

УДК 621.375.

И.М. ПРИХОДЬКО, Ю.Н. АГАФОНОВ, Н.П. ПОПОВ, С.В. ОРЛОВ*Военный научный центр космических исследований (при Харьковском военном университете), Украина*

К РАСЧЕТУ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В ПОЛУПРОЗРАЧНЫХ АНТЕННЫХ ОБТЕКАТЕЛЯХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Рассмотрены аппроксимационные формулы расчета приведенной степени черноты и эффективного коэффициента теплоотдачи полупрозрачных материалов с учетом особенностей их излучения, что может быть использовано при расчете граничных условий для определения нестационарного температурного поля полупрозрачных обтекателей антенн. Дан пример расчета.

градиент температур, полупрозрачный материал, теплопрозрачная область спектра, обтекатель, излучательная способность, спектральная плотность, суммарный коэффициент теплообмена, суммарный приведенный коэффициент черноты

1. Формулирование проблемы

При расчете характеристик обтекателей антенн (ОА) летательных аппаратов (ЛА) в условиях их эксплуатации становится актуальной проблема определения температурного поля обтекателя, подвергаемого аэродинамическому нагреву. Изменение теплового состояния этого элемента конструкции приводит к возрастанию дополнительных ошибок углового определения местоположения объектов в 3 – 7 раз [1 – 5], что в переводе на расстояние означает ошибку навигации в сотни метров. В этой связи актуальной является задача повышения точности расчетов температурного поля обтекателя, которая во многом определяется заданием граничных условий, учитывающих все виды и особенности теплообмена обтекателя с окружающей средой.

1.1. Анализ литературы

Расчеты теплового состояния ОА ЛА проводились в ряде работ [6 – 9]. Общим для них является упрощенный подход к расчету лучистой составляющей теплового потока из-за учета только поверхностного излучения. Однако при расчете полупрозрачных обтекателей такой подход нельзя считать оправданным. Это объясняется тем, что для

частично прозрачных тел закон Кирхгофа в его обычной форме неприменим ввиду того, что он выведен в предположении теплового равновесия между энергией испускания и энергией поглощения при равенстве температур [10].

Основные положения теории излучения частично прозрачных тел разработаны Мак-Магоном, на чьи работы ссылаются [10, 11], который ввел понятие о спектральной объемной мощности излучения материала. Однако его формулы не распространяются на полусферическую излучательную способность и пропускаемость, а вопросы, связанные с коэффициентом преломления, не учитываются. В работе [11] делается вывод о том, что в общем случае задачу теплопереноса в частично прозрачных средах нужно рассматривать как трехмерную даже при направленном излучении.

В работе [10] показано, что излучательная способность полупрозрачных тел зависит от градиента и распределения температуры по толщине, приведены графики зависимости полного (в полусферической области) коэффициента черноты ε_{Σ}^* от различных факторов – толщины слоя d , температуры T , градиента температуры по толщине слоя ΔT для плоской стенки из кварцевого стекла. Вследствие излучения внутренней стенки, нагретой до бо-

лее высокой температуры, чем внешняя, результирующий коэффициент черноты в ряде случаев превышает 1. Например, при разности температур ΔT внутренней $T_{внутр}$ и внешней $T_{нов}$ поверхностей в 200°C и температуре стенки $T_{внутр} = 800^{\circ}\text{C}$, толщине стенки 6 мм величина ε_{Σ}^* достигает значения 1,9.

1.2 Цель работы

Целью работы является разработка метода расчета эффективного коэффициента теплоотдачи, учитывающего особенности переноса излучения полупрозрачных материалов.

2. Решение проблемы

При наличии конвективного и лучистого теплообмена граничное условие обычно записывается в виде

$$q_k + q_l = -\lambda_m \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0}, \quad (1)$$

где x – координата по нормали к поверхности теплообмена; λ_m – теплопроводность материала обтекателя, q_k, q_l – соответственно плотность лучистого и конвективного тепловых потоков.

С учетом лучистого теплообмена значение эффективного коэффициента теплоотдачи $\alpha_{эф}$ определяется по выражению [6]

$$\alpha_{эф} = \alpha_k - \frac{q_l}{(T_2 - T_{нов})}, \quad (2)$$

где α_k – коэффициент теплоотдачи при вынужденной конвекции, определяемый по критериальным уравнениям, T_2 – температура окружающей среды.

Плотность лучистого теплового потока определяется уравнением Стефана – Больцмана, в котором коэффициент черноты стенки учитывает излучение из объема стенки.

Сущность излагаемого метода расчета суммарного коэффициента черноты состоит в следующем.

Для полупрозрачных материалов коэффициент черноты является функцией температуры T , градиента температуры ΔT , толщины стенки d и длины волны λ теплового излучения [10], т.е.

$$\varepsilon_{\Sigma}^* = f(T, \Delta T, d, \lambda). \quad (3)$$

Для полупрозрачных материалов прозрачность для ИК-излучения имеет место в некотором диапазоне длин волн от λ_1 до λ_2 . Так, для кварцевой стенки толщиной 0,5...30 мм окно прозрачности лежит в интервале 4,8...3,6 мкм [12].

Доля полной энергии излучения с поверхности обтекателя, приходящаяся на теплопрозрачную область спектра для данного материала при заданной температуре, равна [7]

$$k_{\lambda} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{b_{\lambda}}(T_{нов}) d\lambda}{\sigma_0 T_0^4}, \quad (4)$$

где λ_1, λ_2 – границы прозрачности для материала по длинам волн, м;

$$E_{b_{\lambda}} = \frac{c_1}{\lambda^5 \left(e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1 \right)} \quad (5)$$

– спектральная плотность потока излучения АЧТ при температуре T , $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ (формула Планка).

Доля полной энергии излучения, приходящаяся на непрозрачную часть спектра, равна $1 - k_{\lambda}$.

В качестве определяющей выбираем длину волны, соответствующую максимуму спектральной интенсивности лучистого потока. По закону Вина,

$$\lambda_{\max} = \frac{2,898 \cdot 10^{-3}}{T_{нов}}. \quad (6)$$

Анализ закона смещения Вина показывает, что в рассматриваемом диапазоне длин волн при $\lambda \geq \lambda_{\max} < \lambda_2$ и $T \leq 1500 \text{ К}$ спектральная плотность излучения изменяется незначительно. В этой связи величину $E_{b_{\lambda}}$ можно принять равной спектральной плотности при $\lambda = \lambda_{\max}$. Аппроксимируя приведен-

ные в [10] графики, получим расчетную зависимость для коэффициента черноты стенки в области прозрачности в виде

$$\varepsilon_{\text{прозр}}^* = \varepsilon \left(1 + \frac{\Delta T L_M}{\lambda_{\text{max}}} k_M d_{P_M} \right), \quad (7)$$

где L_M, k_M, P_M – коэффициенты, определяемые свойствами материала;

ε – коэффициент черноты для непрозрачной части спектра.

Тогда суммарный приведенный коэффициент черноты определится выражением

$$\varepsilon_{\Sigma}^* = \varepsilon_{\text{прозр}}^* k_{\lambda} + \varepsilon (1 - k_{\lambda}). \quad (8)$$

Плотность лучистого потока через единичную поверхность обтекателя с учетом объемного излучения в этом случае будет определяться по формуле

$$q_l = \sigma_0 \varepsilon_{\Sigma}^* T_{\text{нов}}^4, \quad (9)$$

где $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{Вт}{м^2 K^4}$ – постоянная Стефана – Больцмана.

Таким образом, искомый эффективный коэффициент теплоотдачи будет равен

$$\alpha_{\text{эф}} = \alpha_k - \frac{\sigma_0 \varepsilon_{\Sigma}^* T_{\text{нов}}^4}{(T_c - T_{\text{нов}})}. \quad (10)$$

Пример расчета.

Рассчитать суммарный коэффициент черноты, плотность лучистого теплового потока, суммарный коэффициент теплообмена для кварцевого обтекателя при температуре внешней стенки $T_{\text{нов}} = 477^{\circ}C$, температуре внутренней стенки $T_{\text{внутр}} = 677^{\circ}C$ и температуре среды $T_c = 427^{\circ}C$. Коэффициент черноты для непрозрачной области спектра для кварца $\varepsilon = 0,97$; коэффициент конвективного теплообмена (получен из баллистических расчетов)

$$\alpha_k = 1000 \frac{Вт}{м^2 \cdot K}.$$

Доля полной энергии излучения, приходящаяся на теплопрозрачную область спектра для кварцевого стекла при температуре $477^{\circ}C$, равна

$$k_{\lambda} = \frac{\int_{3,6 \cdot 10^{-6}}^{4,8 \cdot 10^{-6}} \frac{3,7418 \cdot 10^{-16}}{\lambda^5 \left(e^{\frac{1,4388 \cdot 10^{-2}}{\lambda(273+477)}} - 1 \right)} d\lambda}{5,67 \cdot 10^{-8} (273 + 477)^4} = 0,204.$$

Максимум спектральной интенсивности лучистый поток достигнет на длине волны

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{2,898 \cdot 10^{-3}}{(273 + 477)} = 3,864 \cdot 10^{-6} м.$$

Суммарный коэффициент черноты для прозрачной части спектра

$$\varepsilon_{\text{прозр}}^* = 0,97 \left(1 + \frac{(677 - 477)^{0,2}}{3,864 \cdot 10^{-6}} \cdot 1,75 \cdot 10^{-4} \cdot 0,006^{0,95} \right) = 1,825.$$

Суммарный приведенный коэффициент черноты равен

$$\varepsilon_{\Sigma}^* = 1,825 \cdot 0,204 + 0,97 \cdot (1 - 0,204) = 1,141$$

Плотность лучистого теплового потока

$$q_l = 1,141 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot (477 + 273)^4 = 2,047 \cdot 10^4 \frac{Вт}{м^2}.$$

Эффективный коэффициент теплоотдачи

$$\alpha_{\text{эф}} = 1000 - \frac{2,047 \cdot 10^4}{(427 - 477)} = 1409,1 \frac{Вт}{м^2 \cdot K}.$$

Результаты расчета без учета переотражений в обтекателе с теми же исходными данными:

$$q_l = 0,81 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot (477 + 273)^4 = 1,74 \cdot 10^4 \frac{Вт}{м^2};$$

$$\alpha_{\text{эф}} = 1000 - \frac{1,74 \cdot 10^4}{(427 - 477)} = 1348 \frac{Вт}{м^2 \cdot K}.$$

По результатам исследований был произведен расчет температур в критической точке на поверхности ЛА в течение всего времени полета различными методами. Данные расчетов приведены на рис. 1.

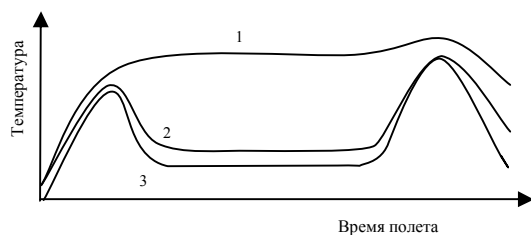


Рис. 1. Температура на поверхности обтекателя ЛА по всей траектории полета: 1 – без учета лучистого теплообмена; 2 – с учетом лучистого теплообмена обтекателя как непрозрачного тела; 3 – с учетом лучистого теплообмена обтекателя как полупрозрачного тела

Сравнение полученных результатов показывает, что для прозрачных материалов эффективный коэффициент теплоотдачи снижается на 5 – 10 %.

Выводы

1. Получено выражение для определения суммарного приведенного коэффициента черноты стенки, которое позволяет проводить расчеты излучения для полупрозрачного материала как в прозрачной, так и в непрозрачной областях спектра.

2. Учет влияния особенностей излучения полупрозрачных материалов позволяет повысить точность расчета нестационарного температурного поля обтекателя антенн ЛА в процессе полета.

Литература

1. Михайлов В.Ф. Прогнозирование эксплуатационных характеристик антенн с теплозащитой. – СПб.: Судостроение, 1994. – С. 25 – 31.

2. Воробьев Е.А., Михайлов В.Ф., Харитонов А.А. СВЧ-диэлектрики в условиях высоких температур. – М.: Сов. радио, 1977. – С. 23 – 29.

3. Воробьев Е.А. Угловые ошибки антенны при аэродинамическом нагреве обтекателя // Изв. вузов

СССР. Сер. Радиоэлектроника. – 1967. – Т. 10, № 2. – С. 197 – 198.

4. Михайлов В.Ф. О влиянии обтекателя, испытывающего тепловой удар, на дальность действия радиолокационной станции // Изв. вузов СССР. Сер. Радиоэлектроника. – 1967. – Т. 10, № 6. – С. 207 – 209.

5. Калашников В.С., Михайлов В.Ф., Калашников В.С. Влияние шумов антенного обтекателя при его аэродинамическом нагреве на работу бортовой радиоаппаратуры // Изв. вузов СССР. Сер. Радиоэлектроника. – 1976. – Т. 19, № 5. – С. 3 – 8

6. Дракин И.И. Аэродинамический и лучистый нагрев в полете. – М.: Оборонгиз, 1961. – С. 77.

7. Крейт Ф., Блэк У. Основы теплопередачи. – М.: Мир, 1983. – С. 251 – 255.

8. Ужик Г.В. Проблемы высоких температур в авиационных конструкциях. – М.: Изд-во иностр. лит., 1961. – С. 29 – 33.

9. Краснов А.А. Аэродинамика ракет. – М.: Оборонгиз, 1961. – С. 559.

10. Свет Д.Я. Температурное излучение металлов и некоторых веществ. – М.: Наука, 1964. – С. 48 – 54.

11. Свет Д.Я. Оптические методы измерения истинных температур. – М.: Наука, 1982. – С. 31.

12. Петров В.Ф. Радиационные характеристики кварцевых стекол // Теплофизика высоких температур. – 1975. – Т. 13, № 2. – С. 335 – 345.

Поступила в редакцию 12.03.04

Рецензент: д-р физ-мат. наук, проф. А.Г. Николаев, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, г. Харьков