

# Лекция

на тему: «Лучистый теплообмен»

# Структура лекции

1. Основные понятия и определения

# Основные понятия и определения

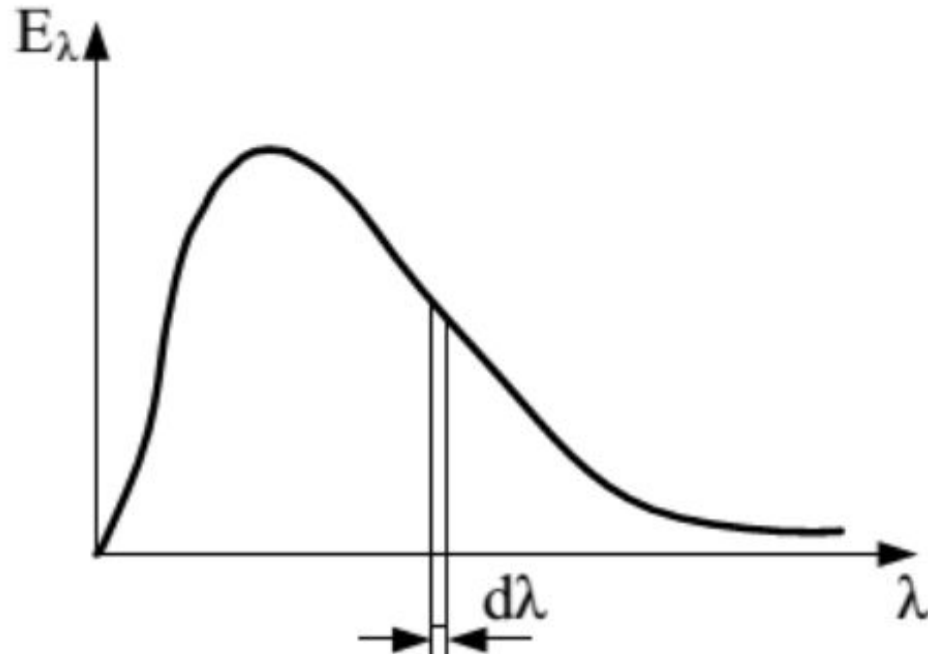
- Тепловое излучение (радиационный теплообмен) - способ переноса теплоты в пространстве, осуществляемый в результате распространения электромагнитных волн, энергия которых при взаимодействии с веществом переходит в тепло.
- Электромагнитные волны - электромагнитные возмущения, исходящие из излучаемого тела и распространяющиеся в вакууме со скоростью света  $c = 2,9979 \cdot 10^8$  м/с.
- Тепловому излучению соответствует интервал длин волн 0,4 – 25 мкм.

# Спектр излучения

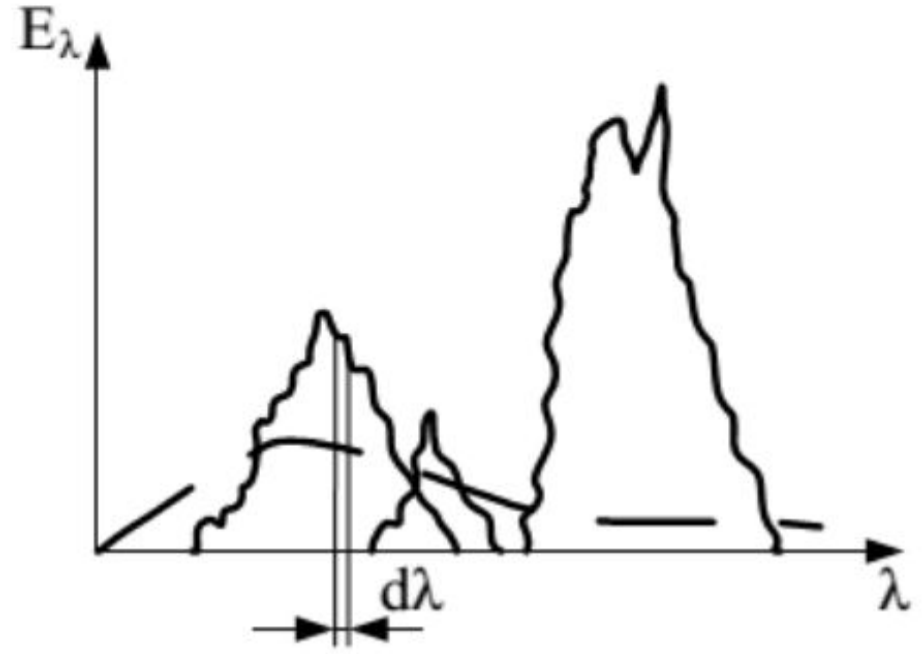
- **Спектром излучения** называют распределение лучистой энергии по длине волны  $E_\lambda = f(\lambda)$ .

$E_\lambda$  (Вт/м<sup>3</sup>) – спектральная плотность теплового потока собственного излучения (спектральная лучеиспускательная способность тела).

# Распределение энергии излучения по спектру



твёрдое тело



газ

# Особенности радиационного теплообмена

Теплообмен излучением имеет ряд отличий от кондуктивного и конвективного теплообмена:

1. Тепловое излучение вещества зависит от температуры тела (степени нагретости вещества), поэтому все тела (твердые тела, жидкости и поглощающие лучистую энергию газы) с температурой выше нуля по шкале Кельвина обладают собственным тепловым излучением;
2. Для передачи теплоты излучением не требуется тело-посредник, т.е. лучистая энергия может передаваться и в вакууме;
3. При температурах от  $0^{\circ}\text{C}$  до  $100^{\circ}\text{C}$  лучистая и конвективная (при свободной конвекции) составляющие теплообмена имеют один порядок; в высокотемпературных энергетических (например, парогенераторах) и высокотемпературных теплотехнологических (например, металлургических печах) лучистый теплообмен является доминирующим в суммарном теплопереносе от горячего источника к приемнику тепловой энергии;
4. В расчетах необходимо учитывать особенности поверхностного излучения (твердые тела) и объемного излучения (излучающие и поглощающие газы).

# ОСНОВНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ

В расчетах радиационного теплообмена приняты следующие обозначения:

$Q_{\text{пад}}$  и  $E_{\text{пад}}$  – поток и плотность потока излучения, падающие на поверхность тела;

$Q_{\text{отр}}$  и  $E_{\text{отр}}$  – поток и плотность потока излучения, отраженные от поверхности тела;

$Q_{\text{погл}}$  и  $E_{\text{погл}}$  – поток и плотность потока излучения, поглощенные телом;

$Q_{\text{проп}}$  и  $E_{\text{проп}}$  – поток и плотность потока излучения, пропускаемые телом;

$Q_{\text{соб}}$  (Q) и  $E_{\text{соб}}$  (E) – поток и плотность потока собственного излучения тела;

$Q_{\text{эф}}$  и  $E_{\text{эф}}$  – поток и плотность потока эффективного излучения тела;

$Q_{\text{рез}}$  и  $E_{\text{рез}}$  – поток и плотность потока результирующего излучения тела.

# Поглощательная, отражательная, пропускная способность тела

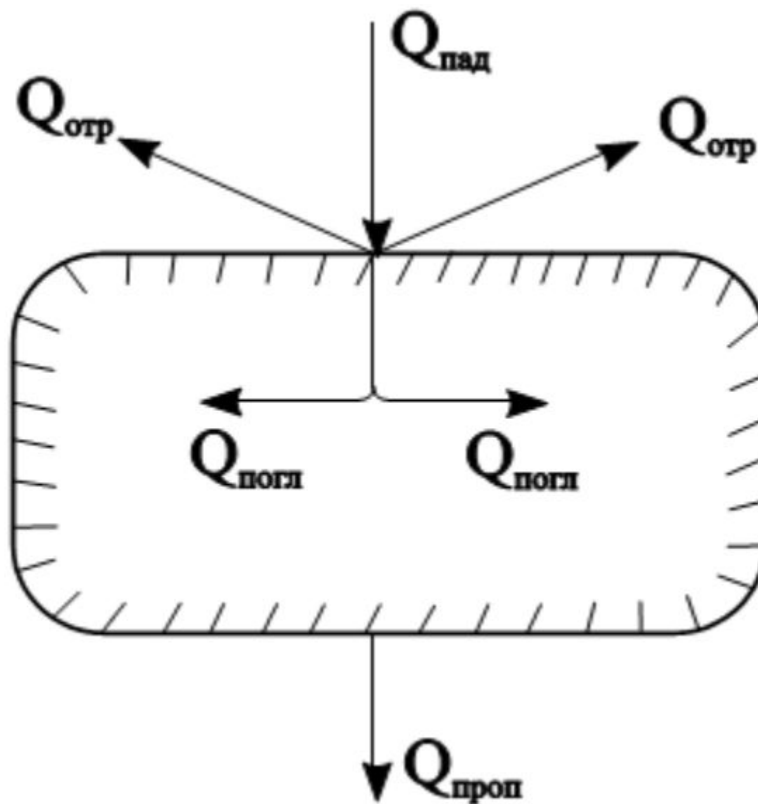


Схема радиационного теплообмена для полупрозрачного тела



- $$Q_{\text{пад}} = Q_{\text{погл}} + Q_{\text{отр}} + Q_{\text{проп}} \quad (1)$$

Разделим левую и правую части равенства (1) на поток падающего излучения  $Q_{\text{пад}}$ , получим:

$$\frac{Q_{\text{пад}}}{Q_{\text{пад}}} = \frac{Q_{\text{погл}}}{Q_{\text{пад}}} + \frac{Q_{\text{отр}}}{Q_{\text{пад}}} + \frac{Q_{\text{проп}}}{Q_{\text{пад}}} \quad (2)$$

или 
$$1 = A + R + D \quad (3)$$

где

$$A = \frac{Q_{\text{погл}}}{Q_{\text{пад}}} - \text{поглощательная способность тела}$$

$$R = \frac{Q_{\text{отр}}}{Q_{\text{пад}}} - \text{отражательная способность тела}$$

$$D = \frac{Q_{\text{проп}}}{Q_{\text{пад}}} - \text{пропускательная способность тела}$$

# Частные случаи

- Тело, которое поглощает все падающее на него излучение, называют **абсолютно черным телом** (АЧТ). У абсолютно черного тела радиационные способности равны:  $A = 1, R = 0, D = 0$ .

Тело, которое диффузно отражает все падающее на него излучение, называют **абсолютно белым телом**. У абсолютно белого тела радиационные способности равны:  $A = 0, R = 1, D = 0$ .

Тело, которое пропускает все падающее на него излучение, называют **абсолютно прозрачным** или **диатермичным**. Для диатермичного тела радиационные способности равны:  $A = 0, R = 0, D = 1$ .

# Теплообмен излучением в прозрачной среде . Диатермическая среда.

- Диатермической называется среда, не поглощающая и не излучающая электромагнитные волны. Примерами диатермических сред являются вакуум, одно- и двухатомные газы при обычных температурах и давлениях.

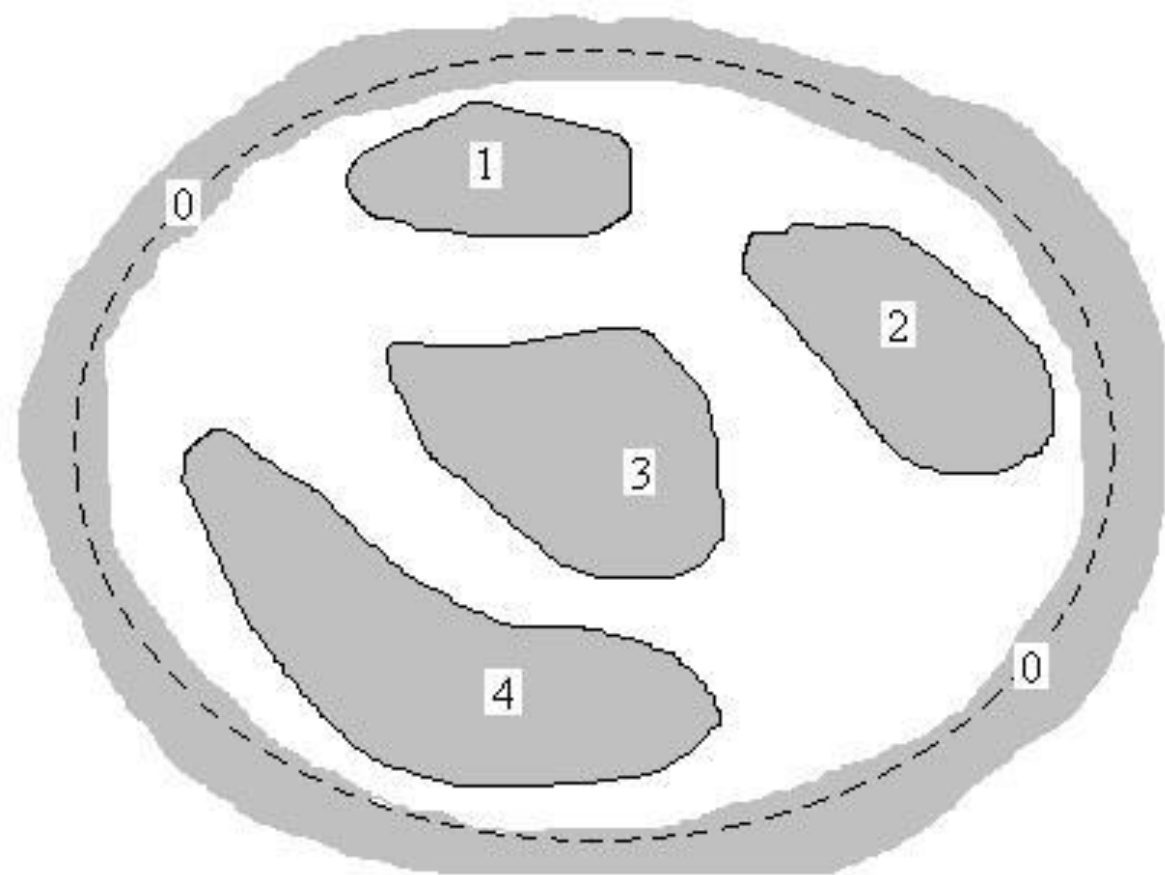
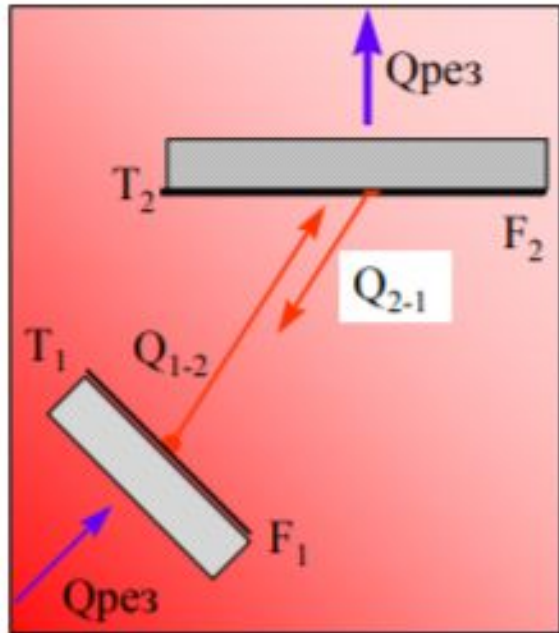


Рис. 1. К общей постановке задачи радиационного теплообмена

# Понятие углового коэффициента излучения



$$Q_1 = E_{0,1}F_1, \text{ Вт.} \quad (22.1)$$

$$\varphi_{12} \equiv \frac{Q_{1 \rightarrow 2}}{Q_1}. \quad (22.2)$$

$$Q_{1 \rightarrow 2} = E_{0,1}F_1\varphi_{12}.$$

$$Q_{2 \rightarrow 1} = E_{0,2}F_2\varphi_{21}.$$

$$Q_{\text{рез}} = Q_{1 \rightarrow 2} - Q_{2 \rightarrow 1} = E_{0,1}F_1\varphi_{12} - E_{0,2}F_2\varphi_{21}. \quad (22.3)$$

$$F_1\varphi_{12} = F_2\varphi_{21}, \quad (22.4)$$

# Методы определения угловых коэффициентов излучения

- Элементарный
- Локальный
- Средний

[REDACTED]

# RESUME

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

$$d^2 Q_2^{\text{изл}} = B_1^{\text{эф}} \cdot \cos \theta_1 \cdot d\omega_1 dF_1 \quad (5.1)$$

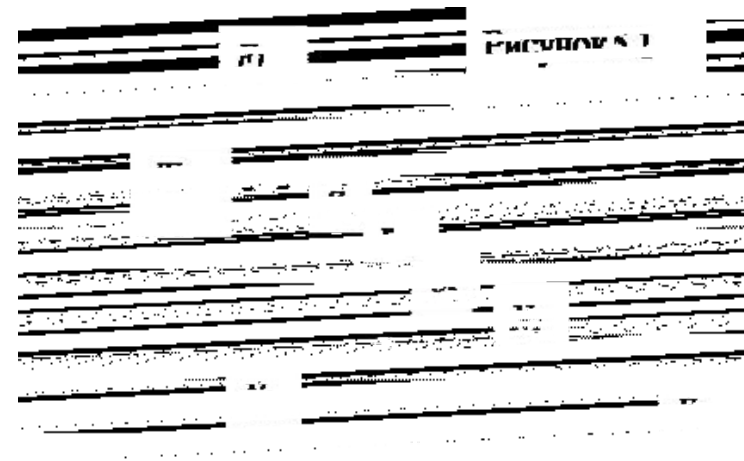
Поскольку для серых поверхностей  $B_1^{\text{эф}} = q_1^{\text{эф}} / \pi$ , а  $d\omega_1 = dF_2 \cos \theta_2 / r^2$ , то

$$d^2 Q_2^{\text{изл}} = q_1^{\text{эф}} \cdot dF_1 \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{\pi r^2} dF_2 \quad (5.2)$$

В правой части выражения 5.1 произведение  $q_1^{\text{эф}} \cdot dF$  представляет величину эффективного потока энергии излучения, ушедшего с площадки  $dF_1$  в пределах полусферы. Величина

$$d\phi_{12} = \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{\pi r^2} dF_2$$

представляет собой долю эффективного потока энергии полусферического излучения площадки  $dF_1$ , попавшую на  $dF_2$  и называется элементарным угловым коэффициентом излучения с  $dF_1$  на  $dF_2$ . Как видно, в правую часть последнего выражения входят величины, характеризующие только геометрию системы. При изменении взаимного расположения элементарных площадок изменится и величина  $d\phi_{12}$ , поскольку изменятся величины углов  $\theta_1$  и  $\theta_2$  и расстояние  $r$ .





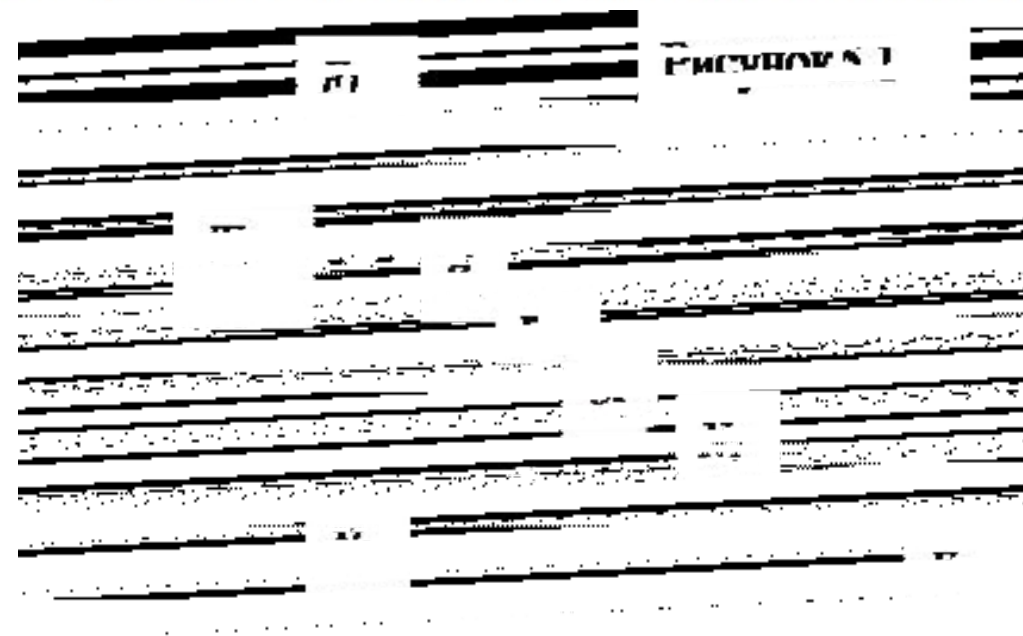
Проводя аналогичные рассуждения для излучения площадки  $dF_2$  на  $dF_1$ , можно получить

$$d^2 Q_1^{rad} = q_2^{rad} \cdot dF_2 \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{R^2} dF_1$$

Тогда величина

$$d^2 \phi_{21} = \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{R^2} dF_1$$

представляет собой элементарный угловой коэффициент излучения в площадки  $dF_2$  на  $dF_1$ , смысл которого, естественно, аналогичен смыслу  $d^2 \phi_{12}$ .



# Локальный (местный) угловой коэффициент излучения $\varphi$

- Локальный (местный) угловой коэффициент излучения  $\varphi^l$  используется при анализе и расчете теплообмена излучением между элементарной площадкой  $dF_1$  или  $dF_2$ , принадлежащей поверхности  $F_1$  или  $F_2$  и поверхностью  $F_2$  или  $F_1$ .

По определению

$$dQ_1^{\text{изл}} = \int_{F_2} d^2 Q_2^{\text{изл}} = q_1^{\text{эф}} \cdot dF_1 \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{r^2} dF_2$$

И

$$dQ_1^{\text{изл}} = \int_{F_1} d^2 Q_1^{\text{изл}} = q_2^{\text{эф}} \cdot dF_2 \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{r^2} dF_1$$

В правых частях последних двух выражений также присутствуют составляющие, которые характеризуют только геометрию системы, а именно

$$\varphi'_{12} = \int_{F_2} \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{r^2} dF_2$$

И

$$\varphi'_{21} = \int_{F_1} \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{r^2} dF_1$$

Эти величины характеризуют долю эффективного потока энергии излучения, падающую соответственно с  $dF_1$  на всю  $F_2$  и с  $dF_2$  на всю  $F_1$  от всей величины эффективного потока энергии излучения, уходящего в пределах полусферы соответственно с  $dF_1$  на  $F_2$  и с  $dF_2$  на  $F_1$ .

# Средний угловой коэффициент излучения $\varphi$

- используется при анализе и расчете теплообмена излучением между поверхностями конечных размеров  $F_1$  и  $F_2$ . Он характеризует отношение потока, попавшего, например, на всю поверхность  $F_2$ , ко всему потоку, ушедшему со всей поверхности  $F_1$  по всем направлениям в пределах полусферы.

$$Q_2^{\text{max}} = \int_{F_1} dQ_2^{\text{max}} = \int_{F_1} q_1^{\text{эф}} \cdot dF_1 \int_{F_2} \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{r^2} dF_2$$

где величина плотности эффективного потока энергии излучения  $q_1^{\text{эф}}$  в общем случае переменна в пределах поверхности  $F_1$ , т.к. могут меняться как температура, так и степень черноты по этой поверхности в различных ее точках. Однако, если считать поверхность изотермической и изооптической, то, вынося величину  $q_1^{\text{эф}}$  из под знака интеграла, можно записать интегральное уравнение в виде

$$Q_2^{\text{max}} = q_1^{\text{эф}} \int_{F_1} \int_{F_2} \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{r^2} dF_2 dF_1$$

или

$$Q_2^{\text{max}} = Q_1^{\text{эф}} \frac{1}{F_1} \int_{F_1} \int_{F_2} \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{r^2} dF_2 dF_1 \quad (5.3)$$

В выражении (5.3) величина

$$\varphi_{12} = \frac{1}{F_1} \int_{F_1} \int_{F_2} \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{r^2} dF_2 dF_1$$

называется средним угловым коэффициентом излучения с поверхности  $F_1$  на поверхность  $F_2$ . Эта величина определяется только геометрическими параметрами системы и характеризует долю энергии, упавшую на поверхность  $F_2$ , от всей энергии, ушедшей с поверхности  $F_1$  по всем направлениям в пределах полусферы.

Аналогично, считая также, что  $q_2^{\text{эф}}$  постоянна в пределах  $F_2$ , можно записать

$$Q_1^{\text{пад}} = q_2^{\text{эф}} \iint_{F_1, F_2} \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{r^2} dF_2 dF_1$$

или 
$$Q_1^{\text{пад}} = Q_2^{\text{эф}} \frac{1}{F_2} \iint_{F_1, F_2} \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{r^2} dF_2 dF_1$$

где

$$\varphi_{21} = \frac{1}{F_2} \iint_{F_1, F_2} \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{r^2} dF_2 dF_1$$

называется средним угловым коэффициентом излучения с поверхности  $F_2$  на поверхность  $F_1$ , смысл которого аналогичен смыслу  $\varphi_{21}$ .



$$\varphi_{12} = \frac{Q_2^{\text{полн}}}{Q_1^{\text{эф}}} \quad (5.4)$$

При противоположном направлении переноса энергии можно написать:

$$\varphi_{21} = \frac{Q_1^{\text{полн}}}{Q_2^{\text{эф}}} \quad (5.5)$$

В общем случае для системы из  $n$  поверхностей справедливы соотношения:

$$\varphi_{ki} = \frac{Q_i^{\text{полн}}}{Q_k^{\text{эф}}} \quad (5.6)$$

$$\varphi_{ik} = \frac{Q_k^{\text{полн}}}{Q_i^{\text{эф}}} \quad (5.7)$$

# Основные свойства средних угловых коэффициентов излучения

Свойство взаимности. Это свойство вытекает из определения средних угловых коэффициентов и записывается для пары поверхностей  $F_i$  и  $F_k$  в следующем виде:

$$F_i \cdot \varphi_{ik} = F_k \cdot \varphi_{ki}$$

Обозначения  $\varphi_{12} \cdot F_1 = H_{12}$  и  $\varphi_{21} \cdot F_2 = H_{21}$ , получим  $H_{12} = H_{21} = H_{\varphi}$

Величина  $H_{\varphi}$  называется взаимной поверхностью излучения пары тел 1 и 2 или полной поверхностью взаимного обмена между двумя телами.

Свойство невогнутости. Свойство справедливо только для невогнутых, т. е. плоских  $F_1$  и выпуклых  $F_2$  поверхностей (рис. 6.1). Эффективный поток, уходящий с поверхностей  $F_1$  и  $F_2$  прямым образом, т. е. в отсутствии других поверхностей, от которых он мог бы отразиться, не может попасть на эти же поверхности. Это значит, что  $\varphi_{11}=0$  и  $\varphi_{22}=0$ . Для вогнутой поверхности  $F_3$  часть уходящего с нее потока энергии попадает на эту же поверхность, следовательно,  $\varphi_{33} \neq 0$ .



# Основные свойства средних угловых коэффициентов излучения

- Свойство замыкаемости.

$$\varphi_{11} + \varphi_{12} + \varphi_{13} + \varphi_{14} = 1$$

$$\varphi_{22} + \varphi_{21} + \varphi_{23} + \varphi_{24} = 1$$

$$\varphi_{33} + \varphi_{31} + \varphi_{32} + \varphi_{34} = 1$$

$$\varphi_{,,} + \varphi_{,,} + \varphi_{,,} + \varphi_{,,} = 1$$

В общем виде, для системы из  $n$  поверхностей, свойство замыкаемости можно записать следующим образом:

$$\sum_{k=1}^n \varphi_{ik} = 1, \quad i=1, 2, 3, \dots, k, \dots, n \quad (6.1)$$

Или

$$\sum_{k=1}^n \varrho_i^{*k} \cdot \varphi_{ik} = \varrho_i^{\text{пад}} \quad (6.2)$$

# Основные свойства средних угловых коэффициентов излучения

- Свойство совмещаемости.

$$\varphi_{12} + \varphi_{15} = 1; \varphi_{13} + \varphi_{15} = 1; \varphi_{14} + \varphi_{15} = 1; \varphi_{10} + \varphi_{15} = 1;$$

откуда следует, что

$$\varphi_{12} = \varphi_{13} = \varphi_{14} = \varphi_{10}.$$

# Основные свойства средних угловых коэффициентов излучения

- Свойство затеняемости утверждает, что если между двумя поверхностями  $F_1$  и  $F_2$  расположить третье непрозрачное тело с поверхностью  $F_3$ , которое полностью препятствует прямому обмену энергией между  $F_1$  и  $F_2$ , то  $\varphi_{12} = 0$ ;  $\varphi_{21} = 0$ .
- Свойство аддитивности. Если рассматривается теплообмен излучение между поверхностью  $F_1$  и поверхностью  $F_4$ , которая является суммой поверхностей  $F_2$  и  $F_3$ , т. е.  $F_4 = F_2 + F_3$ , то  $\varphi_{14} = \varphi_{12} + \varphi_{13}$ .

# Расчет средних угловых коэффициентов излучения для простейших геометрических систем

Схема а) две плоские близко расположенные бесконечные параллельные поверхности; если пренебречь фактом незамкнутости такой системы, то можно записать очевидные соотношения:

$$\varphi_{11}=0; \varphi_{12}=1; \varphi_{22}=0; \varphi_{21}=1.$$

Схема б) – плоская поверхность  $F_1$  замкнута вогнутой поверхностью  $F_2$ . Для такой системы  $\varphi_{11}=0; \varphi_{12}=1$ ;  
 $\varphi_{12} \cdot F_1 = \varphi_{21} \cdot F_2$ , следовательно,  $\varphi_{21} = \frac{F_1}{F_2}$ ;  $\varphi_{21} + \varphi_{22} = 1$ , следовательно,  $\varphi_{22} = 1 - \varphi_{21} = 1 - \frac{F_1}{F_2}$ .

Схема в) – выпуклая поверхность  $F_1$  замкнута вогнутой поверхностью  $F_2$ . Для такой системы, как и в предыдущем случае,  $\varphi_{11}=0; \varphi_{12}=1; \varphi_{21} = \frac{F_1}{F_2}$ ;  $\varphi_{22} = 1 - \frac{F_1}{F_2}$ .

Схема г) – системы из двух вогнутых поверхностей  $F_1$  и  $F_2$ . В этом случае для определения четырех средних угловых коэффициентов  $\varphi_{11}, \varphi_{12}, \varphi_{21}, \varphi_{22}$  необходимо для замыкания системы уравнений иметь дополнительные уравнения. С этой целью введем новую мнимую плоскую поверхность  $F_3$ , которая разделяет поверхности  $F_1$  и  $F_2$ . В результате получим две замкнутые геометрические системы  $F_1-F_3$  и  $F_2-F_3$ , для которых можно записать следующие угловые коэффициенты излучения:  $\varphi_{11}, \varphi_{13}, \varphi_{31}, \varphi_{22}, \varphi_{23}, \varphi_{32}, \varphi_{33}, \varphi_{12}, \varphi_{21}$ .

$$\varphi_{11} + \varphi_{12} = 1$$

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

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

$$\varphi_{31} \cdot F_3 = \varphi_{13} \cdot F_1$$

$$\varphi_{11} + \varphi_{13} = 1$$

Т.к.  $\varphi_{31} = 1$ , то  $\varphi_{13} = \frac{F_3}{F_1}$ , поскольку  $\varphi_{11} + \varphi_{13} = 1$ , то  $\varphi_{11} + \frac{F_3}{F_1} = 1$ , то  $\varphi_{11} = 1 - \frac{F_3}{F_1}$ .

Из соотношения  $\varphi_{11} + \varphi_{12} = 1$  следует, что  $\varphi_{12} = 1 - 1 + \frac{F_3}{F_1} = \frac{F_3}{F_1}$ .

Т.к.  $\varphi_{12} \cdot F_1 = \varphi_{21} \cdot F_2$ , то  $\varphi_{21} = \frac{\varphi_{12} \cdot F_1}{F_2} = \frac{F_3 \cdot F_1}{F_1 \cdot F_2} = \frac{F_3}{F_2}$ .

Из свойства  $\varphi_{22} + \varphi_{21} = 1$  следует  $\varphi_{22} = 1 - \varphi_{21} = 1 - \frac{F_3}{F_2}$ .

В этой схеме следует обратить внимание на тот факт, что по свойству взаимности  $\varphi_{31} \cdot F_3 = \varphi_{13} \cdot F_1$  и тогда  $\varphi_{13} = \frac{F_3}{F_1} = \varphi_{12}$ . Это действительно так, поскольку энергия, падающая с  $F_1$  на  $F_2$  проходит полностью через поверхность  $F_3$ .

# Постановка задач расчета теплообмена излучением

**Основные допущения,  
принимаемые при постановке  
задач**

# Зональный метод решения задач теплообмена излучением в системах с лучепрозрачной средой

$$Q_k^{\text{пад}} = \sum_{i=1}^n Q_i^{\text{эф}} \cdot \varphi_{ik} \quad (8.1)$$

В соответствии с определением результирующего потока для поверхности  $F_k$  можно записать:

$$Q_k^{\text{рез}} = Q_k^{\text{пад}} - Q_k^{\text{эф}} \quad (8.2)$$

или

$$Q_k^{\text{рез}} = \sum_{i=1}^n Q_i^{\text{эф}} \cdot \varphi_{ik} - Q_k^{\text{эф}} \quad (8.3)$$

Уравнение (8.3) является основным расчетным уравнением зонального метода расчета теплообмена излучением в системах с лучепрозрачной средой. Видно, что это уравнение является алгебраическим линейным уравнением, поскольку неизвестная величина  $Q_k^{\text{рез}}$  стоит в первой степени.



Величины  $Q_i^{*\phi}$  и  $Q_k^{*\phi}$  являются известными, их можно представить в виде:

$$Q_i^{*\phi} = Q_i^{<<B} + Q_i^{отр} \quad \text{и} \quad Q_k^{*\phi} = Q_k^{<<B} + Q_k^{отр}, \quad \text{где}$$

$$Q_i^{<<B} = \varepsilon_i \cdot C_\diamond \cdot \left( \frac{T_i}{100} \right)^4 \cdot F_i$$

$$Q_k^{<<B} = \varepsilon_k \cdot C_\diamond \cdot \left( \frac{T_k}{100} \right)^4 \cdot F_k$$

$$Q_i^{отр} = (1 - \varepsilon_i) \cdot Q_i^{пад}$$

$$Q_k^{отр} = (1 - \varepsilon_k) \cdot Q_k^{пад}$$

При расчетах для того, чтобы не использовать величины  $Q^{*\phi}$ , куда входят  $Q^{пад}$ , используют ранее полученную зависимость:

$$Q^{*\phi} = \frac{1-A}{A} \cdot Q^{пад} + \frac{Q^{<<B}}{A} \quad (8.4)$$

Считая поверхность каждой зоны серой, выражение (8.4) можно переписать в виде:

$$Q^{*\phi} = \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \cdot Q^{рез} + Q^\diamond, \quad (8.5)$$

где  $Q^\diamond = \frac{Q^{<<B}}{A} = \frac{Q^{<<B}}{\varepsilon}$  – поток энергии излучения а. ч. т., имеющего температуру этой же зоны

$$Q^\diamond = c_\diamond \left( \frac{T}{100} \right)^4 \cdot F$$

# Составление системы зональных уравнений

Уравнения (2.16) и (2.18) являются рекуррентными уравнениями, т. е. такими, в которых изменяются только индексы при переходе от одной зоны к другой. Для примера, напомним систему зональных уравнений для системы из трех зон ( $n=3$ ).

Зона 1 ( $k=1$ ),  $i=1, 2, 3$ .

$$Q^{23} = \left( \frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1} \cdot Q^{22} + Q^1 \right) \cdot \varpi_{11} + \left( \frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2} \cdot Q^{23} + Q^2 \right) \cdot \varpi_{12} + \left( \frac{1-\varepsilon_3}{\varepsilon_3} \cdot Q^{23} + Q^3 \right) \cdot \varpi_{13} - \left( \frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1} \cdot Q^{22} + Q^1 \right) \quad (8.7)$$

Зона 2 ( $k=2$ ),  $i=1, 2, 3$ .

$$Q^{23} = \left( \frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1} \cdot Q^{23} + Q^1 \right) \cdot \varpi_{21} + \left( \frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2} \cdot Q^{23} + Q^2 \right) \cdot \varpi_{22} + \left( \frac{1-\varepsilon_3}{\varepsilon_3} \cdot Q^{23} + Q^3 \right) \cdot \varpi_{23} - \left( \frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2} \cdot Q^{23} + Q^2 \right) \quad (8.8)$$

Зона 3 ( $k=3$ ),  $i=1, 2, 3$ .

$$Q^{23} = \left( \frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1} \cdot Q^{23} + Q^1 \right) \cdot \varpi_{31} + \left( \frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2} \cdot Q^{23} + Q^2 \right) \cdot \varpi_{32} + \left( \frac{1-\varepsilon_3}{\varepsilon_3} \cdot Q^{23} + Q^3 \right) \cdot \varpi_{33} - \left( \frac{1-\varepsilon_3}{\varepsilon_3} \cdot Q^{23} + Q^3 \right) \quad (8.9)$$

# Второй способ расчета потока энергии результатирующего излучения

Возможен и другой способ записи зональных уравнений. Ранее было показано, что

$$Q_k^{\text{рез}} = Q_k^{\text{полл}} - Q_k^{\text{кос}}$$

Так как по определению

$$Q_k^{\text{полл}} = A_k \cdot Q_k^{\text{полл}} = A_k \cdot \sum_{i=1}^n Q_i^{\text{изл}} \cdot \varphi_{ik}$$

то

$$Q_k^{\text{рез}} = A_k \cdot \sum_{i=1}^n Q_i^{\text{изл}} \cdot \varphi_{ik} - Q_k^{\text{кос}} \quad (8.10)$$

или

$$Q_k^{\text{рез}} = A_k \cdot \sum_{i=1}^n \left( \frac{1 - \varepsilon_i}{\varepsilon_i} \cdot Q_i^{\text{рез}} + Q_i^{\text{с}} \right) \cdot \varphi_{ik} - Q_k^{\text{кос}} \quad (8.11)$$

# Методы определения угловых коэффициентов излучения

- **Аналитический метод.** Основан на непосредственном интегрировании математического выражения для элементарного углового коэффициента излучения

$$d\varphi_{1,2} = \frac{\cos \psi_1 \cos \psi_2}{\pi r^2} dF_2$$

Величины, входящие в это выражение, равны

$$r^2 = h^2 + 1 + R^2 + 2R \cos \alpha;$$

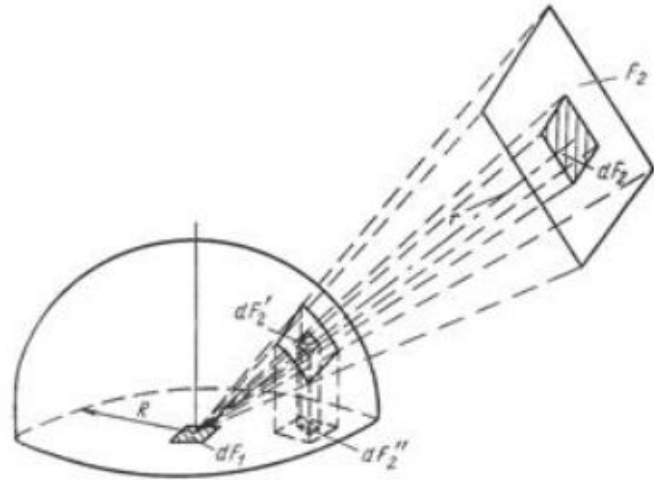
$$\cos \psi_1 = \frac{1 + R \cos \alpha}{r}; \quad \cos \psi_2 = \frac{h}{r}; \quad dF_2 = R dR d\alpha.$$

Подставляя эти значения в выражение для элементарного углового коэффициента, получаем:

$$d\varphi_{1,2} = \frac{h}{\pi} \frac{1 + R \cos \alpha}{(h^2 + 1 + R^2 + 2R \cos \alpha)^2} R dR d\alpha$$

Таким образом, аналитический метод связан с операциями по непосредственному интегрированию зависимости, которая является математическим описанием углового коэффициента.

**Графоаналитический метод (метод проекций).** В этом методе операции интегрирования заменяются графическим проектированием. На полусфере контур лучей, падающих с площадки  $dF_1$  на поверхность второго тела, вырежет площадку  $dF_2'$ , проекция которой выразится площадкой  $dF_2''$ .



К графоаналитическому методу определения угловых коэффициентов

Тогда местный угловой коэффициент излучения  $\varphi_{1,2}$  равен частному от отделения площадки  $dF_2''$  на площадь круга радиусом  $R$ . Элементарный угловой коэффициент излучения

$$d\varphi_{1,2} = \frac{d\omega_1}{\pi} \cos \psi_1,$$

Произведение  $d\omega_1 \cos \psi_1$  является проекцией элементарного угла  $d\omega_1$ , на плоскость, в которой находится площадка  $dF_1$ .

Проинтегрировав это выражение, получим значение местного углового коэффициента  $\varphi_{1,2}$ .



**Метод поточной алгебры.** В этом методе интегрирование заменяется простыми алгебраическими операциями. В основе метода лежат геометрические свойства лучистых потоков.

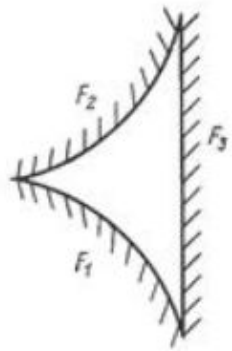


Схема замкнутой системы из трех выпуклых (плоских) тел поверхностями  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$ .

Найдем средние значения взаимных поверхностей и угловых коэффициентов излучения для тел с поверхностями  $F_1$  и  $F_2$ . Согласно свойству замыкаемости

$$\bar{H}_{1,1} + \bar{H}_{1,2} + \bar{H}_{1,3} = F_1 ,$$

$$\bar{H}_{2,1} + \bar{H}_{2,2} + \bar{H}_{2,3} = F_2 ,$$

$$\bar{H}_{3,1} + \bar{H}_{3,2} + \bar{H}_{3,3} = F_3 .$$

Так как, самооблучения не происходит  $\bar{H}_{1,1} = \bar{H}_{2,2} = \bar{H}_{3,3} = 0$  .

Следовательно, 
$$\bar{H}_{1,2} + \bar{H}_{1,3} + \bar{H}_{2,3} = \frac{1}{2}(F_1 + F_2 + F_3) .$$

Вычтем последовательно из последнего уравнения, уравнения системы, получим

$$\overline{H}_{2,3} = \frac{F_2 + F_3 - F_1}{2} ; \quad \overline{H}_{1,3} = \frac{F_1 + F_3 - F_2}{2} ; \quad \overline{H}_{1,2} = \frac{F_1 + F_2 - F_3}{2} .$$

С учетом  $\overline{H}_{2,3} = F_2 \overline{\varphi}_{2,3}$ , имеем  $\overline{\varphi}_{2,3} = \frac{F_2 + F_3 - F_1}{2F_2}$ .

По свойству взаимности  $\overline{H}_{2,3} = \overline{H}_{3,2}$ ;  $\overline{\varphi}_{2,3}F_2 = \overline{\varphi}_{3,2}F_3$ , следовательно

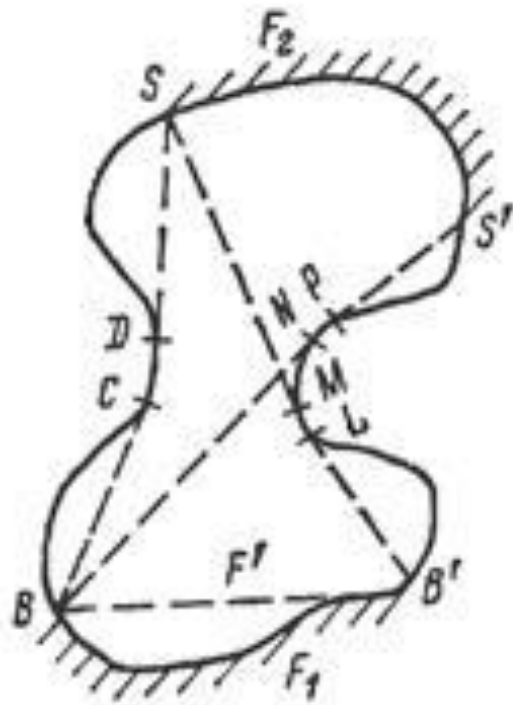
$$\overline{\varphi}_{3,2} = \frac{F_3 + F_2 - F_1}{2F_3} .$$

Из  $\overline{H}_{1,3} = F_1 \overline{\varphi}_{1,3}$  имеем  $\overline{\varphi}_{1,3} = \frac{F_1 + F_3 - F_2}{2F_1}$ . Аналогично

$$\overline{\varphi}_{3,1} = \frac{F_3 + F_1 - F_2}{2F_3} .$$



# «НАТЯНУТЫЕ НИТИ»



Применение метода поточной алгебры  
к замкнутой системе сложных тел

Рассмотрим систему пластин одинаковой ширины с относительно большими продольными размерами. Задана ширина  $a$  и расстояние между пластинами  $h$ . Требуется определить  $H_{1,2}$  и  $\varphi_{1,2}$ . Введем условные поверхности с контурами AC и BD. Получаем замкнутую систему, состоящую из четырех тел. Свойство замкнутости выразится

$$\overline{\varphi_{1,2}} + \overline{\varphi_{1,AC}} + \overline{\varphi_{1,BD}} = 1; \quad \overline{\varphi_{1,1}} = 0,$$

откуда искомое значение

$$\overline{\varphi_{1,2}} = 1 - \overline{\varphi_{1,AC}} - \overline{\varphi_{1,BD}}.$$

Согласно

$$\overline{\varphi_{1,AC}} = \frac{F_1 + AC - BC}{2F_1}; \quad \overline{\varphi_{1,BD}} = \frac{F_1 + BD - AD}{2F_1},$$

где  $AB=a$ ;  $AC=BD=h$ ;  $AD=BC=\sqrt{a^2 + h^2}$ .

После подстановки этих величин найдем искомое значение среднего углового коэффициента и взаимной поверхности излучения

$$\overline{\varphi_{1,2}} = \frac{2\sqrt{a^2 + h^2}}{2a} - \frac{2h}{a} = \sqrt{1 + \left(\frac{h}{a}\right)^2} - \frac{h}{a};$$

$$\overline{H_{1,2}} = \sqrt{a^2 + h^2} - h.$$

Используя метод натянутых нитей можно сразу получить

$$\overline{H_{1,2}} = \frac{AD + BC}{2} - \frac{AC + BD}{2} = \sqrt{a^2 + h^2} - h.$$

**Метод светового моделирования.** В опытном исследовании углового коэффициента излучения лучистые потоки заменяются световыми, так как оба вида относятся к электромагнитному излучению. Однако световое моделирование обладает рядом преимуществ. В нем устраняются трудности, связанные с измерением лучистых потоков, особенно в области высоких температур.

**Метод электрического моделирования.** Метод электрического моделирования использовался выше применительно к процессам теплопроводности. Существует также аналогия между переносом энергии излучением заряда в электрической цепи. Результирующий лучистый поток

$$\Delta Q_{1,2} = c_0 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \Delta H_{1,2} = \frac{\Delta T}{R_T}$$

С другой стороны

$$I = \frac{\Delta U}{R_s}$$

Формальное сходство уравнений позволяет измерить потоки излучения и провести опытное исследование угловых коэффициентов излучения.

# Список используемой литературы:

1. Теплопередача: Учебник для вузов/ В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел.- 4-е изд., перераб. И доп.- М.: Энергоиздат, 1981.- 416 с., ил.
2. А.П. Солодов «Электронный курс» 1-13 с.
3. <https://poznayka.org/s31251t1.html>
4. [https://studopedia.ru/22\\_23795\\_uglovie-koeffitsienti-izlucheniya-i-ih-fizicheskiy-smisl.html](https://studopedia.ru/22_23795_uglovie-koeffitsienti-izlucheniya-i-ih-fizicheskiy-smisl.html)
5. ISSN 181433296. Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури, випуск 201433(107)