

ТЕПЛОМАССООБМЕН

Теплообмен излучением (часть 2)

Лекция № 12

2016 год

План

- 1. Теплообмен излучением между твердыми телами.
- 2. Угловые коэффициенты излучения.
- 3. Расчет теплообмена излучением в системе, образованной тремя поверхностями, одна из которых является адиабатной.
- 4. Экраны. Действия экранов.
- 5. Излучение и поглощение в газах.
- 6. Сложный теплообмен.

1. Теплообмен излучением между твердыми телами

- Поскольку каждое тело при любой температуре испускает электромагнитные волны, при подсчете его полной энергии следует учитывать и энергию собственного излучения тела E_1 .
- Если со стороны других тел на данное тело падает излучение с энергией E_2 , из которой $A_1 E_2$ поглощается, а $(1 - A_1) \cdot E_2$ отражается, то (поскольку $D = 0$)

$$E_{\text{эф1}} = E_1 - A_1 \cdot E_2 = E_1 + (1 - A_1) \cdot E_2 = E_1 + R_1 \cdot E_2 \quad (1)$$

называют *эффективным излучением тела*.

- **Эффективное излучение тела** равно сумме *собственного и отраженного излучений тела*.

Рассмотрим методику расчета теплообмена излучением твердых тел на простейшем примере двух серых плоских параллельных пластин, температуры которых равны соответственно T_1 и T_2 ($T_1 > T_2$), а коэффициенты поглощения A_1 и A_2 .

- Будем считать расстояние между пластинами таким, что излучение каждой из них полностью достигает другой.

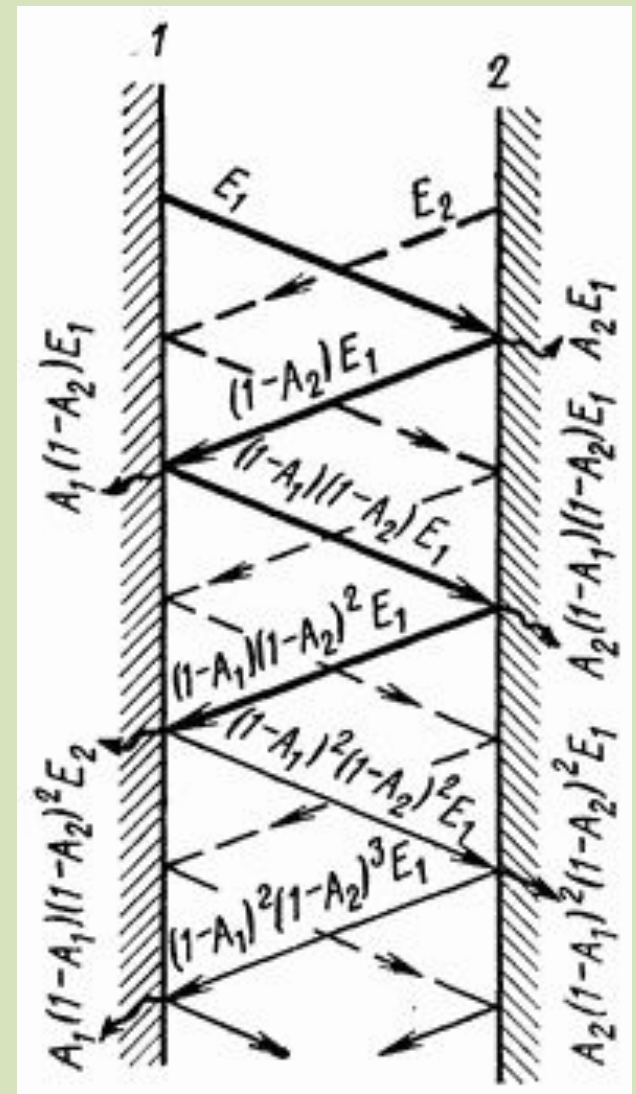


Схема теплообмена излучением между двумя плоскими параллельными пластинами

- Величина теплообмена излучением между пластинами равна:

$$q_{\text{и}} = E_{\text{и}} = E_{\text{эф1}} - E_{\text{эф2}},$$

где $q_{\text{и}} = E_{\text{и}}$ – мощность теплового потока излучением.

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

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

(2)

- Решая систему уравнений (2) относительно $E_{\text{эф1}}$ и $E_{\text{эф2}}$, подставив вместо *интегральных плотностей излучения* E_1 и E_2 их выражения из закона Стефана–Больцмана и введя вместо *коэффициентов поглощения* A_1 и A_2 соответственно коэффициенты *черноты для серых тел* ε_1 и ε_2 (так как $A = \varepsilon$), получим после преобразований

$$Q_{\text{и}} = E \cdot F = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1} \cdot c_0 \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot F \quad (3)$$

где $Q_{\text{и}}$ – *тепловой поток излучения*.

• Здесь

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

– **температурный множитель,**

• а

$$\epsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1}$$

– **приведенная степень черноты системы тел;**

величина

$$c_{\text{пр}} = c_0 \cdot \epsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{c_0 \cdot \epsilon_1} + \frac{1}{c_0 \cdot \epsilon_2} - \frac{1}{c_0}} = \frac{Q_{\text{и}}}{\theta \cdot F}$$

называется приведенным коэффициентом излучения.

- Приведенный коэффициент излучения представляет собой количество энергии, перенесенной излучением от 1-й пластины ко 2-й за 1 с при условии, что поверхность каждой пластины равна 1 м^2 , а температурный множитель – 1 К.

- Следовательно, формулу (3) можно переписать в следующем виде:

$$Q_{\text{и}} = \varepsilon_{\text{пр}} \cdot c_0 \cdot \theta \cdot F = c_{\text{пр}} \cdot \theta \cdot F, \quad [Q_{\text{и}}] = 1 \text{ Вт},$$

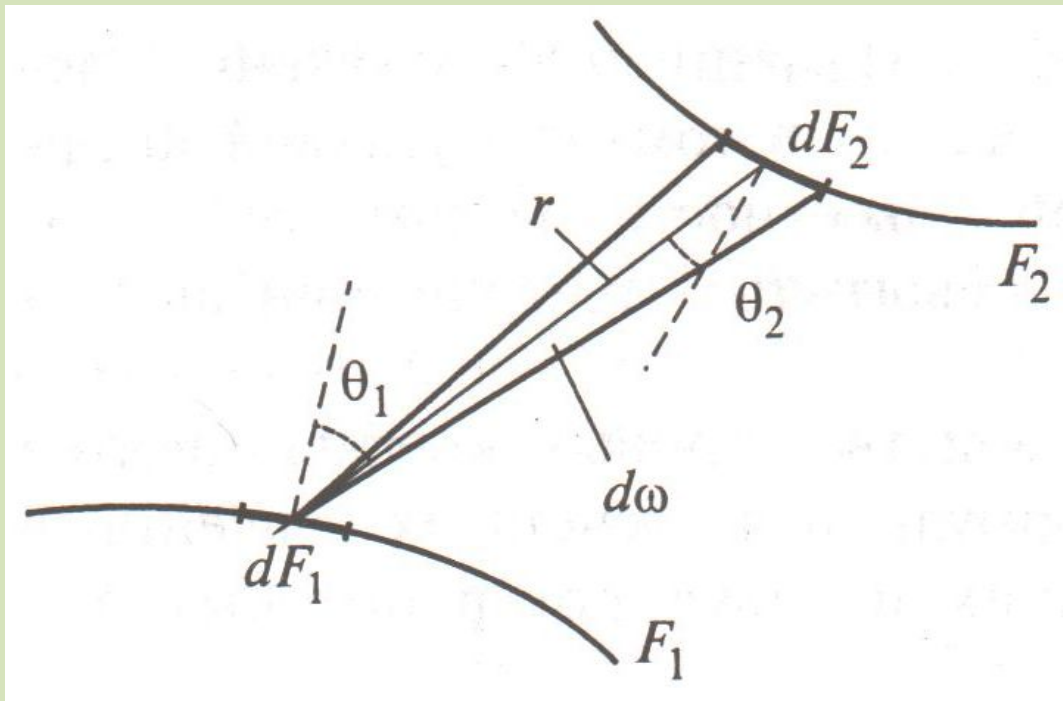
- или

$$Q'_{\text{и}} = c'_{\text{пр}} \cdot \theta \cdot F \cdot \tau, \quad [Q'_{\text{и}}] = 1 \text{ Дж}.$$

- Значит, для повышения интенсивности теплообмена излучением надо увеличить $\varepsilon_{\text{пр}}$ и θ , т.е. степень черноты участвующих в теплообмене поверхностей и разность их температур.

2. Угловые коэффициенты излучения

Законы излучения абсолютно черного тела и их модификации для серых тел позволяют определить плотность потока полусферического излучения, испускаемого телом в пределах телесного угла 2π стерadian. При расчетах теплообмена излучением в системе тел надо знать, какая часть испущенного каким-либо телом излучения попадает на поверхность другого тела, входящего в обменивающуюся теплом систему. Для этого служат *тепловые коэффициенты излучения*.



**Рисунок к расчету
углового
коэффициента
излучения методом
прямого
интегрирования**

- Определим угловой коэффициент излучения с некоторой k -й (излучающей) зоны на некоторую i -ю (лучевоспринимающую) зону.
- Выделим в пределах этих зон элементарные участки dF_k (dF_1) и dF_i (dF_2), назовем направление соединяющей их прямой направлением наблюдения и введем следующие обозначения:

- r – расстояние между элементарными участками;
- θ_k (θ_1) и θ_i (θ_2) – углы между нормальными к этим участкам и направлением наблюдения;

$$d\omega = \frac{dF_i \cdot \cos \theta_i}{r^2}$$

– элементарный телесный угол, под которым лучевоспринимающий участок виден из точки расположения излучающего участка.

- Найдем поток $d^2 Q_{ki}^{\text{пад}}$, падающий с участка dF_k (dF_1) на dF_i (dF_2).

- Используя понятия угловой плотности и яркости эффективного излучения, допущение о диффузном характере эффективного излучения и условие постоянства плотности потока эффективного излучения $dq_{ki}^{\text{эф}}$ в пределах k -й зоны, получим

$$d^2 Q_{ki}^{\text{пад}} = q_{ki}^{\text{эф}} d\omega dF_k = B_k^{\text{эф}} \cos \theta_k d\omega dF_k =$$

$$\frac{q_k^{\text{эф}}}{\pi} \cos \theta_k d\omega dF_k = \frac{q_k^{\text{эф}}}{\pi} \cos \theta_k \frac{dF_i \cos \theta_i}{r^2} dF_k =$$

$$= \frac{Q_k^{\text{эф}}}{F_k} \frac{\cos \theta_k \cos \theta_i}{\pi r^2} dF_k dF_i.$$

- Интегрируя элементарный поток $d^2 Q_{ki}^{\text{пад}}$ по поверхностям F_k и F_i , найдем полную величину потока излучения, падающего с k -й на i -ю зону

$$Q_{ki}^{\text{пад}} = \frac{Q_k^{\text{эф}}}{F_k} \int_{F_k} \int_{F_i} \frac{\cos \theta_k \cos \theta_i}{\pi r^2} dF_k dF_i,$$

откуда следует выражение для искомого углового коэффициента

$$\Phi_{ki} = \frac{1}{F_k} \int_{F_k} \int_{F_i} \frac{\cos \theta_k \cos \theta_i}{\pi r^2} dF_k dF_i, \quad (1)$$

- Из формулы (1) следует, что в диффузном приближении угловые коэффициенты излучения зависят только от размеров, формы и взаимного расположения зон, т.е. **являются чисто геометрическими параметрами системы.**

Угловые коэффициенты являются геометрической характеристикой теплообменивающейся системы.

- Угловым коэффициентом излучения Φ_{ki} называется отношение части потока эффективного излучения k -й зоны, попадающей на i -ю зону $Q_{ki}^{\text{пад}}$ к полной величине потока эффективного излучения k -й зоны:

$$\Phi_{ki} = \frac{Q_{ki}^{\text{пад}}}{Q_k^{\text{эф}}}.$$

- Другими словами, угловой коэффициент излучения Φ_{ki} показывает, какая доля эффективного излучения k -й зоны падает на i -ю зону.
- Угловые коэффициенты излучения** обладают рядом свойств, важнейшими из которых являются следующие:

- Свойство взаимности:

$$F_k \cdot \Phi_{ki} = F_i \cdot \Phi_{ik} \quad (2)$$

- Если рассматриваемая система находится в состоянии термодинамического равновесия, из законов термодинамики следует, что для каждой пары зон
- Найдем связь между коэффициентом излучения серого тела C и коэффициентом излучения для абсолютно черного тела c_0 :

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

т.
е.

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

- **Свойство замкнутости:**

$$\sum_{k=1}^n \Phi_{ik} = 1 \quad (3)$$

является следствием закона сохранения энергии и заключается в том, что в замкнутой системе сумма угловых коэффициентов с какой-либо поверхности на все остальные (включая ее самое) равна единице.

- **Свойство невогнутости:**

$$\Phi_{ik} = 0 \quad (4)$$

заключается в том, что плоское или выпуклое тело не может излучать само на себя.

- **Свойство аддитивности:**

$$\Phi_{ik} = \Phi_{ik_1} + \Phi_{ik_2} + \dots + \Phi_{ik_n} \quad (5)$$

заключается в том, что если поверхность k состоит из n зон, так что

$$F_k = F_{k_1} + F_{k_2} + \dots + F_{k_n},$$

То все угловые коэффициенты взаимно независимы и суммируются в обычном арифметическом смысле.

Нахождение угловых коэффициентов является одной из самых сложных задач теории радиационного теплообмена и в общем случае они определяются четырехкратным интегрированием, либо с использованием методов статистических испытаний. В ряде простейших случаев, угловые коэффициенты легко определить, используя выше приведенные свойства.

Для системы, состоящей из двух параллельных бесконечных пластин 1 и 2 (рис. а), аналогичной рабочему пространству современных протяженных печей, печей с шагающим подом с плоским сводом и т. п., очевидно, что **по свойству невогнутости**:

$$\varphi_{11} = \varphi_{22} = 0 \quad (6)$$

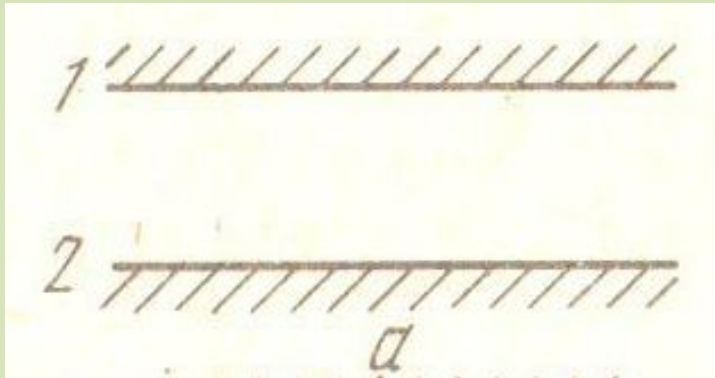
Тогда по **свойству замкнутости**:

$$\varphi_{11} + \varphi_{12} = 1 \quad \text{и}$$

$$\varphi_{22} + \varphi_{21} = 1$$

или с учетом соотношения (6)

$$\varphi_{12} = \varphi_{21} = 1 \quad (7)$$



Схемы б и в характерны для электропечей сопротивления.

Схема з – для секционных электропечей. Эти схемы аналогичны с точки зрения геометрии излучения. В обоих случаях по свойству невогнутости

$$\Phi_{11} = 0$$

И по свойству замкнутости

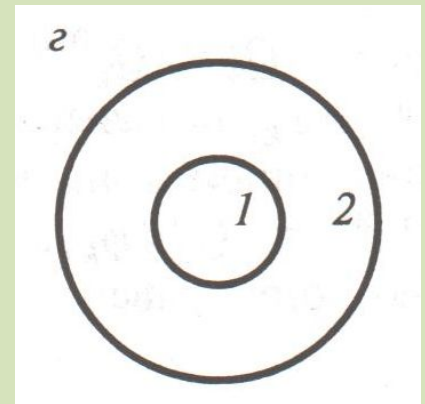
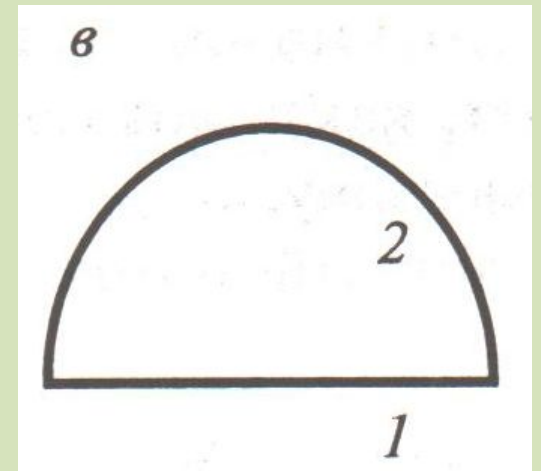
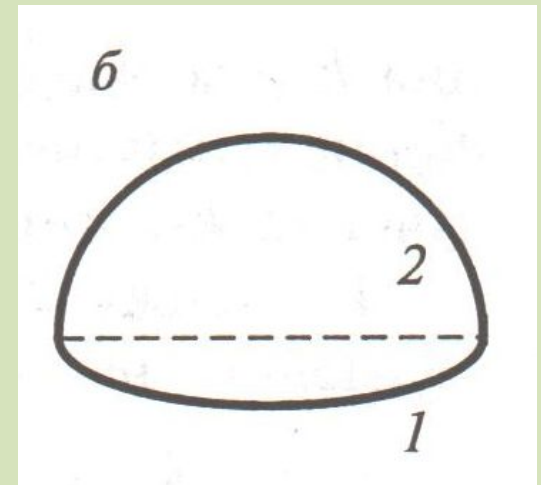
$$\Phi_{12} = 1$$

Теперь по свойству взаимности можно записать

$$F_1 \cdot \Phi_{12} = F_2 \cdot \Phi_{21}$$

или

$$\Phi_{21} = \Phi_{12} \cdot \left(\frac{F_1}{F_2} \right) = \frac{F_1}{F_2} \quad (8)$$



С учетом свойства замкнутости для поверхности 2 запишем

$$\varphi_{21} + \varphi_{22} = 1$$

откуда

$$\varphi_{22} = 1 - \varphi_{21} = 1 - \frac{F_1}{F_2}. \quad (9)$$

3. Расчет теплообмена излучением в системе, образованной тремя поверхностями, одна из которых является адиабатной

- Рассмотрим замкнутую систему, образованную тремя поверхностями.
- Пусть температуры первой и второй поверхностей имеют заданные значения T_1 и T_2 , а третья поверхность является адиабатной:

$$Q_3^p = 0.$$

- Участие адиабатной поверхности в радиационном теплообмене (теплообмене излучением) заключается в том, что она поглощает часть падающего на нее излучения, но полностью компенсирует эту часть собственным излучением, так что

$$Q_3^{\text{эф}} = Q_3^{\text{пад}}.$$

$Q^{\text{эф}}$

- поток эффективного излучения.

- Будем считать, что в пределах каждой из указанных поверхностей их степень черноты, температуры и плотности потоков эффективного излучения имеют постоянные значения.
- Геометрическая конфигурация системы описывается известными коэффициентами излучения $\varphi_{ki} (k, i = 1, 2, 3)$.

• Требуется рассчитать потоки результирующего излучения Q_1^p, Q_2^p и температуру T_3 .

- Отметим, что $Q_1^p + Q_2^p + Q_3^p = 0$,
- достаточно определить поток результирующего излучения на первой поверхности Q_1^p .

- Запишем зональные уравнения относительно потоков эффективного излучения для первой и второй поверхности (зон I-го рода)

$$\left. \begin{aligned} Q_1^{\text{эф}} &= (1 - \varepsilon_1) (Q_1^{\text{эф}} \varphi_{11} + Q_2^{\text{эф}} \varphi_{21} + Q_3^{\text{эф}} \varphi_{31}) + \varepsilon_1 \sigma_0 T_1^4 F_1 \\ Q_2^{\text{эф}} &= (1 - \varepsilon_2) (Q_1^{\text{эф}} \varphi_{12} + Q_2^{\text{эф}} \varphi_{22} + Q_3^{\text{эф}} \varphi_{32}) + \varepsilon_2 \sigma_0 T_2^4 F_2 \end{aligned} \right\}. \quad (1)$$

- Для третьей адиабатной поверхности (зоны II-го рода)

$$Q_3^{\text{эф}} = Q_1^{\text{эф}} \varphi_{13} + Q_2^{\text{эф}} \varphi_{23} + Q_3^{\text{эф}} \varphi_{33},$$

- Откуда следует, что

$$Q_3^{\text{эф}} = Q_1^{\text{эф}} \frac{\varphi_{13}}{1 - \varphi_{33}} + Q_2^{\text{эф}} \frac{\varphi_{23}}{1 - \varphi_{33}}. \quad (2)$$

- Подставим выражение (2) в уравнения (1), после алгебраических преобразований получим систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} Q_1^{\text{эф}} &= (1 - \varepsilon_1) (Q_1^{\text{эф}} \tilde{\varphi}_{11} + Q_2^{\text{эф}} \tilde{\varphi}_{21}) + \varepsilon_1 \sigma_0 T_1^4 F_1 \\ Q_2^{\text{эф}} &= (1 - \varepsilon_2) (Q_1^{\text{эф}} \tilde{\varphi}_{12} + Q_2^{\text{эф}} \tilde{\varphi}_{22}) + \varepsilon_2 \sigma_0 T_2^4 F_2 \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

где

$$\tilde{\varphi}_{ki} = \varphi_{ki} + \frac{\varphi_{k3}}{1 - \varphi_{33}} \varphi_{3i}, \quad k, i = 1, 2$$

– приведенные угловые коэффициенты излучения в системе двух поверхностей, учитывающие переизлучение на третьей (адиабатной) поверхности.

□ **Зоны I-го рода**, для которых по условию заданы температуры, а требуется определить потоки результирующего излучения.

□ **Зоны II-го рода**, для которых заданные значения имеют потоки результирующего излучения, а определению подлежат температуры.

□ **Зоны III-го рода**, для которых на основании уравнений теплового баланса устанавливают связи между потоками результирующего излучения и температурами.

- Система уравнений (3) отличается от системы уравнений, описывающей радиационный теплообмен в замкнутой системе, образованной двумя поверхностями, только тем, что вместо исходных угловых коэффициентов излучения в зональных уравнениях фигурируют приведенные угловые коэффициенты излучения.
- Запишем выражение для потока результирующего излучения на первой поверхности

$$Q_1^p = \tilde{\epsilon}_1 \sigma_0 (T_2^4 - T_1^4) F_1 \quad (4)$$

где

$$\tilde{\epsilon}_1 = \frac{\tilde{\varphi}_{12}}{1 + \left(\frac{1}{\epsilon_1} - 1 \right) \tilde{\varphi}_{12} + \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right) \tilde{\varphi}_{21}} \quad (5)$$

– приведенная степень черноты рассматриваемой системы.

- В данном случае интенсивность радиационного теплообмена пропорциональна разности четвертых степеней первых двух поверхностей, а конкретные оптико-геометрические особенности системы, включая наличие третьей адиабатной поверхности, влияют лишь на приведенную степень черноты.
- Для расчета температуры адиабатной поверхности необходимо по формуле (2) найти поток эффективного излучения и используя соотношение

$$Q^p = \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} (Q^{\text{эф}} - \sigma_0 T^4 F),$$

из этого соотношения следует, что

$$T_3 = \left(\frac{Q_3^{\text{эф}}}{\sigma_0 \cdot F} \right)^{1/4} = \left(\frac{q_3^{\text{эф}}}{\sigma_0} \right)^{1/4}. \quad (6)$$

- Полученные результаты свидетельствуют о независимости интенсивности радиационного теплообмена от степени черноты адиабатной поверхности.
- Это объясняется тем, что изменение ε_3 приводит к одинаковому (в сером приближении) изменению потоков собственного и поглощенного излучения, так что величина потока эффективного излучения адиабатной поверхности остается неизменной.

В качестве примера проведем расчет потерь тепла излучением через окно в стенке печи.

- Обозначим через T_1 температуру окружающей среды, T_2 – эффективную температуру рабочего пространства печи и припишем эти температуры воображаемым абсолютно черным поверхностям, замыкающим оконный проем с наружной и внутренней стороны.
- Потери тепла через окно выражаются в этом случае потоком результирующего излучения Q_1^p в замкнутой системе, образованной тремя поверхностями: двумя абсолютно черными и третьей (адиабатной) – внутренней поверхностью футеровки.
- Подставив в выражение (5) для приведенной степени черноты значения $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 1$, получим $\tilde{\varepsilon}_1 = \tilde{\varphi}_{12}$.

- С учетом свойств угловых коэффициентов излучения и соображений симметрии несложно показать, что приведенный угловой коэффициент излучения $\tilde{\varphi}_{12}$, который в данном случае называется **коэффициентом диафрагмирования** и обозначается через Φ , равен

$$\Phi \equiv \tilde{\varphi}_{12} = \frac{1 + \varphi_{12}}{2}. \quad (7)$$

- Тогда по формуле (4) окончательно получим

$$Q_1^p = \sigma_0 (T_2^4 - T_1^4) \cdot F_1 \cdot \Phi, \quad (8)$$

где F_1 — площадь наружной поверхности окна.

- Исходный коэффициент излучения φ_{12} в выражении (7) зависит от толщины стенки, формы и размеров отверстия. В рассматриваемой задаче **коэффициент диафрагмирования Φ** является функцией только геометрических размеров и формы окна.

4. Экраны. Действия экранов

Довольно часто встречаются случаи, когда требуется уменьшить передачу теплоты потоком излучения. Например, нужно оградить рабочих от действия тепловых лучей в цехах, где имеются поверхности с высокими температурами. В других случаях необходимо оградить деревянные части зданий от потока излучения в целях предотвращения воспламенения. Следует защищать от потока излучения термометры, так как в противном случае они дают неверные показания.

- Когда необходимо уменьшить передачу теплоты лучистым потоком, прибегают к установке **экранов**.
- **Обычно экран** представляет собой тонкий металлический лист с большой отражательной способностью.
- *Температуры обеих поверхностей экрана можно считать одинаковыми.*

Рассмотрим действие экрана между двумя плоскими безграничными параллельными поверхностями, причем передачей теплоты конвекцией пренебрегаем.

Поверхности стенок и экрана считаем одинаковыми.

- Температуры стенок T_1 и T_2 *поддерживаются постоянными*, причем $T_1 > T_2$.
- Допускаем, что *коэффициенты излучения стенок и экрана равны между собой*. Тогда приведенные коэффициенты излучения между поверхностями без экрана, между первой поверхностью и экраном, экраном и второй поверхностью равны между собой.

Поверхностную плотность теплового потока излучением, передаваемую от первой поверхности ко второй (без экрана), определяем из уравнения:

$$q_0 = C_{\text{пр}} \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]. \quad (1)$$

Поверхностную плотность теплового потока излучением, передаваемую от первой поверхности к экрану, находим по формуле:

$$q_1 = C_{\text{пр}} \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{эк}}}{100} \right)^4 \right],$$

а от экрана ко второй поверхности – по уравнению

$$q_2 = C_{\text{пр}} \cdot \left[\left(\frac{T_{\text{эк}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right].$$

При установившемся тепловом равновесии $q_1 = q_2$, поэтому

$$C_{\text{пр}} \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{эк}}}{100} \right)^4 \right] = C_{\text{пр}} \cdot \left[\left(\frac{T_{\text{эк}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right],$$

Откуда

$$\left(\frac{T_{\text{эк}}}{100} \right)^4 = \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 + \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] / 2,$$

Подставляя полученную температуру экрана в любое из уравнений для плотности теплового потока излучением, получаем:

$$q_{1,2} = C_{\text{пр}} \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] / 2. \quad (2)$$

Сравнивая уравнения (1) и (2), находим, что установление одного экрана при принятых условиях уменьшает теплоотдачу излучением в два раза:

$$q_{1,2} = \frac{q_0}{2} \quad (3)$$

Можно доказать, что установка двух экранов уменьшает теплоотдачу втрое, установка трех экранов уменьшает теплоотдачу вчетверо и т. д.

□ Значительный эффект уменьшения теплообмена лучистым потоком получается при применении экрана из полированного металла, тогда

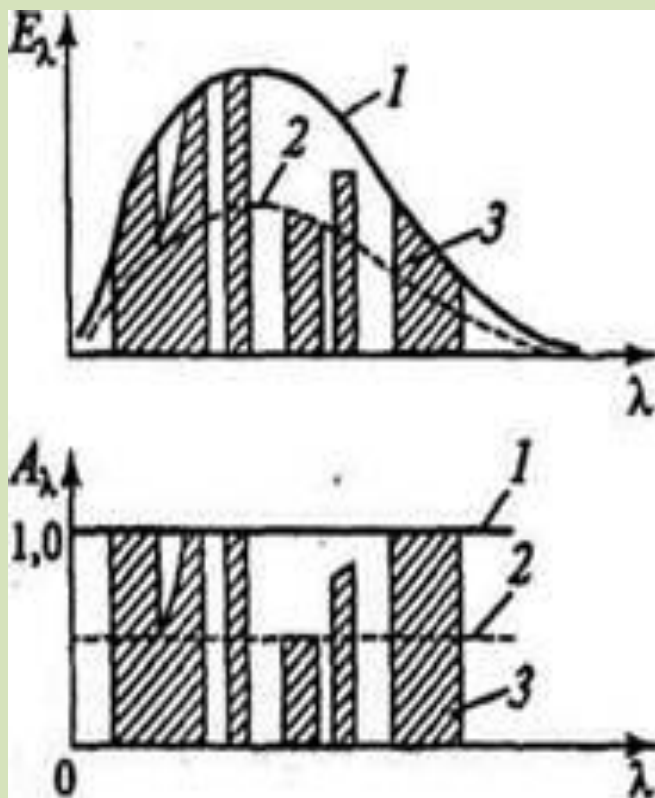
$$q_1 = 0,5 \cdot \left(\frac{C'_{\text{пр}}}{C_{\text{пр}}} \right) q_0, \quad (4)$$

где $C'_{\text{пр}}$ — приведенный коэффициент излучения между поверхностью и экраном; $C_{\text{пр}}$ — приведенный коэффициент излучения между поверхностями.

5. Излучение и поглощение в газах

Излучение твердых тел распределено хотя и неравномерно, но по всем длинам волн, т.е. имеет **сплошной спектр**.

Газы излучают и поглощают лучи только в определенных для каждого газа интервалах длин волн, т.е. обладает **избирательной** излучательно-поглощательной способностью и имеет спектр в виде полос — **полосовой**.



Верхний рисунок – спектры излучения, нижний – поглощения:

1 - абсолютно черного тела,
2 – серого тела, 3 – газа

Это объясняется тем, что газы излучают и поглощают свободными молекулами, а твердые тела – огромным числом связанных молекул.

Уровни энергии электронов в свободных молекулах имеют вполне определенные для каждого вещества значения.

При переходе электронов с одного уровня на другой каждый элемент поглощает или излучает фотон определенной энергии (или длины волны).

- Когда же несколько молекул образуют твердое тело, электроны каждой из них находятся под действием сил со стороны соседних атомов, а это приводит к тому, что некоторые энергетические уровни становятся размытыми или перекрывают друг друга.
- Таким образом, в излучении и поглощении твердого тела участвуют электроны не каких-то определенных энергий, а всех возможных.

Одноатомные и **двухатомные** газы полностью пропускают тепловое излучение, являются *диатермичными*, поэтому поглощение в них *обычно не учитывают*.

□ Трехатомные и многоатомные газы *обладают излучательно-поглощательной способностью* в определенном диапазоне длин волн.

□ Например: основные продукты сгорания органического топлива CO_2 и H_2O имеют в своем спектре три полосы в диапазоне волн $\Delta\lambda = 2,24 \div 30$ мкм.

□ Другой особенностью теплообмена излучением в газах является излучение и поглощение молекул всей массы газа, а не какой-то определенной поверхности, как это свойственно твердым телам.

□ Эта особенность газов серьезно затрудняет расчет теплообмена излучением и делает его весьма приближенным.

- Для ориентировочного расчета излучения газов в пустоту можно использовать уравнение Стефана–Больцмана

$$E_{\Gamma} = c_0 \cdot \epsilon_{\Gamma} \cdot \left(\frac{T_{\Gamma}}{100} \right)^4 = c \cdot \left(\frac{T_{\Gamma}}{100} \right)^4, \quad (1)$$

для газов коэффициенты черноты ϵ_{Γ} (или $A_{\Gamma} = \epsilon_{\Gamma}$) зависят:

- от температуры T_{Γ} ;
- от парциального давления данного газа в смеси $p_{i\Gamma}$;
- от пути пробега излучения $l_{\text{и}}$, который часто бывает равен толщине слоя газа δ_{Γ} :

$$\epsilon_{\Gamma} = f(T_{\Gamma}, p_{i\Gamma}, l_{\text{и}}). \quad (2)$$

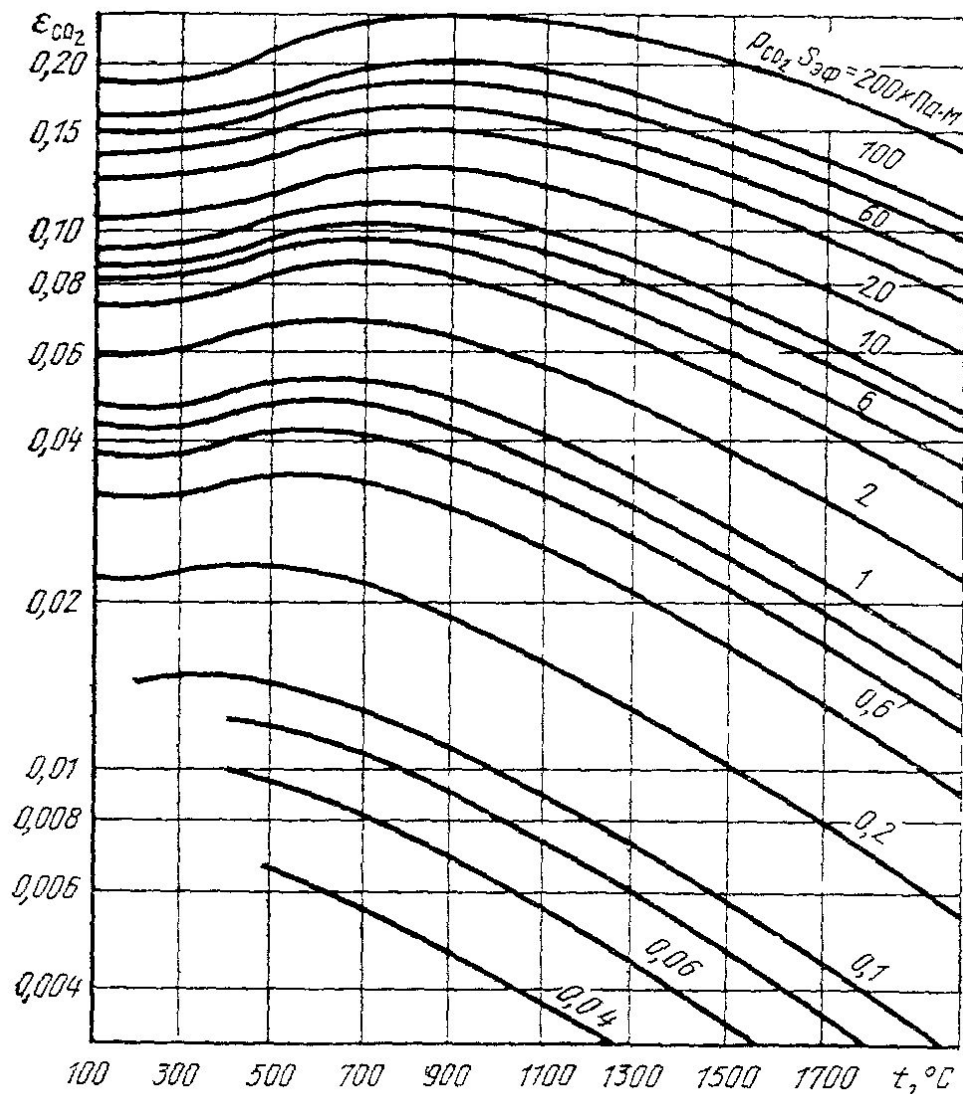
$$\epsilon_{\Gamma} = f(T_{\Gamma}, p_{i\Gamma}, l_{\text{и}}). \quad (2)$$

- Функция (2) для различных газов имеет различный вид, но в любом случае, если ее ввести в уравнение (1), окажется, что интегральная плотность излучения E_{Γ} будет пропорциональна уже не T^4 , а T^n , где $n < 4$.
- Например: для CO_2 $n = 3,5$, а для H_2O $n = 3$.
- Так, для H_2O при $l_{\text{и}} = 0,06 \div 0,8$ м и $t = 400 \div 1300$ °C

$$E_{\text{H}_2\text{O}} = 142 \cdot p^{0,8} \cdot l_{\text{и}}^{0,6} \cdot \left(\frac{T}{100} \right)^3.$$

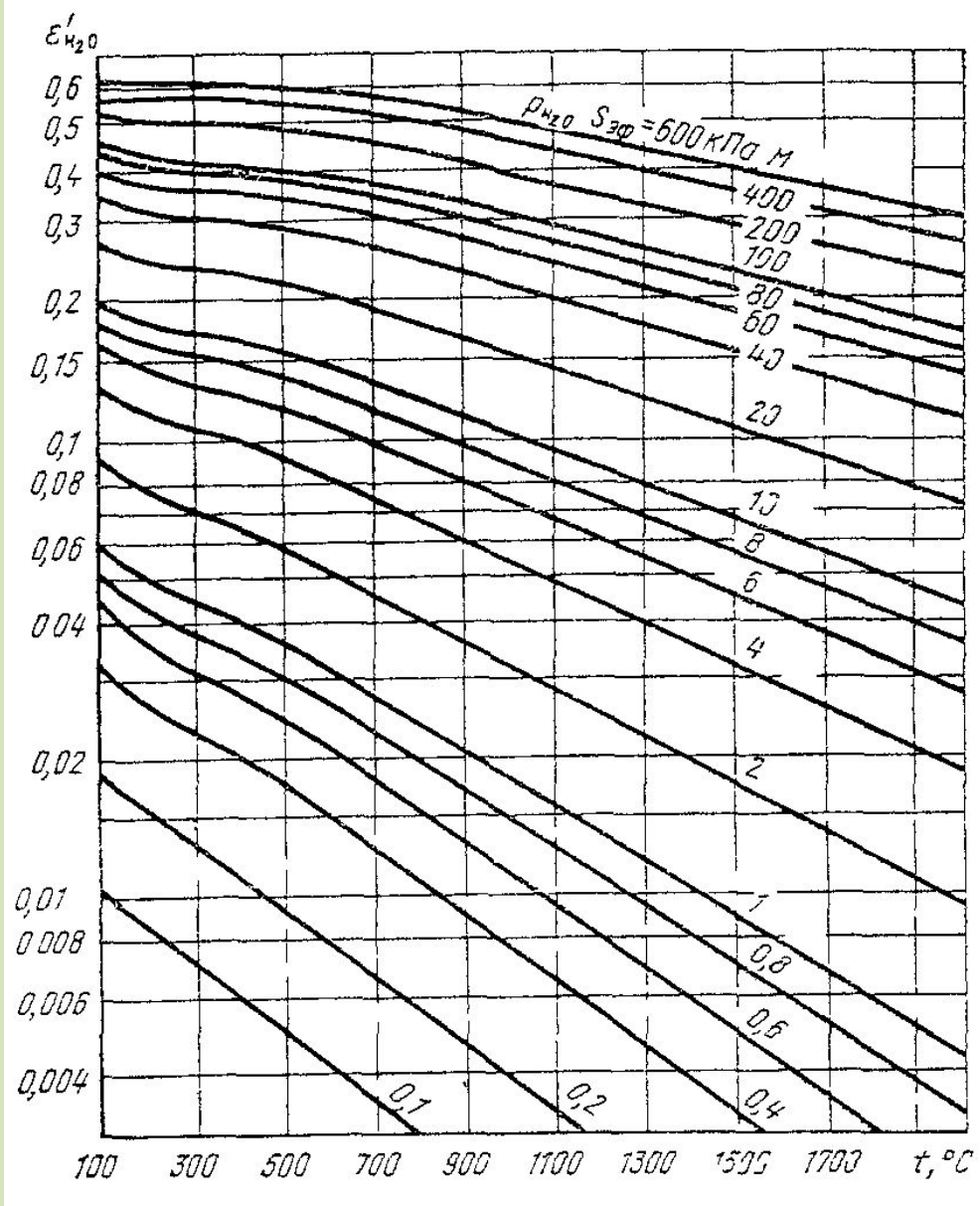
В технических расчетах пользуются аналогичными эмпирическими формулами, справедливыми в определенных условиях.

Степень черноты смеси газов определяется с помощью специальных графиков.

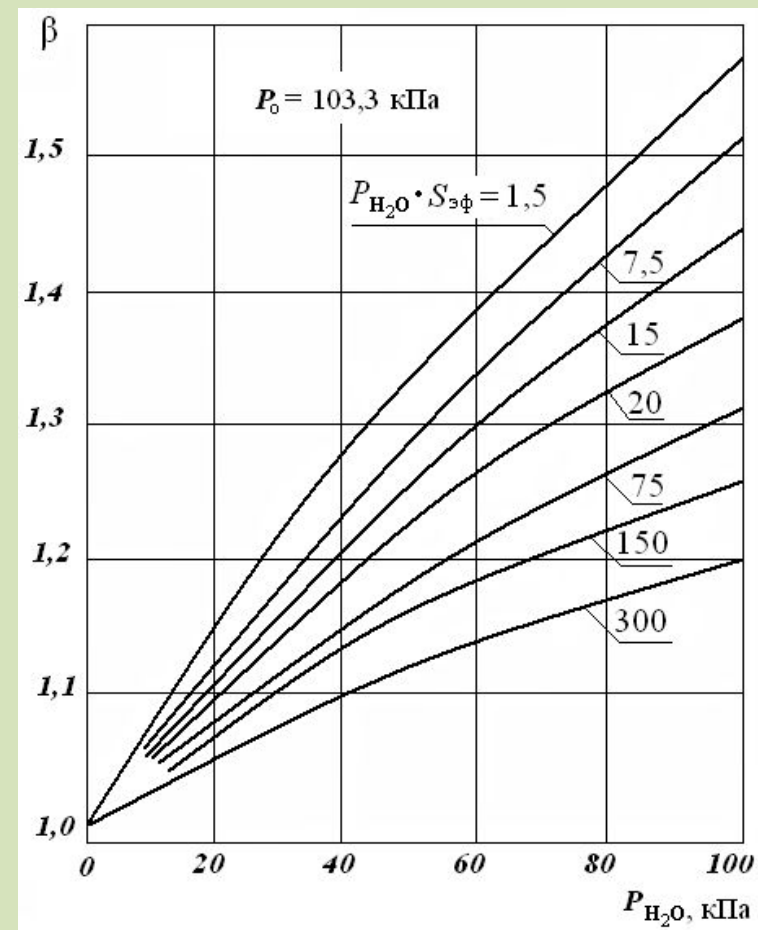


Номограмма
определения
черноты CO_2

для
степени



Номограмма для определения степени черноты H_2O



Номограмма для определения поправочного коэффициента β

□ Для смеси H_2O (пар) и CO_2 коэффициент черноты ε_{Γ} приближенно вычисляется по формуле:

$$\varepsilon_{\Gamma} = \varepsilon_{\text{CO}_2} + \beta \cdot \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}},$$

где β и — поправочный множитель, зависящий от парциального давления паров H_2O .

□ $\beta = 1,1 \div 1,6$ при $p_{\Gamma} = (0,1 \div 1) \cdot 10^5$ и $l_{\Gamma} p_{\Gamma} = (0 \div 300) \text{ кПа} \cdot \text{м}$.

□ В реальных условиях газ бывает окружен оболочкой (стенки топки, камеры сгорания и т.п.). Расчет теплообмена между газами и оболочкой можно производить по формуле:

$$q_{\text{и}} = \varepsilon'_c c_0 \left[\varepsilon_{\text{г}} \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - A_{\text{г}} \left(\frac{T_c}{100} \right)^4 \right]. \quad (3)$$

□ Здесь:

ε'_c – эффективная (приведенная) степень черноты оболочки;

• при

$$\varepsilon_c = 0,8 \div 1,$$

$$\varepsilon'_c \cong 0,5 \cdot (\varepsilon_c + 1);$$

$A_{\text{г}}$ – коэффициент поглощения газа при температуре стенок оболочки;

$T_{\text{г}}$ и T_c – соответственно температура газа и стенок оболочки.

- В продуктах сгорания помимо чистых газов (CO_2 , H_2O и т.п.), излучение которых находится в инфракрасной части спектра, обычно содержатся раскаленные твердые частицы – горючее, зола, примеси и т.п.
- Они придают пламени видимую окраску, и коэффициент черноты ϵ такого пламени резко увеличивается, достигая значений 0,6 – 0,7.
- Поэтому при факельном сжигании мелкоразмолотого горючего в топках котлов основное количество теплоты передается излучением пламени и светящихся газов.

6. Сложный теплообмен

Обычно передача теплоты от тела с высокой температурой к телу с низкой температурой происходит через разделительную стенку.

При этом в передаче теплоты одновременно принимают участие все виды теплообмена – теплопроводность, конвекция и излучение.

Теплообмен, учитывающий все виды теплообмена, называется *сложным теплообменом*.

- Количественной характеристикой процесса теплообмена от газа к стенке (или наоборот) является суммарный коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = \alpha_{\text{к}} + \alpha_{\text{и}}$$

где $\alpha_{\text{к}}$ – коэффициент конвективной теплоотдачи учитывающий передачу теплоты теплопроводностью и конвекцией, а $\alpha_{\text{и}}$ – коэффициент учитывающий передачу теплоты излучением.

- Плотность теплового потока рассчитываемого теплового аппарата определяется по закону Ньютона–Рихмана

$$q = \alpha(t_{\text{г}} - t_{\text{ст}}),$$

где α – суммарный коэффициент теплоотдачи.

- Суммарный коэффициент теплоотдачи входит в уравнение коэффициента теплопередачи.
- Уравнение коэффициента теплопередачи для плоской стенки в этом случае примет вид:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{к1} + \alpha_{и1}} + \sum \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{к2} + \alpha_{и2}}}.$$

- При решении задач под α_1 или α_2 будем обозначать суммарный коэффициент теплоотдачи, учитывающий конвекцию, теплопроводность и излучение.