

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ШУМОВОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ СИСТЕМЫ АНТЕННА-ОБТЕКАТЕЛЬ С УЧЕТОМ ОТРАЖЕНИЙ ВНУТРИ СТЕНКИ ОБТЕКАТЕЛЯ

д.т.н. В.И. Антюфеев, к.т.н. Ю.Н. Агафонов, к.т.н. В.Н. Быков,
С.В. Орлов, д.т.н., проф. И.М. Приходько

Приводятся результаты расчета шумовой температуры системы антенна-обтекатель, выполненные в соответствии с соотношениями, полученными в [4]. Показано, что учет отражений внутри стенки обтекателя может привести к существенному (до двух раз) увеличению эквивалентной температуры.

Постановка проблемы. Расположенные в носовой части летательных аппаратов обтекатели антенн подвергаются аэродинамическому нагреву в процессе полета в плотных слоях атмосферы, что может приводить к снижению чувствительности радиоприемных устройств за счет увеличения вклада в антенную температуру собственного излучения разогретого обтекателя. При этом возникают значительные градиенты температурного поля по толщине стенки, приводящие к существенным градиентам электрофизических параметров материала обтекателя. Если антенна используется в системах миллиметрового диапазона, толщина стенки обтекателя становится сравнимой с длиной волны, что заставляет при расчете интенсивности излучения обтекателя учитывать отражения внутри стенки.

Анализ литературы. Немногочисленные работы по расчету шумовой температуры системы антенна-обтекатель выполнены либо для модели равномерно нагретого обтекателя [1], либо для неравномерно нагретого обтекателя, но без учета отражений внутри стенки [2, 3]. В [4] получены исходные соотношения с учетом последнего фактора, но не проведено исследование его влияния на характеристики системы антенна-обтекатель с учетом распределения поля в раскрыве антенны и формы обтекателя.

Целью статьи является проведение расчетов с помощью соотношений, приведенных в [4], исследование влияния отражений внутри стенки обтекателя на шумовую температуру системы и анализ полученных результатов.

Исходные соотношения. В работе [4] получено основное соотношение для расчета эквивалентной температуры системы антенна-обтекатель

$$T_a^\circ = \frac{\omega \varepsilon_0}{2k_B P_\omega} \sum_{j=0}^{J-1} \sum_{k=0}^{K-1} \Omega_{jk} . \quad (1)$$

где ε_0 – электрическая постоянная; k_B – постоянная Больцмана (остальные параметры формулы (1) будут определены ниже).

Будем пользоваться обозначениями и результатами упомянутой статьи, причем $(1)_{[4]}$ обозначает ссылку на формулу (1) работы [4]. Предполагалось, что на прямоугольном плоском раскрыве

$$G = [-a_x/2, a_x/2] \times [-a_z/2, a_z/2]$$

задано синфазное распределение поля с комплексной амплитудой $U(x, z)$. Поле на внутренней поверхности обтекателя Σ , которая задавалась в виде поверхности вращения некоторой регулярной кривой вокруг оси z и описывалась уравнением $F(x, y, z) = 0$, с учетом первой поправки к теории геометрической оптики получено в форме (23)_[3]:

$$E_{jk}^0 = E_x(M_{jk}) = e^{ik_c y_{jk}} \left(1 - \frac{y_{jk}}{2ik_c} \Delta \right) U \Big|_{x=x_j, z=z_k} , \quad (2)$$

где $\{(x_j, z_k)\}_{j=0; k=0}^{J-1; K-1}$ – семейство узлов равномерной прямоугольной сетки с шагом $\Delta x = a_x/2J$, $\Delta z = a_z/2K$, построенной на части раскрыва $G_0 = [0, a_x/2] \times [0, a_z/2]$; $M_{jk} = (x_j, y_{jk}, z_k) \in \Sigma$; y_{jk} – решение уравнения

$F(x_j, y, z_k) = 0$; $k_c = \frac{\omega}{c} \sqrt{\varepsilon_c \mu_c}$ – волновой вектор в среде, которой заполнено пространство между раскрывом и обтекателем; Δ – оператор Лапласа. В формуле (1) ((29)_[4]):

$$P_\omega \approx \frac{1}{2Z_c} \sum_{j=0}^{J-1} \sum_{k=0}^{K-1} |U(x_j, z_k)|^2 \Delta x \Delta z - \quad (3)$$

спектральная плотность мощности излучения с части раскрыва G_0 ;

$$Z_c = \sqrt{\frac{\mu_c \mu_0}{\varepsilon_c \varepsilon_0}} .$$

Для каждого (i, j) -го узла строилась плоскость падения волны на обтекатель в точке M_{jk} , вычислялся угол падения θ_{jk} , компоненты по-

ля $E_{s\omega jk}$, $E_{\perp\omega jk}$ внутри элемента тела обтекателя V_{jk} , лежащие в плоскости падения и в ортогональной плоскости соответственно. Полагая локально часть стенки обтекателя в окрестности точки M_{jk} плоскопараллельным слоем и используя многослойную модель, учитывающую отражения внутри стенки, в работе [4] для компонент Ω_{jk} , входящих в формулу (1), получено выражение

$$\Omega_{jk} \approx \sum_{m=0}^{n-2} \Theta(T_{jk}^m) \varepsilon'(T_{jk}^m) \operatorname{tg} \delta(T_{jk}^m) \left(\left| E_{s\omega jk}^m \right|^2 + \left| E_{\perp\omega jk}^m \right|^2 \right) \Delta S_{jk} \Delta d_{jk}, \quad (4)$$

где $n-2$ – число элементарных слоев, на которые разбивается стенка; d – толщина стенки; $T_{jk}^m = T(x_j, m\Delta d_{jk}, z_k)$; $\Delta d_{jk} = d / [(n-2) \cos \theta_{jk}]$;

$$\theta_{jk} = \arccos \frac{F_y}{\sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}} \Big|_{x=j\Delta x, y=y_{jk}, z=k\Delta z}; \quad (5)$$

$$\Delta S_{jk} \approx \Delta x \Delta z \sqrt{1 + (F_x/F_y)^2 + (F_z/F_y)^2} \Big|_{x=x_j; z=z_k} - \quad (6)$$

площадь элементарной площадки в касательной к Σ в точке M_{jk} плоскости.

Составляющие электрического поля $E_{s\omega jk}^m$, $E_{\perp\omega jk}^m$ внутри стенки находятся в результате решения систем уравнений (27) [4], (28) [4].

Постановка задачи. Будем решать задачу определения температуры системы антенна-обтекатель по формуле (1) при следующих предположениях и допущениях:

– пространство между обтекателем и раскрывом заполнено воздухом, для которого $\varepsilon_c \approx 1$; $\mu_c = 1$; $\operatorname{tg} \delta \approx 0$;

– внутренняя поверхность Σ представляет собой верхнюю часть вытянутого эллипсоида вращения вокруг оси y , описываемого уравнением

$$\frac{x^2 + z^2}{u^2} + \frac{(y - y_0)^2}{g^2} = 1, \quad u \geq g, \quad (7)$$

где y_0 – расстояние, на которое смещена плоскость раскрыва от центра эллипсоида;

– распределение поля в прямоугольном раскрыве антенны, лежащем в плоскости $y = 0$, является синфазным и задается выражением

$$|U(x, z)| = \cos(\pi x/a_x) \cos(\pi z/a_z); \quad \arg U(x, z) = \operatorname{const}; \quad (8)$$

– обтекатель изготовлен из кварцевого стекла или из окиси бериллия, зависимости $\varepsilon'(T)$, $\text{tg}\delta(T)$ для которых представлены на рис. 1 по данным из [4], причем материал второго типа отличается более высокими потерями;

– распределение температуры внутри стенки обтекателя предполагается известным в результате решения задачи аэродинамического нагрева обтекателя и симметричным относительно оси обтекателя [4], задано в виде $N_1 \times N_2$ -матрицы $[T_{ij}]$ в узлах полярной сетки

$$(\rho_i = R + (i-1)\Delta\rho, \varphi_j = (j-1)\Delta\varphi), i \in \overline{1, N_1}, j \in \overline{1, N_2}, \Delta\varphi = \pi/(2N_1), \Delta\rho = d/N_2 \quad (9)$$

для каждой секунды полета летательного аппарата (в формуле (9) предполагается, что $u = g = R$).

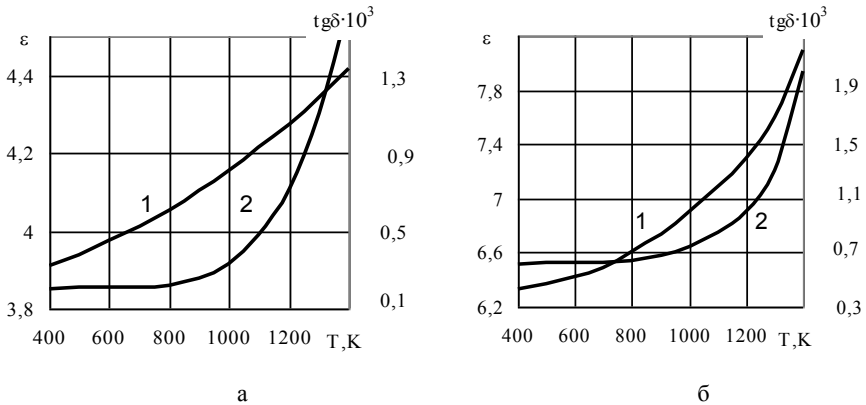


Рис. 1. Зависимости $\varepsilon(T)$ (кривые 1) и $\text{tg}\delta(T)$ (кривые 2) для обтекателя из кварцевого стекла (а) и окиси бериллия (б)

Требуется при сделанных допущениях и предположениях рассчитать температуру системы антенна-обтекатель и исследовать ее зависимости от конструктивных параметров системы.

Результаты расчетов и их анализ. Нормаль к эллипсоиду (7) в точке M_{jk} описывается выражением

$$\frac{x - x_j}{x_j/u^2} = \frac{y - y_{jk}}{y_{jk}/g^2} = \frac{z - z_k}{z_k/u^2},$$

а угол падения в соответствии с соотношением (5) равен

$$\theta_{jk} = \begin{cases} 0; & (x_{jk}, z_{jk}) \in G' = \{(x, z) \in G_0 | x = z = 0\}; \\ \arccos \sqrt{1 - \frac{(g/u)^2}{u^2/(x_{jk}^2 + z_{jk}^2) + (g/u)^2 - 1}}; & (x_{jk}, z_{jk}) \notin G'. \end{cases}$$

Для площади участка слоя ΔS_{jk} в соответствии с выражением (6) имеем

$$\Delta S_{jk} \approx \Delta x \Delta z / \sqrt{1 - (x_j^2 + z_k^2) / u^2}.$$

Поскольку распределение температуры в стенке обтекателя задано в полярных координатах, возникает задача построения двумерных интерполяционных формул в декартовых координатах (x, y, z) , связанных с раскрывом и обтекателем (рис. 1 работы [1]).

Пусть требуется найти температуру в точке

$$P_{jki} = (x_j, i\Delta d_{jk}, z_k).$$

В плоскости падения луча, выходящего из точки (x_j, z_k) ортогонально плоскости $y=0$, введем систему координат (y', ζ) (рис. 2) с началом в центре полусферы радиуса R , ось y' которой совпадает с осью y , а ось ζ развернута в плоскости $x=z$ на угол $\delta_{jk} = \arctg z_k / x_j$, так что $\zeta = \sqrt{x^2 + z^2}$. Тогда узлу P_{jki} соответствует точка

$$P'_{jki} = (\zeta_{jki} = \sqrt{x_j^2 + z_k^2}, y_{jki} = \sqrt{R^2 - x_j^2 - z_k^2} + i\Delta d_{jk}).$$

В той же плоскости введем полярную систему координат (ρ, φ) так, что начало отсчета углов совпадает с осью y . Тогда точка P'_{jki} имеет координаты $(\rho_{jki} = \sqrt{\zeta_{jki}^2 + y_{jki}^2}, \varphi_{jki} = \arctg(y_{jki} / \zeta_{jki})$. Если обозначить через $\{x\}$ операцию определения ближайшего целого к числу x , то формулы $i = \{(R + d - \rho_{jki}) / \Delta \rho\}$, $j = \{\varphi_{jki} / \Delta \varphi\}$ дают номер центрального элемента для интерполяции.

Выразим координаты узлов полярной сетки в декартовых координатах:

$$\zeta_{ij} = [R + (N_1 - i)\Delta \rho] \sin[(j-1)\Delta \varphi];$$

$$y_{ij} = [R + (N_1 - i)\Delta \rho] \cos[(j-1)\Delta \varphi].$$

Формула квадратичной двумерной интерполяции по шести ближайшим к центральному узлу точкам обычно приводится для равномерного шага по осям x, z . Построим поверхность второго порядка, общее уравнение для которой имеет вид

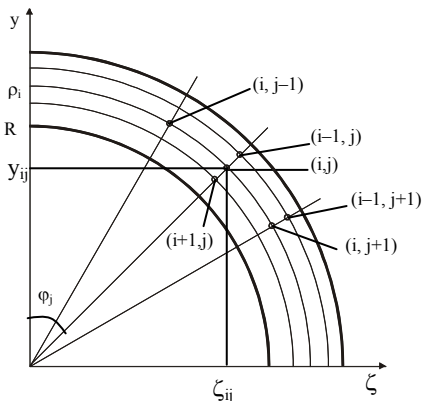


Рис. 2. Расположение узлов интерполяции в полярной системе координат

$$\pi(\zeta, y) = b_1 \zeta + b_2 y + b_3 \zeta^2 + b_4 y^2 + b_5 \zeta y + b_6, \quad (10)$$

чтобы она проходила через узлы с номерами $(i, j-1), (i, j+1), (i+1, j), (i-1, j), (i-1, j+1), (i, j)$. В результате получим систему линейных уравнений относительно коэффициентов b_i :

$$\begin{bmatrix} \zeta_{i,j-1} & y_{i,j-1} & \zeta_{i,j-1}^2 & y_{i,j-1}^2 & \zeta_{i,j-1} y_{i,j-1} & 1 \\ \zeta_{i,j+1} & y_{i,j+1} & \zeta_{i,j+1}^2 & y_{i,j+1}^2 & \zeta_{i,j+1} y_{i,j+1} & 1 \\ \zeta_{i+1,j} & y_{i+1,j} & \zeta_{i+1,j}^2 & y_{i+1,j}^2 & \zeta_{i+1,j} y_{i+1,j} & 1 \\ \zeta_{i-1,j} & y_{i-1,j} & \zeta_{i-1,j}^2 & y_{i-1,j}^2 & \zeta_{i-1,j} y_{i-1,j} & 1 \\ \zeta_{i-1,j+1} & y_{i-1,j+1} & \zeta_{i-1,j+1}^2 & y_{i-1,j+1}^2 & \zeta_{i-1,j+1} y_{i-1,j+1} & 1 \\ \zeta_{ij} & y_{ij} & \zeta_{ij}^2 & y_{ij}^2 & \zeta_{ij} y_{ij} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \\ b_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{i,j-1} \\ T_{i,j+1} \\ T_{i+1,j} \\ T_{i-1,j} \\ T_{i-1,j+1} \\ T_{ij} \end{bmatrix}.$$

После решения этой системы можно найти температуру в некоторой точке P'_{jk} можно найти из соотношения

$$T_{jk} = \pi(\rho_{jk} \sin \varphi_{jk}, \rho_{jk} \cos \varphi_{jk}). \quad (11)$$

Зададим следующую совокупность параметров: $a_x = a_y = 0,3$ м; $\lambda = 0,008$ м; $R = u = g = 0,3$ м; $y_0 = 0,1$ м. Условие (21)_[4] для границы применимости приближения ближней зоны принимает вид $a_x = a_y = 0,3$ $y' \ll 4 \left[\pi \lambda \left(\frac{1}{a_x^2} + \frac{1}{a_z^2} \right) \right]^{-1} = 7,16$ м. Возьмем $y' = 0,7$ м. Максимальное расстояние от плоскости раскрыва до поверхности обтекателя составляет $\Delta l = g + l_0 = 0,4$ м $< y'$, т.е. в рассматриваемом случае справедливо приближение ГО и в формуле (2) можно ограничиться главным членом.

Из (2) следует, что $\Delta U(x, z) = \pi^2 \left[\frac{1}{a_x^2} + \frac{1}{a_z^2} \right] U(x, z)$, и формула (23)_[4]

$$E_{jk}^0 = E_x(M_{jk}) = e^{ik_c y_{jk}} \left(1 - \frac{y_{jk}}{2ik_c} \Delta \right) U \Big|_{x=x_j, z=z_k}$$

для амплитуды электрического поля в точке $M_{jk} = (x_j, y_{jk}, z_k)$ на внутренней поверхности обтекателя принимает вид

$$E_{jk}^0 = E_x(M_{jk}) = e^{ik_c y_{jk}} \left[1 - \frac{\pi^2 y_{jk}}{2ik_c} \left(\frac{1}{a_x^2} + \frac{1}{a_z^2} \right) \right] \cos \frac{\pi x_j}{a_x} \cos \frac{\pi z_k}{a_z}, \quad (12)$$

где (x_j, z_k) – точка на раскрыве антенны, а $y_{jk} = g \sqrt{1 - (x_j^2 + z_k^2) / u^2}$.

Чтобы исследовать влияние отражений внутри слоя, рассмотрим сначала случай, когда распределение температуры по нормали к стенке не зависит от сдвига по образующей обтекателя, а само распределение по толщине имеет вид

$$T(y) = T_0 + K(y - d/2), \quad (13)$$

где коэффициент K характеризует градиент температуры (случай $K = 0$ соответствует равномерному распределению температуры в стенке, когда внутренние отражения отсутствуют). На рис. 3 приведены семейства зависимостей шумовой температуры системы антенна-обтекатель для модели (13) распределения температуры по толщине стенки.

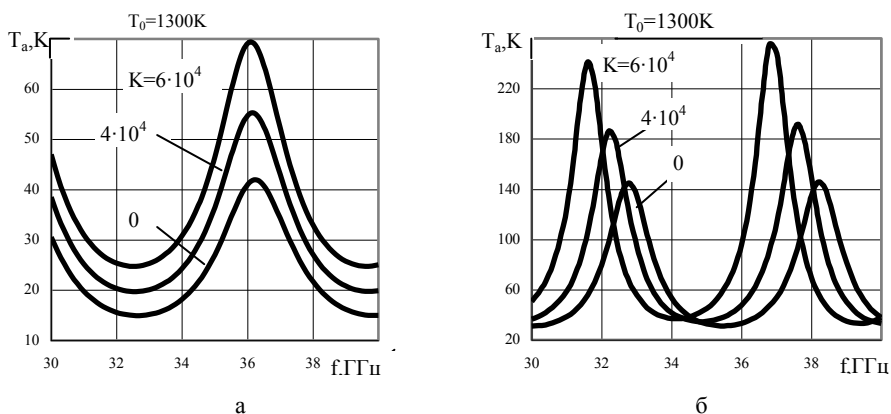


Рис. 3. Зависимость шумовой температуры от частоты для обтекателя из кварцевого стекла (а) и окиси бериллия (б) при различных градиентах температуры по толщине стенки

Кривые имеют четко выраженные максимумы и минимумы, обусловленные интерференцией колебаний различных частот в стенке. Отметим, что формула (6) работы [4] не учитывает этого эффекта, так как в ее основе лежит выражение для усредненного по частоте коэффициента излучения. В окрестностях максимумов шумовой температуры лежат минимумы модуля коэффициента отражения и максимумы модуля коэффициента прозрачности стенки, поэтому среднюю рабочую частоту радиоэлектронного средства при заданной толщине следует выбирать вблизи одного из максимумов или при заданной частоте выбирать должным образом толщину стенки обтекателя.

Отметим, что максимумы шумовой температуры для кварцевого стекла практически не смещаются при изменении T_0 , в то время как в случае окиси бериллия смещения оказываются значительными, что затрудняет выбор оптимальной толщины стенки обтекателя. Графики на

рис. 4 иллюстрируют зависимости шумовой температуры в одном из максимумов по частоте (36,8 ГГц для кварцевого стекла и 34,2 ГГц для окиси бериллия) от градиента температур для модели (13).

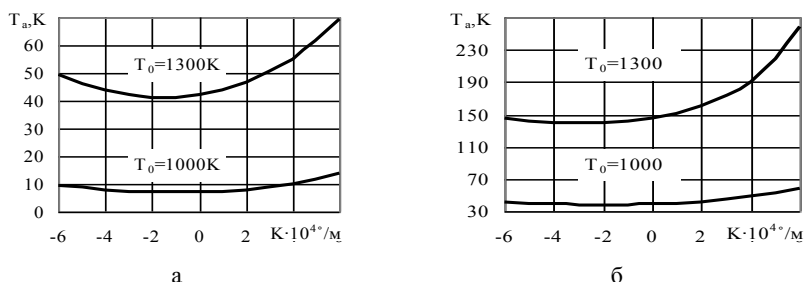


Рис. 4. Зависимость шумовой температуры от градиента температур К для обтекателя из кварцевого стекла (а) и окиси бериллия (б) при различных значениях T_0

Отметим несимметрию кривых от знака градиента температур, причем минимум каждой кривой не соответствует нулевому значению градиента, а смещен в область отрицательных значений градиента. Это объясняется тем, что при положительном градиенте к излучению менее нагретой внутренней стенки радиопрозрачного обтекателя добавляется излучение более нагретых внешних слоев. Если использовать понятие коэффициента излучения как отношения интенсивности излучения данного тела к интенсивности излучения абсолютно черного тела такой же формы и нагретого до той же температуры, этот коэффициент в рассматриваемом случае может превышать единицу, так как черное тело излучает только с поверхности [5]. Найдем теперь шумовую температуру системы антенна-обтекатель для случая, когда распределение температур не моделируется, а определяется из решения задачи аэродинамического нагрева в процессе полета в плотных слоях атмосферы, которая решена в [6].

На рис. 5 приведены результаты расчета поля температур в стенке обтекателя полусферической формы радиуса $R = 0,3$ м с толщиной стенки $d = 0,01$ м для близкой к навесной траектории за одну секунду до окончания полета. Зависимость температуры в центральных точках обтекателя на внутренней и внешней поверхностях от времени, оставшегося до завершения полета, представлены на рис. 6. Результаты расчетов шумовой температуры антенна-обтекатель по формуле (1) при указанных исходных данных для распределения температур, представленного на рис. 5, иллюстрируются графиками на рис. 7. Смещение максимумов шумовой температуры для окиси бериллия здесь выражено менее явно, чем на рис. 3, б, поскольку в первом случае распределение температуры

в стенке соответствует представленному на рис. 5, б, а во втором предполагалось не зависящим от смещения вдоль образующей обтекателя.

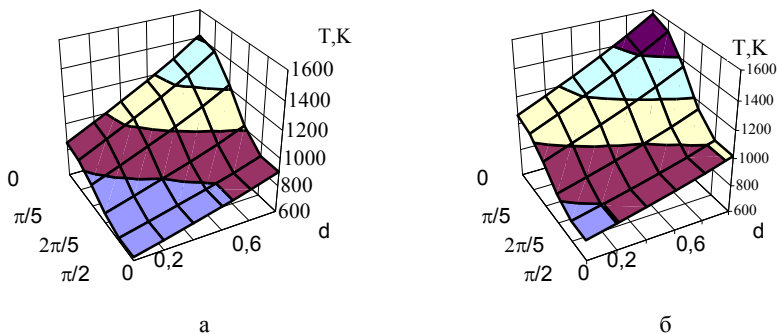


Рис. 5. Распределение температуры в стенке обтекателя, изготовленного из кварцевого стекла (а) и окиси бериллия (б)

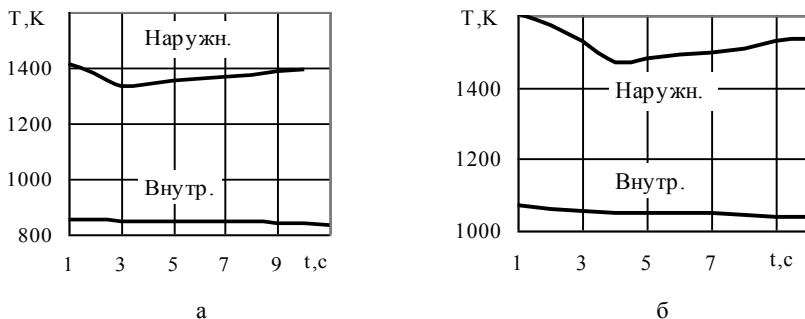


Рис. 6. Зависимость температуры нагрева в осевой точке обтекателя на внутренней и наружной поверхностях от времени, оставшегося до завершения полета: а – обтекатель из кварцевого стекла; б – обтекатель из окиси бериллия

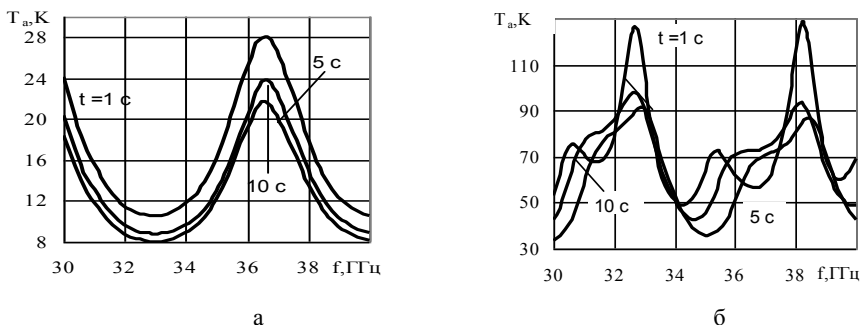


Рис. 7. Зависимость шумовой температуры от частоты для обтекателя из кварцевого стекла (а) и окиси бериллия (б)

Этим же фактором объясняется меньшее значение максимума шумовой температуры и искажение кривых зависимости от частоты в первом случае.

Выводы. Учет отражений внутри стенки обтекателя позволяет существенно (в полтора-два раза в зависимости от средней температуры стенки и электрофизических параметров материала) повысить точность расчета шумовой температуры системы антенна-обтекатель. При надлежащем выборе материала интенсивностью собственного излучения разогретого обтекателя по сравнению с эквивалентной температурой шума неохлаждаемого радиометрического приемника можно пренебречь.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воробьев В.А. Шумы антенного обтекателя, подвергающегося высокотемпературному нагреву // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 1971. – Т. 14. – № 7. – С. 839 – 840.
2. Калашников В.С., Михайлов В.Ф. Влияние шумов антенного обтекателя при его аэродинамическом нагреве на работу бортовой аппаратуры // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 1976. – Т. 19. – № 5. – С. 3 – 8.
3. Михайлов В.Ф., Победоносцев К.А., Брагин И.В. Прогнозирование эксплуатационных характеристик антенн с теплозащитой. – СПб.: Судостроение, 1994. – 304 с.
4. Антюфеев В.И., Агафонов Ю.Н., Быков В.Н., Орлов С.В., Приходько И.М. Метод расчета шумовой температуры системы антенна-обтекатель с учетом отражений внутри стенки обтекателя // Системы обработки информации. – 2004. – Вып. 7 (35). – С. 9 – 19.
5. Свет Д.Я. Температурное излучение металлов и некоторых веществ. – М.: Металлургия, 1964. – 134 с.
6. Приходько И.М., Агафонов Ю.М., Попов Н.П., Орлов С.В. К расчету нестационарного температурного поля в полупрозрачных антенных обтекателях летательных аппаратов // Авіаційна і ракетно-космічна техніка. – 2004. – Вып. 4. – С. 90 – 93.

Поступила 19.07.2004

АНТЮФЕЕВ Валерий Иванович, доктор техн. наук, ст. научн. сотрудник, главный научный сотрудник научного центра при ХВУ. В 1969 году окончил ХГУ. Область научных интересов – системы навигации летательных аппаратов, цифровая обработка изображений.

АГАФОНОВ Юрий Николаевич, канд. техн. наук, доцент, начальник НИУ научного центра при ХВУ. В 1971 году окончил ХВКИУ. Область научных интересов – теория построения и конструкции летательных аппаратов.

БЫКОВ Виктор Николаевич, канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, начальник НИО научного центра при ХВУ. В 1971 году окончил ХВКИУ. Область научных интересов – системы навигации летательных аппаратов, дистанционное зондирование Земли, цифровая обработка изображений

ОРЛОВ Сергей Владимирович, адъюнкт ХВУ. В 1999 году окончил ХВУ. Область научных интересов – ракетная и космическая теплотехника.

ПРИХОДЬКО Иван Михайлович, доктор техн. наук, профессор, главный научный сотрудник научного центра при ХВУ. Область научных интересов – тепло-массообмен в ракетной и космической технике.