

В таблице 5.3 в качестве примера приводятся рассчитанные по (5.24) значения T_w для тех же моментов времени t и температуры T_0 , что и в таблице 5.2, построенной на основе решения уравнения (5.13).

Как следует из сравнения таблиц 5.2 и 5.3, формула (5.24) дает завышенные значения T_w по сравнению с более точными результатами, полученными при решении уравнения (5.13). Наибольшее различие, как и следовало ожидать, отмечается в моменты времени, близкие к начальному. В дальнейшем эти различия сглаживаются, и уже через 0,06 с результаты, получаемые по формуле (5.24) и при точном решении уравнения (5.13), различаются на 10–15 %. Формула (5.24) дает верхнюю оценку T_w .

Нижнюю оценку T_w можно получить из (5.24) посредством предельного перехода при $t \rightarrow \infty$:

$$T_{w, \min} = \left(T_\infty^4 + \frac{\mu V_z^2}{\pi \varepsilon \sigma R_p} \right)^{1/4}. \quad (5.25)$$

Такая температура должна установиться на поверхности ротора при его неограниченном во времени вращении в слое атмосферы. Если вязкость воздуха принять соответствующей температуре $T_0 = 293$ °K, то из (5.25) находим $T_{w, \min} = 803$ °K. Если же $T_0 = 3000 \div 5000$ °K, то нижняя оценка температуры поверхности ротора $T_{w, \min} = 1180 \div 1300$ °K. При $T_0 = 10^4$ °K, соответствующей температуре воздуха в пике (рисунок 37), из (5.25) находим $T_{w, \min} = 1490$ °K.

5.6. Квазистационарный расчет динамики испарения сублимирующего покрытия тепловой защиты ротора

Температура поверхности ротора, как следует из полученных выше результатов, для $t \geq 0,05$ с достигает 1500–2000 °K. Для большинства материалов такие, а тем более возникающие в начальный момент времени температуры достаточно высоки, поэтому представляет интерес рассмотреть активную тепловую защиту ротора с помощью сублимирующих покрытий.

В этом случае радиус R_p поперечного сечения ротора не является постоянной величиной, так как по мере испарения защитного покрытия он будет уменьшаться. Пусть $R_p = R_{p0}$ – начальное значение радиуса.

В квазистационарном случае уравнение теплопереноса (5.13) в безразмерном виде принимает форму:

$$\frac{\partial}{\partial r'} \left(r' \frac{\partial T'}{\partial r'} \right) = -\frac{A_6 r'}{t} \exp \left[-\frac{(r' - R_r')^2}{A_2 t} \right]. \quad (5.26)$$

Здесь приняты обозначения

$$T' = \frac{T - T_\infty}{T_s - T_\infty}; \quad r' = \frac{r}{R_{p0}}; \quad R' = \frac{R_p}{R_{p0}};$$

$$t' = \frac{t}{t_*}; \quad A_6 = \frac{\rho V^2 R_{p0}^2}{\pi t_* \lambda (T_s - T_\infty)},$$

где T_s – предполагаемая постоянной температура поверхности ротора, равная температуре сублимации материала защитного покрытия.

Граничные условия для (5.26) и учетом (5.4), (5.5), (5.23) имеют вид:

$$r' = R_p'; \quad T' = 1; \quad \frac{\partial T'}{\partial r'} = A_4 \left[(1 + A_5)^4 + A_5^4 \right] + J'; \quad (5.27)$$

$$r' \rightarrow \infty; \quad r' \frac{\partial T'}{\partial r'} \rightarrow 0; \quad J' = \frac{J L R_{p0}}{\lambda (T_s - T_\infty)}. \quad (5.28)$$

Здесь A_2 и A_4 определяются по формулам (5.16), (5.20) и заменами R_p и T_* на R_{p0} и T_s .

Уравнения (5.8) динамики испарения защитного покрытия в безразмерной форме:

$$\frac{dR_p'}{dt'} = -A_7 J', \quad (5.29)$$

где

$$A_7 = \frac{\lambda (T_s - T_\infty) t_*}{L \rho_w R_{p0}^2}.$$

Интегрируя (5.26) по r' в пределах от R_p' до ∞ и привлекая граничные условия (5.27), (5.28), получим после преобразований формулу безразмерного массового потока:

$$J' = -A_4 \left[(1 + A_5)^4 - A_5^4 \right] + \frac{A_2 A_6}{2 R'} + \frac{A_6}{2} \left(\frac{\pi A_2}{t'} \right). \quad (5.30)$$