

План лекции:

1. Теплообмен излучением. Основные понятия
2. Теплообмен излучением между твёрдыми телами
3. Теплообмен излучением между твёрдыми телами при наличии экрана

1. ТЕПЛООБМЕН ИЗЛУЧЕНИЕМ. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Все тела при любых температурах излучают и поглощают энергию излучения, но количество теплоты, переносимое путем излучения, становится существенным только при высоких температурах (например, в котельных установках) или в условиях, когда перенос теплоты другими способами затруднен (например, в вакууме).

Процесс превращения внутренней энергии в энергию излучения происходит во всем объеме твердого тела, но энергия излучения частиц, расположенных далеко от поверхности, поглощается самим телом, а в окружающую среду попадает только энергия, испускаемая тонким поверхностным слоем. Для металлов $\sim 10^{-3}$ мм, для диэлектриков ~ 1 мм.

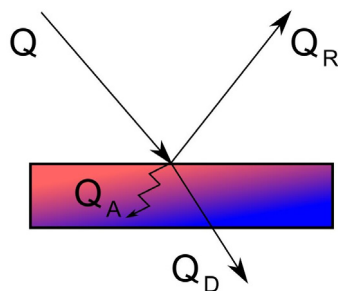
Излучение энергии телом оценивается поверхностной плотностью потока собственного излучения $E, [Вт/м^2]$, которая представляет собой количество энергии излучения, испускаемое единицей площади поверхности в единицу времени. Плотность потока собственного излучения учитывает излучение во всех направлениях и при всех длинах волн ($\lambda = 0 \dots \infty$).

Полагая, что спектр электромагнитных волн по частоте излучения является непрерывным для диапазона длин волн от λ до $\lambda + d\lambda$ можно записать:

$$J = \frac{dE}{d\lambda}. \quad (1)$$

Величина $J, [Вт/м^3]$ носит название **плотности потока монохроматического (с одной длиной волны) излучения**.

Поглощение энергии излучения происходит также в тонком поверхностном слое твердого тела. Плотность потока излучения, падающего на поверхность тела будем обозначать $Q, [Вт/м^2]$. Поток излучения, падающий на поверхность тела, поглощается не полностью: часть энергии отражается, часть - проходит сквозь тело.



$$Q = Q_A + Q_R + Q_D, \quad (2)$$

или

$$A + R + D = 1, \quad (3)$$

где $A = Q_A/Q$ - **поглощательная** способность тела, $R = Q_R/Q$ - **отражательная** способность тела, $D = Q_D/Q$ - **пропускательная** способность тела.

Тело, поглощающее всю падающую на него энергию во всём диапазоне длин волн, называется **абсолютно черным**.

$$A = 1 \quad (4)$$

Несмотря на название, абсолютно чёрное тело само может испускать электромагнитное излучение любой частоты и визуально иметь цвет. Спектр излучения абсолютно чёрного тела определяется только его температурой. Наиболее чёрные реальные вещества, например, сажа, поглощают до 99 % падающего излучения в видимом диапазоне длин волн, однако инфракрасное излучение поглощается ими значительно хуже.

Следует заметить, что при умеренной температуре источника излучения цвет поверхности не определяет ее поглощательную способность. Белые тела так же хорошо поглощают энергию излучения, как и темные. Так, например, у снега поглощательная способность в ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра $A = 0,985$.

Большинство **твердых тел** не пропускает энергию излучения и для них:

$$A + R = 1 \quad (5)$$

В этом случае все факторы, увеличивающие поглощательную способность, одновременно уменьшают отражательную способность поверхности. Это свойство в значительной степени зависит от длины волны падающего излучения. Например, для стекла соотношение (5) выполняется только в инфракрасной и ультрафиолетовой области спектра, в видимом диапазоне длин волн стекло практически полностью прозрачно.

Тела, пропускающие всю падающую на них энергию излучения, называются **диатермичными**.

$$D = 1 \quad (6)$$

Наибольшей пропускательной способностью обладают газы. Слой воздуха толщиной несколько метров можно считать диатермичным. Однако следует заметить, что пропускательная способность газов сильно зависит от длины волны падающего излучения. Так углекислый газ практически не прозрачен для теплового (инфракрасного) излучения, что приводит к так называемому "парниковому эффекту" на нашей планете.

Вернёмся теперь к способности тел излучать энергию. Важнейшей **радиационной характеристикой** тел является **степень черноты ϵ (или коэффициент излучения)**. Эта величина определена, как:

$$\epsilon = \frac{E}{E_0}, \quad (7)$$

где E_0 - поверхностная плотность потока собственного излучения абсолютно чёрного тела. Теоретически Планком было показано, что спектр излучения абсолютно чёрного тела, и, соответственно, поверхностная плотность потока собственного излучения определяется только его температурой.

$$E_0 = C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4, \quad (8)$$

где $C_0 = 5,67$ - коэффициент излучения абсолютно чёрного тела, $[Вт / (м^2 \cdot град^4)]$.

Таким образом зная степень черноты тела можно определить плотность потока излучения этого тела:

$$E = \varepsilon C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4 = C \left(\frac{T}{100} \right)^4. \quad (9)$$

Величину C в уравнении (9) называют коэффициентом излучения тела.

Величина **степени черноты** зависит от природы тела, температуры, степени шероховатости поверхности, от степени окисления поверхности.

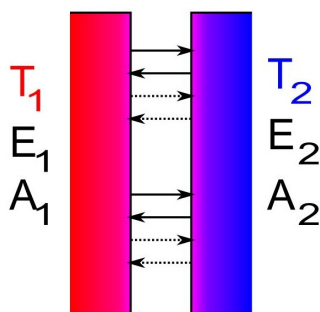
Степень черноты диэлектриков $\varepsilon > 0,8$.

Степень черноты металлов значительно ниже, чем у диэлектриков, и увеличивается с ростом температуры. Так, чистые стальные и чугунные поверхности имеют степень черноты $\varepsilon = 0,05 \dots 0,45$. Появление окислов на полированной поверхности приводит к увеличению ее степени черноты иногда на порядок.

2. ТЕПЛООБМЕН ИЗЛУЧЕНИЕМ МЕЖДУ ТВЁРДЫМИ ТЕЛАМИ

Интенсивность теплообмена излучением между твердыми телами в общем случае зависит от физических свойств этих тел, их температур, расстояния между ними и их взаимного расположения.

Рассмотрим теплообмен излучением при стационарном режиме между двумя параллельными стенками, имеющими большую поверхность и отстоящими друг от друга на небольшом расстоянии так, что излучение каждой стенки полностью попадает на противоположную. Пропускательную способность стенок считаем равной нулю.



Излучение каждой стенки частично поглощается, частично отражается, причем этот процесс многократно, повторяется и имеет затухающий характер.

Обозначим через Q_1 плотность потока эффективного излучения от первой стенки ко второй, включающую как собственное излучение первой стенки, так и все ее отражения. Аналогично обозначим плотность потока эффективного излучения от второй стенки к первой - Q_2 .

Из потока излучения Q_2 , падающего на первую стенку, будет поглощено $A_1 Q_2$ и отражено $(1 - A_1) Q_2$. Следовательно,

$$Q_1 = E_1 + (1 - A_1) Q_2. \quad (10)$$

Аналогично:

$$Q_2 = E_2 + (1 - A_2) Q_1 \quad (11)$$

После несложных преобразований результирующую плотность потока энергии излучения между первой и второй стенкой можно записать в виде:

$$q = Q_1 - Q_2 = \frac{A_2 E_1 - A_1 E_2}{A_1 + A_2 - A_1 A_2}. \quad (12)$$

Поскольку в результате многократных отражений энергия излучения будет поглощена той или иной поверхностью и перейдёт в тепло можно сказать, что полученное соотношение (12) выражает плотность теплового потока между поверхностями.

Плотность потока излучения первой E_1 и второй поверхностей E_2 можно определить по формуле (9). В результате получим:

$$q = \frac{1}{A_1 + A_2 - A_1 A_2} \left(A_2 \varepsilon_1 C_0 \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - A_1 \varepsilon_2 C_0 \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right) \quad (13)$$

Можно показать, что в состоянии термодинамического равновесия $\varepsilon = A$ (Закон Кирхгофа). Если тела отдают или получают теплоту посредством радиационного теплообмена, то степень черноты будет зависеть от температуры нагретой и холодной поверхностей. Эккертом было показано, что если степень черноты тел определять по среднегеометрической температуре $\sqrt{T_1 \cdot T_2}$, то закон Кирхгофа будет выполняться и в неравновесных условиях. С учётом этого уравнение (13) можно переписать следующим образом:

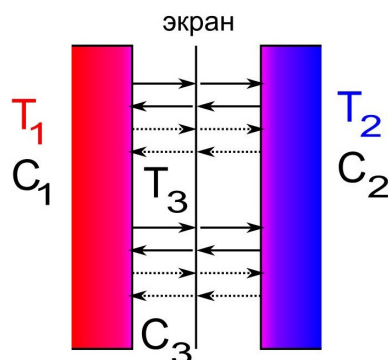
$$q = A_{\text{пр}} C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \quad (14)$$

где $A_{\text{пр}} = 1 / (1/A_2 + 1/A_1 - 1)$ - приведённая поглощательная способность системы. В силу закона Кирхгофа $A_{\text{пр}} = \varepsilon_{\text{пр}}$, где $\varepsilon_{\text{пр}}$ - приведённая степень черноты системы. Комплекс $C_{\text{пр}} = \varepsilon_{\text{пр}} C_0$ называют коэффициентом излучения системы. Легко показать, что:

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}; \quad C_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_0}} \quad (15)$$

3. ТЕПЛООБМЕН ИЗЛУЧЕНИЕМ МЕЖДУ ТВЁРДЫМИ ТЕЛАМИ ПРИ НАЛИЧИИ ЭКРАНА

Рассмотрим теплообмен излучением при наличии экранов, которые уменьшают интенсивность теплообмена между телами. Экраны обычно изготавливают из тонких металлических листов. Сопоставим теплообмен излучением при стационарном режиме между параллельными стенками без экрана и с экраном, воспользовавшись формулой (14) и полагая, что $C_1 = C_2 = C_3 = C$.



Если экрана нет, то

$$q = C_{12} \left(\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right). \quad (16)$$

Если экран есть, то тепловой поток от горячей стенки к экрану и от экрана к холодной стенке можно рассчитать так:

$$q_{13} = C_{13} \left(\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_3}{100} \right)^4 \right); \quad q_{32} = C_{32} \left(\left(\frac{T_3}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right) \quad (17)$$

Из определения приведённого коэффициента излучения системы следует:

$$C_{12} = C_{13} = C_{32} = C_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{2}{C} - \frac{1}{C_0}}. \quad (18)$$

Поскольку в стационарном случае $q_{13} = q_{32} = q_3$, из уравнений (17) и (18) можно получить:

$$q_3 = \frac{1}{2} C_{\text{пр}} \left(\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right), \quad (19)$$

или

$$\boxed{q_3 = \frac{1}{2} q} \quad (20)$$

Таким образом, наличие экрана даже с тем же коэффициентом излучения, что и коэффициент излучения нагретой и холодной поверхностей снижает интенсивность радиационного теплообмена в два раза. Аналогично можно показать, что два экрана приводят к трёхкратному снижению интенсивности теплообмена, а в общем виде n экранов снижают теплообмен в $n+1$ раз.

Если коэффициенты излучения стенок и экрана неодинаковы, то приведённые коэффициенты излучения системы также не равны между собой $C_{13} \neq C_{32} \neq C_{12}$. В этом случае:

$$\boxed{q_3 = \frac{C_{13} C_{32}}{C_{12}} \frac{1}{C_{13} + C_{32}} q} \quad (21)$$

Например, если коэффициент излучения экрана равен $C_3 = 0,3$, а коэффициенты излучения поверхностей близки к коэффициенту излучения абсолютно чёрного тела и равны $C_1 = C_2 = 5,25$, то такой экран снижает интенсивность радиационного теплообмена в 32 раза.