

# Теплотехника

ЛУЧИСТЫЙ ТЕПЛООБМЕН

# ЛУЧИСТЫЙ ТЕПЛООБМЕН

Тепловое излучение есть результат превращения внутренней энергии тел в энергию электромагнитных колебаний.

При попадании тепловых лучей (волн) на другое тело их энергия частично поглощается им, снова превращаясь во внутреннюю. Так осуществляется лучистый теплообмен между телами.

Тепловое излучение как процесс распространения электромагнитных волн характеризуется длиной волны  $\lambda$  и частотой колебаний  $\nu = c / \lambda$ ,  $c = 3 \cdot 10^8$  / , где  $c$  — скорость света.

# Основные понятия

Все виды электромагнитного излучения имеют одинаковую природу, поэтому классификация излучения по длинам волн в зависимости от производимого ими эффекта носит лишь условный характер.

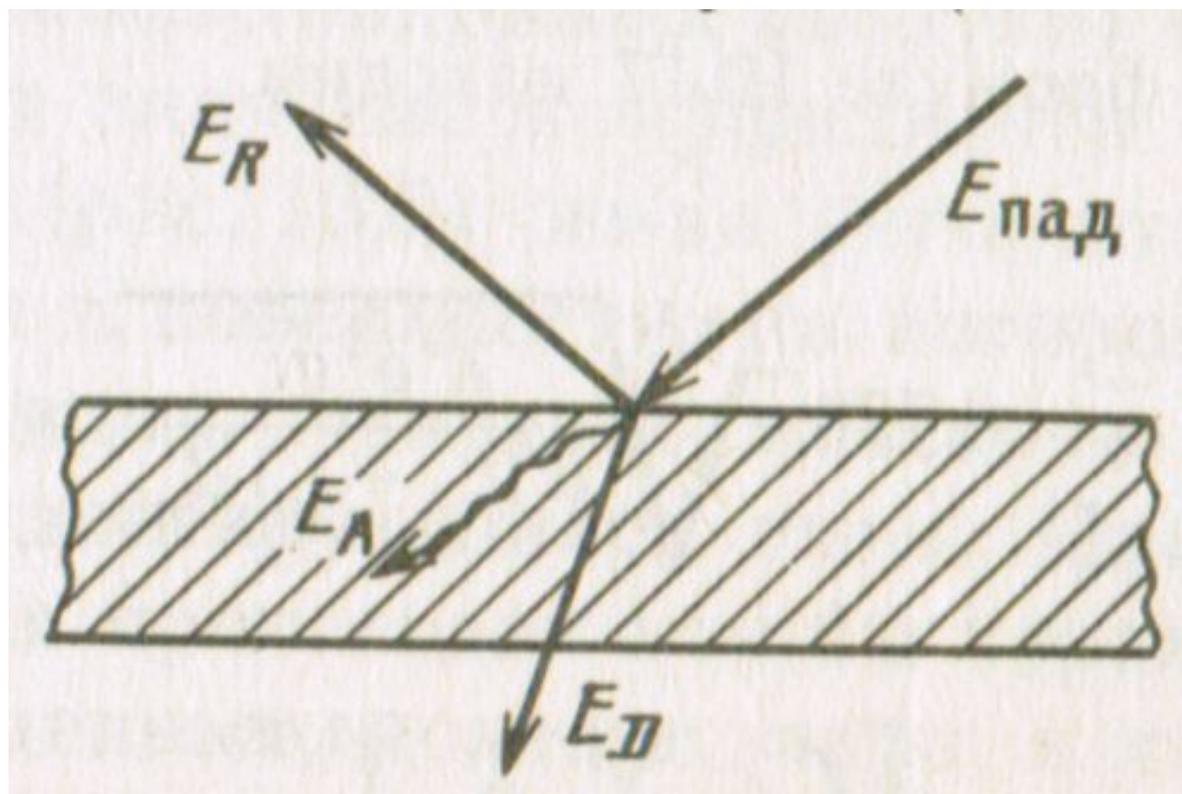
При температурах, с какими обычно имеют дело в технике, основное количество энергии излучается при длине волны 0,8-80 мкм. Эти лучи принято называть тепловыми (инфракрасными).

# Основные понятия

Тепловой поток, излучаемый на всех длинах волн с единицы поверхности тела по всем направлениям, называется поверхностной плотностью потока интегрального излучения  $E$ , Вт/м<sup>2</sup>. Она определяется природой данного тела и его температурой. Это собственное излучение тела.

# Основные понятия

## Распределение лучистой энергии



# Основные понятия

Часть энергии излучения  $E_{пад}$ , падающей на тело, поглощается ( $E_A$ ), часть отражается ( $E_R$ ) и часть проникает сквозь него ( $E_D$ ).

Таким образом,

$$E_A + E_R + E_D = E_{пад} \quad (1)$$

Это уравнение теплового баланса можно записать в безразмерной форме:

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

# Основные понятия

$A = E_A/E_{\text{пад}}$  - коэффициент поглощения,  
 $R = E_R/E_{\text{пад}}$  - коэффициентом отражения,  
 $D = E_D/E_{\text{пад}}$  - коэффициентом пропускания.

Тело, поглощающее все падающее на него излучение, называется абсолютно черным. Для этого тела  $A = 1$ .

Тела, для которых коэффициент  $A < 1$  и не зависит от длины волны падающего излучения, называются серыми.

Для абсолютно белого тела  $R = 1$ ,  
для абсолютно прозрачного  $D = 1$ .

# Основные понятия

Если поверхность поглощает тепловые лучи, но не поглощает световые, она не кажется черной. Более того, наше зрение может воспринимать такую поверхность как белую, например снег, для которого  $A = 0,98$ .

Стекло, прозрачное в видимой части спектра, почти не прозрачно для тепловых лучей ( $A = 0,94$ ).

# Основные понятия

Твердые и жидкие тела в большинстве излучают энергию всех длин волн т.е. имеют сплошной спектр излучения (хотя наибольшее количество энергии испускается в пределах длин волн от 0,8 до 80мкм).

Чистые (неокисленные) металлы и газы характеризуются выборочным — селективным излучением, т. е. излучают энергию только определенных длин волн.

# Основные понятия

В большинстве твердых и жидких тел поглощение тепловых лучей завершается в тонком поверхностном слое, т. е. не зависит от толщины тела. Для этих тел тепловое излучение обычно рассматривается как поверхностное явление.

В газе в силу значительно меньшей концентрации молекул процесс лучистого теплообмена носит объемный характер. Коэффициент поглощения газа зависит от размеров («толщины») газового объема и давления газа, т. е. концентрации поглощающих молекул.

# Основные понятия

Сумма потоков собственного и отраженного телом излучения называется его **эффективным излучением**:

$$E_{эф} = E + E_{пад}. \quad (3)$$

Суммарный процесс взаимного испускания, поглощения, отражения и пропускания энергии излучения в системах тел называется **лучистым теплообменом**

# Закон Стефана-Больцмана

Поверхностная плотность потока интегрального излучения абсолютно черного тела в зависимости от его температуры описывается законом Стефана-Больцмана:

$$E_0 = \sigma_0 T^4$$

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

# Закон Стефана-Больцмана

Для технических расчетов закон Стефана-Больцмана обычно записывают в виде

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

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

# Закон Стефана-Больцмана

*Отношение поверхностной плотности потока собственного интегрального излучения  $E$  данного тела к поверхностной плотности потока интегрального излучения  $E_0$  абсолютно черного тела при той же температуре называется **степенью черноты этого тела**:*

$$\varepsilon = E / E_0$$

# Закон Стефана-Больцмана

Используя понятие степени черноты, можно записать закон Стефана—Больцмана для реального тела:

$$\begin{aligned} E &= \varepsilon E_0 = \\ &= \varepsilon C_0 (T / 100)^4 = \\ &= C (T / 100)^4 \end{aligned}$$

# Закон Кирхгофа

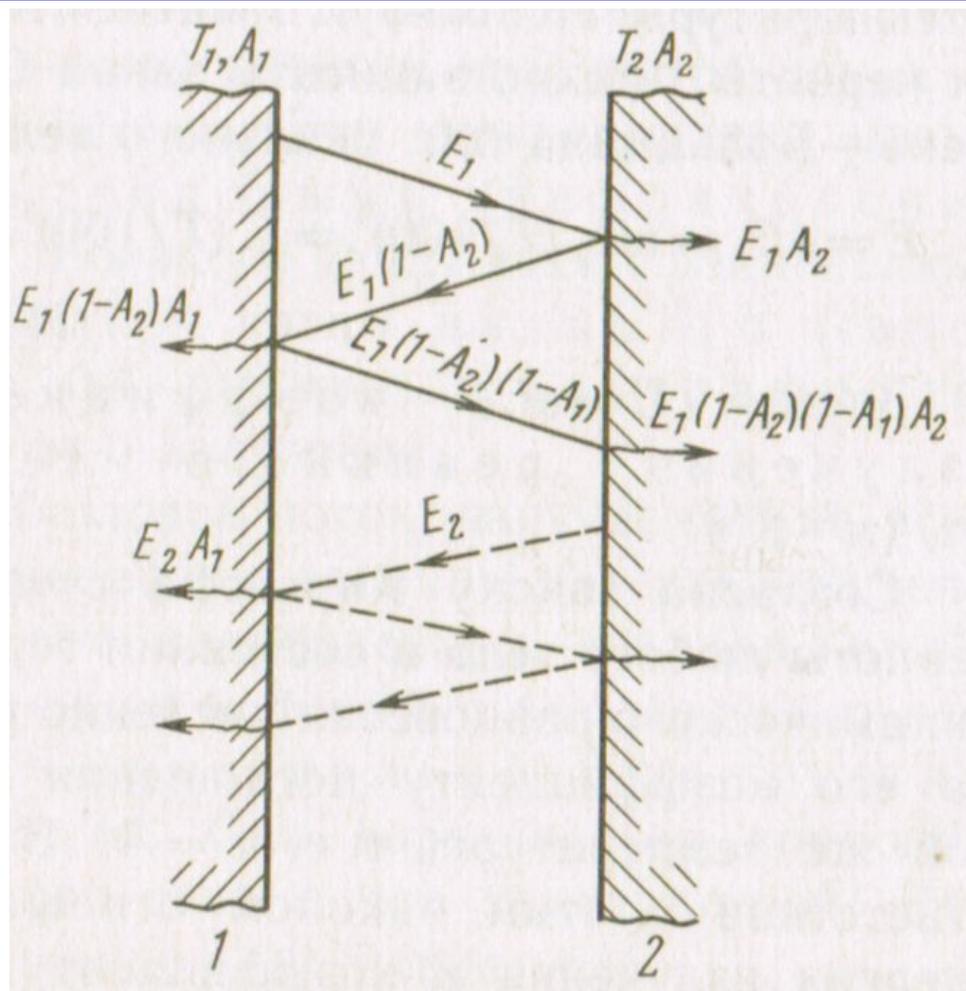
Согласно закону Кирхгофа степень черноты любого тела в состоянии термодинамического равновесия численно равна его коэффициенту поглощения при той же температуре.

В соответствии с этим законом отношение энергии излучения к коэффициенту поглощения ( $E/A$ ) не зависит от природы тела и равно энергии излучения абсолютно черного тела при той же температуре.

Чем больше коэффициент поглощения, тем больше и энергия излучения этого тела при заданной температуре. Если тело мало излучает, то оно мало и поглощает. Абсолютно белое тело не способно ни излучать, ни поглощать энергию.

# ТЕПЛОБМЕН ИЗЛУЧЕНИЕМ СИСТЕМЫ ТЕЛ В ПРОЗРАЧНОЙ СРЕДЕ

Схема лучистого  
теплообмена  
между двумя  
телами



## ТЕПЛООБМЕН МЕЖДУ ПОВЕРХНОСТЯМИ, ОБРАЩЕННЫМИ ДРУГ К ДРУГУ С НЕБОЛЬШИМ ЗАЗОРОМ

Рассмотрим теплообмен между двумя единичными поверхностями, обращенными друг к другу с небольшим зазором, причем  $T_1 > T_2$ . В этой системе  $E_1$  — энергия собственного излучения первого тела на второе,  $E_2$  - второго на первое.

Ввиду малого расстояния между ними практически все излучение каждой из рассматриваемых поверхностей попадает на противоположную.

Для непрозрачного тела ( $D = 0$ ,  $R = 1 - A$ ). Тогда:

$$E_{эф} = E + E_{пад}(1 - A)$$

## ТЕПЛООБМЕН МЕЖДУ ПОВЕРХНОСТЯМИ, ОБРАЩЕННЫМИ ДРУГ К ДРУГУ С НЕБОЛЬШИМ ЗАЗОРОМ

*Каждое из рассматриваемых тел  
имеет эффективное излучение.*

*Для первого тела:*

$$E_{\text{эф1}} = E_1 + E_{\text{эф2}}(1 - A_1)$$

*Для второго тела:*

$$E_{\text{эф2}} = E_2 + E_{\text{эф1}}(1 - A_2)$$

## ТЕПЛООБМЕН МЕЖДУ ПОВЕРХНОСТЯМИ, ОБРАЩЕННЫМИ ДРУГ К ДРУГУ С НЕБОЛЬШИМ ЗАЗОРОМ

Плотность результирующего теплового потока от первого тела на второе равна  $q_{1,2} = E_{эф1} - E_{эф2}$ .

Тогда:

$$q_{1,2} = (A_2 E_1 - A_1 E_2) / (A_1 + A_2 - A_1 A_2)$$

## ТЕПЛООБМЕН МЕЖДУ ПОВЕРХНОСТЯМИ, ОБРАЩЕННЫМИ ДРУГ К ДРУГУ С НЕБОЛЬШИМ ЗАЗОРОМ

Заменяя в данной формуле  $E_1$  и  $E_2$  в соответствии с законом Стефана-Больцмана, получим:

$$q_{1,2} = \frac{A_2 \varepsilon_1 C_0 (T_1 / 100)^4 - A_1 \varepsilon_2 C_0 (T_2 / 100)^4}{A_1 + A_2 - A_1 A_2}$$

# ТЕПЛООБМЕН МЕЖДУ ПОВЕРХНОСТЯМИ, ОБРАЩЕННЫМИ ДРУГ К ДРУГУ С НЕБОЛЬШИМ ЗАЗОРОМ

Заменив  $A$  на  $\varepsilon$ , получим:

$$q_{1,2} = \frac{1}{1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1} C_0 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right]$$

# ТЕПЛООБМЕН МЕЖДУ ПОВЕРХНОСТЯМИ, ОБРАЩЕННЫМИ ДРУГ К ДРУГУ С НЕБОЛЬШИМ ЗАЗОРОМ

Приведенная степень черноты системы тел:

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

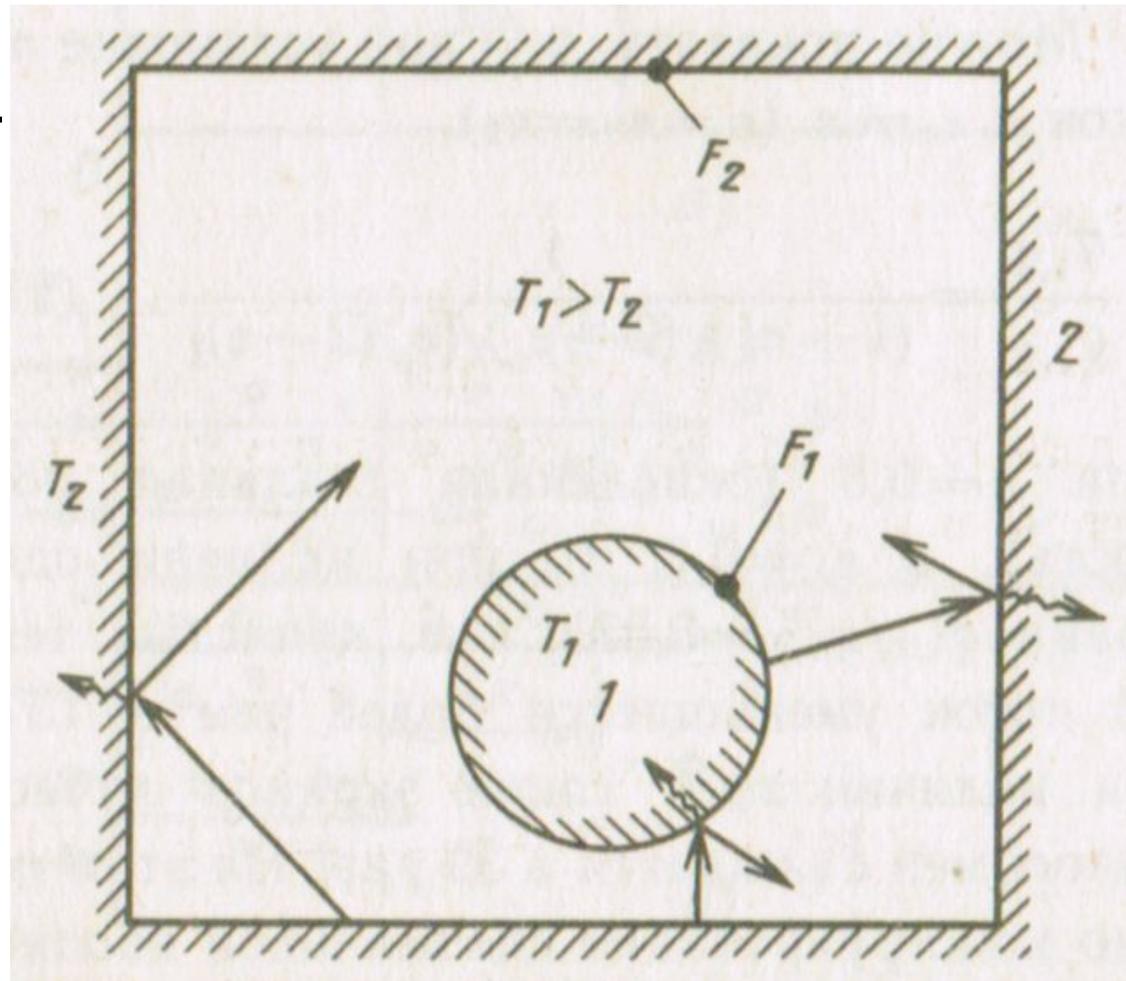
# ТЕПЛООБМЕН МЕЖДУ ПОВЕРХНОСТЯМИ, ОБРАЩЕННЫМИ ДРУГ К ДРУГУ С НЕБОЛЬШИМ ЗАЗОРОМ

Полный тепловой поток через поверхность  $F$ :

$$Q_{1,2} = \varepsilon_{np} C_0 F \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right]$$

# Теплообмен между телами в замкнутом пространстве

Схема лучистого  
теплообмена  
между телами  
в замкнутом  
пространстве



# Теплообмен между телами в замкнутом пространстве

На практике часто одна теплообменная поверхность полностью охватывается другой. В отличие от теплообмена между близко расположенными поверхностями с равными площадями здесь лишь часть излучения поверхности  $F_2$  попадает на  $F_1$ . Остальная энергия воспринимается самой же поверхностью  $F_2$ . Тепловой поток, передаваемый излучением от внутреннего тела к внешнему, можно также определить по той же формуле, если вместо  $F$  подставить поверхность меньшего тела  $F_1$ , а степень черноты системы определить по формуле:

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

# Теплообмен между телами в замкнутом пространстве

В случае теплообмена между произвольными телами каждое из них излучает на другое лишь часть энергии, излучаемой им по всем направлениям. Остальная энергия рассеивается в пространстве или попадает на другие тела. В этом случае в расчетную формулу вводится поправочный коэффициент, называемый коэффициентом облученности тела  $\varphi_{1,2}$  и учитывающий долю излучения первого тела, которая воспринимается вторым телом.

# Теплообмен между телами в замкнутом пространстве

Тогда теплообмен между двумя произвольно расположенными телами может быть рассчитан по формуле

$$Q_{1,2} = \varphi_{1,2} \varepsilon_{np} C_0 F_1 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right]$$

# Теплообмен между телами в замкнутом пространстве

Коэффициент облученности называют также **угловым коэффициентом излучения**.

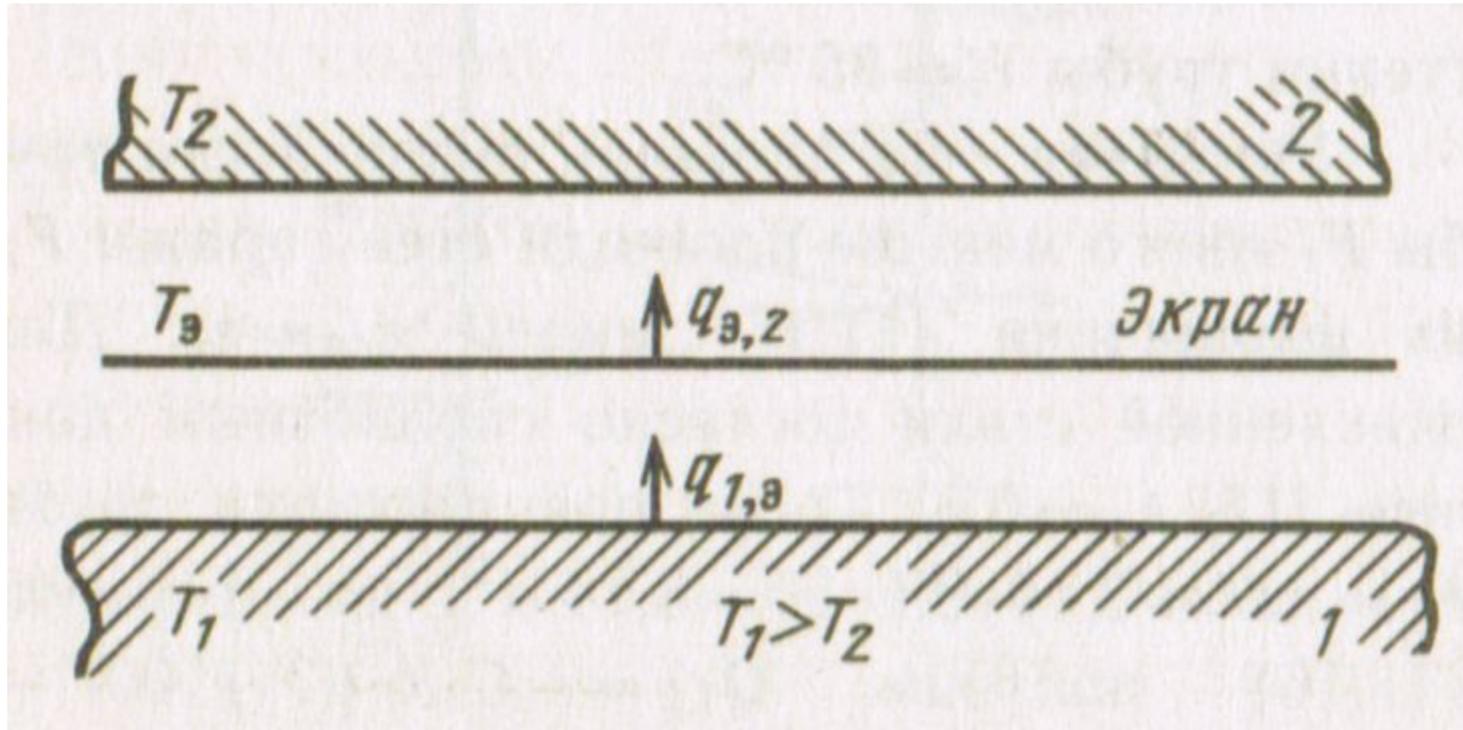
Это чисто геометрический фактор, зависящий только от формы, размеров тел и их взаимного расположения.

Различают коэффициент облученности первым телом вторым и коэффициент облученности вторым телом первым. При этом коэффициент облученности определяется аналитически или экспериментально.

Для большинства частных случаев, имеющих место в технике, значения коэффициентов облученности или соответствующие формулы для их расчета приводятся в справочниках.

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭКРАНОВ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ИЗЛУЧЕНИЯ

Схема лучистого теплообмена между двумя  
поверхностями через экран



# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭКРАНОВ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ИЗЛУЧЕНИЯ

Для защиты от перегрева некоторых элементов теплотехнического оборудования требуется уменьшить лучистый теплообмен. В этом случае между излучателем и обогреваемым элементом ставят перегородки, называемые **экранами**.

Лучшую защиту второго тела от излучения первого обеспечит, абсолютно белый экран, полностью отражающий все падающие на него излучение излучение

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭКРАНОВ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ИЗЛУЧЕНИЯ

Реально можно сделать экран из полированных металлических пластин со степенью черноты 0,05-0,15. В этом случае часть энергии, испускаемой первым телом, будет поглощаться экраном, а остальная — отражаться.

В стационарном режиме вся поглощенная экраном энергия будет излучаться им на второе тело, в результате чего будет осуществляться передача теплоты излучением от первого тела через экран на второе.

Оценим роль экрана, исключив из рассмотрения конвекцию и теплопроводность. Примем, что степени черноты всех тел одинаковые,  $T_1 > T_2$ .

Термическое сопротивление теплопроводности тонкостенного экрана практически равно нулю, поэтому обе его поверхности имеют одинаковые температуры.

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭКРАНОВ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ИЗЛУЧЕНИЯ

Приведенные степени черноты системы:  
«первое тело - экран и экран - второе тело»  
одинаковы и равны:

$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{1/\varepsilon + 1/\varepsilon - 1} = \frac{\varepsilon}{2 - \varepsilon}$$

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭКРАНОВ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ИЗЛУЧЕНИЯ

От более горячей пластины к экрану и от экрана к более холодной поверхности передается теплота, плотность потока которой:

$$q_{1,\text{э}} = \varepsilon_{\text{пр}} C_0 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{э}}}{100} \right)^4 \right];$$

$$q_{\text{э},2} = \varepsilon_{\text{пр}} C_0 \left[ \left( \frac{T_{\text{э}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right]$$

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭКРАНОВ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ИЗЛУЧЕНИЯ

В стационарном режиме:

$$\begin{aligned} q_{1,\varepsilon} &= q_{\varepsilon,2} \Rightarrow \\ \Rightarrow \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_\varepsilon}{100} \right)^4 \right] &= \\ = \left[ \left( \frac{T_\varepsilon}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \end{aligned}$$

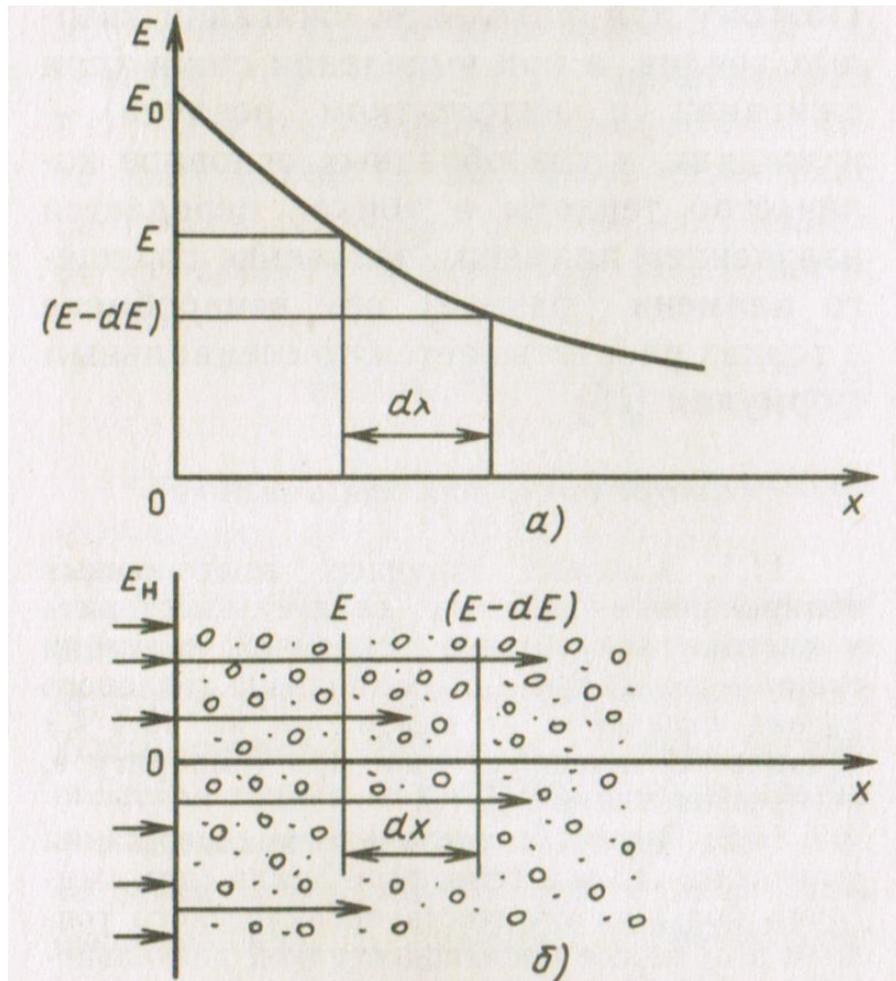
# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭКРАНОВ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ИЗЛУЧЕНИЯ

Исключив  $T_{\text{э}}$ , получим:

$$q_{1,\text{э}} = q_{\text{э},2} =$$
$$= \frac{1}{2} \varepsilon_{\text{пр}} C_0 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{э}}}{100} \right)^4 \right]$$

# Перенос лучистой энергии в поглощающей и излучающей среде

Ослабление  
плоскопараллельного  
излучения в  
запыленной среде



# Перенос лучистой энергии в поглощающей и излучающей среде

Рассмотрим перенос теплоты плоскопараллельным лучом в запыленной среде, например в продуктах сгорания твердого топлива, содержащих частицы золы. Луч направлен вдоль оси  $x$ .

# Перенос лучистой энергии в поглощающей и излучающей среде

Закон Бугера:

$$E = E_n e^{-\eta l},$$

где

$E_n$  - энергия луча в начале пути;

$E$  - энергия луча на расстоянии  $l$  от начала пути;

$\eta$  - коэффициент ослабления (увеличивается с ростом массовой концентрации частиц и уменьшением их размеров).

# Перенос лучистой энергии в поглощающей и излучающей среде

Коэффициент поглощения слоя запыленной среды:

$$A = 1 - e^{-\eta l},$$

## Перенос лучистой энергии в поглощающей и излучающей среде

Процесс распространения лучистой энергии в газовой (незапыленной) среде имеет много общего с вышеописанным процессом в запыленной среде. Роль пылинок играют здесь молекулы газа, концентрация которых увеличивается с ростом давления газа.

# Перенос лучистой энергии в поглощающей и излучающей среде

Различные газы обладают различной способностью излучать и поглощать энергию. Одно- и двухатомные газы (кислород, азот и др.) практически прозрачны для теплового излучения. Значительной способностью излучать и поглощать энергию излучения обладают многоатомные газы: диоксид углерода  $\text{CO}_2$  и серы  $\text{SO}_2$ , водяной пар  $\text{H}_2\text{O}$ , аммиак  $\text{NH}_3$  и др.

Наибольший интерес представляют сведения об излучении  $\text{CO}_2$  и водяного пара, образующихся при сгорании топлив. Интенсивностью их излучения в основном определяется теплообмен раскаленных газообразных продуктов сгорания с обогреваемыми телами в топках.

# Перенос лучистой энергии в поглощающей и излучающей среде

Имеющиеся в продуктах сгорания раскаленные твердые частицы (зола и т. п.) придают пламени видимую окраску, и его степень черноты может быть большой, достигая значений 0,6—0,7. Поэтому при факельном сжигании твердых топлив, а при выделении сажи (при сжигании с недостатком воздуха) и жидких, и газообразных основное количество теплоты в топках передается излучением пламени. Излучение горящего пламени (факела) при теплообмене в топках рассчитывается по специальным формулам.