Лекция 24. Основные положения теплообмена излучением

Процессы лучистого теплообмена получили широкое распространение в различных областях техники, в частности в теплотехнике, ядерной энергетике, ракетной технике, металлургии, сушильной технике, химической технологии, светотехнике и др.

Тепловое излучение представляет собой процесс распространения внутренней энергии излучающего тела путем электромагнитных волн. Электромагнитными волнами называют электромагнитные возмущения, исходящие от излучающего тела и распространяющиеся в вакууме со скоростью света, равной $\cdot c = 3 \cdot 10^8$ м/с. При поглощении электромагнитных волн какими-либо другими телами они вновь превращаются в тепловую энергию. Возбудителями электромагнитных волн являются заряженные материальные частицы, т.е. электроны и ионы, входящие в состав вещества. При этом колебания ионов соответствуют излучению низкой частоты; излучение, обусловленное движением электронов может, иметь высокую частоту, если они входят в состав атомов и молекул и удерживаются около положения своего равновесия значительными силами.

Таким образом, радиационный теплообмен связан с двойным преобразованием энергии и происходит в три этапа:

− первоначально внутренняя энергия тела превращается в энергию электромагнитного излучения (энергию фотонов или квантов);

− затем, лучистая энергия переносится электромагнитными волнами в пространстве, которые в однородной и изотропной среде и в вакууме распространяются прямолинейно со скоростью света подчиняясь оптическим законам преломления, поглощения и отражения;

− после переноса энергии электромагнитными волнами, происходит второй переход лучистой энергии во внутреннюю энергию тела путем поглощения фотонов.

В металлах многие электроны являются свободными. Поэтому здесь нельзя говорить о колебаниях около центров равновесия. Электроны движутся и при этом испытывают нерегулярное торможение. Вследствие этого излучение металлов приобретает характер импульсов и имеет волны различной частоты и том числе волны низкой частоты. Помимо волновых свойств, излучение обладает также и корпускулярными свойствами, которые состоят в том, что лучистая энергия испускается и поглощается материальными телами не непрерывно, а отдельными дискретными порциями – квантами света или фотонами. Испускаемый фотон – частица материи, обладающая энергией, количеством движения и электромагнитной массой. Поэтому тепловое излучение можно рассматривать как фотонный газ.

Прохождение фотонов через вещество есть процесс поглощения и последующего испускания энергии фотонов атомами и молекулами этого вещества. Таким образом, излучение имеет двойственный характер, поскольку оно обладает свойствами непрерывного поля электромагнитных волн и свойствами дискретности, типичными для фотонов. Синтезом обоих свойств является представление, согласно которому энергия и импульс сосредоточиваются в фотонах, а вероятность нахождения их в том или ином месте пространства – в волнах. Соответственно это излучение характеризуется длиной волны λ или частотой колебаний $\nu = c/\lambda$ Все виды электромагнитного излучения имеют одинаковую природу и различаются лишь длиной волны (табл. 4.1) [17, 19, 21].

Таблица 4.1

Классификация электромагнитного излучения в зависимости от длины волны

Вид излучения	Длина волны, мкм
Космические и гамма лучи	0,00001÷0,0001
Рентгеновское излучение	0,001÷0,02
Ультрафиолетовые лучи	0,02÷0,4
Видимые (световые) лучи	0,4÷0,76
Инфракрасные (тепловые) лучи	0,76÷400
Радио и электрические волны	400 и выше

Большинство твердых и жидких тел имеет сплошной спектр излучения, т. е. излучает энергию всех длин волн от нуля до бесконечности. К числу твердых тел, имеющих сплошной спектр излучения, относятся диэлектрики, полупроводники и окислы металлов. Некоторые тела излучают энергию только в определенных интервалах длин волн, т. е. испускают энергию прерывистым спектром. К ним относятся чистые металлы и газы, которые характеризуются селективным или выборочным излучением. Излучение различных тел различно. Оно зависит от природы тела, его температуры, состояния поверхности, а для газов – еще и от толщины слоя и давления. Большинство встречающихся в природе и технике тел имеют значительную поглощательную и излучательную способность, поэтому в процессах лучистого теплообмена участвуют лишь тонкие поверхностные слои. Для проводников теплоты толщина этих слоев имеет порядок 1 мкм, а для непроводников теплоты – 1 мм. Поэтому применительно к твердым телам, а также к жидкостям тепловое излучение в ряде случаев приближенно можно рассматривать как поверхностное явление. Газообразные тела имеют значительно меньшее излучение, чем жидкие и твердые тела. Поэтому в излучении газов участвуют все его частицы, и процесс теплового излучения носит объемный характер.

Излучение всех тел зависит от температуры. С увеличением температуры излучение увеличивается, так как увеличивается внутренняя энергия тела. Изменение температуры тела вызывает не только изменение абсолютной величины интенсивности излучения, но сопровождается еще изменением спектрального состава или «цвета» излучения. С повышением температуры повышается интенсивность коротковолнового излучения и уменьшается интенсивность длинноволновой части спектра. Зависимость излучения от температуры значительно большая, чем процессов теплопроводности и конвекции. Поэтому при низких температурах преобладающую роль может играть теплообмен за счет конвекции и теплопроводности, а при высоких – основным видом переноса теплоты может быть тепловое излучение.

Особенности радиационного теплообмена:

− все тела с температурой выше 0 К обладают собственным тепловым излучением, то есть энергию излучают все тела (твердые тела, жидкости и лученепрозрачные газы);

− для передачи теплоты излучением не требуется тело-посредник, т.е. лучистая энергия может передаваться и в вакууме;

− при температурах до 100ºС лучистая и конвективная (при свободной конвекции) составляющие теплообмена имеют один порядок;

− различают поверхностное излучение (твердые тела) и объемное излучение (лученепрозрачные газы).

С точки зрения радиационного теплообмена различают два типа поверхностей: *диффузные* и *зеркальные* поверхности. Диффузные поверхности разлагают все падающее на них излучение в пределах полусферы. У зеркальных поверхностей угол падения луча равен углу его отражения.

При одной и той же температуре излучаемая энергия распределяется различно при различных длинах волн и для того, чтобы это учесть, вводят понятие о спектральной интенсивности излучения, представляющей собой лучистый поток в узком интервале длин волн и выражаемой уравнением

$$I = \frac{dE}{d\lambda}, \text{ Вт/м}^3.$$

Параметры и характеристики теплового излучения

В расчетах радиационного теплообмена приняты следующие обозначения:

− $Q_{\text{пад}}$ и $E_{\text{пад}}$ поток и плотность потока излучения падающие на поверхность тела;

– $Q_{отр}$ и $E_{отр}$ поток и плотность потока излучения отраженные от поверхности тела;

– $Q_{погл}$ и $E_{погл}$ поток и плотность потока излучения поглощенные телом;

– $Q_{проп}$ и $E_{проп}$ поток и плотность потока излучения пропускаемые телом;

– $Q_{соб}$ и $E_{соб}$ поток и плотность потока собственного излучения тела;

– $Q_{эф}$ и $E_{эф}$ поток и плотность потока эффективного излучения тела;

– $Q_{рез}$ и $E_{рез}$ поток и плотность потока результирующего излучения тела.

Рассмотрим полупрозрачное тело на поверхность которого падает поток излучения $Q_{пад}$ (рис. 4.1). Очевидно, что для любого полупрозрачного тела из закона сохранения энергии следует [12]

$$Q_{погл} + Q_{отр} + Q_{проп} = Q_{пад}. \qquad (4.1)$$

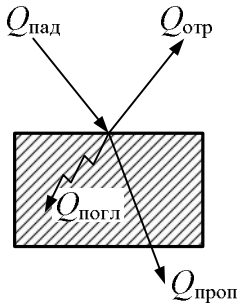

Рис. 4.1. Схема радиационного теплообмена для полупрозрачного тела

Разделив левую правую части равенства (4.1) на поток падающего излучения, получим

$$\frac{Q_{погл}}{Q_{пад}} + \frac{Q_{отр}}{Q_{пад}} + \frac{Q_{проп}}{Q_{пад}} = \frac{Q_{пад}}{Q_{пад}} \text{ или } A + R + D = 1,$$

где

$A = Q_{погл} / Q_{пад}$ – *поглощательная способность* тела, равная доле от падающего излучения поглощенного телом;

$R = Q_{\text{отр}} / Q_{\text{пад}}$ – *отражательная способность* тела, равная доле от падающего излучения отраженного телом;

$D = Q_{\text{проп}} / Q_{\text{пад}}$ – *пропускательная способность* тела, равная доле от падающего излучения проходящего через тело.

В зависимости от числового значения A, R и D различают *абсолютно черное*, *абсолютно белое* и *лучепрозрачное* (*диатермичное*) тела.

Тело, которое поглощает все падающее на него излучение, называют *абсолютно черным* телом (АЧТ). Поток и плотность потока собственного излучения АЧТ обозначают Q_0 и E_0 соответственно. У абсолютно черного тела: $A = 1$, $R = D = 0$.

Тело, которое диффузно отражает все падающее на него излучение называют *абсолютно белым* телом. У абсолютно белого тела: $R = 1$, $A = D = 0$.

Тело, которое пропускает все падающее на него излучение, называют *лучепрозрачным* или *диатермичным*. Для диатермичного тела: $D = 1$, $A = R = 0$.

Идеальных тел в природе не существует. Однако некоторые реальные тела по своим радиационным свойствам близки к идеальным. Например, у сажи и окисленной шероховатой стали $A \to 1$, у полированных металлов $R \to 1$, у двухатомных газов с симметричными молекулами (N_2, O_2), в том числе, и у сухого воздуха $D \to 1$.

У непрозрачных тел: $D = 0$, $A + R = 1$.

У газов: $R = 0$, $A + D = 1$.

Виды лучистых потоков

Излучение тела, обусловленное его тепловым состоянием (степенью нагретости) называют *собственным излучением* этого тела. Поток собствен-

ного излучения обозначают $Q_{соб}$ или буквой Q без нижнего индекса. *Плотность потока собственного излучения* обозначают

$$E_{соб} = \frac{dQ_{соб}}{dF} \text{ или } E = \frac{dQ}{dF}, \text{ Вт/м}^2$$

и называют *лучеиспускательной способностью* тела. В величине $E_{соб}$ заключена вся энергия, излучаемая телом в диапазоне длин волн $\lambda = 0 \div \infty$, т.е. энергия излучения всего спектра. Долю лучеиспускательной способности, заключенную в бесконечно малом спектральном диапазоне длин волн $d\lambda$ называют *спектральной плотностью потока собственного излучения* или *спектральной лучеиспускательной способностью* тела и обозначают

$$E_\lambda = \frac{d^2Q}{dF \cdot d\lambda} = \frac{dE}{d\lambda}, \text{ Вт/м}^3.$$

Зная функцию распределения $E_\lambda = f(\lambda)$, лучеиспускательную способность тела можно рассчитать, проинтегрировав эту функцию по всему спектру излучения:

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

Поэтому лучеиспускательную способность тела также называют *интегральной* плотностью потока собственного излучения.

Далее рассмотрим схему радиационного теплообмена, изображенную на рис. 4.2. На непрозрачное тело падает лучистый поток $Q_{пад}$. Одна часть теплового потока в количестве $Q_{погл}$ поглощается телом, а другая – в количестве $Q_{отр}$ телом отражается. Тело обладает и собственным излучением $Q_{соб}$ или Q.

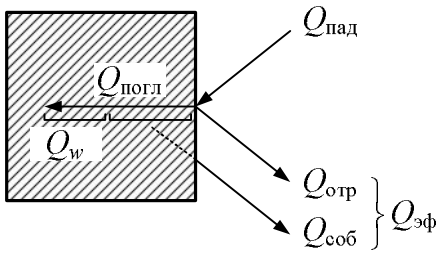

Рис. 4.2. Схема радиационного теплообмена
для непрозрачного тела

Радиационный тепловой поток, уходящий с поверхности тела, равный сумме собственного и отраженного тепловых потоков называют *эффективным* тепловым потоком и обозначают $Q_{эф}$. Эффективный тепловой поток по определению равен:

$$Q_{эф} = Q_{соб} + Q_{отр}. \qquad (4.2)$$

Тепловой поток, идущий на изменение теплового состояния тела, называют *результирующим* тепловым потоком и обозначают $Q_{рез}$ или с целью унификации обозначений в расчетах сложного (радиационно-конвективного) теплообмена Q_w. В результате радиационного теплообмена тело получает или отдает количество энергии (см. рис. 4.2):

$$Q_w \equiv Q_{рез} = Q_{погл} - Q_{соб} = A \cdot Q_{пад} - Q_{соб} \qquad (4.3)$$

или

$$Q_w \equiv Q_{рез} = (Q_{погл} + Q_{отр}) - (Q_{соб} + Q_{отр}) = Q_{пад} - Q_{эф}. \qquad (4.4)$$

Если расчет радиационного теплообмена проводят, используя плотности соответствующих радиационных потоков, то в этом случае формулы (4.2) – (4.4) примут вид:

$$E_{эф} = E_{соб} + E_{отр},$$

$$q_w \equiv E_{рез} = E_{погл} - E_{соб} = A \cdot E_{пад} - E_{соб},$$

$$q_w \equiv E_{рез} = (E_{погл} + E_{отр}) - (E_{соб} + E_{отр}) = E_{пад} - E_{эф}.$$

Без вывода приведем формулу связи собственного, результирующего и эффективного потоков излучения:

$$Q_{эф} = \frac{1-A}{A} \cdot Q_w + \frac{Q_{соб}}{A} \text{ или } E_{эф} = \frac{1-A}{A} \cdot q_w + \frac{E_{соб}}{A}.$$

Для черного тела $A = 1$ и $E_{эф} = E_{соб}$, т е. эффективное излучение вырождается в собственное.

Из изложенного следует, что поверхностные плотности всех видов излучения, кроме собственного, являются линейными функциями падающего излучения. Собственное излучение объединяется и увязывается с другими его видами через эффективное излучение.