

Гирченко А.Г.¹, Скурский П.П.²

¹ Институт химии поверхности НАН Украины. Украина, г. Киев

² Аппарат Совета национальной безопасности и обороны Украины. Украина, г. Киев

ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУР ВАФЕЛЬНОГО ТИПА ИЗ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ОБТЕКАТЕЛЕЙ АНТЕНН СВЧ

Анотація

Запропонована розрахункова модель багатошарових структур вафельного типу з композитних матеріалів для проектування обтічників антен СВЧ і методика синтезу таких структур для вибору раціональних значень їх конструктивних параметрів за вимогами до радіотехнічних характеристик обтічників. Встановлені критерії досягнення системою підкріплюючих силових елементів вафельної структури електродинамічної еквівалентності однорідному шару діелектрика із заданими діелектричними характеристиками. Показано, що багатошарові структури вафельної будови можуть володіти покращуваними радіотехнічними характеристиками в порівнянні з традиційними тришаровими конструкціями.

Abstract

A computational model of multilayer wafer type structure of composite materials for the design of microwave antennas radomes and method of synthesis of such structures to select the rational values of design parameters on the requirements for radio-technical characteristics are proposed. The criteria for the system to reach the supporting force elements waffle structure for electrodynamic equivalent to homogeneous dielectric layer with given dielectric characteristics are established. It is shown that multilayer structures wafer structure may have improved radio-technical characteristics compared to traditional sandwich structures.

Обоснование актуальности проблемы

Стеклопластики, обладающие оптимальным сочетанием прочностных и диэлектрических свойств, получили широкое применение в различных формах конструкций обтекателей антенн РЛС. При их создании стремятся к достижению допустимого компромисса между требованиями к уровню радиопрозрачности и прочностным характеристикам.

Известные технологии создания обтекателей антенн СВЧ основаны на применении многослойных конструкций стенок симметричной структу-

ры и содержат чередующие слои из высокопрочного композиционного диэлектрического материала и менее плотного диэлектрического материала типа пенопласта, сотового и ячеистого наполнителей [1, 2]. Однако, при проектировании конструкций авиационных и ракетных обтекателей не всегда удается обеспечить высокие радиотехнические характеристики в нескольких частотных или широком диапазоне частот в условиях сильных аэродинамических нагрузок и значительного аэродинамического нагрева [3, 4].

Альтернативным путем достижения высоких радиотехнических характеристик для таких конструкций является применение несимметричных подкрепленных многослойных структур из композиционных материалов. Они состоят из наружного силового слоя и внутреннего слоя, изготовленного из пористого диэлектрического материала и/или системы подкрепляющих силовых элементов из высокопрочного диэлектрического материала [3, 4]. Являясь весьма перспективными для достижения высоких радиотехнических свойств, по прочностным возможностям они уступают симметричным конструкциям стенок по прочностным характеристикам. Это объясняется трудностями в технологической реализации такой схемы соединения слоев при создании оболочки обтекателя сложной формы из-за невозможности достижения надежного соединения наружного слоя с системой подкрепляющих силовых элементов и эффективного перераспределения механических напряжений между ними и внешним слоем.

Другим путем усовершенствования технологии и конструкции несимметричных подкрепленных многослойных структур стенок обтекателей может быть использование новой структуры стенки – стенки вафельного типа [5]. Такая конструкция состоит из наружной силовой обшивки и ребристого подкрепления в виде тонких пустотелых пересекающихся ребер, соединенных с ней при помощи специального соединительного слоя, как показано на рис. 1.

Постановка задачи исследования

Однако, для принятия решения о возможности и целесообразности применения таких структур в конструкциях обтекателей антенн СВЧ важным



является знание особенностей их радиотехнических характеристик в сравнении, например, с широко применяемыми на практике трехслойными структурами особенно при проектировании антенных обтекателей для работы в нескольких частотных или широком диапазоне частот. Другой проблемой остается установление условий достижения системой подкрепляющих силовых элементов (рис. 1) электродинамической эквивалентности однородному слою диэлектрика с заданными диэлектрическими характеристиками.

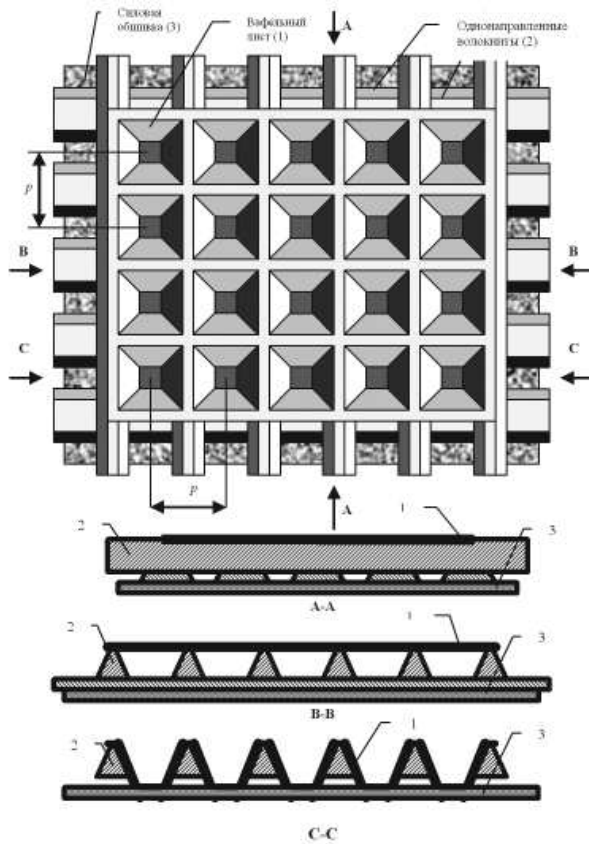


Рис. 1

Исследование радиотехнических характеристик стенки обтекателей вафельного типа

Рассмотрим расчетную модель стенки обтекателей вафельного типа. Поскольку внешний слой (обшивка) двухслойной вафельной стенки обтекателя может иметь многослойную структуру (например, многослойное лакокрасочное покрытие), рассмотрим общий случай падения линейно поляризованной плоской электромагнитной волны под углом θ на N – слойную плоско-слоистую среду с вафельным внутренним слоем. Обозначим индексом « i » номер среды (слоя), причем $i=1, 2, \dots, N+3$. Пусть среды с индексами $i=1$ и $i=N+3$ являются воздушной средой, а среды с индексом $i=N+2$ – вафельным слоем, которому присвоим индекс « ϵ ». Для наглядности

рассмотрим случай сред без диэлектрических потерь.

Представляя такую слоистую среду каскадным соединением четырехполюсников, эквивалентных N -слойной стенке обтекателя и вафельному слою, матрица передачи \mathbf{A} такого соединения, равная произведению матриц \mathbf{A}_N и \mathbf{A}_ϵ N -слойной стенки и вафельного слоя соответственно, будет иметь вид

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \dot{a} & \dot{b} \\ \dot{c} & \dot{d} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{a}_N & \dot{b}_N \\ \dot{c}'_N & \dot{d}'_N \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{a}_\epsilon & \dot{b}_\epsilon \\ \dot{c}_\epsilon & \dot{d}_\epsilon \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где

$$\begin{cases} \dot{a}_\epsilon = \sqrt{\frac{Z_{N+3}}{Z_{N+1}}} \cos \varphi_\epsilon; \\ \dot{b}_\epsilon = i \sin \varphi_\epsilon \left(\frac{Z_{N+2}}{\sqrt{Z_{N+1} Z_{N+3}}} \right); \\ \dot{c}_\epsilon = i \sin \varphi_\epsilon \left(\frac{\sqrt{Z_{N+1} Z_{N+3}}}{Z_{N+2}} \right); \\ \dot{d}_\epsilon = \sqrt{\frac{Z_{N+1}}{Z_{N+3}}} \cos \varphi_\epsilon, \end{cases} \quad (2)$$

φ_ϵ – электрическая толщина вафельного слоя (слоя $N+2$), равная

$$\varphi_\epsilon = \frac{2\pi d_\epsilon}{\lambda} \sqrt{\epsilon_\epsilon - \sin^2 \theta}$$

d_ϵ и ϵ_ϵ – толщина и диэлектрическая проницаемость вафельного слоя;

λ – длина электромагнитной волны в воздухе, Z_{N+1} , Z_{N+2} , Z_{N+3} – эквивалентные волновые сопротивления сред.

Эквивалентные волновые сопротивление Z_i i -ой среды для случая, когда вектор напряженности электрического поля \vec{E} падающей электромагнитной волны перпендикулярен (\perp) или параллелен (\parallel) плоскости падения, равны, соответственно

$$Z_{i\perp} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_i - \sin^2 \theta}}, \quad Z_{i\parallel} = \frac{\sqrt{\epsilon_i - \sin^2 \theta}}{\epsilon_i},$$

где ϵ_i – диэлектрическая проницаемость i -го слоя.

После несложных преобразований можно получить систему уравнений (3), где

$$M = \sqrt{\frac{Z_{N+3}}{Z_{N+2}}} \quad \text{и} \quad L = \sqrt{\frac{Z_{N+2}}{Z_{N+1}}}.$$

$$\begin{cases} \dot{a} = \frac{M}{\sqrt{1+tg^2\varphi_\epsilon}} \left(\dot{a}_N L + i \frac{\dot{b}_N}{L} tg\varphi_\epsilon \right); \\ \dot{b} = \frac{1}{M\sqrt{1+tg^2\varphi_\epsilon}} \left(\frac{\dot{b}_N}{L} + i \dot{a}_N L tg\varphi_\epsilon \right); \\ \dot{c} = \frac{1}{\sqrt{1+tg^2\varphi_\epsilon}} \left(\dot{c}_N L + i \dot{d}_N \frac{tg\varphi_\epsilon}{L} \right); \\ \dot{d} = \frac{1}{M\sqrt{1+tg^2\varphi_\epsilon}} \left(\frac{\dot{d}_N}{L} + i \dot{c}_N L tg\varphi_\epsilon \right). \end{cases} \quad (3)$$

Коэффициент прохождения электромагнитных волн по мощности через многослойную стенку, как известно, равен

$$K_{np} = \frac{4}{|\dot{a} + \dot{b} + \dot{c} + \dot{d}|^2}.$$

Если обозначить $\dot{K} = \dot{a} + \dot{b} + \dot{c} + \dot{d}$, а элементы матрицы \mathbf{A}_N записать в виде $\dot{a}_N = |\dot{a}_N| e^{i\varphi_{aN}}$, $\dot{b}_N = |\dot{b}_N| e^{i\varphi_{bN}}$, $\dot{c}_N = |\dot{c}_N| e^{i\varphi_{cN}}$, $\dot{d}_N = |\dot{d}_N| e^{i\varphi_{dN}}$, то из (3) можно получить:

$$\dot{K} = \frac{1}{\sqrt{1+tg^2\varphi_\epsilon}} \left[(A - Btg\varphi_\epsilon) + i(C + Dtg\varphi_\epsilon) \right],$$

где

$$\begin{cases} A = ML \left(|\dot{a}_N| \cos \varphi_{aN} + |\dot{c}_N| \cos \varphi_{cN} \right) + \frac{|\dot{b}_N| \cos \varphi_{bN} + |\dot{d}_N| \cos \varphi_{dN}}{ML}, \\ B = \frac{L}{M} \left(|\dot{a}_N| \sin \varphi_{aN} + |\dot{c}_N| \sin \varphi_{cN} \right) + \frac{M}{L} \left(|\dot{b}_N| \sin \varphi_{bN} + |\dot{d}_N| \sin \varphi_{dN} \right), \\ C = ML \left(|\dot{a}_N| \sin \varphi_{aN} + |\dot{c}_N| \sin \varphi_{cN} \right) + \frac{|\dot{b}_N| \cos \varphi_{bN} + |\dot{d}_N| \cos \varphi_{dN}}{ML}, \\ D = \frac{L}{M} \left(|\dot{a}_N| \cos \varphi_{aN} + |\dot{c}_N| \cos \varphi_{cN} \right) + \frac{M}{L} \left(|\dot{b}_N| \cos \varphi_{bN} + |\dot{d}_N| \cos \varphi_{dN} \right). \end{cases}$$

Условием достижения полной радиопрозрачности такой многослойной структуры, когда

$$K_{np} = 1, |\dot{K}|^2 = 2, \text{ будет:}$$

$$\frac{d_\epsilon}{\lambda} = \frac{Z_d}{2\pi} \left(\pi\kappa + \arctg \left(\frac{-\beta \pm \sqrt{\beta^2 - 4\alpha\gamma}}{2\alpha} \right) \right), \quad \kappa = 0, 1, \dots \quad (4)$$

где

$$\alpha = B^2 + D^2 + |\dot{K}|^2, \beta = CD - AB, \gamma = A^2 + C^2 - |\dot{K}|^2, \kappa = 0, 1, \dots$$

Из (4) следует, что любой наружный силовой многослойный диэлектрический слой обтекателя (обшивку) можно согласовать вафельным диэлектрическим силовым слоем.

В качестве примера рассмотрим согласование наружного силового слоя слоем вафельной структурой (при $N=1$). После простых преобразований получим, что

$$|\dot{K}|^2 = \left(2 \cos \varphi_2 \cos \varphi_3 - \frac{Z_2^2 + Z_3^2}{Z_2 Z_3} \sin \varphi_2 \sin \varphi_3 \right)^2 + \left(\frac{Z_3^2 + Z_1^2}{Z_3 Z_1} \cos \varphi_2 \cos \varphi_3 + \frac{Z_2^2 + Z_1^2}{Z_2 Z_1} \sin \varphi_2 \sin \varphi_3 \right)^2. \quad (5)$$

Откуда следует, что условием достижения полной радиопрозрачности такой двухслойной стенки обтекателя будет

$$\begin{cases} \frac{d_2}{\lambda} = \frac{\kappa Z_2}{2}, \\ \frac{d_3}{\lambda} = \frac{\ell Z_3}{2}, \end{cases}$$

где $\kappa = 1, 2, \dots, \ell = 1, 2, \dots$

Рассмотрим случай, когда $\varphi_3 = \pi\ell$, а $\varphi_2 \approx 0$, что соответствует применению электрически тонкой обшивки, когда $\lambda[d_2]$. Раскладывая функцию $\sin\varphi_2$ в ряд и ограничиваясь его первым членом, выражение (5) можно преобразовать к виду:

$$|\dot{K}|^2 \gg 4 + \varphi_2 A,$$

$$\text{где } A = \left(\frac{Z_2^2 + Z_1^2}{Z_1 Z_2} \right)^2 - 4.$$

Зададим требуемый уровень радиопрозрачности T такой двухслойной стенки обтекателя, определяемый как

$$\min K_{np} = K_{np}(\lambda, \theta) = T.$$

Тогда условием достижения заданного уровня радиопрозрачности $T = T_N$ (где $N = 1, 2, \dots$):

$$\begin{cases} \frac{d_2}{\lambda} \leq \frac{Z_2}{2\pi} \sqrt{\frac{1 - T_N}{AT_N}}, \\ \frac{d_3}{\lambda} = \frac{\ell Z_3}{2}. \end{cases}$$

Из этого соотношения легко определить для заданных значений T_N области допустимых значений d_2/λ и ϵ_2 силового наружного слоя двухслойной вафельной стенки обтекателя для перпендикулярной поляризации электромагнитной волны и $\theta = 50^\circ$. В общем случае

выбор рациональных параметров слоев такой структуры выполняется с использованием известного метода синтеза полоскостойких радиопрозрачных сред по требованиям к уровню радиопрозрачности T для заданного диапазона углов падения $\theta \in [0; \theta_{\max}]$ [6].

Результаты такого синтеза приведены на рис. 2. Рассматривался случай наличия на наружной поверхности стенки лакокрасочного покрытия и диэлектрических потерь в материале слоев. Предполагалось, что наружный силовой слой стенки выполнен из композиционного материала на основе кварцевой стеклоткани. Были определены области допустимых значений параметров d_2/λ и d_1/λ такой стенки для сектора углов падения от 0 до 70° . Как видно из рисунка, для $\min d_1/\lambda \leq 0,03$ и $d_2/d_1 \geq 30$ можно обеспечить уровень радиопрозрачности $T = 0,8$ во всем рабочем диапазоне длин волн $\lambda \in [\lambda_{\min}; \infty)$ независимо от типа их поляризации.

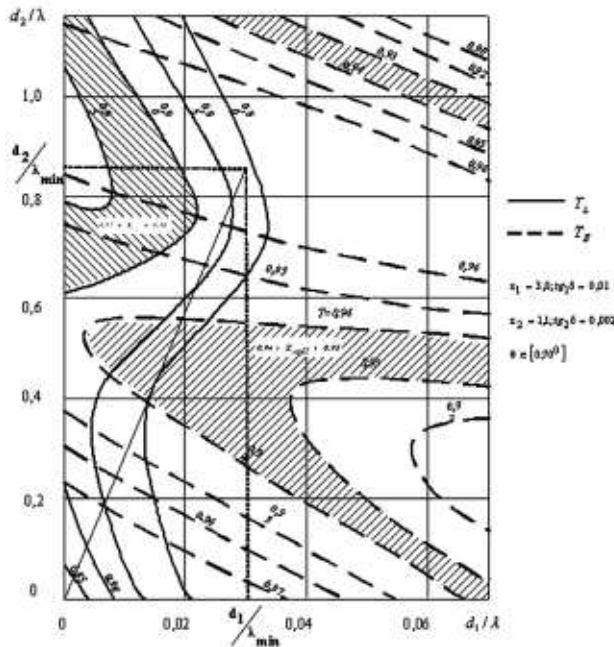


Рис. 2

Другим важным условием применимости вафельных структур в конструкциях обтекателей антенн СВЧ является достижение электродинамической эквивалентности их гомогенному слою диэлектрика при прохождении через них электромагнитной волны. Известно, что при прохождении электромагнитных волн через периодические диэлектрические структуры обтекателей может

возникать дифракция электромагнитных волн [7]. Вследствие рассеяния электромагнитных волн в пространстве такими структурами на могут возникать искажения главного лепестка диаграммы направленности системы антенна—обтекатель и даже появляться дифракционные лепестки. Из-за обусловленных этим «дифракционных потерь» происходит снижение уровня радиопрозрачности обтекателя.

В первом приближении влияние дифракционных потерь можно минимизировать если выполняется соотношение [7, 8]:

$$p \leq \frac{\lambda_{\min}}{2}, \quad (6)$$

где p — шаг периодической диэлектрической структуры, λ_{\min} — минимальная длина электромагнитной волны рабочего частотного диапазона излучения антенны СВЧ.

Однако, на особенности рассеяния электромагнитных волн в пространстве влияет не только пространственное расположение элементов периодических диэлектрических структур, но и их форма [7]. Поэтому в результате экспериментальных исследований соотношение (6) было уточнено, применительно к выбранной форме вафельной периодической диэлектрической структуры стенки обтекателя.

С этой целью были проведены измерения значений $K_{np(\text{эксн})}$ многослойной вафельной структуры, приведенной на рис. 1, для значений $p = 10$ мм и $d = 8$ мм. Измерения проводились известным методом одноантенного интерферометра с погрешностью измерения 5% на частотах $f_1 = 12$ ГГц, $f_2 = 14$ ГГц и $f_3 = 16$ ГГц для случая перпендикулярной поляризации падающей электромагнитной волны и $\theta \in [0; 50^\circ]$. Рассчитаны также теоретические значения коэффициента прохождения электромагнитных волн в предположении эквивалентности вафельной структуры гомогенному слою диэлектрика. Значения $K_{np(\text{теор})}$ определялись с использованием рассчитанных для вафельных структур значений эффективной диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{\theta(\text{эфф})}$ и тангенса угла диэлектрических потерь $tg \delta_{\theta(\text{эфф})}$.

Экспериментально было подтверждено, что диэлектрические свойства периодических диэлектрических структур многослойный стенок обтекателей электродинамически эквивалентны гомогенному слою диэлектрика с системой хаотически ориентированных диэлектрических пластинок, что позволяет применить известные соотношения для

расчета значений $\varepsilon_{\theta(\text{эфф})}$ и $\text{tg}\delta_{\theta(\text{эфф})}$ [9]:

$$\varepsilon_{\theta(\text{эфф})} = 1 + \nu^n (\varepsilon - 1),$$

$$\text{tg}\delta_{\theta(\text{эфф})} = \frac{\nu^n \varepsilon \text{tg}\delta}{\nu^n (\varepsilon - 1) + 1},$$

где ε и $\text{tg}\delta$ — диэлектрическая проницаемость и тангенс диэлектрических потерь материала вафельного слоя в заданном частотном диапазоне,

ν — объемная доля материала вафельного слоя,

n — эмпирическая константа.

Если определить степень влияния дифракционных потерь на снижение коэффициента прохождения электромагнитных волн через многослойные вафельные структуры как

$$L_{\text{диф}} = L_{\text{диф}}(\theta) = \frac{|K_{\text{пр(теор)}} - K_{\text{пр(эксн)}}|}{K_{\text{пр(теор)}}},$$

то условием электродинамической эквивалентности вафельной структуры однородному слою диэлектрика будет выполнение соотношения

$$\max L_{\text{диф}}|_{\theta \in [0; \theta_{\text{max}}]} \leq \sigma, \quad (7)$$

где σ — инструментальная погрешность измерения $K_{\text{пр(эксн)}}$.

В результате проведенных экспериментов были получены кривые зависимости $L_{\text{диф}} = L_{\text{диф}}(\theta)$ для различных значений p/λ для случая перпендикулярной поляризации электромагнитной волны как для наиболее худшего случая. Из анализа этих данных установлено, что условие (7) будет выполняться, если $p/\lambda_{\text{min}} \leq 0,4$. Такое соотношение можно считать уточненным условием (критерием) применимости вафельной структуры в конструкциях обтекателей антенн СВЧ.

На основании полученных данных были проведены сравнительные расчеты коэффициента прохождения электромагнитных волн по мощности для стенок обтекателей вафельной и традиционной симметричной трехслойной структуры. Рассматривался наиболее распространенный на практике случай — диапазон углов падения электромагнитных волн — от 0 до 60°; перпендикулярная поляризация электромагнитных волн (наихудший случай) и диапазон длин электромагнитных волн — 30–32 мм.

Для оценки преимуществ и недостатков таких структур расчет проводился в случае использования одинаковых конструкционных материалов силовых слоев, эрозионностойких защитных по-

крытий и клеев. Был рассмотрен случай выполнения силовых слоев упомянутых структур из стеклопластика на основе кварцевой ткани. Диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь вафельного силового слоя равны, соответственно, 1,5 и 0,006, а аналогичные значения для наиболее широко распространенных заполнителей трехслойной структуры — 1,2 и 0,003. С целью минимизации массогабаритных характеристик конструкции обтекателей накладывалось следующее ограничение — суммарная толщина силовых слоев обшивок не должна превышать 2,0–2,5 мм.

Результаты синтеза вафельной и трехслойной структуры приведены, соответственно, на рис. 3 и 4. Из сравнения областей допустимых значений толщин слоев для разных уровней радиопрозрачности, при равной строительной высоте сравниваемых структур наибольший уровень (0,8) обеспечивается вафельной структурой. При этом толщина силовой обшивки вафельной структуры значительно (более, чем в 1,5 раза) меньше суммарной толщины силовых обшивок трехслойной симметричной структуры.

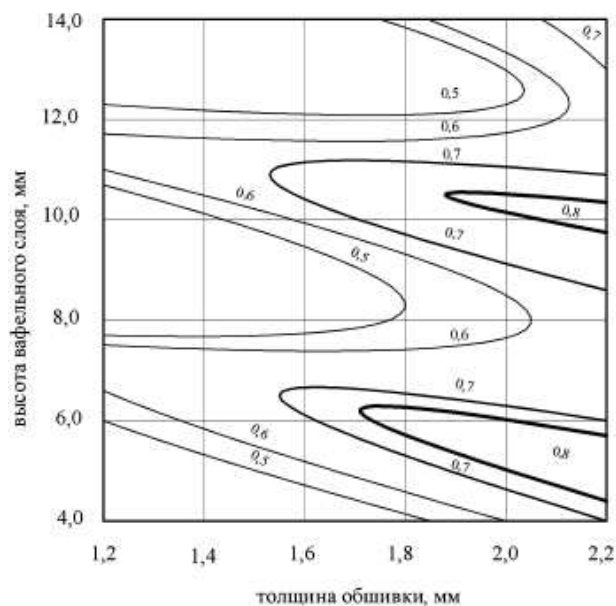


Рис. 3

Проведенные расчеты показали, что многослойные радиопрозрачные вафельные структуры, созданные на базе новой технологии, обладают улучшенными характеристиками по сравнению с традиционными трехслойными конструкциями. Достоинством таких структур является технологическая возможность изменения их конструктивных параметров с целью оптимизации радиотехнических и прочностных характеристик обтекателей. Такая силовая схема строения стенки авиационных обтекателей была использована автора-

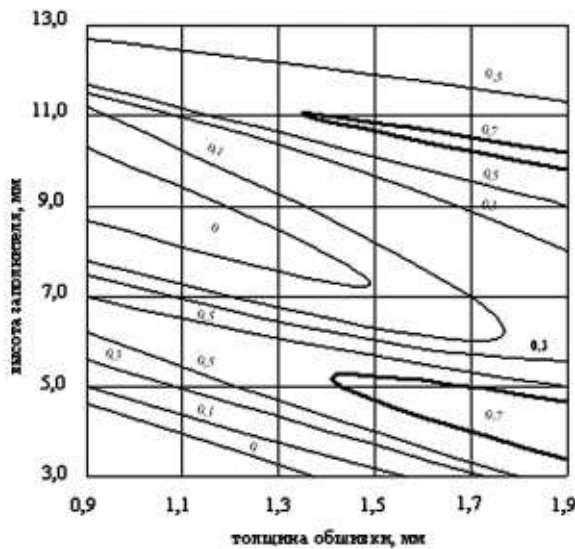


Рис. 4

ми и апробирована на практике при создании экспериментальных образцов авиационных обтекателей по заказу Московского машиностроительного завода им. П.О. Сухого [10].

Заключение

Предложена расчетная модель многослойных структур вафельного типа из композитных материалов для проектирования обтекателей антенн СВЧ и методика синтеза таких структур для выбора рациональных значений их конструктивных параметров по требованиям к характеристикам обтекателей. Установлены критерии достижения системой подкрепляющих силовых элементов вафельной структуры электродинамической эквивалентности однородному слою диэлектрика с заданными диэлектрическими характеристиками. Показано, что многослойные структуры вафельного строения могут обладать улучшенными радиотехническими характеристиками по сравнению с традиционными трехслойными конструкциями.

Литература

1. *Справочник по радиолокации*. Под ред. М. Скольника. Нью-Йорк. 1970. / Пер. с англ. (в

четырех томах) под общей ред. К.Н. Трофимова. // Том. 2. Радиолокационные антенные устройства. Под ред. П.И. Дудника. — М.: Изд-во «Сов. Радио», 1977. — 408 с.

2. *Гуртовник И.Г., Соколов В.И., Трофимов Н.Н., Шалгунов С.И.* Радиопрозрачные изделия из стеклопластиков. — М.: Изд-во МИР, 2003. — 368 с. : ил.

3. *Пат. 4149731 США, МКИ2 Н 01 Q 1/42.* Radome with tilted dielectric strips / E. L. Rope, G.P. Tricoles ; заявитель и патентообладатель General Dynamics Electronics. — № 914519; заявлено 12.06.78 ; опубликовано 19.02.1980.

4. *Пат. 4179699 США, МКИ2 Н 01 Q 1/42.* Low reflectivity radome United States Patent / Lunden C. D. ; заявитель и патентообладатель The Boeing Company. — № 813065; заявлено 05.07.77 ; опубликовано 18.12.1979.

5. *Гирченко А.Г., Скурский П.П.* Вафельные конструкции из композиционных армированных материалов. — Технологические системы. — № 4, 2010. — С. 80.

6. *Скурский П.П., Каминский В.В., Шумило Т.В.* Синтез радиопрозрачных плоскостойких сред. — Изв. ВУЗов СССР, Радиоэлектроника. — 1982. — Т. XXV. — № 8. — С. 97–99.

7. *Конев В.А., Скурский П.П., Касьяненко А.А.* Исследование дифракции электромагнитных волн СВЧ на ячеистых структурах. — Весці Акадэміі навук БССР, сер. фіз.-тэхн. Навук. — 1983. — № 2. — С. 114–117.

8. *Винниченко Ю.П., Леманский А.А., Туманская А.Е.* О прохождении электромагнитных волн через диэлектрическую сотовую структуру. — Радиотехника и электроника. — 1980. — Т. XXV. — № 8. — С. 1751–1753.

9. *Скурский П.П., Лерман Л.Б., Оперчук И.И., Морозов А.В., Сыч А.М., Цыкалов В.Г.* Диэлектрическая проницаемость кристаллических порошков в диапазоне СВЧ. — Диэлектрики и полупроводники: Респ. междувед. научн.-техн. сб. — Вып. 19. — 1981. — С. 23–27.

10. *А.с. № 1306019, МКИ В 64 С 3/26.* Панель крыла летательного аппарата / А.Г. Гирченко. — Заявл. 02.04.85 № 3912329/40-23; опубликовано Б.И. № 749024.