

«Теплообмен излучением между телами,
разделённой прозрачной средой;
коэффициент облучённости; теплообмен
между телами, произвольно
расположенными в пространстве. Защита
от излучения. Излучение газов.»

Выполнили:
Труфанов Алексей
Приказщиков. И.С

Теплообмен излучением

Тепловое излучение – процесс превращения внутренней энергии тела в лучистую энергию и ее распространение в виде электромагнитных волн.

Характеристики излучения:

1. Длина волны - λ мкм
2. Частота - ν

Все виды электромагнитного излучения (космическое, рентгеновское, ультрафиолетовое, световое, инфракрасное, радиоволны) имеют одинаковую квантовую природу, но разные длины волн.

В наибольшей степени внутренняя энергия передается инфракрасными $\lambda = 0.8 \div 800$ мкм и световыми $\lambda = 0.4 \div 0.8$ мкм лучами.

Лучеиспускание свойственно всем телам, причем каждое тело испускает энергию непрерывно. Количество излучаемой энергии зависит от температуры и оптических свойств поверхности.

Q Вт - Поток собственного излучения – количество энергии излучения, испускаемое в единицу времени с поверхности тела.

$E \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right]$ Плотность потока собственного излучения или излучательность – поток собственного

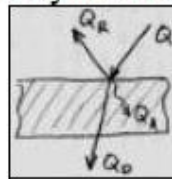
излучения, испускаемый с единицы поверхности тела во всех направлениях пространства.

Излучение:

Теплообмен излучением

1. Интегральное – излучение $0 \div \infty$
2. Монохроматическое – излучение $\lambda \div \lambda + d\lambda$

Теплообмен излучением – совместный процесс излучения и поглощения



$$Q = Q_A + Q_R + Q_D$$

$$\frac{Q_A}{Q} + \frac{Q_R}{Q} + \frac{Q_D}{Q} = 1$$

$$A + R + D = 1$$

A – коэффициент поглощения

R – коэффициент отражения

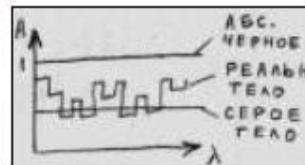
D – коэффициент пропускания

A=1; R=0; D=0 – абсолютно черное тело (сажа, снег)

A=0; R=1; D=0 – абсолютно белое тело (полированный металл)

A=0; R=0; D=1 – абсолютно прозрачное тело

У большинства тел D=0, поэтому A+R=1.



Серое – тело, у которого коэффициент поглощения $A < 1$ и не зависит от длины волны

Законы теплового излучения

Закон Планка

Закон Планка устанавливает распределение энергии излучения по длинам волн для различных температур нагретого абсолютно черного тела.

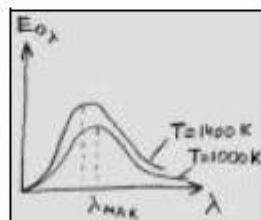
$$dE = E_{\lambda} \cdot \lambda \div \lambda + d\lambda$$

$$\frac{dE}{d\lambda} = E_{\lambda} \text{ - спектральная интенсивность излучения}$$

$$E_{0,\lambda} = f(\lambda, T)$$

$$E_{0,\lambda} = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} \text{ - уравнение закона Планка}$$

$$\left. \begin{aligned} c_1 &= 5.944 \cdot 10^{-17} \\ c_2 &= 1.4388 \cdot 10^{-2} \end{aligned} \right\} \text{ - постоянные Планка}$$



С ростом температур максимум спектральной интенсивности смещается в область более коротких волн – закон смещения Вина.

$$\lambda_{\text{max}} \cdot T = 2.9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$$

Все тепловые излучения являются темными.

Закон Стефана - Больцмана

Закон Стефана–Больцмана устанавливает зависимость плотности потока интегрального полусферического излучения абсолютно черного тела от температуры.

$$E_0 = \sigma T^4$$

T - абсолютная температура

$$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4} \right] - \text{постоянная Стефана-Больцмана}$$

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

$$c_0 = 5.67 \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4} \right] - \text{излучательная способность абсолютно черного тела}$$

Энергия, излучаемая абсолютно черным телом, пропорциональна четвертой степени его абсолютной температуры

$$E = c \left(\frac{T}{100} \right)^4 - \text{закон Стефана-Больцмана для серого тела}$$

c - излучательная способность серого тела

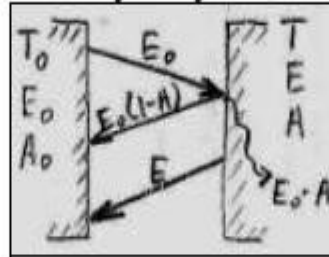
$$0 \leq c \leq 5.67 \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4} \right]$$

$$\varepsilon = \frac{E}{E_0} = \frac{c \left(\frac{T}{100} \right)^4}{c_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4} = \frac{c}{c_0}$$

$$0 \leq \varepsilon \leq 1$$

Закон Кирхгофа

Закон устанавливает количественную связь между излучением абсолютно черного тела и серого тела



$$q = E - E_0 A$$

$$T = T_0 \Rightarrow E = E_0 A$$

$$\boxed{\frac{E}{A} = E_0}$$

Отношение плотности потока собственного излучения к коэффициенту поглощения для всех тел одинаково и равно плотности потока собственного излучения абсолютно черного тела при той же температуре

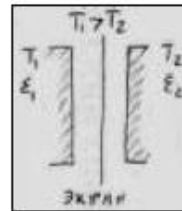
Для серых тел закон Кирхгофа будет справедлив только в спектральной форме:

$$\frac{E_\lambda}{A_\lambda} = E_{\lambda_0}$$

Защита от теплового излучения - экран

Экран устанавливается ортогонально к потоку излучения и изготавливается из материала с высокой отражающей способностью (R) и высоким коэффициентом теплопроводности. Наилучший экран – полированная медная фольга.

В результате переизлучения экранами в обратном направлении, в результате поток излучения уменьшается пропорционально.



$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2$$

$$q_{1-2} = c_0 \varepsilon_{\pi} \left(\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right)$$

$$\varepsilon_{\pi} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}$$

$$q_{1-3} = q_{3-2}$$

$$q_{1-3} = c_0 \varepsilon_{\pi 1} \left(\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_3}{100} \right)^4 \right)$$

$$q_{3-2} = c_0 \varepsilon_{\pi 2} \left(\left(\frac{T_3}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right)$$

$$\varepsilon_{\pi 1} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_3} - 1}$$

$$\varepsilon_{\pi 2} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_3} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}$$

$$\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_3}{100} \right)^4 = \left(\frac{T_3}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4$$

$$\left(\frac{T_3}{100} \right)^4 = \frac{1}{2} \left(\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 + \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right)$$

$$q_{1-3-2} = c_0 \varepsilon_{\pi} \left(\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \frac{1}{2} \left(\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 + \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right) \right)$$

$$q_{1-3-2} = \frac{1}{2} c_0 \varepsilon_{\pi} \left(\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right)$$

Установка одного экрана уменьшает результирующий поток излучения в два раза. Установка n экранов уменьшает результирующий поток излучения в n+1 раз

Излучение газов

Способностью излучать и поглощать энергию обладают не все газы. Одно- и двухатомные газы являются для теплового излучения абсолютно прозрачными. А трех- и многоатомные газы обладают значительной излучательной и поглощательной способностью. В отличие от твердых тел процессы излучения и поглощения газа протекают во всем объеме. При этом поглощают и излучают энергию непосредственно молекулы газа.

$$A = f \phi, l, T$$

p - парциальное давление

l - длина пути луча

$p \cdot l$ Па · м - эффективная толщина слоя газа

С ростом температуры в незамкнутом объеме коэффициент поглощения уменьшается

$$E_r = f \phi, l, T$$

Существенным отличием излучения газа от твердого тела является избирательный характер излучения

$$\lambda = 2.4 \div 3 \text{ мкм} \Rightarrow \Delta\lambda = 0.6 \text{ мкм}$$

$$\lambda = 4 \div 4.8 \text{ мкм} \Rightarrow \Delta\lambda = 0.8 \text{ мкм}$$

$$\lambda = 12.5 \div 16.5 \text{ мкм} \Rightarrow \Delta\lambda = 4 \text{ мкм}$$

...

Для CO_2

$$\lambda = 2.24 \div 3.27 \text{ мкм} \Rightarrow \Delta\lambda = 1.03 \text{ мкм}$$

$$\lambda = 4.8 \div 8.5 \text{ мкм} \Rightarrow \Delta\lambda = 3.7 \text{ мкм}$$

$$\lambda = 12 \div 25 \text{ мкм} \Rightarrow \Delta\lambda = 13 \text{ мкм}$$

...

Для H_2O

$$E_{CO_2} = 3.5 \phi l^{-1/2} \left(\frac{T}{100} \right)^{3.5}$$

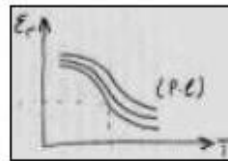
$$E_{H_2O} = 3.5 p^{0.5} l^{0.6} \left(\frac{T}{100} \right)^3$$

$$E_r = \varepsilon_r c_0 \left(\frac{T_r}{100} \right)^4$$

Излучение газов

$\varepsilon_r = \frac{E_r}{E_0} < 1$ - коэффициент теплового излучения газа. Он учитывает отклонение от закона Стефана –

Больцмана



$$l = 0.9 \frac{4V}{F}$$

l м - длина пути луча

V м³ - объем, занимаемый газом

F м² - поверхность стен, ограничивающих газ

$$q_{r-ст} = \varepsilon_r c_0 \left(\left(\frac{T_r}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{ст}}{100} \right)^4 \right)$$

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon_r \cdot \varepsilon_{ст}}{\varepsilon_r + \varepsilon_{ст} - \varepsilon_r \cdot \varepsilon_{ст}}$$

$$\varepsilon_r = \varepsilon_{CO_2} + \varepsilon_{H_2O} - \Delta\varepsilon$$

$\Delta\varepsilon$ - поправка на пересечение спектров излучения газов