

ЛУЧИСТЫЙ ТЕПЛООБМЕН. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ПОНЯТИЯ

Лучистым (радиационным) теплообменом называется передача тепла, обусловленная превращением внутренней энергии вещества в энергию излучения, переносом излучения и его последующим поглощением другим веществом.

Все тела постоянно испускают и поглощают лучистую энергию. Однако при низких температурах количество излучаемой энергии невелико и может не учитываться при расчете теплообмена между телами. При повышении температуры тел излучение их резко возрастает, вследствие чего при высоких температурах перенос тепла излучением становится преобладающим по сравнению с теплопроводностью и конвекцией. Роль лучистого теплообмена также возрастает при понижении плотности среды, заполняющей пространство между телами, а в условиях глубокого вакуума он становится единственно возможным видом теплообмена. Поэтому значение лучистого теплообмена особенно велико в современных областях техники, связанных с применением высоких температур или глубокого вакуума, таких, как ракетно-космическая и авиационная, ядерная, плазменная, металлургия и др.

Тепловое излучение представляет собой процесс передачи тепла с помощью электромагнитных волн, скорость распространения которых в вакууме равна скорости света ($3 \cdot 10^8$ м/с). Таким образом, характерными особенностями лучистого теплообмена является очень большая скорость носителей и возможность передачи тепла от одного тела к другому при отсутствии какой-либо промежуточной среды между ними.

Источниками электромагнитных волн являются заряженные частицы (ионы и электроны), входящие в состав вещества. Различные виды движения этих заряженных частиц относительно друг друга приводят к испусканию электромагнитных волн различной частоты. Так, например, колебание ионов около положения равновесия в твердых телах вызывает испускание электромагнитных волн низкой частоты, движение свободных электронов в металлах относительно ионов приводит к испусканию электромагнитных волн различной частоты.

При этом необходимо отметить, что лучистая энергия испускается телами не непрерывно, а отдельными дискретными порциями — квантами света (или фотонами).

Тепловое излучение, как и любой другой вид электромагнитного излучения, занимает определенное положение в единой классификации электромагнитных волн по длинам волн, м:

космическое	$0,05 \cdot 10^{-12}$
γ -излучение	$0,5 \cdot 10^{-12} \dots 0,1 \cdot 10^{-12}$
рентгеновское	$10^{-12} \dots 20 \cdot 10^{-9}$
ультрафиолетовое	$20 \cdot 10^{-9} \dots 0,4 \cdot 10^{-6}$
видимое	$0,4 \cdot 10^{-6} \dots 0,8 \cdot 10^{-6}$
инфракрасное	$0,8 \cdot 10^{-6} \dots 0,2 \cdot 10^{-3}$
радиоволны	$0,2 \cdot 10^{-3} \dots 10 \cdot 10^3$

Различают интегральное и спектральное (монохроматическое) излучения. Интегральным называется суммарное излучение во всем диапазоне длин волн от 0 до ∞ . Спектральным (монохроматическим) называется излучение в узком интервале длин волн от λ до $\lambda + d\lambda$. Все величины, описывающие спектральное излучение, относятся к единичному интервалу длин волн и обозначаются подстрочным индексом « λ ».

Плотностью потока излучения E называется полное количество лучистой энергии, излучаемой в полусферу за единицу времени единицей площади поверхности.

Полный поток излучений Q с поверхности площадью F может быть выражен через плотность потока излучения интегралом:

$$Q = \int_F E dF.$$

Следовательно,

$$E = \frac{dQ}{dF}.$$

Распределение излучения по направлениям в пределах полусферы характеризуется величиной яркости.

Яркостью (или калорической яркостью) излучения называется количество энергии, излучаемое единицей площади поверхности, расположенной перпендикулярно направлению излучения, в единицу времени, в единицу телесного угла:

$$B = \frac{dQ_\varphi}{d\Omega dF \cos \varphi},$$

где dQ_φ — элементарный поток излучения в данном направлении, Вт; $d\Omega$ — элементарный телесный угол, ср; dF — элементарная площадка, м²; φ — угол между направлением излучения и нормалью к площадке dF

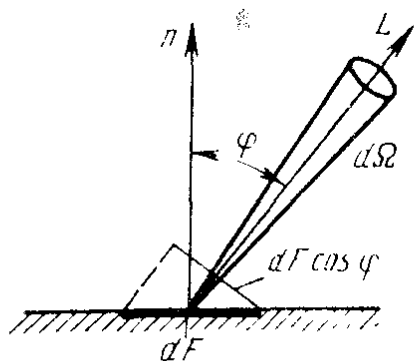


Рис. Схема к определению яркости излучения

Распределение излучения по длинам волн характеризуется величиной спектральной интенсивности излучения E_λ . Спектральной интенсивностью излучения E_λ называется количество энергии, излучаемой единицей площади поверхности за единицу времени в единичном интервале длин волн по всем направлениям полусферического пространства

$$E_\lambda = \frac{dE}{d\lambda},$$

где $d\lambda$ — элементарный интервал длин волн. E_λ зависит от длины волны, температуры, вида и состояния поверхности.

Связь между E_λ и E можно записать в интегральной форме следующим образом:

$$E = \int_0^\infty E_\lambda d\lambda,$$

т. е. плотность потока излучения E выражается площадью под кривой E_λ в интервале длин волн от 0 до ∞ .

Распределение спектрального излучения по направлениям характеризуется величиной спектральной яркости B_λ . Спектральной яркостью излучения B_λ называется количество спектральной энергии, излучаемое единицей площади поверхности, расположенной перпендикулярно направлению излучения, в единицу времени, в единицу телесного угла, в единичном интервале длин волн:

$$B_\lambda = \frac{dB}{d\lambda}.$$

Связь между интегральной и спектральной яркостью излучения

$$B = \int_0^\infty B_\lambda d\lambda.$$

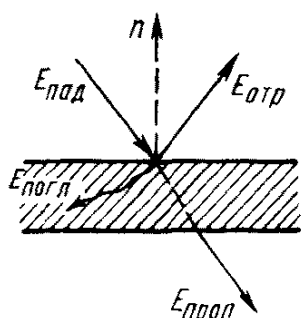


Рис. . Распределение падающего излучения

Энергия теплового излучения, падающего на тело, может поглощаться, отражаться и пропускаться этими телами :

$$E_{\text{пад}} = E_{\text{погл}} + E_{\text{отр}} + E_{\text{проп}}.$$

Поглощательной способностью A называется отношение поглощенной телом лучистой энергии к падающей:

$$A = E_{\text{погл}}/E_{\text{пад}}.$$

Отражательной способностью R называется отношение отраженной телом лучистой энергии к падающей:

$$R = E_{\text{отр}}/E_{\text{пад}}.$$

Пропускательной способностью D называется отношение прошедшей сквозь тело лучистой энергии к падающей:

$$D = E_{\text{проп}}/E_{\text{пад}}.$$

Очевидно,

$$A + R + D = 1.$$

В частных случаях один или два коэффициента в выражении (11.12) могут быть равными нулю. Если $D = 1$, а $A = R = 0$, то такое тело называется абсолютно прозрачным (диатермичным); если $D = 0$, $A + R = 1$, то тело называется непрозрачным; если $A = 1$, а $R = D = 0$, то тело называется абсолютно черным; если $R = 1$, а $A = D = 0$, то тело называется абсолютно белым, когда отражение диффузное, т. е. яркость отраженного излучения во всех направлениях одинакова, или зеркальным, когда отражение излучения подчиняется законам геометрической оптики.

Абсолютно белых, абсолютно прозрачных и абсолютно черных тел в природе не встречается. Однако понятия о таких телах оказываются весьма полезными при изучении законов лучистого теплообмена между реальными телами.

Излучение абсолютно черного тела

$$E_{\lambda,0} = C_1 \lambda^{-5} [e^{C_2/(\lambda T)} - 1]^{-1} \quad (13)$$

$$\lambda_{\max} T = b \quad (14)$$

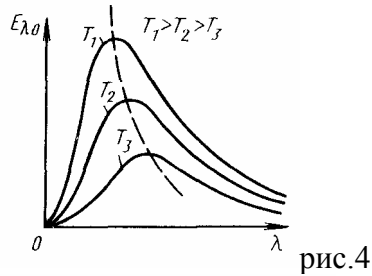


рис.4

$$C_1 = 0,374 \cdot 10^{-16} \text{ Вт} \cdot \text{м}^2,$$

$$C_2 = 1,4398 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{К}$$

$$b = 2,896 \cdot 10^{-3}$$

$$E_0 = \int_0^{\infty} C_1 \lambda^{-5} [e^{C_2/(\lambda T)} - 1]^{-1} d\lambda. \quad (15)$$

$$E_0 = \sigma_0 T^4 \quad (16)$$

$$\sigma_0 = 5,668 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$$

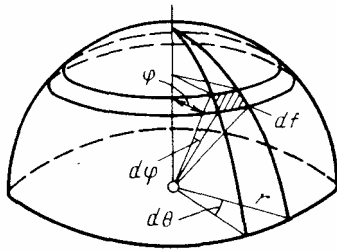


рис.5

$$E_0 = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} B_0 \cos \varphi d\Omega \quad (17)$$

$$E_0 = \pi B_0 \quad (18)$$

$$E_{\lambda,0} = \pi B_{\lambda,0} \quad (19)$$

Излучение реальных тел

$\varepsilon_\lambda = E_\lambda / E_{\lambda,0}$ - спектральная степень черноты

$$\varepsilon = E / E_0$$

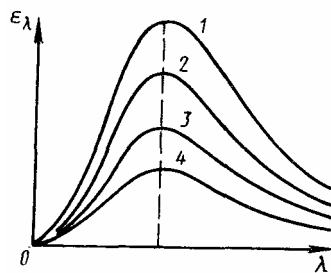


рис.6

$$E_\lambda = \varepsilon C_1 \lambda^{-5} [e^{C_2/(\lambda T)} - 1]^{-1} \quad (20)$$

$$E = \varepsilon \sigma_0 T^4 \simeq \sigma T^4 \quad (21)$$

$$E_{\text{эф}} = E + E_{\text{отр}} = E + (1 - A) E_{\text{пад}} \quad (22)$$

$$E_{\lambda \text{ эф}} = E_\lambda + E_{\lambda \text{ отр}} = E_\lambda + (1 + A_\lambda) E_{\lambda \text{ пад}} \quad (23)$$

Закон Кирхгофа для непрозрачных тел

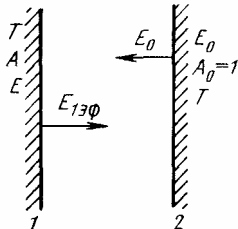


рис.7

$$E_{2 \text{ эф}} = E_0 \quad (24)$$

$$E/A = E_0 \quad (25)$$

$$\varepsilon = A \quad (26)$$

$$E_\lambda / A_\lambda = E_{\lambda,0} \quad (27)$$

$$\varepsilon_\lambda = A_\lambda \quad (28)$$

Теплообмен между двумя параллельными плоскостями

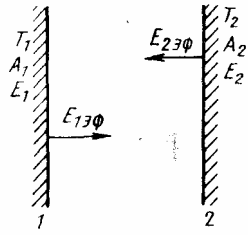


рис.8

$$E_{\text{эф}} = E + E_{\text{отр}} = E + (1 - A) E_{\text{пад}} \quad (31)$$

$$q_{12} = \frac{E_1 A_2 - E_2 A_1}{A_1 + A_2 - A_1 A_2} \quad (33)$$

$$q_{12} = \frac{1}{1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1} \sigma_0 (T_1^4 - T_2^4) \quad (36)$$

$$\begin{aligned} q_{12} &= E_{1 \text{ эф}} - E_{2 \text{ эф}} \\ E_{1 \text{ эф}} &= E_1 + (1 - A_1) E_{2 \text{ эф}} \\ E_{2 \text{ эф}} &= E_2 + (1 - A_2) E_{1 \text{ эф}}. \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} E_{1 \text{ эф}} &= \frac{E_1 + (1 - A_1) E_2}{1 - (1 - A_1)(1 - A_2)} \\ E_{2 \text{ эф}} &= \frac{E_2 + (1 - A_2) E_1}{1 - (1 - A_1)(1 - A_2)}. \end{aligned} \quad (30)$$

$$E_{\lambda \text{ эф}} = E_{\lambda} + E_{\lambda \text{ отр}} = E_{\lambda} + (1 + A_{\lambda}) E_{\lambda \text{ пад}} \quad (32)$$

$$E_1 = \varepsilon_1 \sigma_0 T_1^4 \quad (34)$$

$$E_2 = \varepsilon_2 \sigma_0 T_2^4 \quad (35)$$

$$q_{12} = \varepsilon_{\text{пр}} \sigma_0 (T_1^4 - T_2^4) \quad (37)$$

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1} \quad (38)$$