 4–5) величина относительной диэлектрической проницаемости не изменяется с ростом угла падения от 0 до 60 град – и равна величине 1,10 (при всех углах падения плоскость склеивания параллельна вектору E);

– при поляризации вектора напряженности электрического поля E перпендикулярно плоскости падения происходит незначительное уменьшение измеряемой величины при угле падения 60 град, связанное с тем, что при взаимном расположении антенны и образца при поляризации антенны перпендикулярно плоскости падения при угле падения 60 град размер в плоскости вектора H проекции образца на плоскость апертуры приемной антенны меньше соответствующего размера апертуры.

С целью проверки полученных результатов [18] проведено сравнение с результатами измерений в волноводной измерительной линии [11]. В волноводной измерительной линии размером 90×45 мм измерения проводили при частоте 3 ГГц (длина волны 10 см). Как было показано в работе [10], это соответствует с точки зрения коэффициентов отражения и прохождения падению плоской волны на образец под углом 33 град при поляризации вектора E перпендикулярно плоскости падения. При параллельной взаимной ориентации плоскости склеивания и вектора E измеряемая величина при измерении волноводным методом составляет 1,09, а при измерении в свободном пространстве при угле падения 30 град и поляризации вектора E перпендикулярно плоскости падения: 1,10. При перпендикулярной взаимной ориентации плоскости склеивания и вектора E измеряемая величина при измерении волноводным методом составляет 1,07, а при измерении в свободном пространстве при угле падения 30 град и поляризации вектора E перпендикулярно плоскости падения: 1,08. Таким образом, различие при разных методах измерений незначительное и не превышает 0,01.

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. Гращенко Д.В., Чурсова Л.В. Стратегия развития композиционных и функциональных материалов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 231–242.
3. Виноградный А.В., Колосов Ю.А., Левков Ф.Е. Алгоритм расчета характеристик антенного обтекателя в приближении физической оптики //Антенны. Радиотехника. 2007. №7. С. 59–65.
4. Стрельников С.В., Застрогина О.Б., Вешкин Е.А., Швец Н.И. К вопросу о создании высокоэффективных технологий изготовления панелей интерьера в крупносерийном производстве //Авиационные материалы и технологии. 2011. №4. С. 18–24.
5. Давыдова И.Ф., Кавун Н.С. Стеклопластики – многофункциональные композиционные материалы //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 253–260.
6. Кириллов В.В., Кавун Н.С., Деев И.С. и др. Исследование влияния тепловлажностного воздействия на свойства эпоксидных стеклопластиков //Пластические массы. 2008. №9. С. 14–17.
7. Давыдова И.Ф., Каблов Е.Н., Кавун Н.С. Термостойкие негорючие полиимидные стеклотекстолиты для изделий авиационной и ракетной техники //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2009. №9. С. 2–11.
8. Давыдова И.Ф., Кавун Н.С. Термостойкие герметичные стеклотекстолиты //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2011. №11. С. 18–20.
9. Полиимидное связующее для армированных пластиков, препрег на его основе и изделие, выполненное из него: пат. 2394857 Рос. Федерация; опубл. 07.05.2009.
10. Гуртовник И.Г., Соколов В.И., Трофимов Н.Н., Шалгунов С.И. Радиопрозрачные изделия из стеклопластиков. М.: Мир. 2003. С. 218, 221, 225, 229.
11. Широков В.В., Романов А.М. Исследование диэлектрических характеристик стеклосотопласта волноводным методом //Авиационные материалы и технологии. 2013. №4. С. 62–68.
12. Кобак В.О. Радиолокационные отражатели. М.: Советское радио. 1975. С. 14–17, 20–22.
13. Акатенков Р.В., Аношкин И.В., Беляев А.А. и др. Влияние структурной организации углеродных нанотрубок на радиоэкранирующие и электропроводящие свойства нанокомпозитов //Авиационные материалы и технологии. 2011. №1. С. 35–42.

14. Фальковский О.И. Техническая электродинамика: Учебник. 2-е изд. СПб.: Лань. 2009. С. 152.
15. Баскаков С.И. Электродинамика и распространение радиоволн. М: Либроком. 2012. 87 с.
16. Никольский В.В., Никольская Т.И. Электродинамика и распространение радиоволн. М.: Либроком. 2012. 132 с.
17. Григоров И.Н. Все об антеннах. М.: «ДМК Пресс». 2009. 124 с.
18. Турченков В.А., Баранов Д.Е., Гагарин М.В., Шишкин М.Д. Методический подход к проведению экспертизы материалов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №1. С. 47–53.

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. Grashhenkov D.V., Chursova L.V. Strategija razvitija kompozicionnyh i funkcional'nyh materialov [Development Strategy composite and functional materials] //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 231–242.
3. Vinogradnyj A.V., Kolosov Ju.A., Levkov F.E. Algoritm rascheta harakteristik anten-nogo obtekatelja v priblizhenii fizicheskoj optiki [The algorithm for calculating the characteristics of the antenna radome in physical optics approximation] //Antenny. Radiotekhnika. 2007. №7. С. 59–65.
4. Strel'nikov S.V., Zastrogina O.B., Veshkin E.A., Shvec N.I. K voprosu o sozdanii vysokoeffektivnyh tehnologij izgotovlenija panelej inter'era v krupnoserijsnom proizvodstve [Towards the creation of highly efficient manufacturing techniques interior panels in large-scale production] //Авиационные материалы и технологии. 2011. №4. С. 18–24.
5. Davydova I.F., Kavun N.S. Stekloplastiki – mnogofunkcional'nye kompozicionnye materialy [GRP – multifunctional composite materials] //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 253–260.
6. Kirillov V.V., Kavun N.S., Deev I.S. i dr. Issledovanie vlijanija teplovlazhnostnogo vozdejstvija na svojstva jepoksidnyh stekloplastikov [Investigation of the influence of heat and humidity effects on the properties of epoxy GRP] //Plasticheskie massy. 2008. №9. С. 14–17.

7. Davydova I.F., Kablov E.N., Kavun N.S. Termostojkie negorjuchie poliimidnye steklotekstolity dlja izdelij aviacionnoj i raketnoj tehniki [Heat-resistant polyimide incombustible Fiberglass products for the aviation and rocketry] //Vse materialy. Jenciklopedicheskij spravocnik. 2009. №9. S. 2–11.
8. Davydova I.F., Kavun N.S. Termostojkie germetichnye steklotekstolity [Heat-resistant sealed Fiberglass] //Vse materialy. Jenciklopedicheskij spravocnik. 2011. №11. S. 18–20.
9. Poliimidnoe svjazujushhee dlja armirovannyh plastikov, prepreg na ego osnove i izdelie, vypolnennoe iz nego [Polyimide binder for fiber reinforced plastics, the prepreg on the basis thereof and a product made therefrom]: pat. 2394857 Ros. Federacija; opubl. 07.05.2009.
10. Gurtovnik I.G., Sokolov V.I., Trofimov N.N., Shalgunov S.I. Radioprozrachnye izdelija iz stekloplastikov [Radioparent of fiberglass products]. M.: Mir. 2003. S. 218, 221, 225, 229.
11. Shirokov V.V., Romanov A.M. Issledovanie dijelektricheskikh harakteristik steklosotoplashta volnovodnym metodom [Investigation of the dielectric characteristics of the fiberglass by waveguide method] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №4. S. 62–68.
12. Kobak V.O. Radiolokacionnye otrazhateli [Radar reflectors]. M.: Sovetskoe radio. 1975. S. 14–17, 20–22.
13. Akatenkov R.V., Anoshkin I.V., Beljaev A.A. i dr. Vlijanie strukturnoj organizacii uglerodnyh nanotrubok na radiojekranirujushhie i jelektroprovodjashhie svojstva nanokompozitov [Influence of the structural organization of carbon nanotubes on the radio shielding and conductive properties of the nanocomposites] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2011. №1. S. 35–42.
14. Fal'kovskij O.I. Tehnicheskaja jelektrodinamika [Technical Electrodynamics]: Uchebnik. 2-oe izd. SPb.: Lan'. 2009. S. 152.
15. Baskakov S.I. Jelektrodinamika i rasprostranenie radiovoln [Electrodynamics and Propagation]. M: Librokom. 2012. 87 s.
16. Nikol'skij V.V., Nikol'skaja T.I. Jelektrodinamika i rasprostranenie radiovoln [Electrodynamics and Propagation]. M.: Librokom. 2012. 132 s.
17. Grigorov I.N. Vse ob antennah [All about antennas]. M.: «DMK Press». 2009. 124 s.
18. Turchenkov V.A., Baranov D.E., Gagarin M.V., Shishkin M.D. Metodicheskij podhod k provedeniju jekspertizy materialov [Methodical approach to the examination of materials] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №1. S. 47–53.