

ТЕПЛОМАССООБМЕН

Теплообмен излучением (часть 1)

Лекция № 11

2016 год

План

- 1. Основные понятия. Закон Стефана-Больцмана.
- 2. Коэффициенты, характеризующие теплообмен излучением.
- 3. Законы распределения энергии излучения по различным направлениям и длинам волн:
 - А) Закон Ламберта.
 - Б) Законы распределения энергии излучения по длинам волн.

1. Основные понятия. Закон Стефана-Больцмана

Термин излучение обозначает:

- 1) *процесс испускание электромагнитных волн (квантов) телом;*
- 2) *распространение в пространстве самих электромагнитных волн (квантов).*

При температурах выше абсолютного нуля все тела излучают и поглощают энергию в виде электромагнитных волн.

- Электромагнитное излучение бывает несколько видов:

- 1) **инфракрасное**;
- 2) **видимое**;
- 3) **ультрафиолетовое**;
- 4) рентгеновское.

Свойства этих видов излучения различны, но природа их одна – электромагнитное поле, обладающее как волновыми, так и корпускулярными свойствами.

- **Энергию оптического излучения** принято называть **лучистой**.
- Для теплообмена имеет значение излучение, энергия которого при поглощении его телами превращается в тепловую и наоборот.
- Такими свойствами обладает излучение с длинами волн от 0,4 мкм до 800 мкм.

Такое излучение называется тепловым.

- **Тепловое излучение состоит:**

- **1. Из видимого** (светового) **излучения** (от 0,4 до 0,8 мкм);

- **2. Из инфракрасного излучения** (от 0,8 до 800 мкм).

- В области температур до 2000 °С основную роль в теплообмене играет *инфракрасное излучение*.

- Тепловое излучение как процесс распространения электромагнитных волн характеризуется длиной волны λ и частотой колебаний ν .

- Электромагнитные волны распространяются со скоростью света $c = 3 \cdot 10^8$ м/с.

$$\nu = \frac{c}{\lambda}$$

- Количество энергии излучения в единицу времени, соответствующее узкому диапазону длин волн, называют **поток**ом монохроматического (однородного) излучения Q_λ .
- Количество энергии излучения в единицу времени, соответствующее всему спектру длин волн от 0 до ∞ , называют **интегральным** потоком излучения Q .
- В реальных условиях твердые тела излучают энергию с поверхности. Поэтому часто пользуются величиной интегрального потока излучения с единицы поверхности тела по всем направлениям полусферического пространства, называемой **интегральной плотностью излучения** (**излучательной способностью**)

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

$$[E] = 1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

- Поток излучения со всей поверхности тела равен

$$Q = \int_F E \cdot dF.$$

$$[Q] = 1 \text{ Вт.}$$

- Если **плотность интегрального излучения** равномерно распределена по всей поверхности, то

$$Q = E \cdot F.$$

- Связь между излучательной способностью и температурой выражается законом Стефана-Больцмана:

$$E = C' \cdot T^4,$$

где C' – **коэффициент излучения**, зависящий от свойств излучающего тела и состояния его поверхности.

- Для абсолютно черного тела закон Стефана-Больцмана записывается в следующем виде:

$$E_0 = \sigma_0 \cdot T^4.$$

- Постоянная σ_0 называется постоянной Стефана-Больцмана.

Числовое значение постоянной Стефана-Больцмана в системе СИ равно:

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

2. Коэффициенты, характеризующие теплообмен излучением

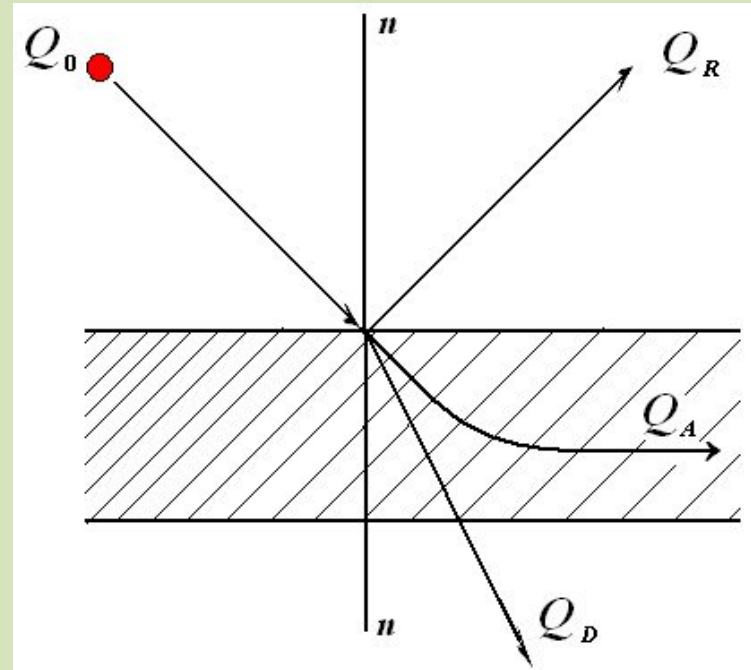
На тело падает поток излучения Q_0 .

В зависимости от физических свойств тела, состояния его поверхности, температуры, длины волны лучистой энергии часть потока:

- поглощается телом Q_A ;
- другая часть – Q_R – отражается от тела;
- третья часть – Q_D – пройдет сквозь тело.

Тогда баланс энергии можно выразить равенством:

$$Q_0 = Q_A + Q_R + Q_D. \quad (1)$$



**Схема распределения
лучистой энергии
падающей на тело**

- Поделим обе части уравнения (1) на Q_0 , получим:

$$1 = \frac{Q_A}{Q_0} + \frac{Q_R}{Q_0} + \frac{Q_D}{Q_0}.$$

- Заменяем дроби через соответствующие коэффициенты:

$$A = \frac{Q_A}{Q_0}$$

– коэффициент

$$R = \frac{Q_R}{Q_0}$$

– коэффициент

– коэффициент

$$D = \frac{Q_D}{Q_0}$$

– коэффициент

– коэффициент

прозрачности,

**получи
м:**

$$A + R + D = 1. \quad (2)$$

$$A + R + D = 1. \quad (2)$$

• Здесь:

□ A – доля потока энергии излучения, поглощенная телом (*превращенная в теплоту*);

□ R – доля потока энергии, отраженная телом;

□ D – доля потока энергии, пропущенная сквозь тело.

✓ При $A = 1$ $R = D = 0$ – весь поток энергии поглощается телом, тело называется *абсолютно черным*.

✓ При $R = 1$, $A = D = 0$ весь поток энергии отражается телом, тело называется *абсолютно белым*.

✓ При $D = 1$ $A = R = 0$ – весь поток энергии проходит сквозь тело, тело называется *абсолютно прозрачным*.

Абсолютно черных, белых и прозрачных тел в природе не бывает.

- Близким к абсолютно черному телу является поверхность, покрытая слоем нефтяной сажи ($\alpha = 0,9 \div 0,96$).
- Для теплообмена имеет значение не только способность тела испускать электромагнитные лучи, но и способность их поглощать.
- В соответствии с законом Кирхгофа *отношение излучательной способности тела к его лучепоглощательной способности одинаково для всех тел и зависит только от температуры*, т.е. для всех тел при данной температуре

$$\frac{E}{A} = \text{const} = f(T). \quad (3)$$

- Предельной излучательной способностью E_0 обладает абсолютно черное тело.
- Поскольку в природе абсолютных черных тел нет, то вводится понятие **серого тела** и *степень* его *черноты* ε .
- Обозначим *излучательную способность серого тела* через E , тогда **степень черноты серого тела** найдем по формуле:

$$\varepsilon = \frac{E}{E_0}. \quad (4)$$

- В соответствии с законом Кирхгофа можно записать

$$\frac{E}{A} = \frac{E_0}{A_0}, \text{ поскольку } E_0 = 1, \text{ то } \frac{E}{A} = E_0 \text{ и } \varepsilon = A. \quad (5)$$

$$\frac{E}{A} = E_0 \quad \text{и} \quad \varepsilon = A. \quad (5)$$

- 1) отношение *излучательной способности серого тела* к **его коэффициенту поглощения** при данной температуре равно излучательной способности абсолютно черного тела при той же температуре.
- 2) Для серых тел **коэффициент поглощения** излучения равен *коэффициенту черноты серого тела* при данной температуре.

Из закона Кирхгофа следует, что чем тело больше поглощает лучистой энергии, тем оно ее больше излучает, и что тело, излучающее энергию в определенной части спектра, способно и поглощать ее только в этой части.

- Закон Стефана-Больцмана для абсолютно черного тела имеет вид:

$$E_0 = \sigma_0 \cdot T^4. \quad (6)$$

- Постоянная σ_0 – константа излучения абсолютно черного тела (постоянной Стефана-Больцмана) в системе СИ равно:

$$\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$$

- В технических расчетах для удобства постоянную σ увеличивают в 10^8 раз и соответственно делят правую часть уравнения (6) 10^8 .

$$C_0 = \sigma_0 = 5,67$$

- Коэффициент C_0 называют *коэффициентом излучения абсолютно черного тела*.

- Введя этот коэффициент в уравнение (6), получим:

$$E_0 = c_0 \cdot \left(\frac{T}{100} \right)^4. \quad (7)$$

- Для теплообмена имеет значение не только способность тела испускать электромагнитные лучи, но и способность их поглощать.
- Найдем связь между коэффициентом излучения серого тела C и коэффициентом излучения для абсолютно черного тела c_0 :

$$\varepsilon = \frac{E}{E_0} = \frac{C(T/100)^4}{c_0(T/100)^4},$$

т.
е.

$$C = c_0 \varepsilon = 5,67 \varepsilon.$$

- Тогда для серых тел закон Стефана – Больцмана запишем в виде:

$$E = 5,67 \cdot \epsilon \cdot \left(\frac{T}{100} \right)^4. \quad (8)$$

3. Законы распределения энергии излучения по различным направлениям и длинам волн

А) Закон Ламберта

Закон Стефана-Больцмана позволяет определить полное количество энергии, излучаемой в пространство поверхностью абсолютно черного тела во всех направлениях.

Энергия, излучаемая телом, распространяется в пространстве с различной интенсивностью.

Закон, устанавливающий зависимость потока энергии от направления, называется *законом Ламберта*.

- **Количество энергии**, излучаемой телом в единицу времени, называется потоком излучения Q (Вт).
- **Плотность потока интегрального излучения** будем называть величину потока интегрального излучения, отнесенную к единице площади излучающей поверхности (Вт/м²)

$$q = \frac{dQ}{dF}. \quad (1)$$

- **Плотность потока спектрального излучения** (Вт/м³)

$$q_{\lambda} = \frac{d^2Q}{d\lambda \cdot dF}. \quad (2)$$

- **Яркостью излучения** называется величина потока излучения в единице телесного угла, отнесенная к единице площади проекции излучающей поверхности на плоскость, ортогональную направлению излучения ($\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{стер}$)

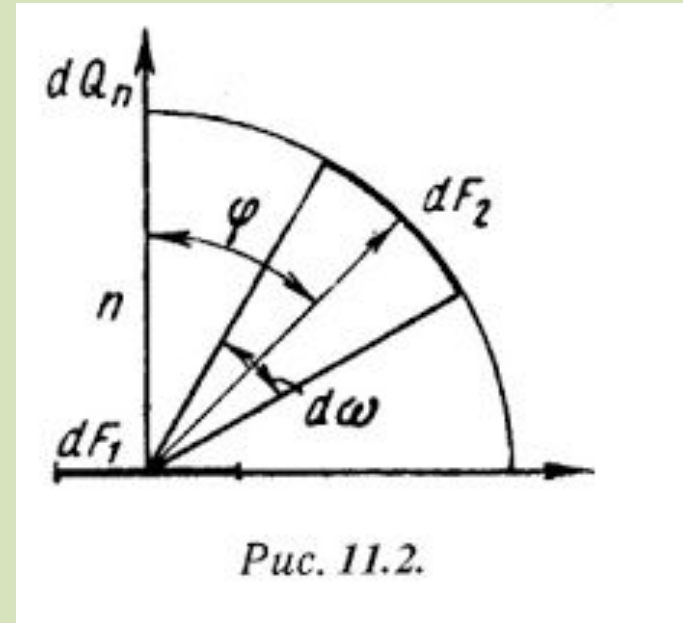
$$B = \frac{d^2 Q}{dF_{1n} \cdot d\omega} = \frac{d^2 Q}{dF_1 \cdot \cos \varphi \cdot d\omega}. \quad (3)$$

- Излучение называется **изотропным** (*диффузным*), если яркость излучения одинакова по всем направлениям, т.е. **$B = \text{const}$** .

Для практических расчетов теплообмена излучением важно знать связь между **яркостью** и **плотностью потока полусферического** (в пределах телесного угла $\omega = 2\pi$) **излучения поверхности**.

Величина плотности теплового потока, изотропно излучаемого площадкой dF_1 в пределах телесного угла $d\omega$ в направлении, расположенном под углом φ к нормали будет равна

$$q_\varphi = \frac{d^2Q}{dF} = B \cdot \cos \varphi \cdot d\omega, \quad (4)$$



а в пределах телесного угла $\omega = 2\pi$ (полусферическое излучение)

$$q = B \cdot \int_{2\pi} \cos \varphi \cdot d\omega. \quad (5)$$

- Из стереометрии известно, что величина телесного угла равна

$$d\omega = \frac{dF_2}{r^2} \quad \text{— в декартовых координатах}$$

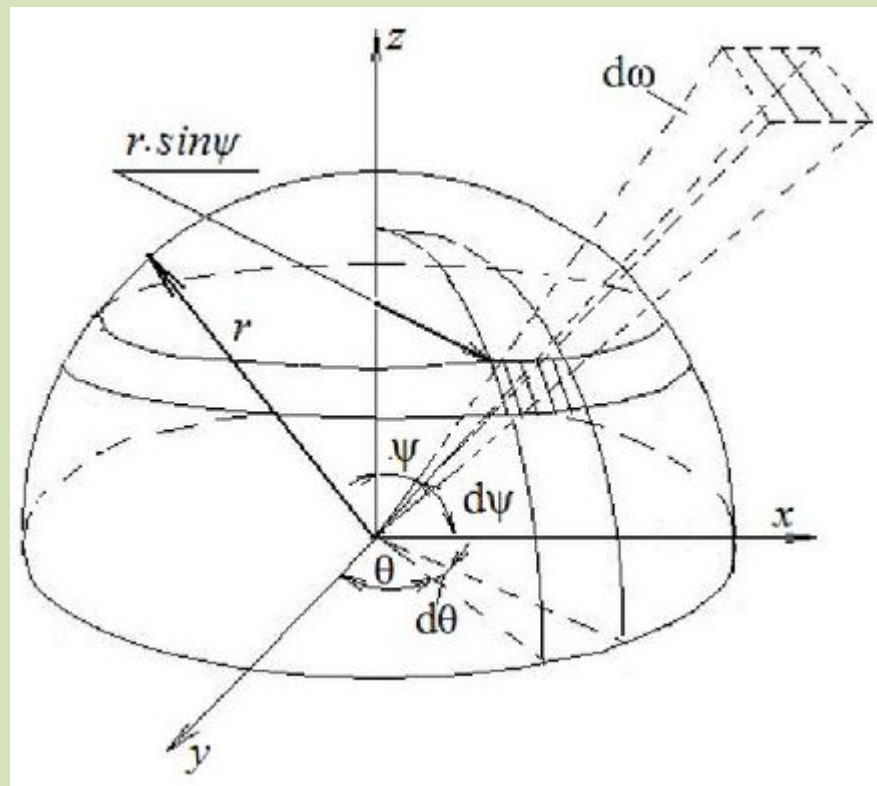
или $d\omega = \sin \varphi \cdot d\varphi \cdot d\theta,$

где θ — азимут выбранного направления (в полярных координатах).

С учетом сказанного выражение (5) представим в виде

$$q = B \cdot \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^{\pi/2} \sin \varphi \cdot \cos \varphi \cdot d\omega = \pi B, \quad (6)$$

т.е. $B = \frac{q}{\pi} \quad (7)$



- **Закон Ламберта** устанавливает, что *интенсивность излучения с единицы поверхности абсолютно черного тела в каком-либо направлении пропорциональна косинусу угла между этим направлением и нормалью к поверхности:*

$$I = I_{\text{н}} \cdot \cos \varphi \quad (8)$$

где $I_{\text{н}}$ – интенсивность излучения в направлении, нормальном к элементу поверхности (количество энергии, излучаемой в единицу времени с единицы поверхности в направлении нормали); φ – угол между направлением излучения энергии и нормалью.

- Общее количество энергии, излучаемой элементарной площадкой dF_1 находим путем интегрирования:

$$E = \int I d\omega = 2\pi I_H \int_0^{\pi/2} \cos \varphi \cdot \sin \varphi d\varphi = \pi I_H. \quad (9)$$

Из формулы (9) видно, что излучательная способность в направлении нормали в π раз меньше полной излучательной способности тела:

$$E_n = E / \pi.$$

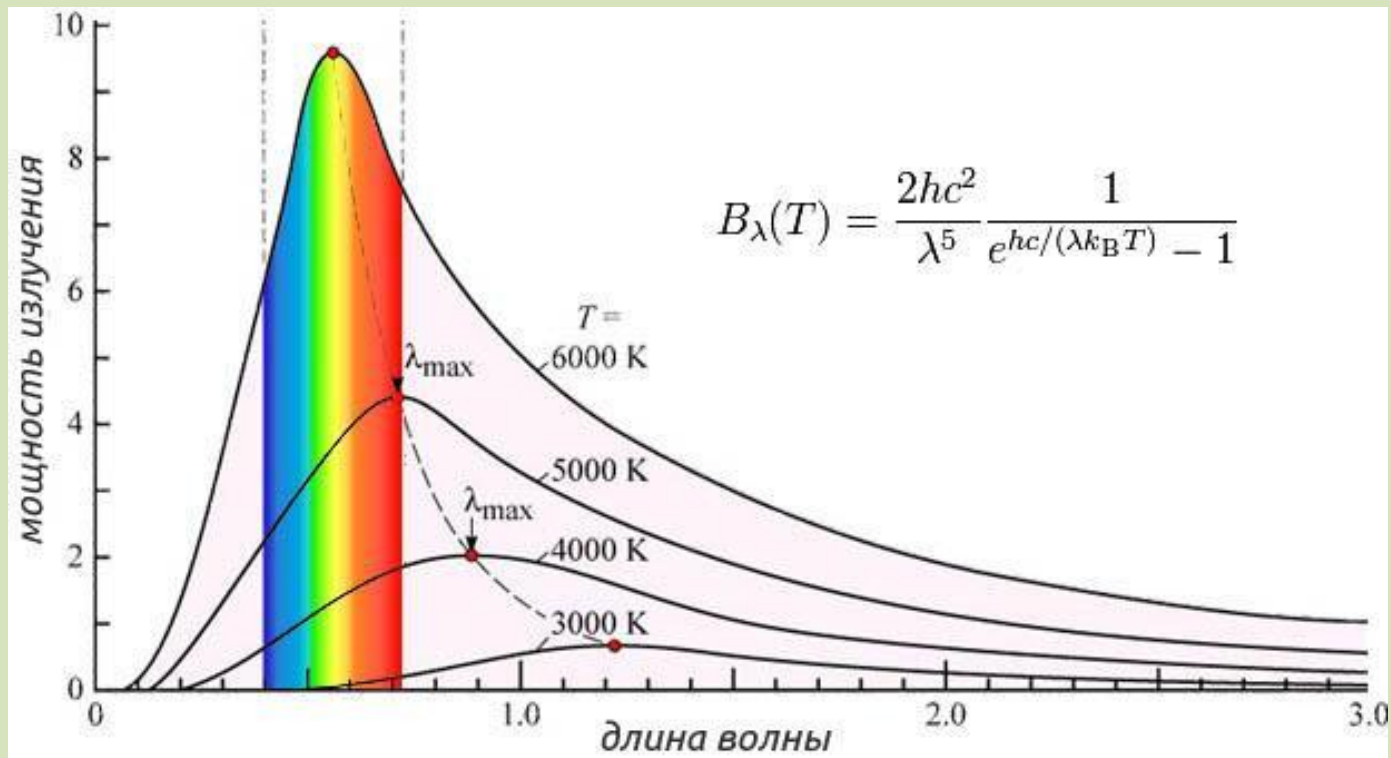
Реальные тела не подчиняются закону Ламберта.

- Однако, для часто встречающихся на практике матовых поверхностей с большой поглощательной способностью можно пользоваться этим законом.

Б) Законы распределения энергии излучения по длинам волн

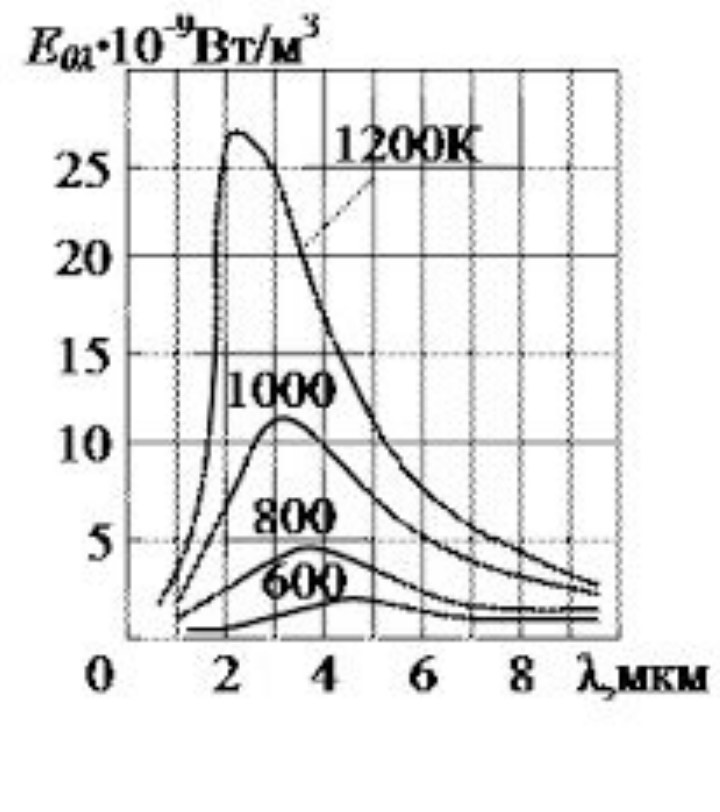
Распределение энергии излучения по длинам волн подчиняются законам Планка и Вина.

- **Закон Планка:** энергия излучения неравномерно распределяется по длинам волн.
- **Закон Вина:** с повышением температуры излучающего тела максимальное значение интенсивности излучения смещается в сторону коротких волн.



Графики зависимости распределения энергии по длинам волн построенные по экспериментальным данным подтверждают справедливость **закона Вина**.

Графики зависимости распределения энергии по длинам волн построенные на основе вычислений по **формуле Планка** полностью совпадают с экспериментальными.



- Абсолютно черное тело при данной температуре излучает энергию всех длин волн от $\lambda = 0$ до $\lambda = \infty$, но распределение энергии вдоль спектра различно.

По мере увеличения длины волны энергия излучения возрастает, при некоторой длине волны достигает максимума, затем убывает.

Для одной и той же длины волны энергия излучения увеличивается с возрастанием температуры тела, излучающего энергию.

В 1900 году Планк выдвинул идею о том, что тело излучает энергию отдельными порциями (квантами):

$$E = h\nu$$

$h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка.

$$\nu = \frac{c}{\lambda}$$

– частота излучения электромагнитных волн;

c – скорость света;

λ – длина электромагнитных волн.

□ В 1900 году Планк используя методы статистической физики, исходя из электромагнитной природы света и представлений о квантах энергии получил формулу распределения энергии излучения по длинам волн для абсолютно черного твердого тела, которая дает значение интенсивности излучения $I_{\lambda 0}$, хорошо совпадающее с опытными данными:

$$I_{\lambda 0}(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right)^{-1}}} \quad (1)$$

где k – постоянная Больцмана; $e = 2,718$ – основание натуральных логарифмов.

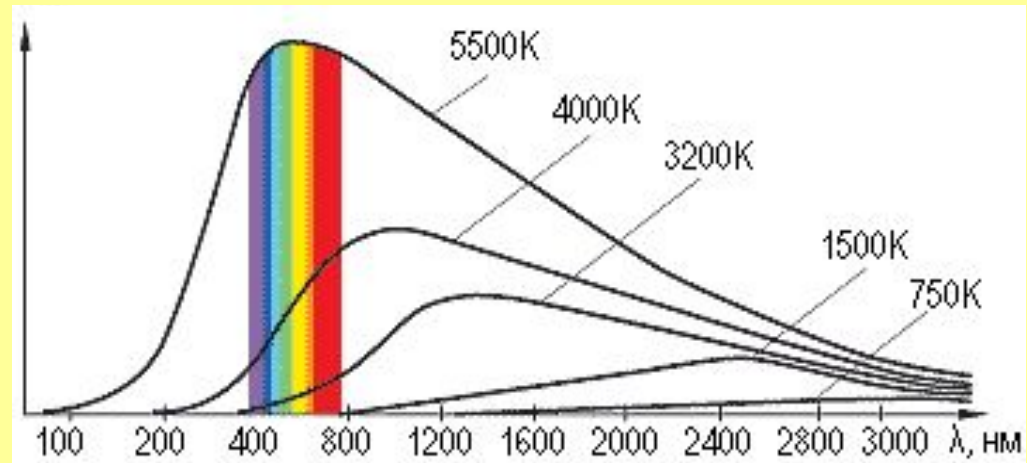
Если ввести постоянные C_1 и C_2 , то уравнение (1) примет вид:

$$I_{\lambda_0}(\lambda, T) = C_1 \cdot \lambda^{-5} \cdot \frac{1}{e^{\left(\frac{C_2}{\lambda k T}\right)^{-1}}} \quad (1a)$$

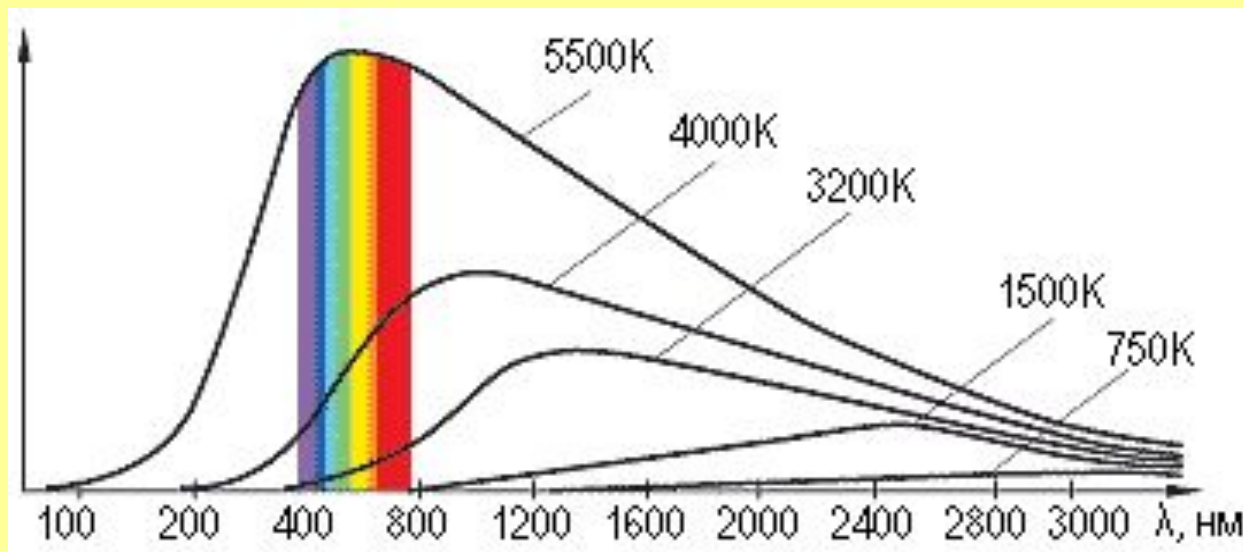
Примем измерение длин волн в метрах, тогда

$$C_1 = 3,74 \cdot 10^{-16} \text{ Вт} \cdot \text{м}^2,$$

$$C_2 = 1,44 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{К}.$$



Из графиков видно, что при $T < 1000$ К почти вся энергия излучения получается за счет инфракрасных лучей ($\lambda = 0,8 \div 800$ мкм). С повышением температуры все увеличивается. Доля энергии переносимой светом, при $T \approx 6000$ К становится равной примерно 50%.



Площадь под каждой кривой эквивалентна интегральному излучению – общей излучательной способности черного тела E_0 при данной температуре:

$$E_0 = \int_0^{\infty} I_{\lambda_0} d\lambda.$$

Если подставить сюда значение интенсивности излучения I_{λ_0} из формулы (1), то после интегрирования получим формулу закона Стефана–Больцмана:

$$E_0 = \sigma_0 \cdot T^4.$$

Первый закон Вина (закон смещения) (1894 год)

- Длина волны, на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости АЧТ, обратно пропорциональна абсолютной температуре тела:

$$\lambda_m = \frac{b}{T}$$

- Числовое значение первой постоянной Вина в системе СИ равно:

$$b = 2,90 \cdot 10^{-3}$$

- **Первая постоянная Вина** $\text{м} \cdot \text{К}$ равна той длине волны, на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости АЧТ при температуре $T=1\text{К}$.