

## РАЗДЕЛ 5. Теплообмен излучением

### §5.1. Основные понятия и определения

*Тепловое излучение (радиационный теплообмен)* – способ переноса теплоты в пространстве, осуществляемый в результате распространения электромагнитных волн, энергия которых при взаимодействии с веществом переходит в тепло. Радиационный теплообмен связан 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 (в вакууме скорость света равна  $3 \cdot 10^8$  м/с) подчиняясь оптическим законам преломления, поглощения и отражения;

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

Тепловому излучению соответствует интервал длин волн  $\lambda = 0,4 \div 25$  мкм ( $1 \text{ мкм} = 10^{-6} \text{ м}$ ), поскольку основная доля лучистой энергии в теплотехнических агрегатах передается именно в этом диапазоне длин волн. Заметим, что видимые световые лучи имеют длину волны  $\lambda = 0,4 \div 0,8$  мкм, а к инфракрасному или тепловому излучению в общем случае относят диапазон длин волн  $\lambda = 0,8 \div 1000$  мкм.

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 100 °С лучистая и конвективная (при свободной конвекции) составляющие теплообмена имеют один порядок. В высокотемпературных энергетических (например, парогенераторах) и высокотемпературных теплотехнологических (например, металлургических печах) лучистый теплообмен является доминирующим (до 100%) в суммарном теплопереносе от горячего теплоносителя к потребителю тепловой энергии;

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

*Спектром излучения* называют распределение лучистой энергии по длине волны  $E_\lambda = f(\lambda)$ , где  $E_\lambda$ , Вт/м<sup>3</sup> спектральная лучеиспускающая способность тела. У большинства твердых тел спектры сплошные. У газов и полированных металлов спектры линейчатые или *селективные*.

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.

#### *Параметры и характеристики теплового излучения*

Как и любой другой способ переноса теплоты, теплообмен излучением характеризуется *температурным полем* системы тел, участвующих в радиационном теплообмене (Т), и *тепловыми потоками* излучения (Q, Вт) или поверхностными плотностями тепловых потоков излучения (Е, Вт/м<sup>2</sup>). Кроме этого, телам, участвующим в радиационном теплообмене, приписывают некоторые специфические свойства, называемые *радиационными характеристиками* или *радиационными свойствами* тела.

*Потоком излучения* ( $Q$ , Вт) называют количество лучистой энергии, проходящее через заданную поверхность площадью  $F$  в *единицу* времени.

Поверхностной *плотностью потока излучения* ( $E$ , Вт/м<sup>2</sup>) называют количество лучистой энергии, проходящее через заданную *единичную* поверхность в *единицу* времени.

В расчетах радиационного теплообмена приняты следующие обозначения:

- $Q_{\text{пад}}$  и  $E_{\text{пад}}$  поток и плотность потока излучения падающие на поверхность тела;
- $Q_{\text{отр}}$  и  $E_{\text{отр}}$  поток и плотность потока излучения отраженные от поверхности тела;
- $Q_{\text{погл}}$  и  $E_{\text{погл}}$  поток и плотность потока излучения поглощенные телом;
- $Q_{\text{проп}}$  и  $E_{\text{проп}}$  поток и плотность потока излучения пропускаемые телом;
- $Q_{\text{соб}}$  и  $E_{\text{соб}}$  поток и плотность потока собственного излучения тела;
- $Q_{\text{эф}}$  и  $E_{\text{эф}}$  поток и плотность потока эффективного излучения тела;
- $Q_{\text{рез}}$  и  $E_{\text{рез}}$  поток и плотность потока результирующего излучения тела

К радиационным характеристикам тела относят *поглощательную, отражательную и пропускательную способности* тела, *спектральную и интегральную степени черноты* и *угловую степень черноты*.

### *Поглощательная, отражательная и пропускательная способности*

Для рассмотрения физического смысла поглощательной, отражательной и пропускательной способностей тела рассмотрим полупрозрачное тело на поверхность которого падает поток излучения  $Q_{\text{пад}}$  (рис. 5.1). Очевидно, что для любого полупрозрачного тела из закона сохранения энергии следует

$$Q_{\text{погл}} + Q_{\text{отр}} + Q_{\text{проп}} = Q_{\text{пад}} \quad (5.1)$$

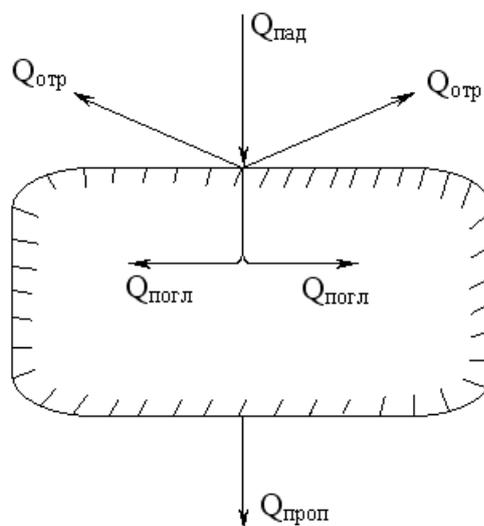


Рис. 5.1. Схема радиационного теплообмена для полупрозрачного тела

Разделив левую правую части равенства (5.1) на поток падающего излучения, получим

$$\frac{Q_{\text{погл}}}{Q_{\text{пад}}} + \frac{Q_{\text{отр}}}{Q_{\text{пад}}} + \frac{Q_{\text{проп}}}{Q_{\text{пад}}} = \frac{Q_{\text{пад}}}{Q_{\text{пад}}} \quad \text{или} \quad A + R + D = 1, \quad (5.2)$$

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

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

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

В зависимости от числового значения  $A$ ,  $R$  и  $D$  различают *абсолютно черное*, *абсолютно белое* и *лучепрозрачное* или *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:  $D = 1$ ,  $A = R = 0$ .

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

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

$$E_{\text{соб}} = \frac{dQ_{\text{соб}}}{dF} \quad \text{или} \quad E = \frac{dQ}{dF}, \quad \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \quad (5.3)$$

и называют *лучеиспускательной способностью* тела. В величине  $E_{\text{соб}}$  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

$$E_{\lambda} = \frac{d^2Q}{dF \cdot d\lambda} = \frac{dE}{d\lambda}, \quad \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3}. \quad (5.4)$$

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

$$E = \int_0^{\infty} E_{\lambda} d\lambda. \quad (5.5)$$

Спектральную лучеиспускательную способность также называют *спектральной интенсивностью излучения*. Поэтому плотность потока собственного излучения тела (лучеиспускательную способность) также называют *интегральной интенсивностью излучения* тела.

Далее рассмотрим схему радиационного теплообмена, изображенную на рис.6.2. На непрозрачное тело падает лучистый поток  $Q_{\text{пад}}$ . Одна часть теплового потока в количестве  $Q_{\text{погл}}$  поглощается телом, а другая – в количестве  $Q_{\text{отр}}$  телом отражается. Тело обладает и собственным излучением  $Q_{\text{соб}}$  или  $Q$ .

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

$$Q_{\text{эф}} = Q_{\text{соб}} + Q_{\text{отр}}. \quad (5.6)$$

Тепловой поток, идущий на изменение теплового состояния тела, называют *результующим* тепловым потоком и обозначают  $Q_{\text{рез}}$  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.5.2):

$$Q_w \equiv Q_{рез} = Q_{погл} - Q_{соб} = A \cdot Q_{пад} - Q_{соб} \quad (5.7)$$

или

$$Q_w \equiv Q_{рез} = (Q_{погл} + Q_{отр}) - (Q_{соб} + Q_{отр}) = Q_{пад} - Q_{эф} \quad (5.8)$$

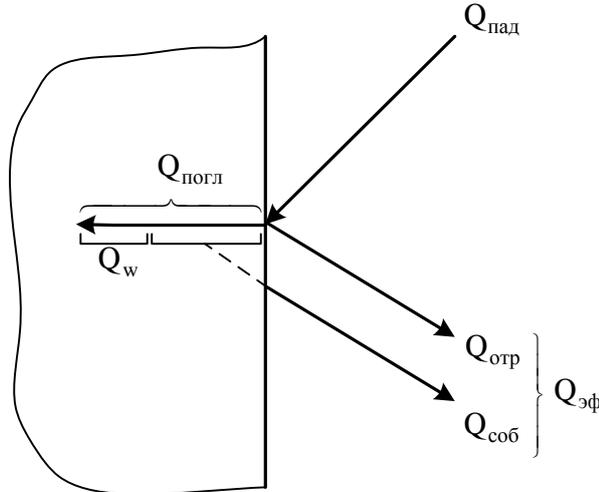


Рис. 5.2. Схема радиационного теплообмена для непрозрачного тела

Если расчет радиационного теплообмена проводят, используя в плотности соответствующих радиационных потоков, то в этом случае формулы (6.6) - (6.8) примут вид:

$$E_{эф} = E_{соб} + E_{отр} \quad (5.9)$$

$$q_w \equiv E_{рез} = E_{погл} - E_{соб} = A \cdot E_{пад} - E_{соб} \quad (5.10)$$

$$q_w \equiv E_{рез} = (E_{погл} + E_{отр}) - (E_{соб} + E_{отр}) = E_{пад} - E_{эф} \quad (5.11)$$

В заключение вводного параграфа темы "Радиационный теплообмен" без вывода приведем формулу связи собственного, результирующего и эффективного потоков излучения:

$$Q_{эф} = \frac{1-A}{A} \cdot Q_w + \frac{Q_{соб}}{A} \quad \text{или} \quad E_{эф} = \frac{1-A}{A} \cdot q_w + \frac{E_{соб}}{A}. \quad (5.12)$$

### §5.2. Основные законы излучения абсолютно черного тела (АЧТ)

Абсолютно черных тел в природе не существует. В качестве модели АЧТ используют отверстие в стенке непрозрачной полости с размерами много меньше самой полости. При равномерном нагреве всей поверхности полости данное отверстие по своим свойствам приближается к абсолютно черному телу, т.е. поглощает все падающее на него излучение и само при этом является идеальным излучателем – излучает максимально возможное количество энергии.

Расчет собственного излучения реальных тел основан на законах излучения АЧТ.

#### *Закон Планка*

В 1900 году на основе квантовой теории немецкий физик Макс Планк вывел закон, устанавливающий зависимость спектральной интенсивности излучения абсолютно черного тела ( $E_{0,\lambda}$ ) от длины волны ( $\lambda$ ) и абсолютной температуры ( $T$ ) –  $E_{0,\lambda} = f(\lambda, T)$ . Этот закон носит имя Планка и имеет вид:

$$E_{0,\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 \left[ \exp\left(\frac{C_2}{\lambda \cdot T}\right) - 1 \right]}, \quad \frac{Вт}{м^3} \quad (5.13)$$

где  $T$  – абсолютная температура абсолютно черного тела, К;  $C_1$  и  $C_2$  – коэффициенты, связанные с универсальными физическими константами следующими соотношениями:

$C_1 = 2 \cdot \pi \cdot c_0^2 = 3,741832 \cdot 10^{-16}$  Вт·м<sup>2</sup>;  $C_2 = h \cdot c_0 / k = 1,438786 \cdot 10^{-2}$  м·К, в которых  $c_0 = 3 \cdot 10^8$  м/с – скорость света в вакууме;  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – постоянная Планка;  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана.

График зависимости  $E_{0,\lambda} = f(\lambda, T)$  изображен на рис. 6.3. Анализ этого графика позволяет сделать следующие выводы:

- зависимость  $E_{0,\lambda} = f(\lambda, T)$  имеет экстремальный характер;
- с ростом температуры длина волны ( $\lambda_{\max}$ ), при которой наблюдается максимум спектральной плотности потока излучения АЧТ, уменьшается.

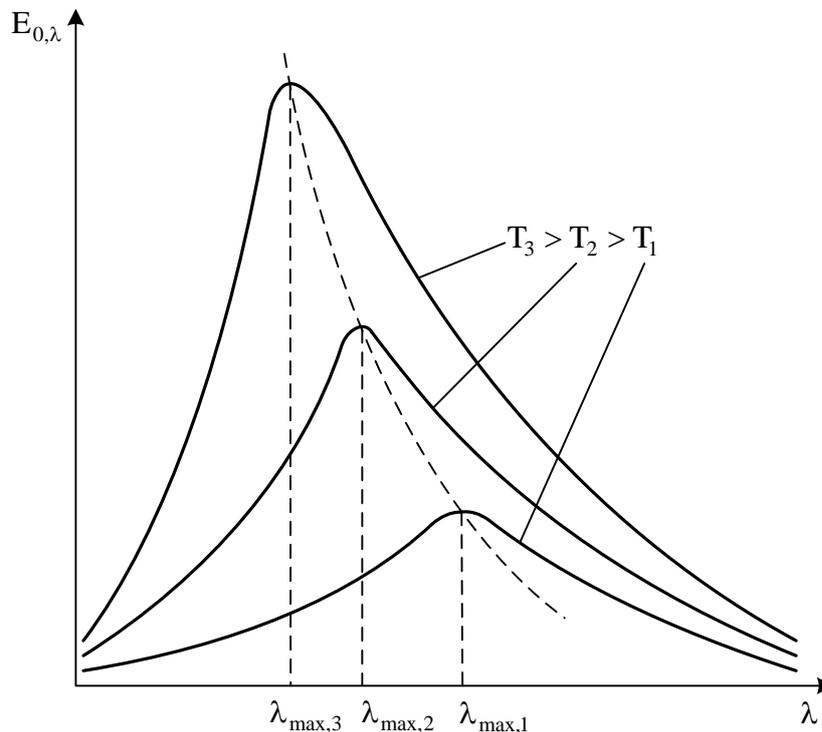


Рис. 5.3. Спектральная плотность потока излучения АЧТ

#### Закон Вина

Длина волны, при которой наблюдается максимальное значение спектральной плотности потока собственного излучения ( $\lambda_{\max}$ ) и температура связаны обратно пропорциональной зависимостью:

$$\lambda_{\max} \cdot T = 2897,82 \text{ мкм} \cdot \text{К} \approx 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}. \quad (5.14)$$

Этот закон является следствием закона Планка. Однако он был получен Вином ранее (в 1893 году) и поэтому носит его имя. Зная  $\lambda_{\max}$ , по формуле (6.14) легко найти температуру излучателя.

#### Закон Стефана-Больцмана

Закон Стефана-Больцмана при условии термодинамического равновесия устанавливает связь плотности потока собственного излучения поверхности АЧТ ( $E_0$ ) с его абсолютной температурой ( $T$ ):

$$E_0 = \int_0^{\infty} E_{0,\lambda} d\lambda = \int_0^{\infty} C_1 \cdot \lambda^{-5} / [\exp(C_2 / \lambda \cdot T) - 1] d\lambda = \sigma_0 \cdot T^4, \text{ Вт/м}^2, \quad (5.15)$$

где  $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$  – постоянная Стефана–Больцмана.

В расчетах на калькуляторе закон Стефана-Больцмана удобно применять в следующем виде:

$$E_0 = c_0 \cdot \left( \frac{T}{100} \right)^4, \quad (5.16)$$

где  $c_0 = 5,67 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела.

Закон Стефана-Больцмана был экспериментально установлен Стефаном в 1879 году, а теоретически обоснован Больцманом в 1884 и Планком в 1901 годах.

### §5.3. Излучение реальных тел. Закон Кирхгофа.

Излучение реальных тел отличается от излучения абсолютно черного тела, как по спектральному составу – виду функции  $E_\lambda = f(\lambda, T)$ , так и по величине (рис.6.4,а). При равных температурах реальные тела излучают тепловой энергии меньше, чем АЧТ. И при этом максимум спектральной плотности потока излучения у металлов смещен в сторону коротковолновой части спектра, а у диэлектриков – в сторону длинноволновой части спектра относительно максимума спектральной плотности потока излучения АЧТ.

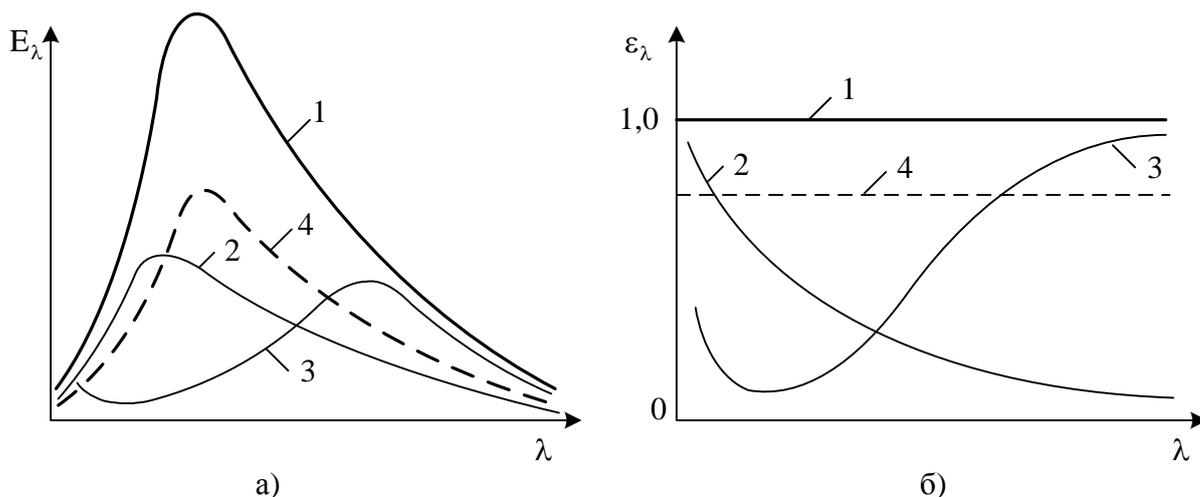


Рис.5.4. Спектральное распределение энергии излучения (а) и степени черноты (б) различных тел:  
1 – АЧТ; 2 – металл; 3 – диэлектрик; 4 – серое тело

Для характеристики излучения реальных тел введено понятие спектральной степени черноты  $\epsilon_\lambda$ , которая характеризует соотношение между спектральной плотностью потоков собственного излучения реального тела  $E_\lambda$  и абсолютно черного тела  $E_{0,\lambda}$ :

$$\epsilon_\lambda = \frac{E_\lambda}{E_{0,\lambda}}. \quad (5.16)$$

Коэффициент  $\epsilon_\lambda$  изменяется в пределах от 0 до 1 и для каждой длины волны  $\lambda$  характеризует долю, которую  $E_\lambda$  данного тела составляет от  $E_{0,\lambda}$  абсолютно черного тела при одной и той же температуре. Изменение спектральной степени черноты различных тел показана-

но на рис. 5.4,б. Из формулы (5.16) следует, что спектральная степень черноты абсолютно черного тела равна единице.

Спектральная степень черноты реального непрозрачного тела зависит от длины волны, природы тела, состояния его поверхности и температуры.

### *Закон Кирхгофа*

Абсолютно черное тело поглощает все падающее на него излучение ( $A_\lambda = 1$ ) и одновременно является идеальным излучателем у которого  $\varepsilon_\lambda = 1$ . Данное обстоятельство наводит на мысль, что и у реальных тел между излучательной способностью  $E_\lambda$  и его поглощательной способностью  $A_\lambda$  существует однозначная связь. Эту связь установил немецкий физик Кирхгоф в 1859 году и поэтому ее называют законом Кирхгофа. По закону Кирхгофа отношение спектральной плотности потока собственного излучения (спектральной лучеиспускательной способности) любого тела к его спектральной поглощательной способности есть величина постоянная и равная спектральной плотности потока АЧТ, имеющего ту же температуру:

$$\frac{E_\lambda}{A_\lambda} = E_{0,\lambda}. \quad (5.17)$$

Сравнивая выражения (5.16) и (5.17), несложно сделать вывод о том, что спектральная поглощательная способность равна спектральной степени черноты:

$$A_\lambda = \varepsilon_\lambda. \quad (5.18)$$

Равенство (5.17) является следствием из закона Кирхгофа и строго справедливо при локальном термодинамическом равновесии между излучением и веществом, что на практике не выполняется. Однако допущение о локальном термодинамическом равновесии в расчетах радиационного теплообмена подтверждается результатами экспериментов.

### *Понятие серого тела*

Плотность потока собственного излучения тела в узком элементарном спектральном диапазоне  $d\lambda$  – спектральную плотность теплового потока можно рассчитать, применив формулу (5.16):

$$E_\lambda = \varepsilon_\lambda \cdot E_{0,\lambda} = \varepsilon_\lambda \cdot \frac{C_1}{\lambda^5 \left[ \exp\left(\frac{C_2}{\lambda \cdot T}\right) - 1 \right]}. \quad (5.19)$$

Затем, экспериментально установив зависимость спектральной степени черноты от длины волны и температуры  $\varepsilon_\lambda = f(\lambda, T)$  для данного материала, можно найти и лучеиспускательную способность реального тела:

$$E = \int_0^\infty \varepsilon_\lambda \cdot E_{0,\lambda} d\lambda. \quad (5.20)$$

Такой подход к расчету собственного излучения реальных тел весьма сложен из-за необходимости экспериментального определения спектров излучения реальных тел, которые при данной температуре зависят не только от природы вещества, но и от его структуры и состояния поверхности. Поэтому в инженерных расчетах с целью их упрощения, как правило, излучение реальных тел моделируют излучением идеального *серого* тела. Излучение *серого* тела обладает всеми свойствами излучения абсолютно черного тела. При этом спектр излучения *серого* тела подобен спектру излучения АЧТ (штриховая линия на рис. 5.4,а), а его спектральная плотность потока излучения  $E_\lambda$  меньше спектральной плотности потока излучения АЧТ  $E_{0,\lambda}$  в одинаковое число раз. Т.е. спектральная степень черноты *серого* тела при

данной температуре не зависит от длины волны:  $\varepsilon_\lambda = \text{const}$  (штриховая линия на рис. 5.4,б). У серого тела лучеиспускательная способность будет равна:

$$E = \int_0^\infty \varepsilon_\lambda \cdot E_{0,\lambda} d\lambda = \varepsilon \cdot \int_0^\infty E_{0,\lambda} d\lambda = \varepsilon \cdot E_0 = \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot T^4 = \varepsilon \cdot c_0 \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4 = c \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4. \quad (5.21)$$

В формуле (5.21):  $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) – постоянная Стефана–Больцмана;  $c_0 = 5,67$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) – коэффициент излучения абсолютно черного серого тела;  $c = \varepsilon \cdot c_0$  – коэффициент излучения серого тела, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);  $\varepsilon = \varepsilon_\lambda = \text{const}$  – интегральная степень черноты тела. Из формулы (5.21) следует, что интегральная степень черноты равна отношению лучеиспускательной способности серого тела (E) к лучеиспускательной способности абсолютно черного тела (E<sub>0</sub>):

$$\varepsilon = \frac{E}{E_0}. \quad (5.22)$$

Интегральная степень черноты серого тела или степень черноты зависит от природы тела, состояния его поверхности и температуры.

Закон Кирхгофа для серого тела принимает вид:

$$\frac{E}{A} = E_0 \quad (5.23)$$

и формулируется следующим образом: «Отношение плотности потока собственного излучения (лучеиспускательной способности) серого тела к его поглощательной способности есть величина постоянная и равная плотности потока излучения АЧТ при условии равенства температур обоих тел».

Сравнивая выражения (5.22) и (5.23) можно сделать вывод о том, что степень черноты серого тела равна его поглощательной способности:

$$\varepsilon = A. \quad (5.24)$$

#### §5.4. Лучистый теплообмен в замкнутой системе из двух серых тел, разделенных диатермичной средой

Теоретические положения по расчету радиационного теплообмена в замкнутой системе, состоящей из серых поверхностей, разделенных лучепрозрачной средой, подробно изложены в литературе [1-3].

Поток результирующего излучения в замкнутой системе, состоящей из двух серых поверхностей, разделенных диатермичной средой, рассчитывают по формуле:

$$Q_{w,1} = -Q_{w,2} = \varepsilon_{\text{пр}} \cdot \sigma_0 \cdot (T_2^4 - T_1^4) \cdot \varphi_{21} \cdot F_2; \quad (5.25)$$

или

$$Q_{w,1} = -Q_{w,2} = c_{\text{пр}} \cdot \left[ \left(\frac{T_2}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_1}{100}\right)^4 \right] \cdot \varphi_{21} \cdot F_2, \quad (5.26)$$

где T – абсолютная температура поверхности теплообмена, К; F – площадь поверхности теплообмена, м<sup>2</sup>;  $\varphi_{12}$  и  $\varphi_{21}$  – угловые коэффициенты излучения соответственно с первого тела на второе и со второго тела на первое;  $\varepsilon_{\text{пр}}$  – приведенная степень черноты в системе двух тел;  $c_{\text{пр}} = \sigma_0 \cdot \varepsilon_{\text{пр}}$  – приведенный коэффициент излучения в системе двух тел.

**Замечание.** Для замкнутой системы радиационного теплообмена, состоящей из двух тел справедливо равенство:

$$Q_{w,2} = -Q_{w,1}. \quad (5.27)$$

Приведенную степень черноты и приведенный коэффициент излучения в замкнутой системе радиационного теплообмена, состоящей из двух серых тел, рассчитывают по формулам:

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1\right)\varphi_{12} + \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)\varphi_{21}}; \quad (5.28)$$

$$c_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{c_0} + \left(\frac{1}{c_1} - \frac{1}{c_0}\right)\varphi_{12} + \left(\frac{1}{c_2} - \frac{1}{c_0}\right)\varphi_{21}}. \quad (5.29)$$

Угловые коэффициенты излучения в системе, состоящей из двух поверхностей, удобно рассчитывать, используя свойства угловых коэффициентов:

а) свойство замкнутости

$$\sum_{k=1}^n \varphi_{ik} = 1; \quad (5.30)$$

б) свойство взаимности

$$\varphi_{ik} \cdot F_i = \varphi_{ki} \cdot F_k; \quad (5.31)$$

в) свойство невогнутости (для плоских и выпуклых поверхностей)

$$\varphi_{ii} = 0. \quad (5.32)$$

### §5.5. Лучистый теплообмен между газом и окружающей его замкнутой серой оболочкой

Теоретические положения по расчету радиационного теплообмена между излучающим и поглощающим газом и окружающей его замкнутой серой оболочкой подробно изложены в литературе [1-3].

В инженерных расчетах лученепрозрачный (излучающий и поглощающий излучение) газ считают серым телом, а его объемное излучение заменяют излучением оболочки, в которую заключен газ. Поэтому плотность потока собственного излучения газа рассчитывают по формуле:

$$E_{\text{г}} = \varepsilon_{\text{г}} \cdot E_{0,\text{г}} = \varepsilon_{\text{г}} \cdot \sigma_0 \cdot T_{\text{г}}^4 = \varepsilon_{\text{г}} \cdot c_0 \cdot \left(\frac{T_{\text{г}}}{100}\right)^4 = c_{\text{г}} \cdot \left(\frac{T_{\text{г}}}{100}\right)^4, \quad (5.33)$$

где  $\varepsilon_{\text{г}}$  – степень черноты газа;  $c_{\text{г}} = \varepsilon_{\text{г}} \cdot c_0$  – коэффициент излучения газа, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);  $T_{\text{г}}$  – температура газа, К.

Расчет радиационного теплообмена между серым газом и окружающей его замкнутой серой оболочкой выполняют по формуле Нуссельта:

$$Q_{\text{w}} = \varepsilon_{\text{пр}} \cdot \sigma_0 \cdot (T_{\text{г}}^4 - T_{\text{w}}^4) \cdot F_{\text{w}}, \quad (5.34)$$

где  $Q_{\text{w}}$  – результирующий тепловой поток излучением, воспринимаемый оболочкой, Вт;  $T_{\text{г}}$  и  $T_{\text{w}}$  – температуры газа и оболочки, К;  $F_{\text{w}}$  – площадь поверхности оболочки, м<sup>2</sup>. Приведенная степень черноты в системе газ–оболочка  $\varepsilon_{\text{пр}}$  рассчитывают по формуле:

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{г}}} + \frac{1}{\varepsilon_{\text{в}}} - 1}, \quad (5.35)$$

где  $\varepsilon_{\text{г}}$  и  $\varepsilon_{\text{в}}$  – степень черноты газа и оболочки соответственно.

Степень черноты газа зависит от его состава, температуры и объема, который занимает газ. Для продуктов сгорания энергетических топлив степень черноты газа рассчитывается по формуле:

$$\varepsilon_{\text{г}} = \varepsilon_{\text{CO}_2} + \beta \cdot \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}^* + \varepsilon_{\text{SO}_2}, \quad (5.36)$$

где  $\varepsilon_{\text{CO}_2}$  – степень черноты углекислого газа;  $\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} = \beta \cdot \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}^*$  – степень черноты водяного пара;  $\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}^*$  – условная степень черноты водяного пара;  $\beta$  – поправочный коэффициент, учитывающий особенности излучения водяного пара;  $\varepsilon_{\text{SO}_2}$  – степень черноты сернистого газа. Степени черноты перечисленных газов определены экспериментально и в зависимости от их парциального давления, длины пути луча и температуры приведены в литературе [1-3] в виде номограмм:

$$\varepsilon_{\text{г},i} = f(p_i \cdot S_{\text{эф}}, T_{\text{г}}), \quad (5.37)$$

где  $p_i$  – парциальное давление  $i$  – го газа, кПа;  $T_{\text{г}}$  – температура газа, °С (К);  $S_{\text{эф}}$  – эффективная длина пути луча, м. Для газового объема произвольной формы эффективную длину пути луча рассчитывают по формуле:

$$S_{\text{эф}} = 3,6 \cdot \frac{V_{\text{г}}}{F_{\text{г}}}, \quad (5.38)$$

где  $V_{\text{г}}$  – объем, занимаемый газом, м<sup>3</sup>;  $F_{\text{г}}$  – площадь оболочки, в которую заключен газ, м<sup>2</sup>.

Поправочный коэффициент  $\beta$  находят по номограммам [1-3] в виде  $\beta = f(p_{\text{H}_2\text{O}} \cdot S_{\text{эф}}, p_{\text{H}_2\text{O}})$ .

В инженерных расчетах лучистый тепловой поток от газа к стенке иногда удобно представить в виде закона теплоотдачи Ньютона:

$$Q_{\text{л}} = \alpha_{\text{л}} \cdot (T_{\text{г}} - T_{\text{в}}) \cdot F_{\text{в}}, \quad (5.39)$$

где  $\alpha_{\text{л}}$  – коэффициент теплоотдачи излучением, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Коэффициент теплоотдачи излучением рассчитывают по формуле:

$$\alpha_{\text{л}} = \frac{\varepsilon_{\text{пр}} \cdot \sigma_0 \cdot (T_{\text{г}}^4 - T_{\text{в}}^4)}{T_{\text{г}} - T_{\text{в}}}, \quad (5.40)$$

где  $\varepsilon_{\text{пр}}$  – приведенная степень черноты, (см. формулу (5.35)).