

# Тема 14. Теплообмен излучением

## 14.1 Общие понятия и определения. Тепловой баланс лучистого теплообмена

Теплообмен происходит непрерывно между телами, произвольно расположенными в пространстве. Тепловое излучение свойственно всем телам: твердым, жидким и газообразным, если их температура больше  $0^{\circ}\text{K}$ .

Спектр излучения большинства тел непрерывен. Тела испускают лучи, отличающиеся только длиной волны  $\lambda$ , а следовательно, свойствами.

**Виды излучения:** космическое,  $\gamma$ -излучение, рентгеновское, ультрафиолетовое, видимое, тепловое (инфракрасное).

С квантовой точки зрения лучистый поток представляет собой поток фотонов, энергия которых равна  $h \cdot \nu$ , где  $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  (Дж·С) – постоянная Планка и  $\nu$  – частота колебаний эквивалентного электромагнитного поля. Длина волны  $\lambda$  связана с частотой  $\nu$  соотношением  $\lambda \cdot \nu = c$ , где  $c$  – скорость распространения колебаний ( $c = 3 \cdot 10^8$  м/с).

## Тема 14. Теплообмен излучением

### 14.1 Общие понятия и определения. Тепловой баланс лучистого теплообмена

В теплотехнике наибольший интерес представляют те лучи, возникновение которых определяется только температурой и оптическими свойствами излучающего тела. Такими свойствами обладают световые и инфракрасные лучи. Эти лучи называют тепловыми, а процесс их распространения тепловым излучением или радиацией.

Природа тепловых и световых лучей одна и та же. Законы распространения, отражения и преломления, установленные для световых лучей справедливы и для тепловых. Поэтому, для лучшего представления сложных явлений теплового излучения, всегда закономерно проводить аналогию со световым излучением, которое больше изучено и доступно непосредственному наблюдению.

## Тема 14. Теплообмен излучением

### 14.1 Общие понятия и определения. Тепловой баланс лучистого теплообмена

Тепловое излучение свойственно всем телам. При попадании на другие тела эта энергия частью поглощается, частью отражается и частью проходит сквозь тело. Та часть лучистой энергии, которая поглощается телом, снова превращается в тепловую. Та часть энергии, которая отражается, попадает на другие тела и ими поглощается. То же самое происходит и с той частью энергии, которая проходит сквозь тело. Значит, после ряда поглощений излучаемая энергия полностью распределяется между окружающими телами. следовательно, каждое тело не только непрерывно *излучает*, но и непрерывно *поглощает* лучистую энергию.

## Тема 14. Теплообмен излучением

### 14.1 Общие понятия и определения. Тепловой баланс лучистого теплообмена

В результате этих явлений, связанных с двойным превращением энергии (тепловая – лучистая - тепловая), и осуществляется процесс лучистого теплообмена. Количество отдаваемого или воспринимаемого тепла определяется разностью между излучаемой и поглощаемой телом лучистой энергии.

## Тема 14. Теплообмен излучением

### 14.2 Виды лучистых потоков. Тепловой баланс

Суммарное излучение, проходящее через произвольную  $F$  поверхность в единицу времени, называется потоком излучения  $Q$ , Вт. Лучистый поток, излучаемый с единицы поверхности по всем направлениям полусферического пространства, называется плотностью потока излучения  $E$  Вт/м<sup>2</sup>:

$$E = dQ / dF$$

Поток излучения и плотность потока излучения содержат лучи различных длин волн, поэтому такой вид излучения также называется **интегральным**. Излучение, соответствующее узкому интервалу изменения длин волн от  $\lambda$  до  $\lambda + d\lambda$ , называется **монохроматическим**.

## Тема 14. Теплообмен излучением

### 14.2 Виды лучистых потоков. Тепловой баланс

Пусть из всего количества энергии  $Q_0$ , падающей на тело, часть  $Q_A$  поглощается, часть  $Q_R$  отражается и часть  $Q_D$  проходит сквозь тело (рис. 15.1), так что

$$Q_A + Q_R + Q_D = Q_0$$

Деля обе части этого равенства на  $Q_0$ , получаем:

$$Q_A / Q_0 + Q_R / Q_0 + Q_D / Q_0 = 1 \quad (\text{a})$$

$$A + R + D = 1$$

Первый член соотношения (a) характеризует собой *поглощательную способность*  $A$ ,

## Тема 14. Теплообмен излучением

### 14.2 Виды лучистых потоков. Тепловой баланс

второй – *отражательную способность*  $R$  и третий – *пропускательную способность* тела  $D$ . Все эти величины имеют нулевую размерность и изменяются лишь в пределах от 0 до 1.

Если  $R = 1$ , то  $A = 0$  и  $D = 0$ ; это означает, что вся падающая лучистая энергия полностью поглощается телом. Такие тела называются *абсолютно черными*, или просто *черными*.

Если  $R = 0$ , то  $A = 1$  и  $D = 0$ ; это означает, что вся падающая лучистая энергия полностью отражается. При этом, если отражение правильное, тела называются *зеркальными*; если же отражение диффузное, – *абсолютно белыми*.

## Тема 14. Теплообмен излучением

### 14.2 Виды лучистых потоков. Тепловой баланс

Если  $D = 1$ , то  $A = 0$  и  $R = 0$ ; это означает, что вся падающая лучистая энергия полностью проходит сквозь тело. Такие тела называются *абсолютно проницаемыми* (прозрачными) или *диатермичными*.

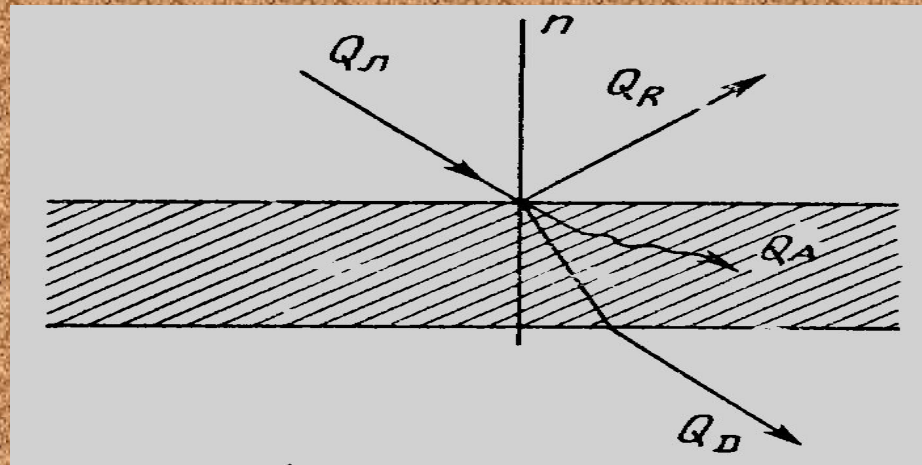


Рис. 14.1. Распределение лучистого теплового потока, падающего на тело



## Тема 14. Теплообмен излучением

### 14.2 Виды лучистых потоков. Тепловой баланс

Абсолютно черных, белых и прозрачных тел в природе нет; в применении к реальным телам эти понятия условны. Значения  $\alpha$ ,  $\rho$  и  $D$  зависят от природы тела, его температуры и спектра падающего излучения. Например, воздух для тепловых лучей прозрачен, но при наличии в нем водяных паров или углекислоты, он становится *полупрозрачным*.

Твердые тела и некоторые жидкости (например, вода, спирты) для тепловых лучей практически непрозрачны (атермичны), т.е.  $D = 0$  в этом случае

$$A + R = 1 \quad (б)$$

Из соотношении (б) следует, что если тело хорошо отражает лучистую энергию, то оно плохо поглощает и наоборот.

## Тема 14. Теплообмен излучением

### 14.2 Виды лучистых потоков. Тепловой баланс

Вместе с этим имеются тела, которые прозрачны лишь для определенных длин волн. Так, например, кварц для тепловых лучей непрозрачен, а для световых и ультрафиолетовых прозрачен. Каменная соль, наоборот, прозрачна для ультрафиолетовых лучей. Оконное стекло прозрачно только для световых лучей, а для ультрафиолетовых оно почти непрозрачно.

То же относится и к понятиям поглощения и отражения. Белая по цвету поверхность хорошо отражает лишь световые лучи. В Жизни это свойство широко используется: белые летние костюмы, белая окраска вагонов-ледников, цистерн и других сооружений, где инсоляция нежелательна. невидимые же тепловые лучи белые ткань и краска поглощают так же хорошо, как и темные. Для поглощения и отражения тепловых лучей большое значение имеет не цвет, а состояние поверхности.

## Тема 14. Теплообмен излучением

### 14.2 Виды лучистых потоков. Тепловой баланс

Независимо от цвета отражательная способность гладких и полированных поверхностей во много раз выше, чем шероховатых. Для увеличения поглотительной способности тел их поверхность покрывается темной шероховатой краской. Для этой цели обычно применяется нефтяная сажа. Но и сажа поглощает всего лишь 90-96% падающего лучистого потока. Это еще не абсолютно черное тело. Такого тела в природе нет, но его можно создать искусственно. Свойством абсолютно черного тела обладает отверстие в стенке полого тела. Для этого отверстия, ибо можно считать, что энергия луча, попадающего в это отверстие, полностью поглощается внутри полого тела (рис. 14.2). В дальнейшем все величины, относящиеся к абсолютно черному телу, мы будем отмечать индексом (0).

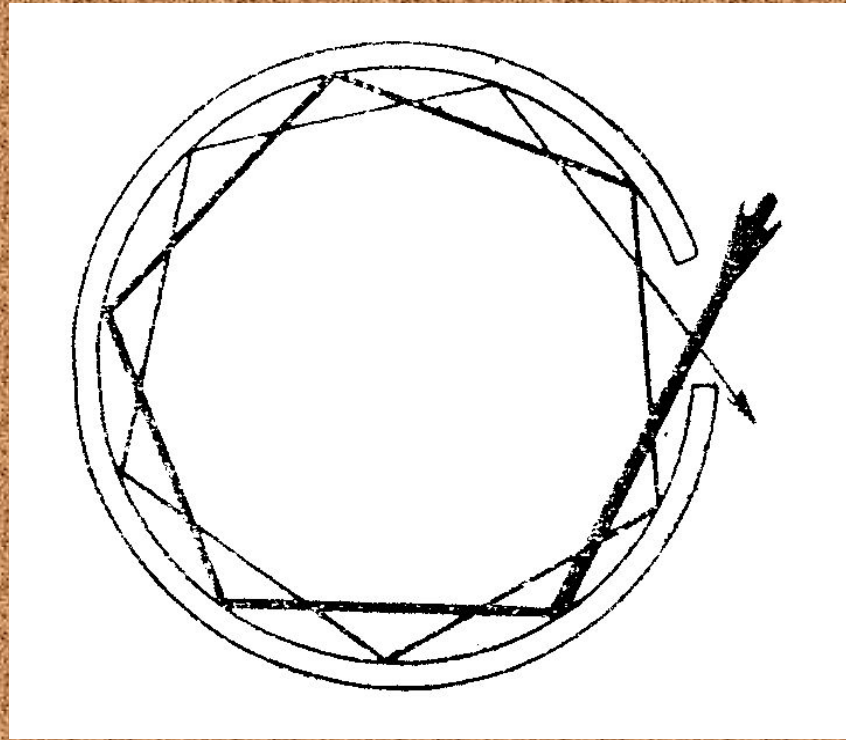


Рис. 14.2. Ход луча в полом теле

## Тема 14. Теплообмен излучением

### 14.2 Виды лучистых потоков. Тепловой баланс

Если на тело извне не падает никаких лучей, то с единицы поверхности тела отводится лучистый поток энергии, равный  $\epsilon \sigma T^4$ , Вт/м<sup>2</sup>. Он полностью определяется температурой и физическими свойствами тела. Это *собственное излучение* тела или его *излучательная способность*. Однако обычно со стороны других тел на рассматриваемое тело падает лучистая энергия в количестве  $G$ , это – *падающее излучение*. Часть падающего излучения в количестве  $G_{\text{погл}}$  поглощается телом – поглощенное излучение; остальное в количестве  $G_{\text{отр}}$  отражается – отраженное излучение (рис. 14.3).

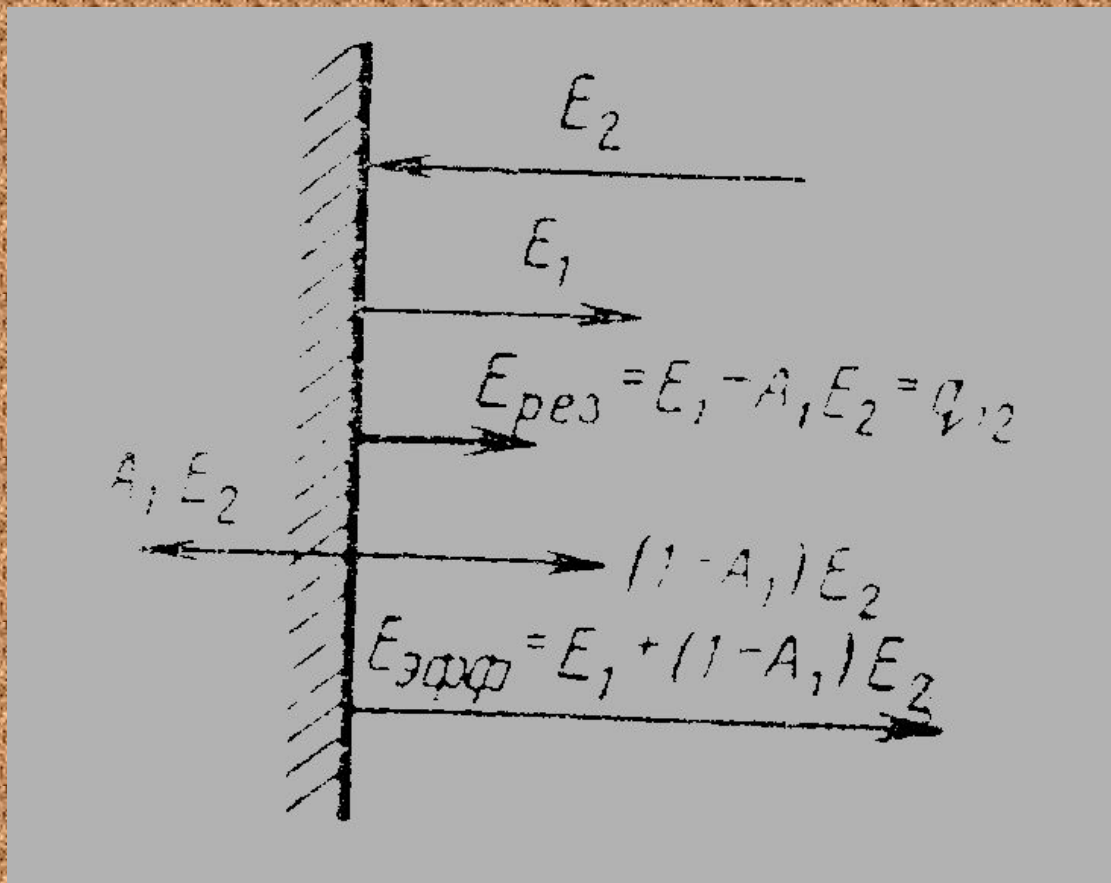


Рис. 14.3. К определению видов теплового излучения

# Тема 14. Теплообмен излучением

## 14.2 Виды лучистых потоков. Тепловой баланс

Собственное излучение тела в сумме с отраженным называется эффективным излучением тела,  $E_{эфф} = E_1 + (1 - A_1)E_2$ ; это фактическое излучение тела; оно больше собственного на величину  $(1 - A_1)E_2$ .

Эффективное излучение  $E_{эфф}$  зависит от физических свойств и температуры не только данного излучаемого тела, но и других окружающих его тел, а также от формы, размеров и расположения в пространстве. Физические качества собственного и отраженного излучения неодинаковы, их спектры различны. Однако для тепловых расчетов это различие не имеет значения, если рассматривается энергетическая сторона процесса.

## Тема 14. Теплообмен излучением

### 14.2 Виды лучистых потоков. Тепловой баланс

Результирующее излучение  $E_{рез}$  представляет собой разность между собственным излучением тела и той частью падающего внешнего излучения  $E_2$  которая поглощается данным телом; последняя равна  $A_1 \cdot E_2$ . Таким образом,

$$E_{рез} = E_1 - A_1 E_2 \quad (14.1)$$

Величина  $E_{рез}$  определяет поток энергии, которое данное тело передает окружающим его телам в процессе лучистого теплообмена. Если величина  $E_{рез}$  оказывается отрицательной ( $E_{рез} < 0$ ), это значит, что тело в итоге лучистого теплообмена получает энергию.



## 14.3 Законы теплового излучения

### 14.3.1 Закон Планка

Собственное излучение  $E_1$  - это количество энергии, излучаемое единицей поверхности в единицу времени для всех длин волн  $\lambda = 0$  от  $\lambda = \infty$  до . Однако важно также знать закон распределения энергии по длинам волн при различных температурах:  $E_\lambda = f(\lambda, T)$ . Величина  $E_\lambda$  - это излучательная способность тела для длин волн от до , отнесенную к рассматриваемому интервалу длин волн

$$E_\lambda = dE / d\lambda \quad (14.2)$$

и называется **спектральной плотностью** (полусферического) излучения.

## 14.3 Законы теплового излучения

### 14.3.1 Закон Планка

Закон изменения спектрального излучения или распределения энергии по длинам волн для абсолютно черного тела Планку удалось установить теоретически:

$$J_0 = \frac{dE_0}{d\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 \left[ \exp \frac{C_2}{\lambda T} - 1 \right]} \quad (14.3)$$

где  $\lambda$  - это длина волны, м;

$T$  - абсолютная температура тела, К;

$C_1$  - постоянная равная  $3,74 \cdot 10^{-16}$  Вт·м<sup>2</sup>;

$C_2$  - постоянная, равная  $1,44 \cdot 10^{-2}$  м·К.

## 14.3 Законы теплового излучения

### 14.3.1 Закон Планка

На рис. 15.1 закон Планка представлен графически.

Видно, что при  $\lambda = 0$  и  $\lambda \rightarrow \infty$ , так же как и при , интенсивность

излучения . Поэтому при  $T = const$  и некотором значении  $\lambda_m$  интенсивность излучения  $J_0 = 0$  достигает максимума.

Связь между  $T$  и  $\lambda_m$  установлена **законом Вина**:

$$\lambda_m \cdot T = 2,9 \cdot 10^{-3} \quad (14.4)$$

Как видно из формулы (15.4), с повышением температуры длина волны, соответствующая максимальной интенсивности излучения, смещается в сторону более коротких длин волн.

## 14.3 Законы теплового излучения

### 14.3.1 Закон Планка

На рис. 14.4 площадь, ограниченная кривой  $T = const$ , осью абсцисс и ординатами  $\lambda$  и  $\lambda + d\lambda$  (заштрихована), дает количество энергии  $dE_0$ , излучаемое участком длин волн  $d\lambda$ ; следовательно,  $dE_0 = E_{0\lambda} d\lambda$ . Полное же количество лучистой энергии, излучаемое всеми длинами волн, очевидно, равно:

$$E_0 = \int_0^{\infty} E_{0\lambda} d\lambda \quad (15.5)$$

Из рисунка также видно, что при температурах, с какими имеют дело в технике, энергия видимого излучения ( $\lambda = 0,4 - 0,8$  мкм) пренебрежительно мала.

## 14.3 Законы теплового излучения

### 14.3.1 Закон Планка

Для реальных тел изменение плотности излучения от длины волны и температуры устанавливается на основании экспериментального изучения их спектра. При этом, если спектр излучения непрерывен и кривая  $E_\lambda = f(\lambda)$  подобна соответствующей кривой для абсолютно черного тела при той же температуре, т.е. если для всех длин волн  $E_\lambda / E_{0\lambda} = const$  то такое излучение называют **серым**. Иногда удобно использовать не длины волн  $\lambda$ , а соответствующие им  $\nu = c / \lambda$  частоты. При этом спектральная плотность излучения  $E_\nu$  относится к единичному интервалу частот

$$E_\nu = dE / d\nu$$

## 14.3 Законы теплового излучения

### 14.3.1 Закон Планка

а закон Планка принимает вид:

$$E_{\nu} = \frac{2\pi \cdot h \cdot \nu^3 / c^2}{\exp[h\nu / kT] - 1} \quad (14.6)$$

где  $c$  - скорость света, м/с;  $h$  и  $k$  - постоянные Планка и Больцмана, равные соответственно  $6,62 \cdot 10^{-34}$  Дж·с и Дж/К.

## 14.3 Законы теплового излучения

### 14.3.2 Закон Стефана-Больцмана

Закон Стефана-Больцмана дает возможность определить плотность лучистого потока  $E_0$  абсолютно черного тела путем интегрирования уравнения (14.3). Этот закон был установлен И. Стефаном экспериментально в 1879 г. и Л. Больцманом теоретически в 1884 г. Исходя из закона Планка, можно доказать, что  $E_0$  пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры:

$$E_0 = \int_0^{\infty} J_0 d\lambda = \sigma_0 T^4 \quad (14.7)$$

где  $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) – константа излучения абсолютно черного тела.

## 14.3 Законы теплового излучения

### 14.3.2 Закон Стефана-Больцмана

В технических расчетах закон Стефана-Больцмана удобно применять в форме:

$$E_0 = C_0 (T / 100)^4$$

Где  $C_0 = \sigma_0 \cdot 10^8 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела.

Для серых тел, у которых интенсивность излучения меньше, чем у черных тел при той же температуре,  $E < E_0$ .

Отношение  $E / E_0 < 1$  называют степенью черноты серного тела  $\varepsilon = E / E_0$ .



## 14.3 Законы теплового излучения

### 14.3.2 Закон Стефана-Больцмана

Пользуясь понятием о степени черноты, плотность лучистого потока для серого тела можно выразить следующим уравнением:

$$E = \varepsilon \cdot E_0 = \varepsilon C_0 (T / 100)^4 = C (T / 100)^4 \quad (15.8)$$

где  $C = \varepsilon C_0$  - коэффициент излучения серого тела.

## 14.3 Законы теплового излучения

### 14.3.3 Закон Киргофа

Закон Киргофа устанавливает связь между излучательной и поглощательной способностью тел. Для вывода этой зависимости составим баланс лучистого теплообмена между параллельно расположенными неограниченными серой 1 и абсолютно черной 2 пластинами (рис. 14.4). примем вначале  $T > T_0$ . Тогда количество теплоты, передаваемой серым телом черному,

$$E_p = E - E_A = E - E_0 A \quad (15.9)$$

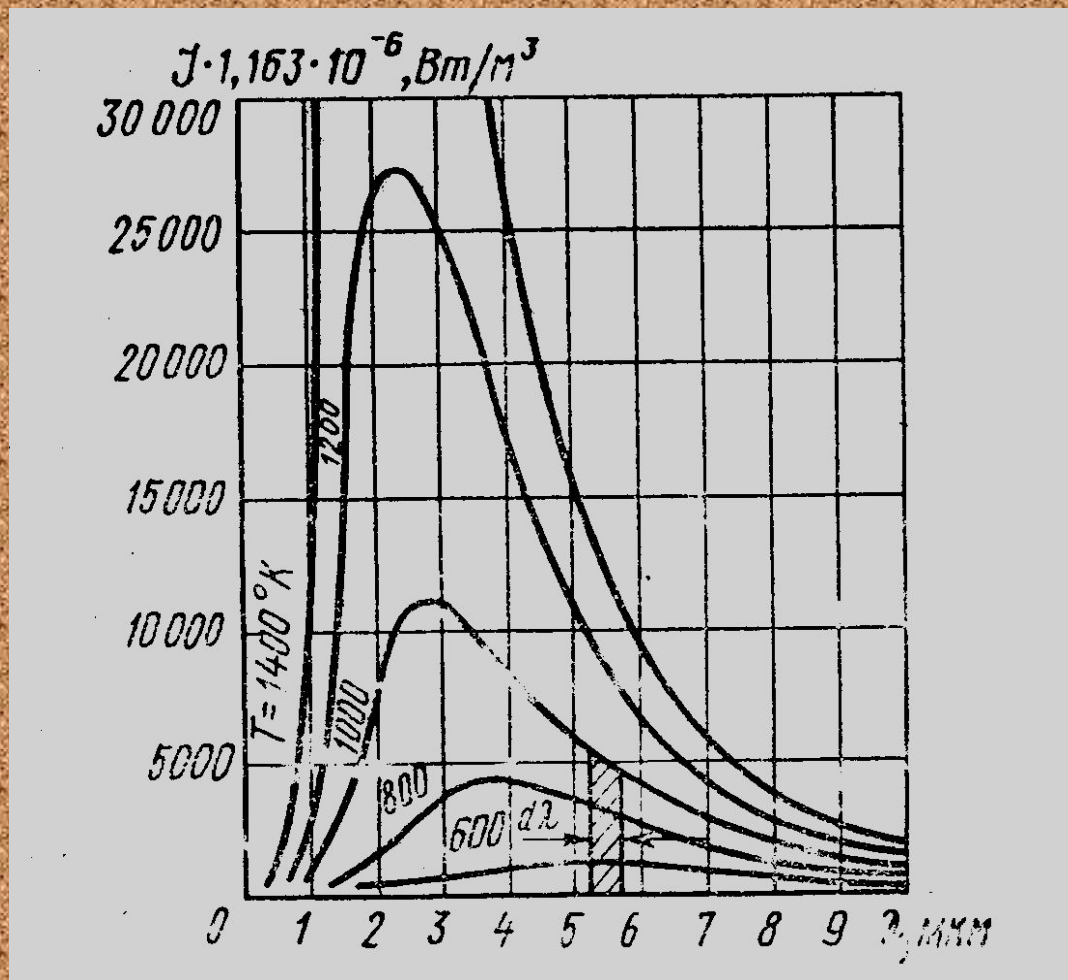


Рис. 15.4. Зависимость спектральной интенсивности излучения абсолютно черного тела от длины волны и температуры

## 14.3 Законы теплового излучения

### 14.3.3 Закон Киргофа

В частном случае, при равенстве температур тел, участвующих в лучистом теплообмене ( $T = T_0$ ), имеет место тепловое равновесие, при котором  $E_p = 0$ . При этом на основании формулы (14.9),  $E - E_0 A = 0$  или

$$E / A = E_0 \quad (14.10)$$

Уравнение (14.10) составляет содержание закона Киргофа: отношение энергии излучения тела к его поглощательной способности для всех тел одинаково и равно энергии излучения абсолютно черного тела при той же температуре.

## 14.3 Законы теплового излучения

### 14.3.3 Закон Киргофа

Уравнение (15.10) может быть преобразовано следующим образом:

$$A = E / E_0 = \varepsilon \quad (14.11)$$

т.е. коэффициент поглощения численно равен степени черноты данного тела.

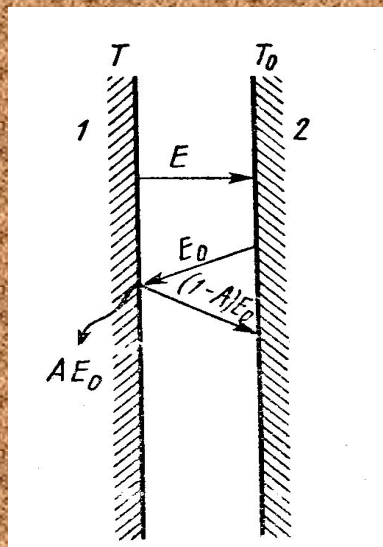


Рис. 14.5. К выводу закона Киргофа

## 14.3 Законы теплового излучения

### 14.3.4. Закон Ламберта

Закон Ламберта дает возможность определить зависимость изменения энергии лучистого потока от его направления по отношению к поверхности тела. Наибольшей интенсивностью обладает излучение по нормали к поверхности  $E_n$ . По остальным направлениям оно меньше, равно  $E_\varphi$  и выражается формулой

$$E_\varphi = E_n \cos \varphi \quad (15.12)$$

где  $\varphi$  - угол между направлением излучения и нормалью (рис. 15.6).

## 14.3 Законы теплового излучения

### 14.3.4. Закон Ламберта

Из закона Ламберта следует. Что плотность полусферического излучения в пределах телесного угла  $\omega = 2\pi / E = E_n \pi$ , откуда  $E_n = E / \pi$ , где  $E$  - плотность интегрального полусферического излучения, определяемого по закону Стефана-Больцмана по формуле (14.8);  $E_n$  - плотность излучения по нормали. Соответственно по направлению  $\varphi$  плотность излучения определяется по формуле (14.12), или после подстановки  $E_n / E_\varphi = (E / \pi) \cos \varphi$ .

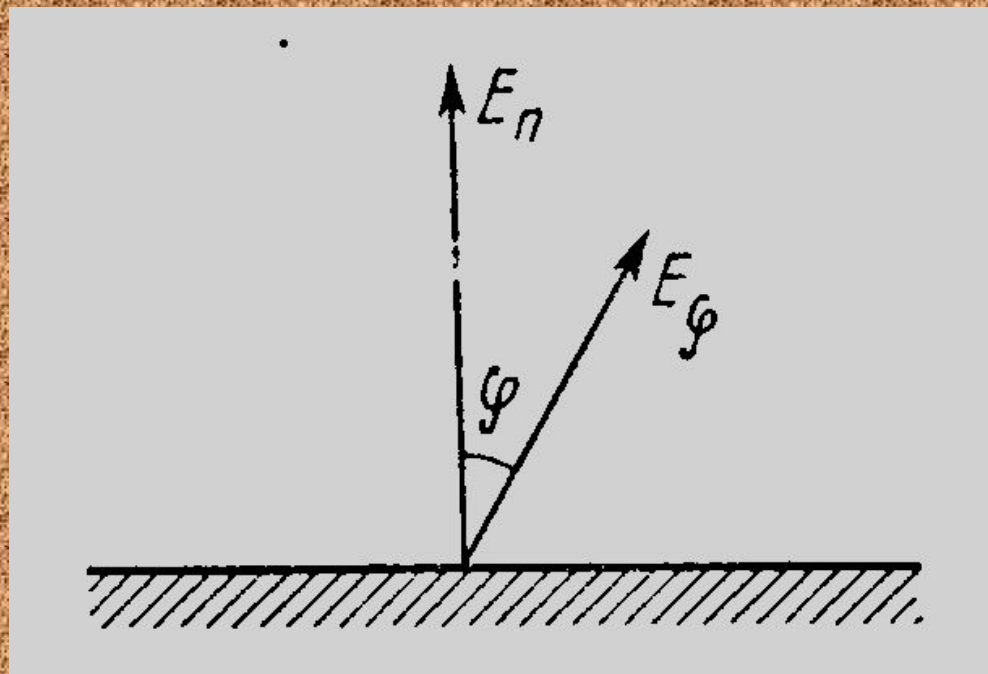


Рис. 15.6. К выводу закона Ламберта



## 14.3 Законы теплового излучения

### 14.4. Лучистый теплообмен между телами

Рассмотрим стационарный лучистый теплообмен между телами 1 и 2 (рис. 15.7) при условии, что эти тела образуют замкнутую систему. Лучистый теплообмен происходит только между ними и степень черноты этих тел не зависит от температуры.

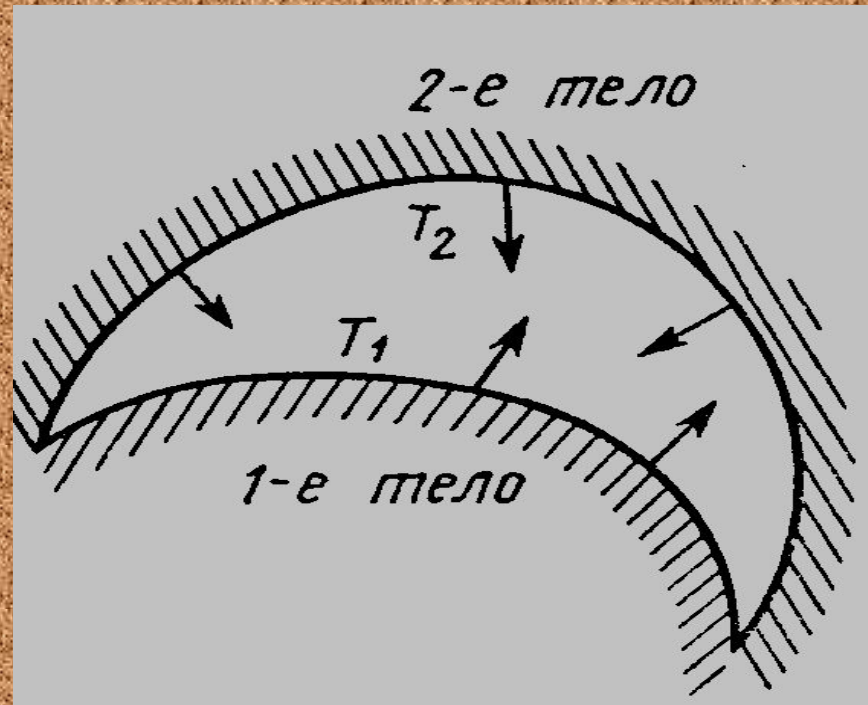


Рис. 15.7. Лучистый теплообмен между телами в замкнутой системе

## 14.3 Законы теплового излучения

### 14.4. Лучистый теплообмен между телами

Обозначим температуру, поверхность и степень черноты более нагретого тела  $T_1$ ,  $F_1$  и  $\varepsilon_1$ , а менее нагретого тела -  $T_2$ ,  $F_2$  и  $\varepsilon_2$  соответственно. При произвольном расположении в пространстве тел, участвующих в теплообмене, не вся лучистая энергия, излучаемая одним телом, падает на другое. Доля полного лучистого потока одного тела, которая попадает на другое тело, называется угловым коэффициентом излучения, или коэффициентом облученности  $\varphi$

Для двух тел, участвующих в лучистом теплообмене, коэффициент облученности первого тела

$$\varphi_{12} = Q_{12} / Q_1 \quad (14.13)$$

## 14.3 Законы теплового излучения

### 14.4. Лучистый теплообмен между телами

второго

$$\varphi_{21} = Q_{21} / Q_2 \quad (14.14)$$

При равных температурах двух абсолютно черных тел, участвующих в лучистом теплообмене,  $Q_{21} = Q_{12}$ .  
Найдем значения  $Q_{12}$  и  $Q_{21}$  из уравнений (14.13) и (14.14):

$$Q_{12} = \varphi_{12} F_1 E_{\text{эф}1} \quad Q_{21} = \varphi_{21} F_2 E_{\text{эф}2}$$

Но для абсолютно черных тел при одинаковых температурах эффективное излучение равно собственному  $E_{\text{эф}1} = E_{\text{эф}2} = E_0$ ,

Тогда

$$\varphi_{12} F_1 = \varphi_{21} F_2 = F_l \quad (14.15)$$

## 14.3 Законы теплового излучения

### 14.4. Лучистый теплообмен между телами

Уравнение (14.15) называется уравнением взаимности, а называется лучевоспринимающей или взаимной поверхностью. По уравнению (14.15) взаимная (лучевоспринимающая) поверхность пары тел равна произведению площади поверхности одного из тел на угловой коэффициент излучения от этого тела на другое. Понятием взаимной поверхности пользуются при расчетах лучистого теплообмена.

Результирующий лучистый тепловой поток от первого тела на второе:

$$Q_l = \varphi_{12} E_{\text{эф}1} F_1 - \varphi_{21} E_{\text{эф}2} F_2 = (E_{\text{эф}1} - E_{\text{эф}2}) \cdot F_l \quad (14.16)$$

### 14.3 Законы теплового излучения

### 14.4. Лучистый теплообмен между телами

Подставив значения эффективного излучения для первого

тела  $E_{эф1} = E_1 + E_{A1} \left( \frac{1}{\varepsilon_1} - 1 \right)$  и для второго  $E_{эф2} = E_2 + E_{A2} \left( \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)$

получим 
$$Q_{л} = \left[ E_1 + E_{A1} \left( \frac{1}{\varepsilon_1} - 1 \right) - E_2 - E_{A2} \left( \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right) \right] \cdot F_{л} \quad (14.17)$$

Исключим из уравнения (14.17) величины  $E_{A1}$  и  $E_{A2}$ .

Для этого напишем значение для каждого из тел, участвующих в теплообмене:

для первого тела 
$$Q_{л} = (E_1 - E_{A1}) \cdot F_1 \quad (14.18)$$

### 14.3 Законы теплового излучения

#### 14.4. Лучистый теплообмен между телами

для второго тела  $Q_{л} = (E_2 - E_{A2}) \cdot F_2$  (14.19)

Решая совместно (14.17), (14.18) и (14.19) находим

$$Q_{л} = \left( \frac{E_1}{\varepsilon_1} - \frac{E_2}{\varepsilon_2} \right) F_{л} / \left[ 1 + \frac{F_{л}}{F_1} \left( \frac{1}{\varepsilon_1} - 1 \right) + \frac{F_{л}}{F_2} \left( \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right) \right] \quad (14.20)$$

После подстановки значений  $E_1 = \varepsilon_1 C_0 (T_1 / 100)^4$  и  $E_2 = \varepsilon_2 C_0 (T_2 / 100)^4$ , а также значений угловых коэффициентов и в уравнение (14.20)

Получим

$$Q_{л} = \left\{ C_0 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot F_{л} \right\} / \left[ 1 + \varphi_{12} \left( \frac{1}{\varepsilon_1} - 1 \right) + \varphi_{21} \left( \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right) \right] \quad (14.21)$$

## 14.3 Законы теплового излучения

### 14.4. Лучистый теплообмен между телами

Обозначив  $\varepsilon_{np} = \frac{1}{1 + \varphi_{12} \left( \frac{1}{\varepsilon_1} - 1 \right) + \varphi_{21} \left( \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}$  (14.2)

окончательно получим расчетную формулу для определения количества теплоты, передаваемой одним телом другому путем излучения:

$$Q_{л} = \varepsilon_{np} C_0 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot F_{л} \quad (15.23)$$

Величина  $\varepsilon_{np}$  называется приведенной степенью черноты замкнутой системы двух серых тел.

## 14.3 Законы теплового излучения

### 14.4. Лучистый теплообмен между телами

Полученное выражение (15.23) является общей формулой для замкнутой системы двух серых тел, произвольно расположенных в пространстве.

Применим эту формулу для ряда частных случаев:

а) 1-е тело, не имеющее вогнутостей, находится внутри 2-го и все его эффективное излучение полностью падает на 2-е тело (рис. 14.8). Тогда  $\varphi_{12} = 1$ , а согласно формуле (14.23)

$F_1 = \varphi_{21} F_2$  и, следовательно,  $\varphi_{21} = F_1 / F_2$ . Поэтому для этого случая

$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \left( \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)} \quad (16.24)$$

а

$$Q_{\lambda} = \varepsilon_{np} C_0 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot F_1$$



## 14.3 Законы теплового излучения

### 14.4. Лучистый теплообмен между телами

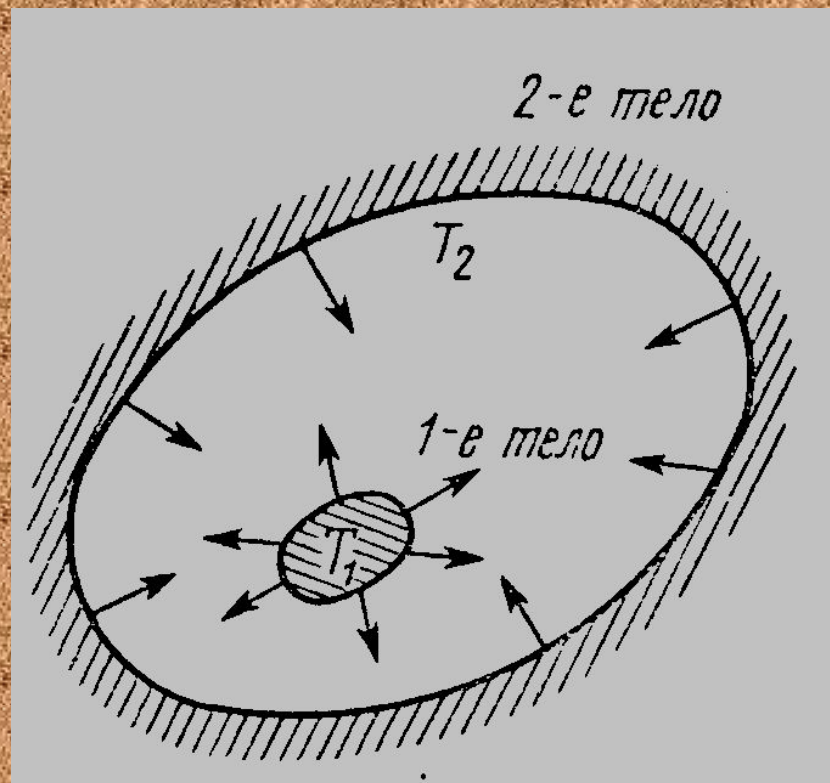


Рис. 15.8. Лучистый теплообмен между телом и оболочкой

## 14.3 Законы теплового излучения

### 14.4. Лучистый теплообмен между телами

б) тот же случай, но при  $F_1 \ll F_2$ . При этих условиях, согласно формуле (15.24) имеем  $\varepsilon_{np} \approx \varepsilon_1$ , т.е.

приведенная степень черноты определяется степенью черноты меньшего тела;

в) оба тела представляют собой параллельные

неограниченные пластины. В этом случае  $\varphi_{12} = \varphi_{21} = 1$ ,

$F_1 \doteq F_2 = F$ , а приведенная степень черноты согласно формулам (14.22) и (14.24):

$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (14.25), \text{ а}$$
$$Q_{\lambda} = \varepsilon_{np} C_0 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot F \quad (14.26)$$

## 14.3 Законы теплового излучения

### 15.5 Методы изменения интенсивности лучистого теплообмена между телами

Основное уравнение лучистого теплообмена между телами (14.23) показывает, что для интенсификации лучистого теплообмена необходимо увеличить степень черноты тел, температуру излучающего тела  $T_1$ , а также применять такое расположение тел, чтобы увеличить угловой коэффициент. По мере увеличения температуры нагреваемого тела  $T_2$  интенсивность лучистого теплообмена между телами снижается.

## 14.3 Законы теплового излучения

### 15.5 Методы изменения интенсивности лучистого теплообмена между телами

В качестве эффективного мероприятия для уменьшения лучистого теплообмена между телами применяется установка между ними экранов. последние представляют собой тонкие листы, перепадом температур по толщине которых можно пренебречь. Рассмотрим влияние экранов на уменьшение теплообмена между двумя параллельными пластинами, температуры которых обозначим  $T_1$  и  $T_2$ , а степень черноты  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  (рис. 14.9).

## 14.3 Законы теплового излучения

### 15.5 Методы изменения интенсивности лучистого теплообмена между телами

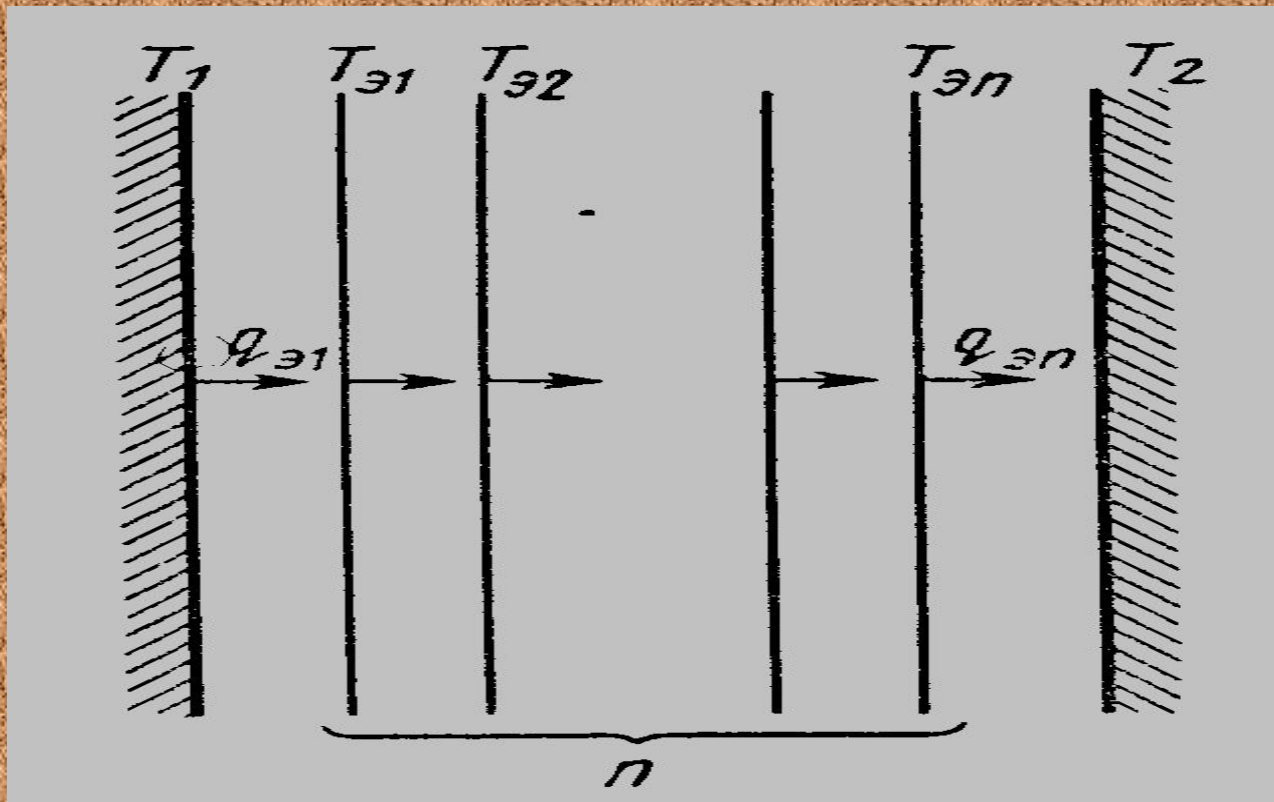


Рис. 14.9. Лучистый обмен при наличии экранов

## 14.3 Законы теплового излучения

### 15.5 Методы изменения интенсивности лучистого теплообмена между телами

Для упрощения вывода примем, что все экраны, число которых обозначим через  $n$ , имеют ту же степень черноты  $\varepsilon$ , что и пластины.

При стационарном тепловом режиме плотность лучистого потока энергии между пластинами и экранами будет одинакова,

т.е.

$$\begin{aligned} q_{\text{л}} = \frac{Q_{\text{л}}}{F} &= \varepsilon_{\text{пр}} C_0 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{э},1}}{100} \right)^4 \right] = \varepsilon_{\text{пр}} C_0 \left[ \left( \frac{T_{\text{э},1}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{э},2}}{100} \right)^4 \right] = \dots \\ \dots &= \varepsilon_{\text{пр}} C_0 \left[ \left( \frac{T_{\text{э},(n-1)}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{э},n}}{100} \right)^4 \right] = \varepsilon_{\text{пр}} C_0 \left[ \left( \frac{T_{\text{э},n}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \end{aligned} \quad (14.27)$$

## 14.3 Законы теплового излучения

### 15.5 Методы изменения интенсивности лучистого теплообмена между телами

где  $\varepsilon_{np}$  вычисляется по формуле (14.25).

При  $n$  экранах число таких равенств будет равно .

Складывая их почленно, получим выражение, в котором все промежуточные температуры экранов взаимно сократятся,

т.е.  $(n + 1) \cdot q_{\varepsilon} = \varepsilon_{np} C_0 \left[ (T_1 / 100)^4 - (T_2 / 100)^4 \right]$

Отсюда плотность лучистого потока при установке экранов

$$q_{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_{np} C_0}{n + 1} \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad (14.28)$$

При отсутствии экранов плотность того же потока будет

$$q_{\varepsilon} = \varepsilon_{np} C_0 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad (15.29)$$

## 14.3 Законы теплового излучения

### 15.5 Методы изменения интенсивности лучистого теплообмена между телами

Следовательно, при установке  $n$  экранов плотность лучистого потока уменьшится в  $n + 1$  раз. Решая совместно (14.28) и (14.29) получим

$$q_{\Sigma} = q / (n + 1) \quad (15.30)$$

Как видно из формулы (14.28), лучистый теплообмен между телами зависит как от числа экранов,  $n$  так и от приведенной степени черноты  $\varepsilon_{пр}$ . Согласно формуле (14.26) последняя уменьшается с уменьшением степени черноты экранов. Поэтому, выбрав экраны с очень малой  $\varepsilon$  (из хорошо отполированного металла), можно резко сократить число необходимых экранов.



## 14.3 Законы теплового излучения

### 15.5 Методы изменения интенсивности лучистого теплообмена между телами

Температура экранных поверхностей может быть определена из уравнения (14.27), после того как по формуле (14.28) подсчитана величина  $q_{\varepsilon}$ . В частности, при установке одного

экрана

$$\left(\frac{T_{\varepsilon}}{100}\right)^4 = \frac{1}{2} \left[ \left(\frac{T_1}{100}\right)^4 + \left(\frac{T_2}{100}\right)^4 \right] \quad (15.31)$$

Экраны применяются для повышения термического сопротивления ограждающих конструкций зданий и транспортных устройств, а также при изоляции тепловых аппаратов и приборов.

## 14.3 Законы теплового излучения

### 15.6 Излучение газов

Отличительными особенностями излучения газов являются: Излучают и поглощают только трех- и многоатомные газы ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и др.); одно- и двухатомные газы практически диатермичны;

Газы излучают и поглощают всем своим объемом в отличие от твердых и жидких тел, у которых излучают и поглощают лишь поверхностные слои;

Излучение многоатомных газов селективное (избирательное), т.е. спектр их излучения не сплошной, как у других тел. А прерывистый, имеет полосы поглощения (рис. 14.10).

## 14.3 Законы теплового излучения

## 15.6 Излучение газов

Поглощение лучистой энергии многоатомными газами также селективное, причем поглощают они лучи тех же длин волн, которые сами излучают.

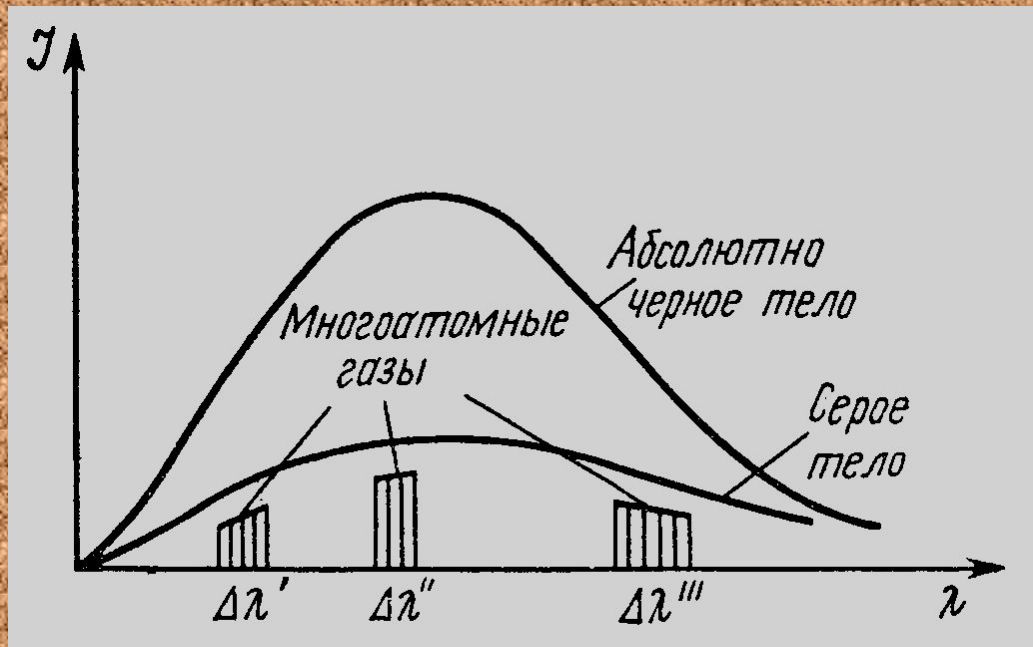


Рис. 15.10. Спектры излучения многоатомных газов и твердого тела

## 14.3 Законы теплового излучения

## 15.6 Излучение газов

Так как в излучении газов участвуют все молекулы, заполняющие объем, то излучательная способность газов зависит от их плотности  $\rho$ , температуры  $T$  и длины пути луча, проходящего через слой газов  $l$ :

$$\varepsilon_2 = \frac{E_2}{E_0} = f(\rho, T, l)$$

В практических расчетах вместо плотности газов в формулы вводится их парциальное давление  $p$ , т.е. принимают

$$\varepsilon_2 = f(p, T, l) \quad (14.32)$$

## 14.3 Законы теплового излучения

## 15.6 Излучение газов

У разных газов зависимость степени черноты от указанных факторов различна. Так, например, по опытным данным для углекислого газа при повышенных температурах

$$\varepsilon_{CO_2} = C_1 (pl)^{1/3} T^{-0.5}$$

а для водяного пара

$$\varepsilon_{H_2O} = C_2 p^{0,8} l^{0,6} T^{-1}$$

Вместо подсчетов по формулам значения  $\varepsilon_{CO_2}$  и  $\varepsilon_{H_2O}$  обычно находят по графикам.

## 14.3 Законы теплового излучения

### 15.6 Излучение газов

Если применить к излучению газов формулу Стефана-Больцмана, то количество теплоты, излучаемой газами в пустоту, которую можно рассматривать как абсолютно черное тело при  $T = 0^0 K$  :

$$E_2 = \varepsilon_2 E_0 = \varepsilon_2 C_0 (T_2 / 100)^4 \quad (14.33)$$

Следует отметить, что применение для подсчета излучения газов закона Стефана-Больцмана носит формальный характер, так как является величиной переменной, а не постоянной, как у серых тел. Однако метод подсчета применяется в практических расчетах в целях унификации методики расчета лучистого теплообмена для различных видов тел.

## 14.3 Законы теплового излучения

### 15.6 Излучение газов

В действительных условиях теплообмен имеет место между газами и облучаемой ими поверхностью и поэтому приходится учитывать количество теплоты, отраженной поверхностью и поглощаемой газами.

Применяемая для практических расчетов формула лучистого теплообмена между газами и облучаемой поверхностью имеет следующий вид:

$$q_{g,e} = \frac{\varepsilon_w + 1}{2} C_0 \left[ \varepsilon'_z \left( \frac{T_z}{100} \right)^4 - \varepsilon''_z \left( \frac{T_c}{100} \right)^4 \right] \quad (14.34)$$

## 14.3 Законы теплового излучения

### 15.6 Излучение газов

где  $\varepsilon_w$  - степень черноты облучаемой поверхности;

$\varepsilon'_2$  - степень черноты излучающих газов при температуре газов  $T_2$ ;

$\varepsilon''_2$  - то же, при температуре стенки  $T_c$ .

Для дымовых газов  $\varepsilon_2 = \varepsilon_{CO_2} + \varepsilon_{H_2O}$  :. Значения и определяются по графикам.

Излучение горящего пламени (факела), учитываемое при расчете теплообмена в топках, подсчитывается по специальным формулам.