

УДК 621.396.67

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МИКРОПОЛОСКОВЫХ АНТЕНН В УСЛОВИЯХ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО НАГРЕВА

А. А. Оводенко, В. Н. Красюк, А. Р. Бестугин, М. Б. Рыжиков  
ГУАП, «Санкт–Петербургский государственный университет  
аэрокосмического приборостроения»

Получена 12 января 2012 г.

**Аннотация.** Проведен анализ возможности применения микрополосковых антенн непосредственно на поверхности гиперзвуковых летательных аппаратов. Представлены результаты исследования влияния повышения температуры на радиотехнические параметры антенн, проанализированы сочетания материалов, которые могут быть использованы для реализации нагревостойких излучателей с относительно малыми потерями.

**Ключевые слова:** микрополосковые антенны, гиперзвуковой летательный аппарат, потери при высоких температурах, нагревостойкие диэлектрики, тугоплавкие металлы.

**Abstract.** Analysis of the possibility of using microstrip antennas directly on the surface hypersonic aircrafts was performed. The results of influence of the effect of temperature increase on the antenna parameters are obtained. Combinations of materials to implement for the heat resistance antennas with relatively small losses are analyzed.

**Key words:** microstrip antennas, hypersonic aircraft, loss at high temperatures, heat resistance dielectric materials, refractory metals.

Известно, что микрополосковые антенны (МПА) в силу малых габаритов, веса и стоимости изготовления находят свое применение на борту гиперзвуковых летательных аппаратов (ГЛА). Примером может служить антенная решетка канала передачи данных космического корабля SHUTTLE с коэффициентом усиления 40 дБ на частоте 15 ГГц [1]. Одно из перспективных направлений по совершенствованию бортовых радиотехнических систем –

реализация антенн непосредственно на корпусе летательного аппарата. Это позволяет не использовать в конструкции воздушного судна антенных окон или обтекателей [2].

При длительном полете ГЛА в атмосфере на гиперзвуковых скоростях вдоль его поверхности устанавливается определенное неравномерное распределение температуры, которое представлено на рис. 1 [3]. Данное распределение построено при условии полета ГЛА продолжительностью более 7 секунд на высоте 27000 метров со скоростью, соответствующей  $M = 8$  ( $M$  – число Маха, равное отношению скорости ГЛА к скорости звука).

Из рисунка 1 следует, что МПА, размещенные на корпусе ГЛА, должны выдерживать высокие температуры. Таким образом, существует только ограниченный ряд металлов и диэлектриков, которые могут работать при указанных температурах. Обычно для изготовления излучателей МПА используют медь, серебро или латунь. Медь имеет температуру плавления  $T_{пл}=1083^{\circ}\text{C}$ , серебро –  $T_{пл}=960^{\circ}\text{C}$ , латунь –  $T_{пл}=950^{\circ}\text{C}$ . Поскольку с повышением температуры механические свойства, характеризующие прочность материала, понижаются, то при температурах близких к температуре плавления при полете ГЛА, то есть в условиях высокого давления, происходит деформация металла, он теряет сцепление с подложкой, а микрополосковые антенны разрушаются.

Поэтому для работы при высоких температурах для изготовления излучателей МПА нужно применять тугоплавкие металлы, такие как хром, молибден, вольфрам, родий или платина. Однако, некоторые из этих металлов непригодны для использования на поверхности ГЛА совместно с применяемыми диэлектрическими подложками. Так при нагревании более  $400^{\circ}\text{C}$  молибден легко окисляется на воздухе и становится хрупким, а платина при высоких температурах может вступить в химические реакции с кремнием, образуя новые соединения проявляющие в основном свойства металлов группы железа. Таким образом, только хром (Cr), вольфрам (W), родий (Rh) или

специальные тугоплавкие сплавы металлов могут быть использованы в качестве материалов, пригодных для изготовления металлических частей МПА.

Для реализации подложек МПА потенциально также может быть использован ограниченный набор диэлектриков: алюмооксидная керамика ( $Al_2O_3$ ),  $BeO$ , пирокерам 9906, рейкерам III –  $2MgO \cdot 2Al_2O_3 \cdot 5SiO_2$ , стеклопластик Т<sub>1</sub>ФН, оксид кремния –  $SiO_2$ .

Зависимости диэлектрической проницаемости –  $\epsilon$  и тангенса угла диэлектрических потерь –  $tg\epsilon$  приведены на рисунках 2 а и 2б соответственно.

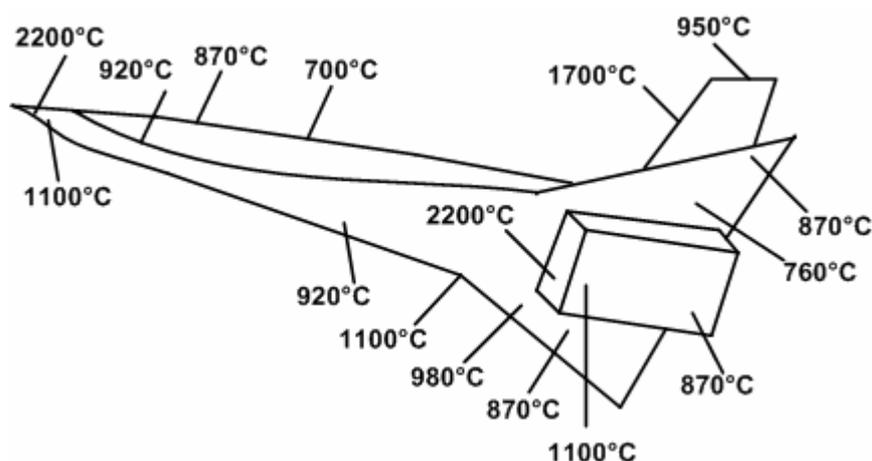


Рисунок 1. – Распределение температуры по поверхности ГЛА в полете.

Основными техническими характеристиками, определяющими возможность работы МПА при высоких температурах, являются величина потерь в антенне, рабочая полоса частот и изменение резонансной частоты, в которой выполняются условия согласования.

Был произведен расчет указанных параметров для прямоугольной МПА при нормальной температуре, равной  $27^\circ C$ , и при температуре поверхности ГЛА в  $1027^\circ C$  для различных материалов. Оценка параметров производилась согласно методике расчета МПА, построенной на основе резонаторного подхода, когда антенну рассматривают как резонатор с диэлектрическим заполнением [4]. Для частоты излучения, равной 10 ГГц, при нормальной температуре определялись вначале геометрические параметры антенны.

Геометрические параметры МПА определяются для заданной длины волны при нормальной температуре. При этом придерживаются определенных рекомендаций, изложенных в [5] для достижения эффективного излучения.

Толщина диэлектрика  $d$  не должна превышать границу

$$d < \lambda / (10\sqrt{\varepsilon})$$

для минимизации излучения поверхностных волн в подложке МПА, но при этом ее уменьшение сопровождается уменьшением рабочей полосы частот МПА. Отсюда рекомендуется выбирать толщину подложки от  $\lambda / (20\sqrt{\varepsilon})$  до  $\lambda / (10\sqrt{\varepsilon})$ . Выберем для реализации МПА толщину  $d = \lambda / (10\sqrt{\varepsilon})$ .

Длина излучающих кромок МПА для достижения комплексного критерия по максимизации эффективного излучения согласно [5] определяется соотношением

$$a = \frac{\lambda}{2} \sqrt{\frac{2}{1+\varepsilon}}$$

Размер неизлучающей стороны  $b$  микрополосковой антенны должен соответствовать резонансу на частоте излучения при использовании СВЧ материала подложки толщиной  $d$ .

Его можно определить с учетом эффекта укорочения по соотношениям [4]

$$b = \frac{\lambda}{2\sqrt{\varepsilon_{\text{эфф}}}} - 2\Delta b;$$

$$\Delta b = 0.412d \frac{\varepsilon_{\text{эфф}} + 0.3 \frac{a}{d} + 0.264}{\varepsilon_{\text{эфф}} - 0.258 \frac{a}{d} + 0.8};$$

$$\varepsilon_{\text{эфф}} = \frac{\varepsilon + 1}{2} + \frac{\varepsilon - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{d}{a}}}.$$

Исходя из представленных соотношений при нагреве отклонение резонансной частоты антенны (в МГц) от частоты излучения, можно посчитать по формуле

$$\Delta f_0 = \frac{\lambda}{2 \cdot 10^6 \sqrt{\epsilon_{\text{эфф}}(t)}} (F(t) - F(t_0));$$

$$F(t) = b(t) + 2 \cdot 0,412d(t) \frac{\epsilon_{\text{эфф}}(t) + 0,3 \frac{a(t)}{d(t)} + 0,264}{\epsilon_{\text{эфф}}(t) - 0,258 \frac{a(t)}{d(t)} + 0,8},$$

$$a(t) = a(1 + k_M(t - t_0)); b(t) = b(1 + k_M(t - t_0)); d(t) = d(1 + k_{\text{п}}(t - t_0)),$$

где  $t_0 = 25^\circ\text{C}$  – нормальная температура, при которой МПА настроена в резонанс,  $t$  – действующая температура среды,  $k_M$  – коэффициент температурного расширения (КТР) металла,  $k_{\text{п}}$  – КТР диэлектрической подложки.

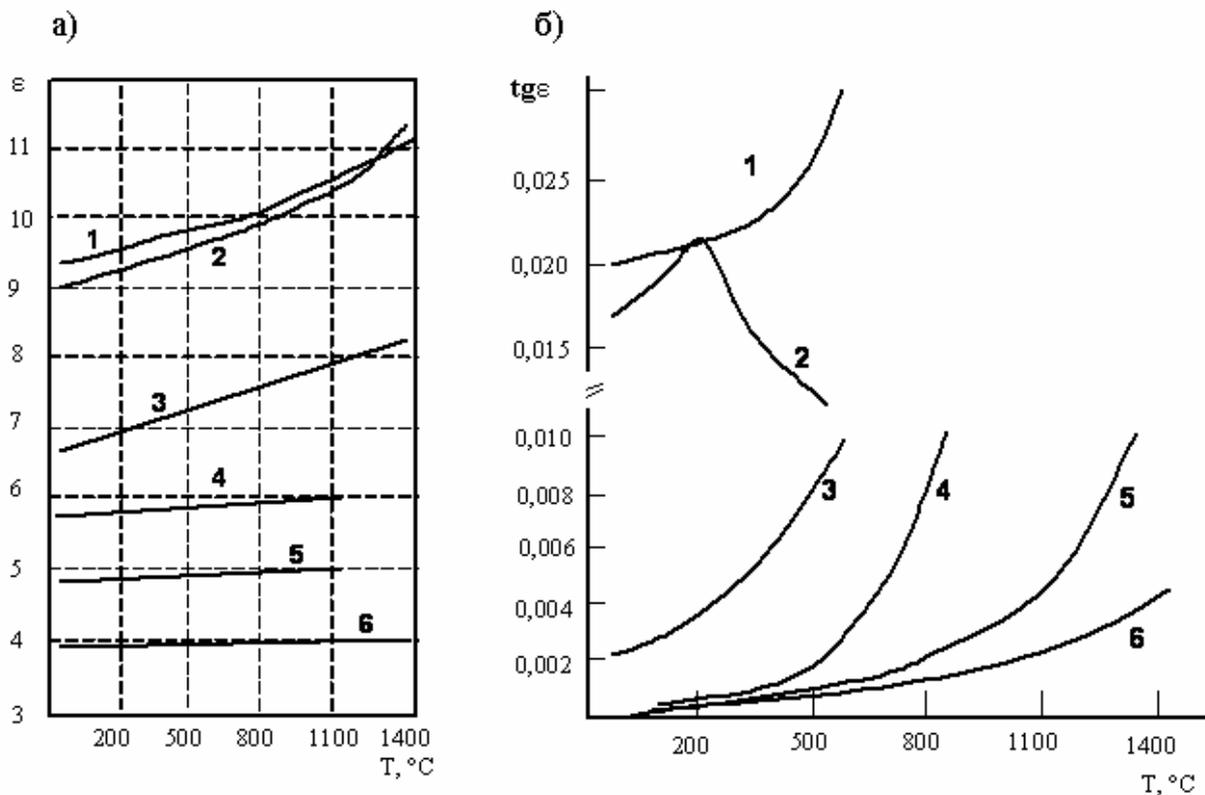


Рисунок 2 – Зависимости диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь от температуры для материалов: 1 – 99%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 2 –

97%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 3 –  $\text{BeO}$ , пирокерам 9906, 4 – рейкерам III ( $2\text{MgO}\cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 5\text{SiO}_2$ ), 5 – стеклопластик  $\text{T}_1\text{ФН}$ , 6 – оксид кремния ( $\text{SiO}_2$ ).

Отметим, что при резонансе антенна имеет на частоте излучения чисто активное входное сопротивление, которое согласовано с нагрузкой для передачи в антенну максимальной мощности. При этой же температуре определены начальные геометрические параметры МПА.

В таблице 1 приведены значения коэффициентов температурного расширения металлов и СВЧ – диэлектриков [6,7]. Отметим, что из диэлектриков и металлов следует выбирать такие пары, которые или расширяются приблизительно одинаково при нагреве, или слабо расширяются при нагреве. Такие сочетания в итоге определяют механическую прочность МПА работающих в условиях высоких давлений и температур.

Таблица 1

Материал	Cr	W	Rh	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{T}_1\text{ФН}$	$\text{SiO}_2$	$\text{BeO}$
$\text{КТР}\cdot 10^{-6}, 1/^\circ\text{C}$	8,75	4,2	8,38	7-9	>23	0,5	6

Учитывая, что наименьшие различия по температурному расширению наблюдаются в сочетаниях излучателей из хрома или родия на алюмооксидных подложках, а наименьшему температурному расширению будет подвержены излучатели из вольфрама на подложке из оксида кремния.

Проанализируем также возможность использования широко рекомендуемого сегодня высокотемпературного прочного к механическим воздействиям соединения вольфрама и карбида кремния, имеющих практически одинаковый КТР. КТР карбида кремния составляет  $4,5\cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ .

Значения  $\epsilon$  и  $\text{tg}\epsilon$  карбида кремния при разных температурах представлены в [8]. Из представленных там данных следует, что ДП карбида кремния падает с ростом температуры от значения 9,5 при нормальной температуре до значения,

равного 7,5 при температуре выше 200°C. При этом тангенс угла диэлектрических потерь также падает со значения 0,08 до значения 0,01.

Выбор металла для реализации излучателей производится по наибольшей электропроводности материала –  $\sigma$ . В таблице 2 приведены значения электропроводности выбранных металлов при разных температурах окружающей среды [6]. В случае реализации подложки из  $Al_2O_3$ , когда для изготовления излучателей может быть использован родий или хром, следует выбирать родий, поскольку тот обладает вдвое большей электропроводностью во всем диапазоне температур.

Таблица 2

Материал	Температура, °C										
	27	127	227	327	427	527	627	727	827	927	1027
	Электропроводность металлов, $\sigma \cdot 10^6, \frac{См}{м}$										
W	18,4	12,8	9,7	7,7	6,4	5,4	4,7	4,1	3,3	2,7	2,3
Rh	20	14	10,7	8,7	7,3	6,3	5,4	4,8	3,8	3,2	2,7
Cr	8,3	7,1	5,3	4,4	3,6	3,1	2,7	2,4	1,9	1,6	1,35

Диаграммы направленности (ДН) прямоугольной МПА в главных плоскостях (индекс  $b$  обозначает размещение ДН в плоскости параллельной неизлучающей стороне МПА, индекс  $a$  – в плоскости параллельной излучающей стороне МПА) в зависимости от температуры можно вычислить по соотношениям [9]

$$F_a(\beta, t) = \left( 1 + \varepsilon_{эфф}(t) \left( \operatorname{ctg} \left( \frac{2\pi d(t) \sqrt{\varepsilon_{эфф}(t)}}{\lambda} \right) \right) \right)^2 \left( \frac{\varepsilon_{эфф}(t)}{\xi(\beta, t)} \right)^2 \times$$

$$\times \frac{(\cos(0,5k_0 a(t) \cos(\beta)) \sin(\beta))^2}{(\xi(\beta, t))^2 + \left( \varepsilon_{эфф}(t) \sin \beta \operatorname{ctg} \left( \frac{2\pi \xi(\beta, t) d(t)}{\lambda} \right) \right)^2};$$

$$F_b(\beta, t) = \left( 1 + \varepsilon_{\text{эфф}}(t) \left( \text{ctg} \left( \frac{2\pi d \sqrt{\varepsilon_{\text{эфф}}(t)}}{\lambda} \right) \right) \right)^2 \left( \frac{(\sin(0,5k_0 b(t) \cos(\beta)))^2}{0,5k_0 b(t) \cos(\beta)} \right)^2 \times$$

$$\times \frac{(\sin(\beta))^2}{(\xi(\beta, t))^2 + \left( \varepsilon_{\text{эфф}}(t) \sin \beta \text{ctg} \left( \frac{2\pi \xi(\beta, t) d(t)}{\lambda} \right) \right)^2};$$

$$\xi(\beta, t) = \sqrt{\varepsilon_{\text{эфф}}(t) - (\cos(\beta))^2};$$

$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$  – волновое число в свободном пространстве,  $\beta$  – угол, отсчитываемый от плоскости излучателя к направлению нормали к его поверхности.

При проектировании МПА следует также оценивать потери при излучении одиночного излучателя и полосу, где указанные потери почти постоянны (не отличаются более чем на 0,5 дБ).

Для их оценки также будем использовать методику, использующую резонаторный метод нахождения параметров, представленную ниже.

Рассчитываем относительный коэффициент преломления подложки при заданной температуре

$$n(t) = \sqrt{\varepsilon(t)}.$$

Находим вспомогательные параметры [10]:

$$\psi(t) = 1 - \frac{1}{n^2(t)} + \frac{2}{5} \frac{1}{n^4(t)}; \quad r(t) = \frac{1}{1 + \frac{3\pi^2}{2\lambda\psi(t)} d(t) \left( 1 - \frac{1}{n(t)^3} \right)^3};$$

$$\rho(t) = 1 + \frac{\chi_2}{10} (k_0 a(t))^2 + (\chi_2^2 + 2\chi_4) \frac{3}{560} (k_0 a(t))^4 + \frac{\chi_3}{5} (k_0 b(t))^2,$$

где  $\chi_2 = -0,16605$ ;  $\chi_4 = 0,00761$ ;  $\chi_3 = -0,9913153$ .

Рассчитываем эквивалентные добротности резонатора, связанные с наличием потерь:

а) в диэлектрике

$$Q_d(t) = 1/\operatorname{tg} \varepsilon(t) ;$$

б) в металле излучателя через удельную электропроводность  $\sigma$  для рабочей частоты  $f_0$

$$Q_r(t) = 0,5\eta_0 k_0 d / R_s(t); \quad R_s(t) = \sqrt{\frac{\pi f_0 \mu_0}{\sigma(t)}},$$

где  $\eta_0 = 377$  Ом – волновое сопротивление свободного пространства,  $\mu_0$  – магнитная проницаемость свободного пространства;

в) с потерями на излучение по пространственным волнам

$$Q_{sp}(t) = 3b(t)\lambda\varepsilon(t)/(16a(t)d(t)\rho(t)\psi(t));$$

г) с потерями на излучение по поверхностным волнам

$$Q_{sw}(t) = Q_{sp}(t)r(t)/(1 - r(t)).$$

Определяем суммарную добротность эквивалентного резонатора по соотношению

$$Q(t) = \frac{1}{\frac{1}{Q_{sw}(t)} + \frac{1}{Q_{sp}(t)} + \frac{1}{Q_d(t)} + \frac{1}{Q_r(t)}}.$$

Считаем эффективность излучения мощности одиночной МПА –  $Ef$  и соответствующие потери подводимой к антенне мощности –  $L$ :

$$Ef(t) = Q(t)/Q_{sp}(t); \quad L(t) = 10\log(Ef(t)).$$

Оценку возможной рабочей полосы пропускания (в МГц) получаем по соотношению

$$\Delta f(t) = \frac{f_0}{10^6 \sqrt{2}} \left[ \operatorname{tg} \varepsilon(t) + \left( \frac{1}{\frac{3}{16} \left( \frac{\varepsilon(t)}{\rho(t)\psi(t)} \right) \left( \frac{b(t)}{a(t)} \right) \left( \frac{\lambda}{d(t)} \right)} \right) \left( \frac{1}{r(t)} \right) + \frac{R_s(t) d(t)}{\pi \eta_0 \lambda} \right].$$

Представим результаты моделирования и анализа численных расчетов для исполнения МПА из различных материалов при разных температурах нагрева.

Рассмотрим вначале техническую реализацию МПА на подложке из 99%  $Al_2O_3$  с излучателями и экраном, выполненными из родия. Оценки основных параметров были произведены при температурах в 27, 327, 1027 °С. Частота излучения была выбрана равной 10 ГГц.

На рисунке 3 приведены диаграммы направленности антенны в главных плоскостях, построенные при температуре 27°С (кривые 1) и 1027 °С (кривые 2). Поскольку отличия практически отсутствуют в силу малого приращения сторон излучателя от температуры, можно сделать вывод о практической независимости ДН МПА от температуры в широких пределах. Отклонение резонансной частоты при  $t = 327^\circ\text{C}$  от заданной составило  $\Delta f_0 = 169$  МГц, а отклонение от рабочей частоты на половину полосы (в которой гарантируется уменьшением потерь максимум на 0,5 дБ) –  $0,5\Delta f = 204$  МГц. Сама же величина потерь в антенне при  $t = 327^\circ\text{C}$  – 4,3 дБ.

Таким образом, максимальные потери в такой антенне будут порядка 5 дБ. При этом следует отметить, что при нормальной температуре максимальные потери – 4,5 дБ.

При температуре в 1027°С  $\Delta f_0 = 580$ , а  $0,5\Delta f = 816$  МГц и максимальные потери мощности в антенне около 11 дБ.

Далее рассмотрим технической реализации МПА на подложке из  $SiO_2$  с излучателями и экраном, выполненными из вольфрама. Оценки основных параметров также были произведены при температурах в 27, 327, 1027°С. МПА, выполненная из указанных материалов, обладает лучшими параметрами на излучение в силу меньших значений диэлектрической проницаемости подложки и тангенса угла диэлектрических потерь, но зато сама антенная является более узкополосной. Ее усредненная ширина ДН на 7,5° уже. При температуре в 327°С  $\Delta f_0 = 224$  МГц, а  $0,5\Delta f = 371$  МГц. Максимальные потери мощности в антенне составляют 2,8 дБ. При температуре в 1027°С  $\Delta f_0 = 346$  МГц, а  $0,5\Delta f = 367$  МГц.

Максимальные потери мощности в антенне составляют 3 дБ. Таким образом, антенна, выполненная на подложке из  $\text{SiO}_2$  с излучателями из вольфрама, обладает малыми потерями и практически не изменяет свой коэффициент усиления в диапазоне температур от  $27^\circ\text{C}$  до  $1027^\circ\text{C}$ .

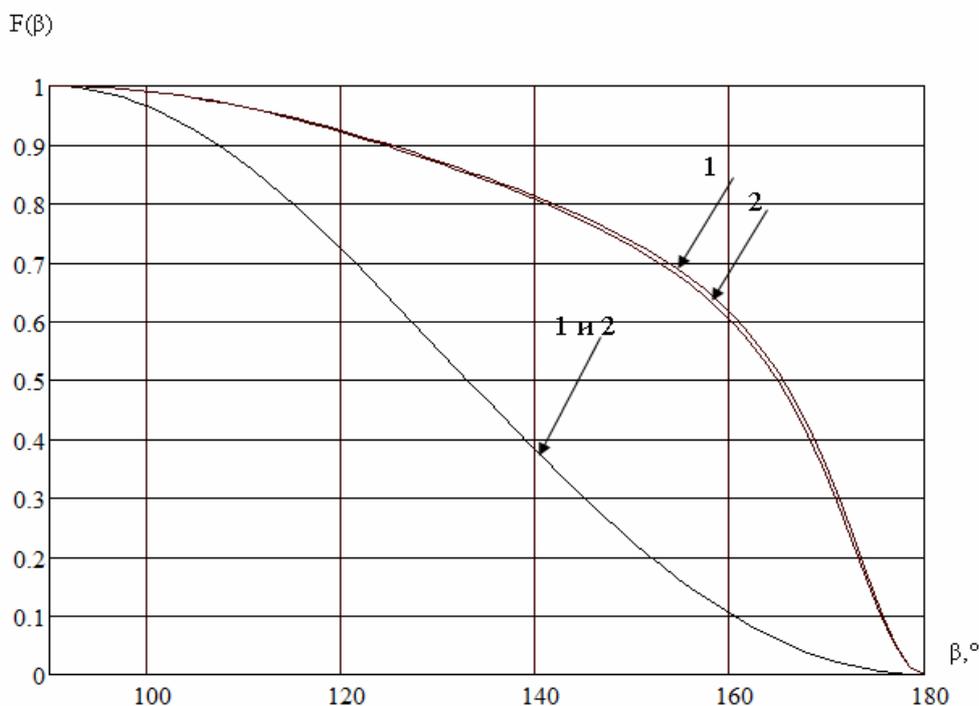


Рисунок 3 – ДН МПА в главных плоскостях при  $t = 27$  и  $t = 1027^\circ\text{C}$ .

Последней рассматривалась антенна, выполненная на основе сочетания карбида кремния и вольфрама, имеющих одинаковый КТР. Значительные потери в диэлектрике карбида кремния  $\text{tg}\epsilon \approx 0,15$  и высокое значение его диэлектрической проницаемости приводят к потерям порядка 9,5 дБ уже при нормальной температуре.

Это означает, что при реализации МПА как под обтекателем и в антенных отсеках, так и на поверхности ГЛА лучше использовать антенны, созданные на базе сочетания оксида кремния и вольфрама. Даже при температуре  $1400^\circ\text{C}$  их ДН практически не изменяется, а потери в антенне возрастают на 2 дБ по сравнению с потерями при нормальной температуре.

## Литература

1. *Munson, R.E.* Conformal microstrip antennas. Array Antennas with Efficient Tapering /R.E. Mun-son//Microwave Journal. Vol. 31, No.3, pp. 91-109.
2. *Jorna, P.* Beam Synthesis for Conformal Array Antennas with Efficient Tapering /P. Jorna, H. Schippers, J. Verpoorte// Proceedings of 5th European Workshop on Conformal Antennas Bristol, September 11-12, 2007, pp. 123-127.
3. *Оводенко, А.А.* Радиозаметность антенных окон гиперзвуковых летательных аппаратов / А.А. Оводенко, В.Н. Красюк, А.Р. Бестугин, М.Б. Рыжиков// Известия вузов. Приборостроение. Санкт-Петербург. Т.54 . №8. 2011. С. 5-11.
4. *Панченко, Б.А.* Микрополосковые антенны/ Б.А. Панченко, Е.И. Нефедов. М.: Радио и Связь. 1986. 144 с.
5. *Dafalla, Z. I.* Design of rectangular Microstrip patch antenna at 1GHz/ Z. I. Dafalla, T. Y. Kuan, A. M. Abdel Rahman, and S. C. Sudhakar// RF and Microwave Conference. 5-6 October 2004, Malaysia, pp. 145-149.
6. *Зиновьев, В.Е.* Теплофизические свойства металлов при высоких температурах/ В.Е. Зиновьев. М.: Металлургия. 1989. 384 с.
7. *Кожитов, Л.В.* Технологическое вакуумное оборудование/ Л.В. Кожитов, А. Ю. Зарапин, Н. А. Чиченев . М.: Руда и металлы. 2011. 416 с.
8. *Kumar, B.S.* Development of a novel instrument for microwave dielectric thermal analysis/ B. S. Kumar, M. B. Parkes, P. A. Barnes// Review of scientific instruments, vol 77, No. 045108, Apr. 2006, pp. 13-21.
9. *Рыжиков, М.Б.* Сравнение ЭПР микрополосковых антенных решеток с излучателями прямоугольной и дисковой формы/М.Б Рыжиков//Труды первой всероссийской научно-технической конференции «Радиовысотометрия». Каменск-Уральский. 2004. С. 52-56.
10. *Jackson, D.R.* A comparison of CAD models for radiation from rectangular microstrip patches/ D.R. Jackson , J.T. Williams //Journal of Microwave and Millimeter-Wave Computer Aided Design, Vol. 1, No. 2, , April 1991, pp. 236-248.