

Тема 11. Тепловое излучение.

11.1. Общие сведения о тепловом излучении.

Лучистая энергия возникает за счет энергии других видов в результате сложных молекулярных и внутриатомных процессов. Природа всех лучей одинакова. Они представляют собой распространяющиеся в пространстве электромагнитные волны. Источником теплового излучения является внутренняя энергия нагретого тела. Количество лучистой энергии в основном зависит от физических свойств и температуры излучающего тела. Электромагнитные волны различаются между собой длиной волны. В зависимости от длины волны λ лучи обладают различными свойствами. Наименьшей длиной волны обладают космические лучи $\lambda = (0,1 - 10)^\circ\text{A}$ (где $^\circ\text{A}$ — ангстрем, единица длины, $1^\circ\text{A} = 10^{-10}\text{м}$). Гамма-лучи, испускаемые радиоактивными веществами, имеют длину волны до 10°A ; лучи Рентгена — $\lambda = (10-200)^\circ\text{A}$; ультрафиолетовые лучи — $\lambda = (200^\circ\text{A} - 0,4\text{ мк})$ (мк — микрон, $1\text{ мк} = 0,001\text{ мм}$), световые лучи — $\lambda = (0,4-0,8)\text{мк}$, инфракрасные или тепловые лучи — $\lambda = (0,8 - 400)\text{ мк}$, радио или электромагнитные лучи — $\lambda > 400\text{ мк}$. Из всех лучей наибольший интерес для теплопередачи представляют тепловые лучи с $\lambda = (0,8 - 40)\text{ мк}$.

Лучеиспускание свойственно всем телам, и каждое из них излучает и поглощает энергию непрерывно, если температура его не равна 0°K . При одинаковых или различных температурах между телами, расположенными как угодно в пространстве, существует непрерывный лучистый теплообмен.

При температурном равновесии тел количество отдаваемой лучистой энергии будет равно количеству поглощаемой лучистой энергии. Спектр излучения большинства твердых и жидких тел непрерывен. Эти тела испускают лучи всех длин волн от малых до больших. Спектр излучения газов имеет линейчатый характер. Газы испускают лучи не всех длин волн. Такое излучение называется *селективным* (избирательным). Излучение газов носит объемный характер.

Суммарное излучение с поверхности тела по всем направлениям полусферического пространства и по всем длинам волн спектра называется *интегральным* или *полным лучистым потоком* (Q).

Интегральный лучистый поток, излучаемый единицей поверхности по всем направлениям, называется *излучательной способностью* тела и обозначается

$$E = dQ / dF, [\text{Вт}/\text{м}^2] \quad (11.1)$$

где dQ - элементарный лучистый поток, испускаемый элементом поверхности dF .

Каждое тело способно не только излучать, но и отражать, поглощать и пропускать через себя падающие лучи от другого тела. Если обозначить общее количество лучистой энергии, падающей на тело, через Q , то часть энергии, равная A , поглотится телом, часть, равная R , отразится, а часть, равная D , пройдет сквозь тело. Отсюда

$$Q = Q_A + Q_R + Q_D, \quad (11.2)$$

или

$$A + R + D = 1. \quad (11.3)$$

Величину A называют *коэффициентом поглощения*. Он представляет собой отношение поглощенной лучистой энергии ко всей лучистой энергии, падающей на тело. Величину R называют *коэффициентом отражения*. R есть отношение отраженной лучистой энергии ко всей падающей. Величину D называют *коэффициентом пропускания*. D есть отношение прошедшей сквозь тело лучистой энергии ко всей лучистой энергии, падающей на тело. Для большинства твердых тел, практически не пропускающих сквозь

себя лучистую энергию, $A + R = 1$.

Если поверхность поглощает все падающие на нее лучи, т. е. $A = 1$, $R = 0$ и $D = 0$, то такую поверхность называют *абсолютно черной*. Если поверхность отражает полностью все падающие на нее лучи, то такую поверхность называют *абсолютно белой*. При этом $R = 1$, $A = 0$, $D = 0$. Если тело *абсолютно прозрачно* для тепловых лучей, то $D = 1$, $R = 0$ и $A = 0$. В природе абсолютно черных, белых и прозрачных тел не существует, тем не менее понятие о них является очень важным для сравнения с реальными поверхностями.

Кварц для тепловых лучей непрозрачен, а для световых и ультрафиолетовых лучей прозрачен. Каменная соль прозрачна для тепловых лучей и непрозрачна для ультрафиолетовых лучей. Оконное стекло прозрачно для световых лучей, а для ультрафиолетовых и тепловых почти непрозрачно. Белая поверхность (ткань, краска) хорошо отражает лишь видимые лучи, а тепловые лучи поглощает также хорошо, как и темная. Таким образом, свойство тел поглощать или отражать тепловые лучи зависят в основном от состояния поверхности, а не от ее цвета.

Если поверхность отражает лучи под тем же углом, под которым они падают на нее, то такую поверхность называют *зеркальной*. Если падающий луч при отражении расщепляется на множество лучей, идущих по всевозможным направлениям, то такое отражение называют *диффузным* (например поверхность мела).

При исследовании лучистых потоков большое значение имеет распределение лучистой энергии, испускаемой абсолютно черным телом по отдельным длинам волн спектра. Каждой длине волны лучей, при определенной температуре, соответствует определенная интенсивность излучения - $I_{s\lambda}$. *Интенсивность излучения* или *спектральная* (монохроматическая) *интенсивность*, представляет собой плотность лучистого потока тела для длин волн от λ до $\lambda + d\lambda$, отнесенная к рассматриваемому интервалу длин волн $d\lambda$;

$$I_{s\lambda} = dE_{s\lambda} / d\lambda, \quad (11.4)$$

где $I_{s\lambda}$ - спектральная интенсивность излучения абсолютно черного тела.

11.2. Основные законы теплового излучения

Закон Планка. Интенсивности излучения абсолютно черного тела $I_{s\lambda}$ и любого реального тела I_{λ} зависят от температуры и длины волны.

Абсолютно черное тело при данной температуре испускает лучи всех длин волн от $\lambda = 0$ до $\lambda = \infty$. Если каким-либо образом отделить лучи с разными длинами волн друг от друга и измерить энергию каждого луча, то окажется, что распределение энергии вдоль спектра различно.

По мере увеличения длины волны энергия лучей возрастает, при некоторой длине волны достигает максимума, затем убывает. Кроме того, для луча одной и той же длины волны энергия его увеличивается с возрастанием температуры тела, испускающего лучи (рис.11.1).

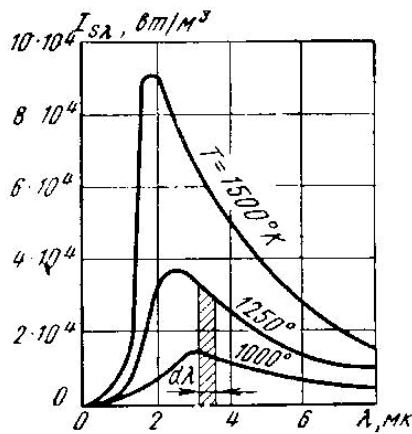


Рис. 11.1.

Планк установил следующий закон изменения интенсивности излучения абсолютно черного тела в зависимости от температуры и длины волны:

$$I_{s\lambda} = c_1 \lambda^{-5} / (e^{c/(\lambda T)} - 1), \quad (11.5)$$

где e - основание натуральных логарифмов; $c_1 = 3,74 \cdot 10^{-16}$ Вт/м²; $c_2 = 1,44 \cdot 10^{-2}$ м*град; λ - длина волны, м; T - температура излучающего тела, К.

Из рис.11.1 видно, что для любой температуры интенсивность излучения $I_{s\lambda}$ возрастает от нуля (при $\lambda=0$) до своего наибольшего значения, а затем убывает до нуля (при $\lambda=\infty$). При повышении температуры интенсивность излучения для каждой длины волны возрастает. **Закон смещения Вина.** Кроме того, из рис.11.1 следует, что максимумы кривых с повышением температуры смещаются в сторону более коротких волн. Длина волны λ_{ms} , отвечающая максимальному значению $I_{s\lambda}$, определяется *законом смещения Вина*:

$$\lambda_{ms} = 2,9 / T. \quad (11.6)$$

С увеличением температуры λ_{ms} уменьшается, что и следует из закона.

Пользуясь законом смещения Вина, можно измерять высокие температуры тел на расстоянии, например, расплавленных металлов, космических тел и др.

Закон Стефана-Больцмана. Планк установил, что каждой длине волны соответствует определенная интенсивность излучения, которая увеличивается с возрастанием температуры. Тепловой поток, излучаемый единицей поверхности черного тела в интервале длин волн от λ до $\lambda + d\lambda$, может быть определен из уравнения

$$dE_s = I_{s\lambda} * d\lambda. \quad (11.7)$$

Элементарная площадка на рис.11.1, ограниченная кривой $T = \text{const}$, основанием $d\lambda$ λ ординатами λ и $\lambda + d\lambda$ ($I_{s\lambda}$) определяет количество лучистой энергии dE_s и называется *лучеиспускательной способностью абсолютно черного тела* для длин волн $d\lambda$. Вся же площадь между любой кривой $T = \text{const}$ и осью абсцисс равна интегральному излучению черного тела в пределах от $\lambda = 0$ до $\lambda = \infty$ при данной температуре.

Подставляя в уравнение (11.7) закон Планка и интегрируя от $\lambda = 0$ до $\lambda = \infty$, найдем, что *интегральное излучение (тепловой поток) абсолютно черного тела* прямо пропорционально четвертой степени его абсолютной температуры (*закон Стефана-Больцмана*).

$$E_s = C_s (T/100)^4, \quad (11.8)$$

где $C_s = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ - коэффициент излучения абсолютно черного тела

Отмечая на рис. 11.1 количество энергии, отвечающей световой части спектра (0,4—0,8 мк), нетрудно заметить, что оно для невысоких температур очень мало по сравнению с энергией интегрального излучения. Только при температуре солнца $\sim 6000\text{К}$ энергия световых лучей составляет около 50% от всей энергии черного излучения.

Все реальные тела, используемые в технике, не являются абсолютно черными и при одной и той же температуре излучают меньше энергии, чем абсолютно черное тело. Излучение реальных тел также зависит от температуры и длины волны. Чтобы законы излучения черного тела можно было применить для реальных тел, вводится понятие о сером теле и сером излучении. Под серым излучением понимают такое, которое аналогично излучению черного тела имеет сплошной спектр, но интенсивность лучей для каждой длины волны I_λ при любой температуре составляет неизменную долю от интенсивности излучения черного тела $I_{s\lambda}$, т.е. существует отношение:

$$I_\lambda / I_{s\lambda} = \varepsilon = \text{const.} \quad (11.9)$$

Величину ε называют *степенью черноты*. Она зависит от физических свойств тела.

Степень черноты серых тел всегда меньше единицы.

Большинство реальных твердых тел с определенной степенью точности можно считать серыми телами, а их излучение — серым излучением. Энергия интегрального излучения серого тела равна:

$$E = \varepsilon \cdot E_s = C \cdot (T/100)^4. \quad (11.10)$$

Лучеиспускательная способность серого тела составляет долю, равную ε от лучеиспускательной способности черного тела.

Величину $C = \varepsilon \cdot E_s$ называют *коэффициентом излучения серого тела*. Величина C реальных тел в общем случае зависит не только от физических свойств тела, но и от состояния поверхности или от ее шероховатости, а также от температуры и длины волны. Значения коэффициентов излучения и степеней черноты тел берут из таблиц.

Таблица 11.1

Степень черноты полного нормального излучения

для различных материалов

Наименование материала	t, °C	ε
Алюминий полированный	50—500	0,04—0,06
Бронза	50	0,1
Железо листовое оцинкованное, блестящее	30	0,23
Жесть белая, старая	20	0,28
Золото полированное	200 - 600	0,02—0,03
Латунь матовая	20-350	0,22
Медь полированная	50—100	0,02
Никель полированный	200—400	0,07—0,09
Олово блестящее	20—50	0,04—0,06
Серебро полированное	200—600	0,02—0,03
Стальной листовой прокат	50	0,56
Сталь окисленная	200—600	0,8

Сталь сильно окисленная	500	0,98
Чугунное литье	50	0,81
Асбестовый картон	20	0,96
Дерево строганое	20	0,8—0,9
Кирпич огнеупорный	500—1000	0,8—0,9
Кирпич шамотный	1000	0,75
Кирпич красный, шероховатый	20	0,88—0,93
Лак черный, матовый	40—100	0,96—0,98
Лак белый	40—100	0,8—0,95
Масляные краски различных цветов . . .	100	0,92—0,96
Сажа ламповая	20—400	0,95
Стекло	20—100	0,91—0,94
Эмаль белая	20	0,9

Закон Кирхгофа. Для всякого тела излучательная и поглощательная способности зависят от температуры и длины волны. Различные тела имеют различные значения E и A . Зависимость между ними устанавливается *законом Кирхгофа*:

$$E = E_s \cdot A \text{ или } E / A = E_s = E_s / A_s = C_s \cdot (T/100)^4. \quad (11.11)$$

Отношение лучеиспускательной способности тела (E) к его поглощательной способности (A) одинаково для всех серых тел, находящихся при одинаковых температурах и равно лучеиспускательной способности абсолютно черного тела при той же температуре.

Из закона Кирхгофа следует, что если тело обладает малой поглощательной способностью, то оно одновременно обладает и малой лучеиспускательной способностью (полированные металлы). Абсолютно черное тело, обладающее максимальной поглощательной способностью, имеет и наибольшую излучательную способность. Закон Кирхгофа остается справедливым и для монохроматического излучения. Отношение интенсивности излучения тела при определенной длине волны к его поглощательной способности при той же длине волны для всех тел одно и то же, если они находятся при одинаковых температурах, и численно равно интенсивности излучения абсолютно черного тела при той же длине волны и температуре, т.е. является функцией только длины волны и температуры:

$$E_\lambda / A_\lambda = I_\lambda / A_\lambda = E_{s\lambda} = I_{s\lambda} = f(\lambda, T). \quad (11.12)$$

Поэтому тело, которое излучает энергию при какой-нибудь длине волны, способно поглощать ее при этой же длине волны. Если тело не поглощает энергию в какой-то части спектра, то оно в этой части спектра и не излучает.

Из закона Кирхгофа также следует, что степень черноты серого тела ε при одной и той же температуре численно равно коэффициенту поглощения A :

$$\varepsilon = I_\lambda / I_{s\lambda} = E / E_{s\lambda} = C / C_{s\lambda} = A. \quad (11.13)$$

Закон Ламберта. Излучаемая телом лучистая энергия распространяется в пространстве по различным направлениям с различной интенсивностью. Закон, устанавливающий зависимость интенсивности излучения от направления, называется *законом Ламберта*. Закон Ламберта устанавливает, что количество лучистой энергии, излучаемое элементом

поверхности dF_1 в направлении элемента dF_2 , пропорционально произведению количества энергии, излучаемой по нормали dQ_n , на величину пространственного угла $d\omega$ и $\cos\varphi$, составленного направлением излучения с нормалью (рис.11.2):

$$d^2Q_n = dQ_n * d\omega * \cos\varphi. \quad (11.14)$$

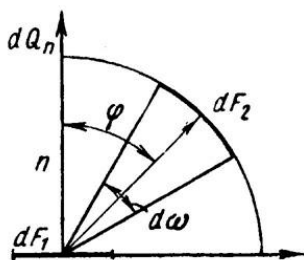


Рис. 11.2.

Следовательно, наибольшее количество лучистой энергии излучается в перпендикулярном направлении к поверхности излучения, т. е. при $(\varphi = 0)$. С увеличением φ количество лучистой энергии уменьшается и при $\varphi = 90^\circ$ равно нулю. Закон Ламберта полностью справедлив для абсолютно черного тела и для тел, обладающих диффузным излучением при $\varphi = 0 - 60^\circ$.

Для полированных поверхностей закон Ламберта неприменим. Для них лучеиспускание при угле φ будет большим, чем в направлении, нормальном к поверхности.

Тема 12. Теплопередача.

12.1. Теплопередача через плоскую стенку.

Теплопередачей называется передача теплоты от горячего теплоносителя к холодному теплоносителю через стенку, разделяющую эти теплоносители.

Примерами теплопередачи являются: передача теплоты от греющей воды нагревательных элементов (отопительных систем) к воздуху помещения; передача теплоты от дымовых газов к воде через стенки кипяtilьных труб в паровых котлах; передача теплоты от раскаленных газов к охлаждающей воде (жидкости) через стенку цилиндра двигателя внутреннего сгорания; передача теплоты от внутреннего воздуха помещения к наружному воздуху и т. д. При этом ограждающая стенка является проводником теплоты, через которую теплота передается теплопроводностью, а от стенки к окружающей среде конвекцией и излучением. Поэтому процесс теплопередачи является сложным процессом теплообмена.

При передаче теплоты от стенки к окружающей среде в основном преобладает конвективный теплообмен, поэтому будут рассматриваться такие задачи.

1). Теплопередача через плоскую стенку.

Рассмотрим однослойную плоскую стенку толщиной δ и теплопроводностью λ (рис12.1).