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 $\boldsymbol{E_1}$.

- Если со стороны других тел на данное тело падает излучение с энергией $\boldsymbol{E_2}$, из которой $\boldsymbol{A_1 E_2}$ поглощается, а $(1 - \boldsymbol{A_1})\cdot\boldsymbol{E_2}$ отражается, то (поскольку $D = 0$)

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

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.

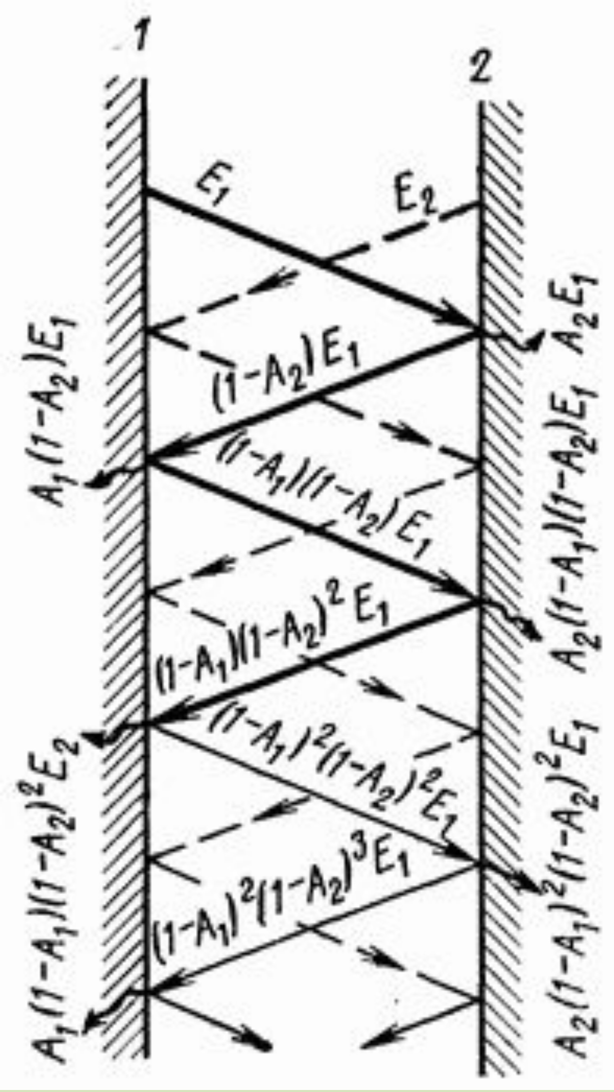


Схема теплообмена излучением между двумя плоскими параллельными пластинами

- Величина теплообмена излучением между пластинами равна:

$$q_{\text{и}} = E_{\text{и}} = E_{\text{эф}1} - E_{\text{эф}2},$$

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

$$\left.\begin{aligned} E_{\text{эф}1} &= E_1 + (1 - A_1)\cdot E_{\text{эф}2} \\ E_{\text{эф}2} &= E_2 + (1 - A_2)\cdot E_{\text{эф}1} \end{aligned}\right\} \quad (2)$$

- Решая систему уравнений (2) относительно $E_{\text{эф}1}$ и $E_{\text{эф}2}$, 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

$$Q_и = E \cdot F = \frac{1}{\dfrac{1}{\varepsilon_1} + \dfrac{1}{\varepsilon_2} - 1} \cdot c_0 \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 \right] \cdot F \qquad (3)$$

где $Q_и$ – ***тепловой поток излучения***.

- Здесь $$\theta = \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_1}{100} \right)^4$$ **– температурный множитель,**
- а $$\varepsilon_{пр} = \frac{1}{\dfrac{1}{\varepsilon_1} + \dfrac{1}{\varepsilon_2} - 1}$$ **– приведенная степень черноты** системы тел;

величина

$$c_{пр} = c_0 \cdot \varepsilon_{пр} = \frac{1}{\dfrac{1}{c_0 \cdot \varepsilon_1} + \dfrac{1}{c_0 \cdot \varepsilon_2} - \dfrac{1}{c_0}} = \frac{Q_и}{\theta \cdot F}$$

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:

$$Q_и = \boldsymbol{\varepsilon}_{пр} \cdot c_0 \cdot \boldsymbol{\theta} \cdot F = c_{пр} \cdot \boldsymbol{\theta} \cdot F, \qquad [Q_и] = 1\ Вт,$$

- или

$$Q'_и = c'_{пр} \cdot \boldsymbol{\theta} \cdot F \cdot \boldsymbol{\tau}, \qquad [Q'_и] = 1\ Дж.$$

- Значит, для повышения интенсивности теплообмена излучением надо увеличить $\boldsymbol{\varepsilon}_{пр}$ и $\boldsymbol{\theta}$, 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 стерадиан. 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***.

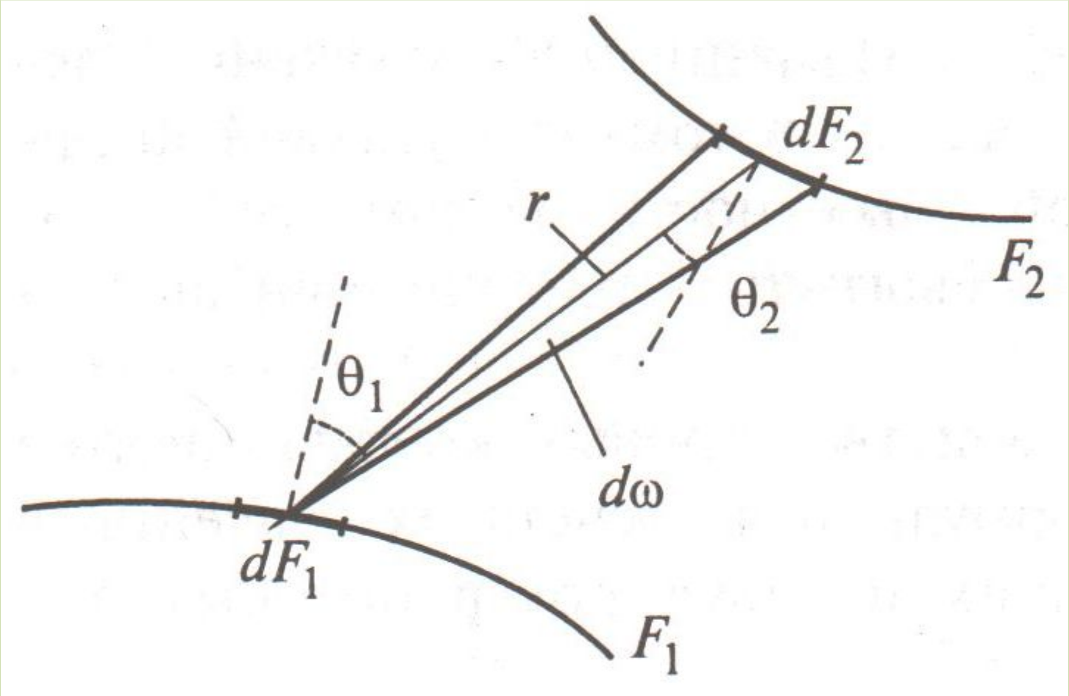


Рисунок к расчету углового коэффициента излучения методом прямого интегрирования

- 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 нормалями 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 $dq_{ki}^{эф}$ в пределах *k*-й зоны, получим

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

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

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

- Интегрируя элементарный поток $d^2Q_{ki}^{\text{пад}}$ 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

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

- 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:

$$\varphi_{ki} = Q_{ki}^{\text{пад}} \big/ Q_k^{\text{эф}}.$$

- 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**: $\boxed{F_k \cdot \varphi_{ki} = F_i \cdot \varphi_{ik}.}$ (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 $\boldsymbol{c_0}$:

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

т. е. $\boxed{C = c_0\boldsymbol{\varepsilon} = 5{,}67\boldsymbol{\varepsilon}.}$

- **Свойство замкнутости**:

$$\boxed{\sum_{k=1}^{n} \varphi_{ik} = 1} \qquad (3)$$

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**:

$$\boxed{\varphi_{ik} = 0} \qquad (4)$$

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

- **Свойство аддитивности**:

$$\boxed{\varphi_{ik} = \varphi_{ik_1} + \varphi_{ik_2} + \cdots + \varphi_{ik_n}} \qquad (5)$$

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

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

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.

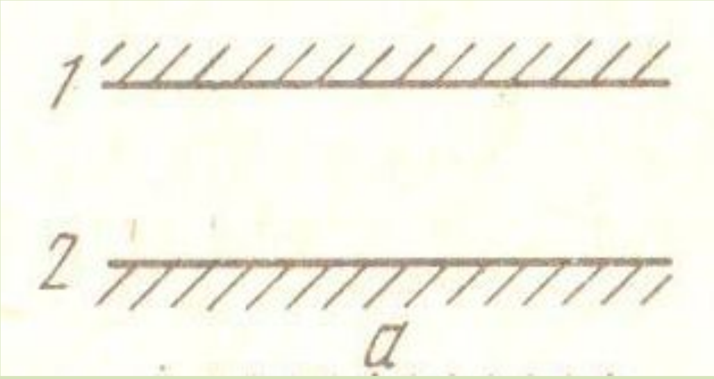
Для системы, состоящей из двух параллельных бесконечных пластин 1 и 2 (рис. *а*), аналогичной рабочему пространству современных протяженных печей, печей с шагающим подом с плоским сводом и т. п., очевидно, что **по свойству невогнутости**:

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

Тогда по **свойству замкнутости**:

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

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



или с учетом соотношения (6)

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

Схемы ***б*** **и** ***в*** характерны для электропечей сопротивления.

Схема ***г*** – для секционных электропечей.

Эти схемы аналогичны с точки зрения геометрии излучения. В обоих случаях по свойству невогнутости

$$\boxed{\varphi_{11} = 0}$$

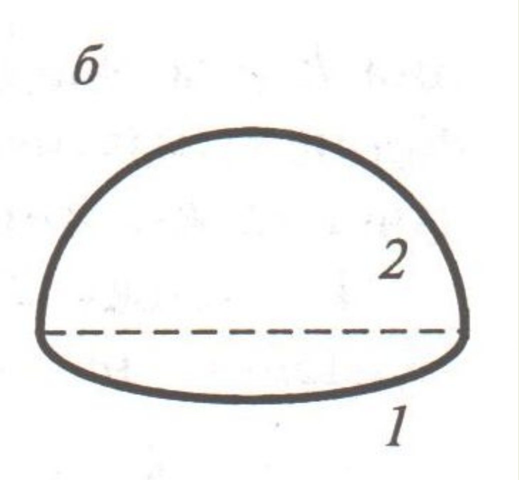
И по свойству замкнутости

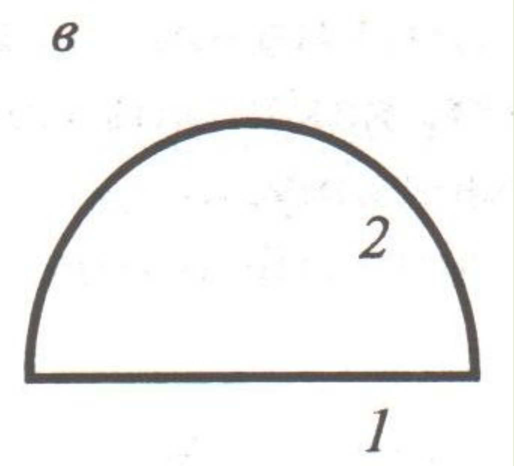
$$\boxed{\varphi_{12} = 1}$$

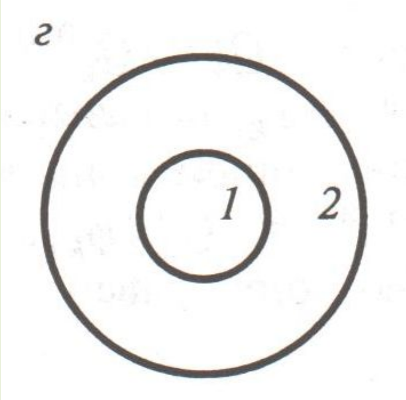
Теперь по свойству взаимности можно записать

$$\boxed{F_1 \cdot \varphi_{12} = F_2 \cdot \varphi_{21}}$$

или $$\boxed{\varphi_{21} = \varphi_{12} \cdot \left(\frac{F_1}{F_2} \right) = \frac{F_1}{F_2}.} \quad (8)$$







С учетом свойства замкнутости для поверхности 2 запишем

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

откуда

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

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:

$$Q_3^{\text{р}} = 0.$$

- 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 $\boldsymbol{\varphi}_{ki}\left(k, i = 1, 2, 3\right)$.

- **Требуется рассчитать потоки результирующего излучения** $Q_1^{\text{р}}, Q_2^{\text{р}}$ **и температуру** T_3.

- Отметим, что $Q_1^{\text{р}} + Q_2^{\text{р}} + Q_3^{\text{р}} = 0,$
- достаточно определить поток результирующего излучения на первой поверхности $Q_1^{\text{р}}$.

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

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

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

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

- Откуда следует, что

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

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

$$\left.\begin{aligned} Q_1^{эф} &= (1-\boldsymbol{\varepsilon}_1)\left(Q_1^{эф}\tilde{\boldsymbol{\varphi}}_{11} + Q_2^{эф}\tilde{\boldsymbol{\varphi}}_{21}\right) + \boldsymbol{\varepsilon}_1\boldsymbol{\sigma}_0 T_1^4 F_1 \\ Q_2^{эф} &= (1-\boldsymbol{\varepsilon}_2)\left(Q_1^{эф}\tilde{\boldsymbol{\varphi}}_{12} + Q_2^{эф}\tilde{\boldsymbol{\varphi}}_{22}\right) + \boldsymbol{\varepsilon}_2\boldsymbol{\sigma}_0 T_2^4 F_2 \end{aligned}\right\}, \qquad (3)$$

где

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

– 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

$$\boxed{Q_1^{\mathrm{p}} = \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_1 \boldsymbol{\sigma}_0 \left(T_2^4 - T_1^4\right) F_1} \qquad (4)$$

где

$$\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_1 = \frac{\tilde{\boldsymbol{\varphi}}_{12}}{1 + \left(\frac{1}{\boldsymbol{\varepsilon}_1} - 1\right)\tilde{\boldsymbol{\varphi}}_{12} + \left(\frac{1}{\boldsymbol{\varepsilon}_2} - 1\right)\tilde{\boldsymbol{\varphi}}_{21}} \qquad (5)$$

– 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

$$\boxed{Q^{\text{р}} = \frac{\boldsymbol{\varepsilon}}{1-\boldsymbol{\varepsilon}}\left(Q^{\text{эф}} - \boldsymbol{\sigma}_0 T^4 F\right),}$$

из этого соотношения следует, что

$$\boxed{T_3 = \left(\frac{Q_3^{\text{эф}}}{\boldsymbol{\sigma}_0 \cdot F}\right)^{1/4} = \left(\frac{q_3^{\text{эф}}}{\boldsymbol{\sigma}_0}\right)^{1/4}.} \quad (6)$$

- 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 $Q_1^{\text{р}}$ 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 $\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_1 = \tilde{\boldsymbol{\varphi}}_{12}.$

- 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 **Ф**, равен

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

- Тогда по формуле (4) окончательно получим

$$\boxed{Q_1^{\text{р}} = \sigma_0\left(T_2^4 - T_1^4\right)\cdot F_1 \cdot \Phi,} \qquad (8)$$

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 Ф** 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:

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

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

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

Откуда

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

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

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

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

$$\boxed{q_{1,2} = {q_0}/{2}\,.} \qquad (3)$$

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

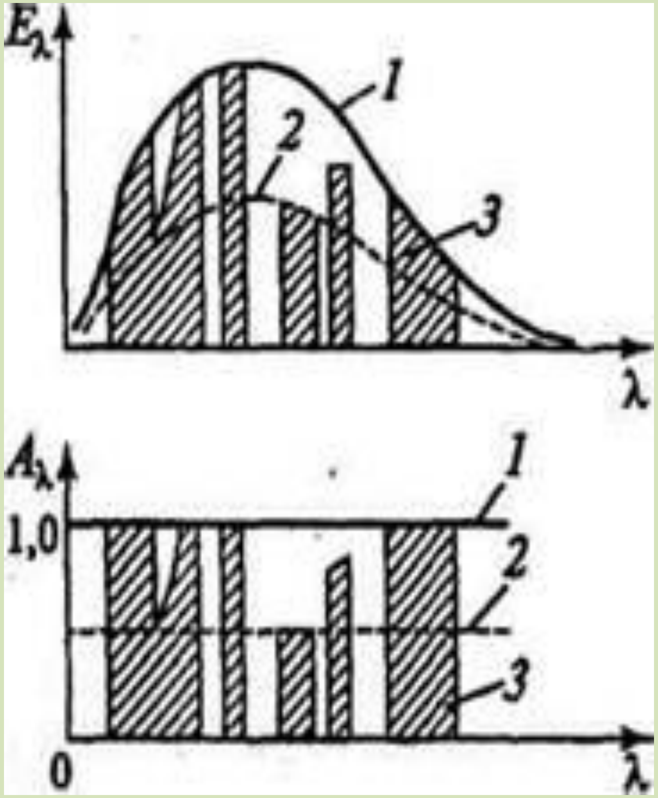
$$\boxed{q_1 = 0{,}5 \cdot \left({C'_{\text{пр}}}/{C_{\text{пр}}}\right) q_0,} \qquad (4)$$

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

$$E_{\text{г}} = c_0 \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_{\text{г}} \cdot \left(\frac{T_{\text{г}}}{100}\right)^4 = c \cdot \left(\frac{T_{\text{г}}}{100}\right)^4, \qquad (1)$$

для газов коэффициенты черноты $\varepsilon_{\text{г}}$ (или $A_{\text{г}} = \varepsilon_{\text{г}}$) зависят:

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

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{г}} = f\left(T_{\text{г}}, p_{i\text{г}}, l_{\text{и}}\right). \qquad (2)$$

$$\boxed{\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{г}} = f\left(T_{\text{г}}, p_{i\text{г}}, l_{\text{и}}\right).} \quad (2)$$

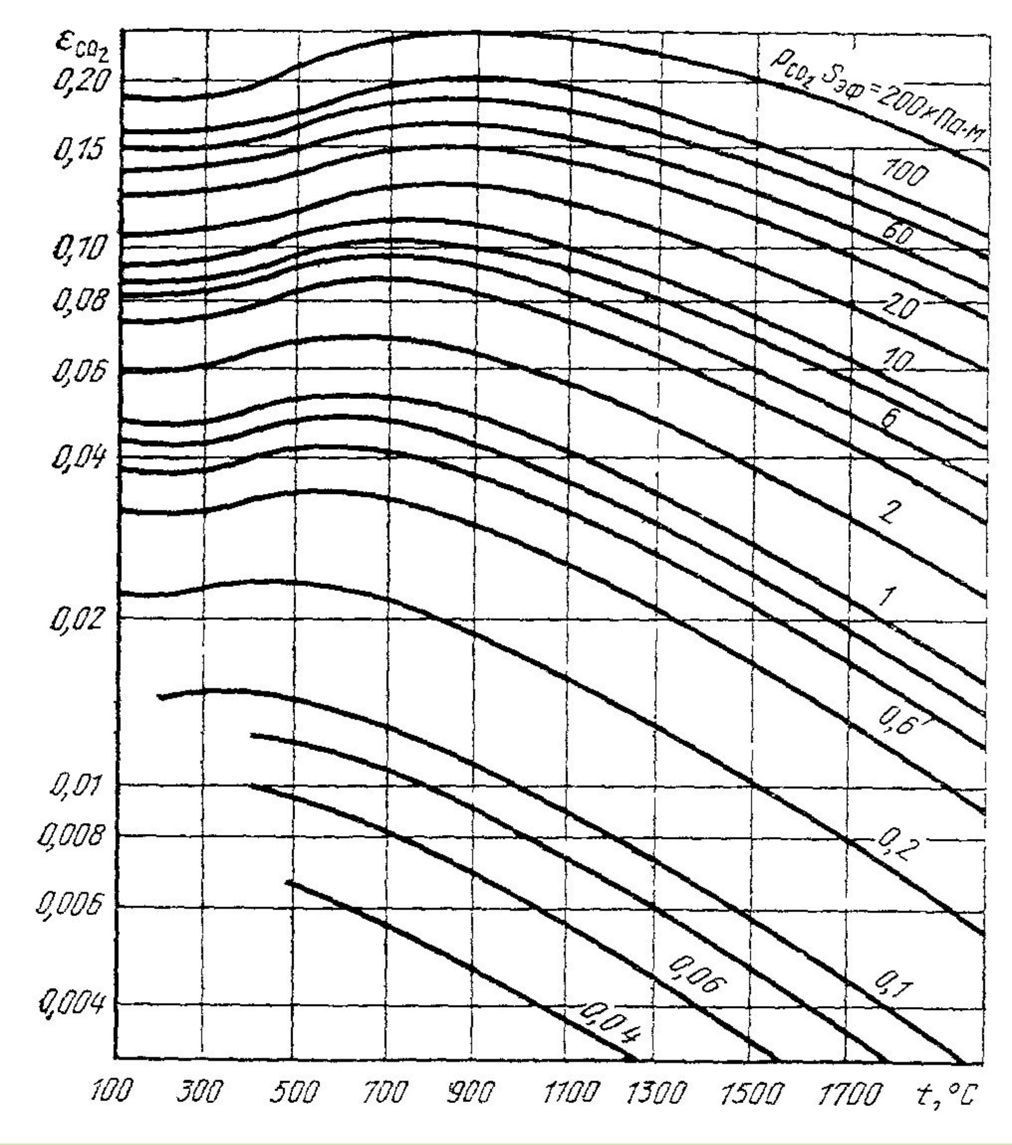
- Функция (2) для различных газов имеет различный вид, но в любом случае, если ее ввести в уравнение (1), окажется, что интегральная плотность излучения $E_{\text{г}}$ будет пропорциональна уже не T^4, а T^n, где $n < 4$.

- 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

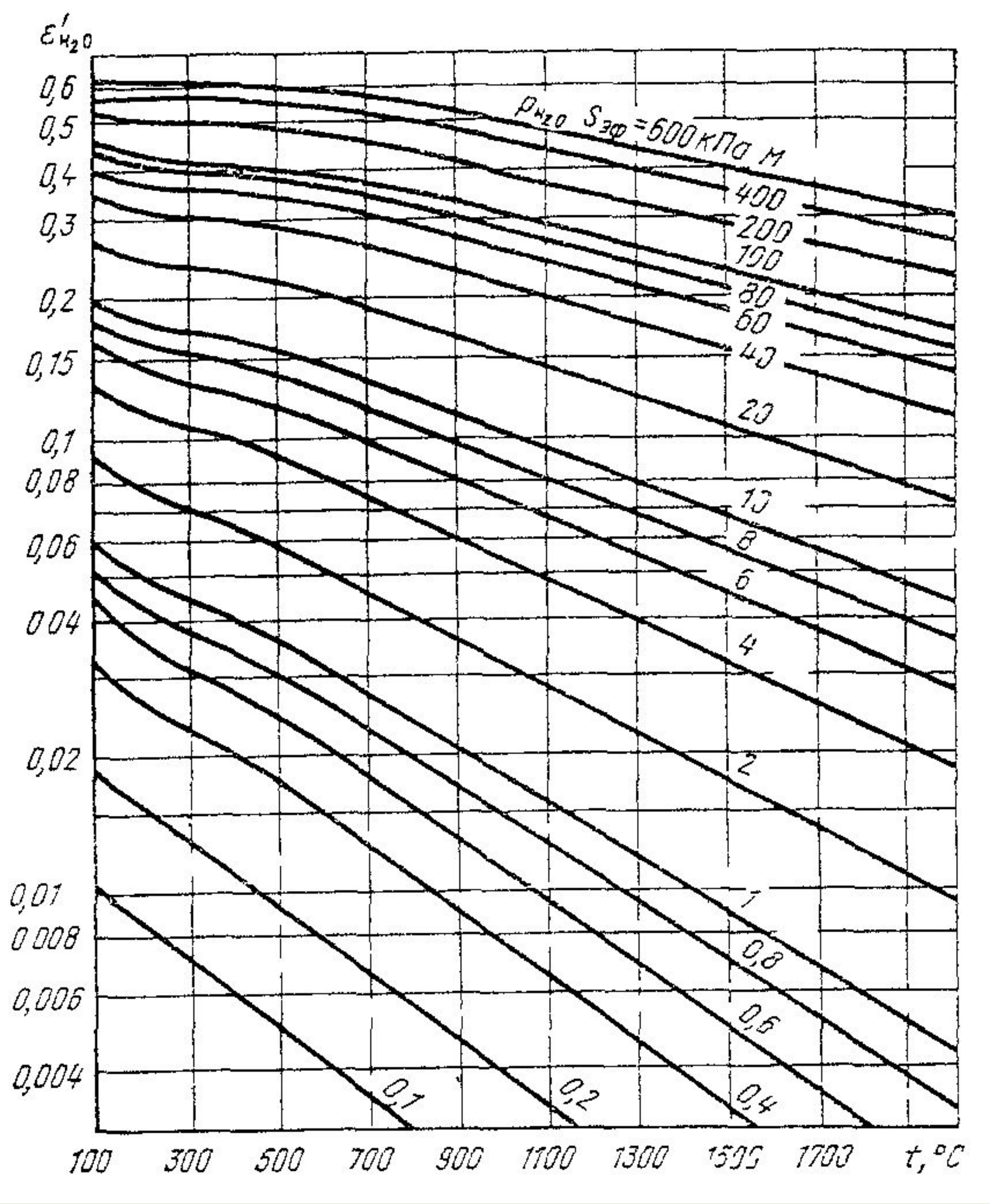
$$\boxed{E_{H_2O} = 142 \cdot p^{0,8} \cdot l_{\text{и}}^{0,6} \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^3.}$$

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

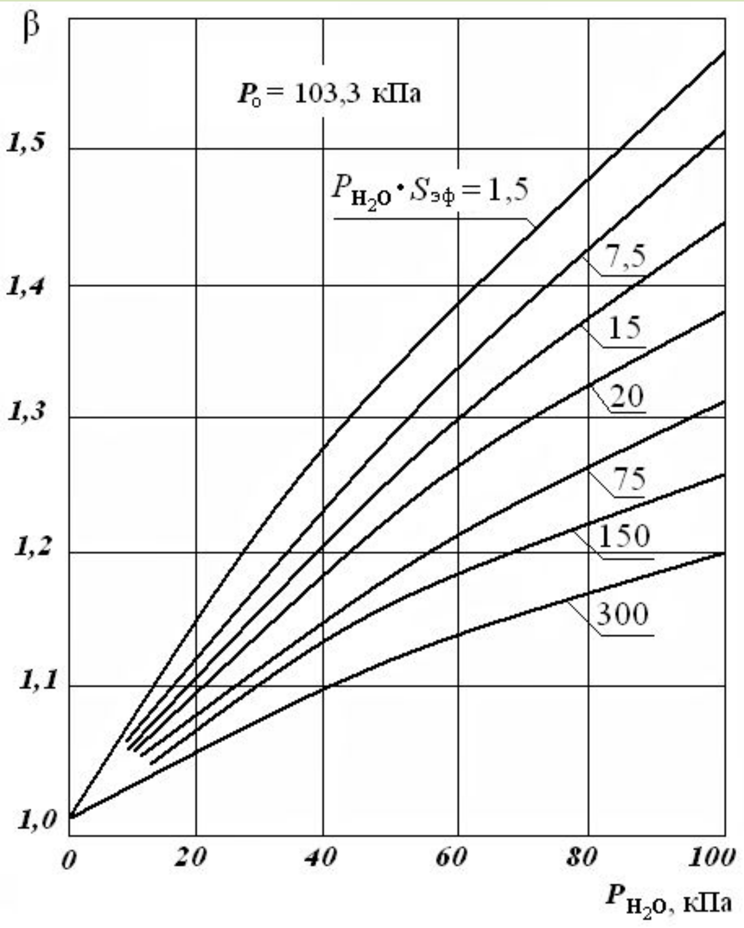
Степень черноты смеси газов определяется с помощью специальных графиков.



Номограмма для определения степени черноты CO_2



Номограмма для определения степени черноты H_2O



Номограмма для определения поправочного коэффициента β

- Для смеси H_2O (пар) и CO_2 коэффициент черноты $\varepsilon_г$ приближенно вычисляется по формуле:

$$\boxed{\boldsymbol{\varepsilon}_{г} = \boldsymbol{\varepsilon}_{CO_2} + \boldsymbol{\beta} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_{H_2O},}$$

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

- $\beta = 1{,}1 \div 1{,}6$ при $p_г = (0{,}1 \div 1)\cdot 10^5$ и $l_и p_г = (0 \div 300)$ кПа·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:

$$\boxed{q_{\text{и}} = \boldsymbol{\varepsilon}'_{\text{c}} c_0 \left[\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{г}} \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - A_{\text{г}} \left(\frac{T_{\text{c}}}{100} \right)^4 \right].} \quad (3)$$

- Здесь:

$\boxed{\boldsymbol{\varepsilon}'_{\text{c}}}$ – эффективная (приведенная) степень черноты оболочки;

- при $\boxed{\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{c}} = 0{,}8 \div 1,}$ $\boxed{\boldsymbol{\varepsilon}'_{\text{c}} \cong 0{,}5 \cdot (\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{c}} + 1);}$

$A_{\text{г}}$ – 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

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

где $\alpha_к$ – коэффициент конвективной теплоотдачи учитывающий передачу теплоты теплопроводностью и конвекцией, а $\alpha_и$ – коэффициент учитывающий передачу теплоты излучением.

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

$$\boxed{q = \alpha\left(t_{г} - t_{ст}\right),}$$

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.