ТЕПЛООБМЕН ИЗЛУЧЕНИЕМ МЕЖДУ ТВЕРДЫМИ ТЕЛАМИ

Параллельные пластины

Если тело участвует в теплообмене излучением с другими телами, то на рассматриваемое тело падает извне энергия излучения в количестве $E_{пад}$. Часть падающей энергии излучения в количестве $AE_{пад}$ телом поглощается и превращается в его внутреннюю энергию. Остальная часть энергии излучения в количестве $RE_{пад}$ отражается от тела.

Сумма собственного и отраженного излучений, испускаемых поверхностью данного тела, называется *эффективным излучением*

$$E_{эф} = E_{соб} + RE_{пад} = E_{соб} + (1 - A)E_{пад}$$

$$D = 0, \quad R = 1 - A$$

Эффективное излучение зависит не только от физических свойств и температуры данного тела, но и от физических свойств, температуры и спектра излучения других окружающих тел.

Для черного тела $E_{эф}= E_{соб}$, т.к. для него $RE_{пад}=E_{отр}=0$ (при R=0).

Рассмотрим теплообмен излучением между двумя серыми параллельными пластинами, разделенными прозрачной средой. Размеры пластин значительно больше расстояния между ними, так что излучение одной из них будет полностью попадать на другую.

Обозначим: температуры пластин T_1 и T_2, коэффициенты поглощения A_1 *и* A_2; собственные излучения пластин E_1 и E_2, эффективные излучения пластин $E_{1эф}$ и $E_{2эф}$, коэффициенты излучения C_1 и C_2. Полагаем, что $T_1 > T_2$.

Суммарный поток излучения первой пластины, состоящий из собственного излучения E_1 и отраженного излучения второй пластины $(1–A_1)E_{2эф}$, находим из уравнения

$$E_{1эф} = E_1 + (1 - A_1)E_{2эф}$$

Аналогично суммарное излучение второй пластины

$$E_{2эф} = E_2 + (1 - A_2)E_{1эф}$$

Решая те два уравнения относительно $E_{1эф}$ и $E_{2эф}$, получаем

$$E_{1эф} = \frac{E_1 + E_2 - A_1 E_2}{A_1 + A_2 - A_1 A_2} \qquad E_{2эф} = \frac{E_1 + E_2 - A_2 E_1}{A_1 + A_2 - A_1 A_2}$$

Тепловое излучение, получаемое второй пластиной:

$$q = E_{1эф} - E_{2эф}\text{; при } T = \text{const} \quad e = A$$

или

$$q = \frac{A_2 E_1 - A_1 E_2}{A_1 + A_2 - A_1 A_2} = \frac{A_2 A_1 C_s (T_1/100)^4 - A_1 A_2 C_s (T_2/100)^4}{A_1 + A_2 - A_1 A_2}$$

или

$$q = \frac{(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4}{\dfrac{A_1}{A_1 A_2 C_s} + \dfrac{A_2}{A_1 A_2 C_s} - \dfrac{A_1 A_2}{A_1 A_2 C_s}} = \frac{(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4}{\dfrac{1}{C_1} + \dfrac{1}{C_2} - \dfrac{1}{C_s}}$$

Таким образом, тепловое излучение между параллельными поверхностями определяется уравнением

$$Q = C_{пр}\left[(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4\right]F$$

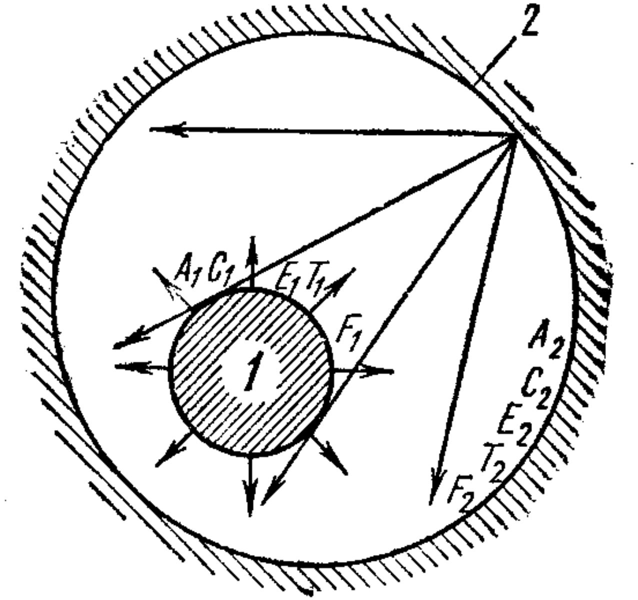
где $C_{пр} = \dfrac{1}{\dfrac{1}{C_1} + \dfrac{1}{C_2} - \dfrac{1}{C_s}} = e_{пр} C_s = \dfrac{1}{\dfrac{1}{C_s}\left(\dfrac{1}{e_1} + \dfrac{1}{e_2} - 1\right)}$ – приведенный коэффициент излучения.

Теплообмен излучением между телами, одно из которых находится внутри другого

Обозначим физические величины

внутреннего тела A_1, C_1, e_1, T_1, F_1

внешнего тела A_2, C_2, e_2, T_2, F_2



В отличие от теплообмена между параллельными пластинами, в данном случае на внутреннее тело падает лишь часть φ от эффективного излучения внешнего тела. Остальная часть энергии излучения (1-φ) падает на поверхность внешнего тела.

Поток эффективного излучения внутреннего тела (1) состоит из *собственного излучения* и *отраженного* (полученного от внешнего тела)

$$Q_{1эф} = E_1 F_1 + (1 - A_1) j\, Q_{2эф} \qquad \text{(а)} \qquad j = \frac{Q_{пад1}}{Q_{2эф}}$$

Поток эффективного излучения внешнего тела (2) состоит из:

собственного излучения

отражённого (полученного от внутреннего тела) $R_2 \cdot Q_{пад21}$

отраженного собственного излучения $R_2 \cdot Q_{пад22}$

$$Q_{2эф} = E_2 F_2 + (1 - A_2) Q_{1эф} + (1 - A_2)(1 - j\,) Q_{2эф} \qquad \text{(б)}$$

Величина теплообмена излучением между телами:

$$Q = Q_{1эф} - Q_{2эф}$$

Решая совместно уравнения (а) и (б), получаем

$$Q = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{F_1}{F_2}\left(\frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_s}\right)}\left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right]F_1$$

или

$$Q = \frac{1}{\frac{1}{e_1} + \frac{F_1}{F_2}\left(\frac{1}{e_2} - 1\right)} C_s \left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right] F_1$$

Если поверхность F_1 мала по сравнению с поверхностью F_2, то отношение F_1/F_2 приближается к нулю и $C_{пр}=C_1$, уравнение теплообмена принимает вид

$$Q = C_1 F_1 \left[(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4\right]$$

Теплообмен между параллельными пластинами при наличии экранов

Экран представляет собой тонкий металлический лист с большой отражательной способностью. Температуры обеих поверхностей экрана можно считать одинаковыми (сопротивление теплопроводности листа бесконечно мало).

Рассмотрим действие экрана между двумя плоскими безграничными параллельными поверхностями, причем передачей теплоты конвекцией в воздушных прослойках будем пренебрегать. Поверхности стенок и экрана считаем одинаковыми. Температуры стенок T_1 и T_2 поддерживаются постоянными, причем $T_1 > T_2$.

Допускаем, что коэффициенты излучения стенок и экрана равны между собой, тогда $C_1 = C_2 = C_{эк} = C_{пр}$.

Тепловой поток, передаваемый от первой поверхности ко второй (без экрана):

$$q_0 = C_{пр}\left[(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4\right].$$

Тепловой поток, передаваемый от первой поверхности к экрану:

$$q_1 = C_{пр}\left[(T_1/100)^4 - (T_{эк}/100)^4\right],$$

а от экрана ко второй поверхности:

$$q_2 = C_{пр}\left[(T_{эк}/100)^4 - (T_2/100)^4\right].$$

При установившемся тепловом состоянии $q_1=q_2$, поэтому

$$\left(T_{эк}/100\right)^4 = \frac{1}{2}\left[\left(T_1/100\right)^4 + \left(T_2/100\right)^4\right]$$

В итоге:

$$q_{1-2} = \frac{1}{2}C_{пр}\left[\left(T_1/100\right)^4 - \left(T_2/100\right)^4\right]$$

Т.о. установка одного экрана уменьшает теплоотдачу излучением в два раза

$$q_{1-2} = \frac{1}{2} q_0$$

При наличии нескольких экранов в стационарных условиях:

$$\begin{cases} q_{1,э1} = A_{1,э1} C_s \left[\left(\dfrac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\dfrac{T_{э1}}{100} \right)^4 \right] \\ q_{э1,э2} = A_{э1,э2} C_s \left[\left(\dfrac{T_{э1}}{100} \right)^4 - \left(\dfrac{T_{э2}}{100} \right)^4 \right] \\ \ldots \\ q_{эn,2} = A_{эn,2} C_s \left[\left(\dfrac{T_{эn}}{100} \right)^4 - \left(\dfrac{T_2}{100} \right)^4 \right] \end{cases}$$

Избавляемся от неизвестных температур экранов, перенеся в левую часть коэффициенты поглощения и складывая обе части уравнений в системе:

$$\frac{q_{(1,2)э}}{C_s}\left(\frac{1}{A_{1,э1}}+\frac{1}{A_{э1,э2}}+\ldots+\frac{1}{A_{эn,2}}\right)=\left(\frac{T_1}{100}\right)^4-\left(\frac{T_2}{100}\right)^4$$

Приведенный коэффициент поглощения системы

из двух плоскопараллельных тел записывается в виде:

$$A_{1,2}=\frac{1}{\frac{1}{A_1}+\frac{1}{A_2}-1}$$

Тогда

$$\frac{1}{A_{1,э1}}+\frac{1}{A_{э1,э2}}+...+\frac{1}{A_{эn,2}}=\frac{1}{A_{(1,2)э}}=$$

$$=\left(\frac{1}{A_1}+\frac{1}{A_{э1}}-1\right)+\left(\frac{1}{A_{э1}}+\frac{1}{A_{э2}}-1\right)+...+\left(\frac{1}{A_{эn}}+\frac{1}{A_2}-1\right)$$

или $$\frac{1}{A_{(1,2)э}} = \left(\frac{1}{A_1} + \frac{1}{A_2} - 1\right) + \left(\frac{2}{A_{э1}} - 1\right) + \left(\frac{2}{A_{э2}} - 1\right) + \ldots + \left(\frac{2}{A_{эn}} - 1\right)$$

Если $A_{э1} = A_{э2} = \ldots = A_{э}$, то $$\frac{1}{A_{(1,2)э}} = \frac{1}{A_{1,2}} + n\left(\frac{2}{A_э} - 1\right)$$

или $$A_{(1,2)э} = \frac{1}{\frac{1}{A_{1,2}} + n\left(\frac{2}{A_э} - 1\right)} \qquad (*)$$

Если $A_1 = A_2 = A_э$, то

$$\frac{1}{A_{(1,2)э}} = \frac{1}{A_{1,2}} + n\left(\frac{2}{A_э} - 1\right) = \frac{1}{A_{1,2}} + n\frac{1}{A_{1,2}} = \frac{1}{A_{1,2}}(1+n)$$

или

$$A_{(1,2)э} = A_{1,2}\frac{1}{1+n} = \frac{1}{\frac{1}{A_1} + \frac{1}{A_2} - 1} \cdot \frac{1}{1+n} \qquad (**)$$

В итоге, если $A_{э1}=A_{э2}=\ldots A_{э}\neq A_{1}\neq A_{2}$:

$$q_{(1,2)э}=\frac{1}{\dfrac{1}{A_{1,2}}+n\left(\dfrac{2}{A_{э}}-1\right)}\cdot C_{s}\left[\left(\frac{T_{1}}{100}\right)^{4}-\left(\frac{T_{2}}{100}\right)^{4}\right]$$

В итоге, если $A_{э1}=A_{э2}=\ldots A_э=A_1=A_2$:

$$q_{(1,2)э} = \frac{1}{\frac{1}{e_1}+\frac{1}{e_2}-1} \cdot \frac{1}{1+n} \cdot C_s \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] =$$

$$= \frac{1}{1+n} \cdot C_{np1,2} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]$$