ЛУЧИСТЫЙ ТЕПЛООБМЕН (Лекция 2)

Теплообмен между телом и его оболочкой

Рассмотрим лучистый перенос тепла между двумя серыми телами , из которых одно (тело 1), не имеющее вогнутой поверхности, находится внутри тела 2 (оболочки). При этом все излучение с поверхности тела 1 попадает на поверхность тела 2. Излучение же с поверхности тела 2 только частично попадает на поверхность тела 1; другая часть этого излучения проходит мимо тела и облучает собственную поверхность тела 2. Эта часть излучения характеризуется коэффициентом самооблучения φ_{22}. Примем, что температура T_1 тела 1 выше температуры T_2 его оболочки.

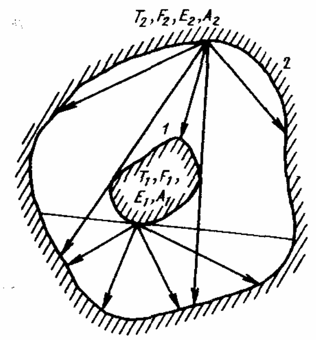
Полный лучистый поток, посылаемый телом 1 в единицу времени,

$$Q_{1\,эф} = Q_1 + (1 - A_1)\,\varphi_{21} Q_{2\,эф} \qquad (1)$$

и, соответственно, поток от второго тела

$$Q_{2\,эф} = Q_2 + (1 - A_2)\,Q_{1\,эф} + (1 - A_2)\,\varphi_{22} Q_{2\,эф}, \qquad (2)$$

где Q_1 и Q_2 — собственные лучистые тепловые потоки тел; A_1 и A_2 — поглощательные способности тела; φ_{22} — коэффициент самооблучения.



Результирующий лучистый тепловой поток от тела 1 к телу 2

$$Q_{12} = Q_{1\,эф} - \varphi_{21} Q_{2\,эф}. \qquad (3)$$

Учитывая, что для тела 2 сумма коэффициентов облученности φ_{21} и самооблучения φ_{22} равна единице, т. е.

$$\varphi_{21} + \varphi_{22} = 1, \qquad (4)$$

найдем выражение для полного лучистого потока с поверхности тела 1 ($Q_{1\,эф}$). Для этого в уравнение (1) подставим значение для $Q_{2\,эф}$ из уравнения (2) и после несложных преобразований получим

$$Q_{1\,эф} = \frac{[1-(1-A_2)(1-\varphi_{21})]\,Q_1 + (1-A_1)\,\varphi_{21} Q_2}{A_2 + A_1\varphi_{21} - A_1 A_2 \varphi_{21}}. \qquad (5)$$

Аналогично из уравнений (1) и (2) с учетом выражения (4) найдем

$$Q_{2\,эф} = \frac{Q_2 + (1-A_2)\,Q_1}{A_1\varphi_{21} + A_2 - A_1 A_2 \varphi_{21}}. \qquad (6)$$

Подставив выражения (5) и (6) в равенство (3), получим

$$Q_{12} = \frac{A_2 Q_1 - A_1 \varphi_{21} Q_2}{A_2 + A_1\varphi_{21} - A_1 A_2 \varphi_{21}}. \qquad (7)$$

Согласно закону Стефана—Больцмана собственные лучистые потоки обоих тел

$$Q_1 = E_1 F_1 = \varepsilon_1 \sigma_0 T_1^4 F_1; \qquad Q_2 = E_2 F_2 = \varepsilon_2 \sigma_0 T_2^4 F_2.$$

Приняв приближенно, что $A_1 = \varepsilon_1$, а $A_2 = \varepsilon_2$, получим

$$Q_{12} = \frac{\sigma_0 \left(T_1^4 - \varphi_{21} \dfrac{F_2}{F_1} T_2^4\right)}{1/\varepsilon_1 + \varphi_{21} 1/\varepsilon_2 - \varphi_{21}} F_1. \qquad (8)$$

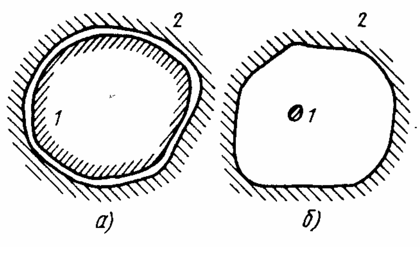
Так как коэффициенты облученности связаны с взаимной поверхностью излучения соотношениями , а $\varphi_{12} = H_{12}/F_1 = 1$, то $\varphi_{21} = H_{12}/F_2$, и выражение для результирующего лучистого потока через взаимную поверхность излучения имеет вид

$$Q_{12} = \varepsilon_{пр} \sigma_0 \left(T_1^4 - T_2^4\right) H_{12}, \qquad (9)$$

где $\varepsilon_{пр} = \dfrac{1}{1/\varepsilon_1 + \varphi_{21}\,(1/\varepsilon_2 - 1)}$ — приведенная степень черноты системы.

Для того, чтобы найти коэффициент облученности φ_{21}, предположим, что система находится в термодинамическом равновесии. В этом случае температура обоих тел одинакова $T_1 = T_2 = T$, а результирующий лучистый тепловой поток Q_{12} равен нулю. Тогда из равенства (8) получаем

$$1 - \varphi_{21} F_2/F_1 = 0 \quad \text{и} \quad \varphi_{21} = F_1/F_2. \qquad (10)$$



а) б)

Окончательно результирующий лучистый тепловой поток можно представить в виде

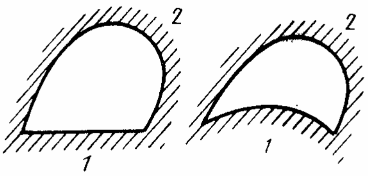
$$Q_{12} = \varepsilon_{\text{пр}} \sigma_0 \left(T_1^4 - T_2^4\right) F_1, \qquad (11)$$

где приведенная степень черноты системы

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{1/\varepsilon_1 + (F_1/F_2)\,(1/\varepsilon_2 - 1)}. \qquad (12)$$

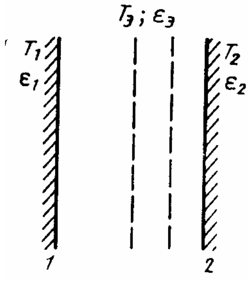
В частном случае, когда площади поверхности тел F_1 и F_2 близки по величине, т. е. $F_1/F_2 \approx 1$ (рис. *а*), выражение для $\varepsilon_{\text{пр}}$ совпадает с ранее полученным для двух бесконечно протяженных параллельных поверхностей . В этом случае согласно выражению (10) $\varphi_{21} \approx 1$, т. е. все излучение с оболочки (тело 2) попадает на тело 1. Если одно тело мало по сравнению с другим ($F_1 \ll F_2$) (рис. *б*), то значение коэффициента облученности $\varphi_{21} \approx 0$, а $\varepsilon_{\text{пр}} \approx \varepsilon_1$. Аналогичный результат имеет место независимо от соотношения площадей F_1 и F_2, когда оболочка является абсолютно черным телом ($\varepsilon_2 = 1$).

Полученные соотношения для лучистого теплового потока и приведенной степени черноты системы пригодны для произвольных замкнутых систем, в которых одна из поверхностей не имеет вогнутостей (рис.).



Влияние экранов на лучистый теплообмен

Лучистый тепловой поток от одного тела к другому может быть значительно уменьшен, если между ними поместить непрозрачные экраны. Экраны устанавливаются ортогонально направлению лучистого потока и выполняются из материалов с малой поглощательной и большой отражательной способностями (полированные тонкие листы из меди, алюминия и других материалов). В результате отражения экранами большого количества лучистой энергии в направлении, обратном распространению лучистого потока, величина результирующего радиационного теплового потока существенно уменьшается.



Рассмотрим для простоты две параллельные бесконечно длинные плоские стенки (рис.), выполненные из одного и того же материала с одинаковыми коэффициентами черноты $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon$. Если принять, что температура первой стенки больше, чем температура второй, то результирующий лучистый тепловой поток между ними равен

$$q_{12} = \varepsilon_{\text{пр}} \sigma_0 \left(T_1^4 - T_2^4\right), \tag{1}$$

где $\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{2/\varepsilon - 1}$ — приведенная степень черноты системы без экранов.

Поместим между этими стенками два тонких непрозрачных экрана (см. рис.), выполненных из очень теплопроводного материала (например полированный лист меди) с малым коэффициентом черноты. Материал экранов один и тот же. Следовательно можно принять, что $\varepsilon_{э1} = \varepsilon_{э2} = \varepsilon_э$. Рассмотрим лучистый теплообмен в такой системе. Так как экраны выполнены из материала с высокой теплопроводностью, а его толщина достаточно мала, то можно считать, что на обеих поверхностях каждого экрана установится одинаковая температура (соответственно $T_{э1}$ и $T_{э2}$).

Внутри рассматриваемой системы при отсутствии внутренних источников тепла между стенками (1 и 2) при наличии двух экранов устанавливается стационарный лучистый тепловой поток

$$\begin{aligned} q'_{12} &= \varepsilon_{\text{пр}}^{(1)} \sigma_0 \left(T_1^4 - T_{э1}^4\right); \\ q'_{12} &= \varepsilon_{\text{пр}}^{(2)} \sigma_0 \left(T_{э1}^4 - T_{э2}^4\right); \\ q'_{12} &= \varepsilon_{\text{пр}}^{(3)} \sigma_0 \left(T_{э2}^4 - T_2^4\right), \end{aligned} \tag{2}$$

проходящий через все экраны. Здесь $\varepsilon_{\text{пр}}^{(i)}$ — приведенная степень черноты i-й системы ($c = 1, 2, 3$).

Выразим из системы уравнений разность температур в четвертой степени

$$\begin{aligned} T_1^4 - T_{э1}^4 &= \frac{1}{\varepsilon_{\text{пр}}^{(1)}} \left(q'_{12}/\sigma_0\right); \\ T_{э1}^4 - T_{э2}^4 &= \frac{1}{\varepsilon_{\text{пр}}^{(2)}} \left(q'_{12}/\sigma_0\right); \\ T_{э2}^4 - T_2^4 &= \frac{1}{\varepsilon_{\text{пр}}^{(3)}} \left(q'_{12}/\sigma_0\right). \end{aligned} \tag{3}$$

Сложив уравнения системы), получим выражение для лучистого теплового потока

$$q'_{12} = \varepsilon'_{\text{пр}} \sigma_0 \left(T_1^4 - T_2^4\right), \tag{4}$$

где приведенная степень черноты ($\varepsilon'_{\text{пр}}$) системы при наличии двух экранов

$$\varepsilon'_{\text{пр}} = \frac{(2/\varepsilon - 1)}{(2/\varepsilon - 1) + \sum_{i=1}^{2} (2/\varepsilon_э - 1)_i}. \tag{5}$$

При наличии n экранов лучистый поток существенно уменьшается

$$\frac{q'_{12}}{q_{12}} = \frac{(2/\varepsilon - 1)}{(2/\varepsilon - 1) + (2/\varepsilon_э - 1)\, n}. \tag{6}$$

Если экраны и стенки выполнены из одного и того же материала ($\varepsilon = \varepsilon_э$), то соотношение значительно упрощается

$$q'_{12}/q_{12} = 1/(n+1), \tag{7}$$

т. е. величина лучистого теплового потока между стенками уменьшится в $(n + 1)$ раз.

При наличии двух экранов, когда $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_э$, $q'_{12}/q_{12} = 1/3$, т. е. лучистый тепловой поток снижается в 3 раза.

Если, например, $n = 2$; $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0{,}8$; $\varepsilon_{э1} = \varepsilon_{э2} = 0{,}1$, то $q'_{12}/q_{12} = 1/26{,}3$, т. е. тепловой поток снижается в 26,3 раза, а если число экранов увеличить до $n = 5$, то лучистый тепловой поток уменьшится в 64 раза.

Из этих примеров видно, что тепловые экраны целесообразно делать многослойными и из материалов, имеющих малую степень черноты и соответственно высокую отражательную способность.