

Лекция

на тему: «Лучистый теплообмен»

Структура лекции

1. Основные понятия и определения

Основные понятия и определения

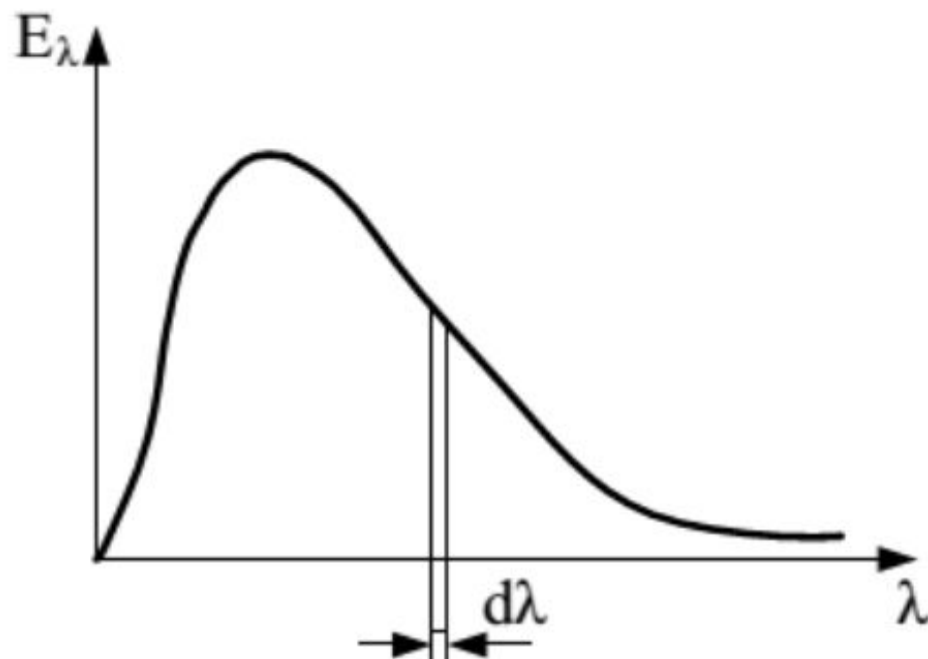
- Тепловое излучение (радиационный теплообмен) - способ переноса теплоты в пространстве, осуществляемый в результате распространения электромагнитных волн, энергия которых при взаимодействии с веществом переходит в тепло.
- Электромагнитные волны - электромагнитные возмущения, исходящие из излучаемого 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

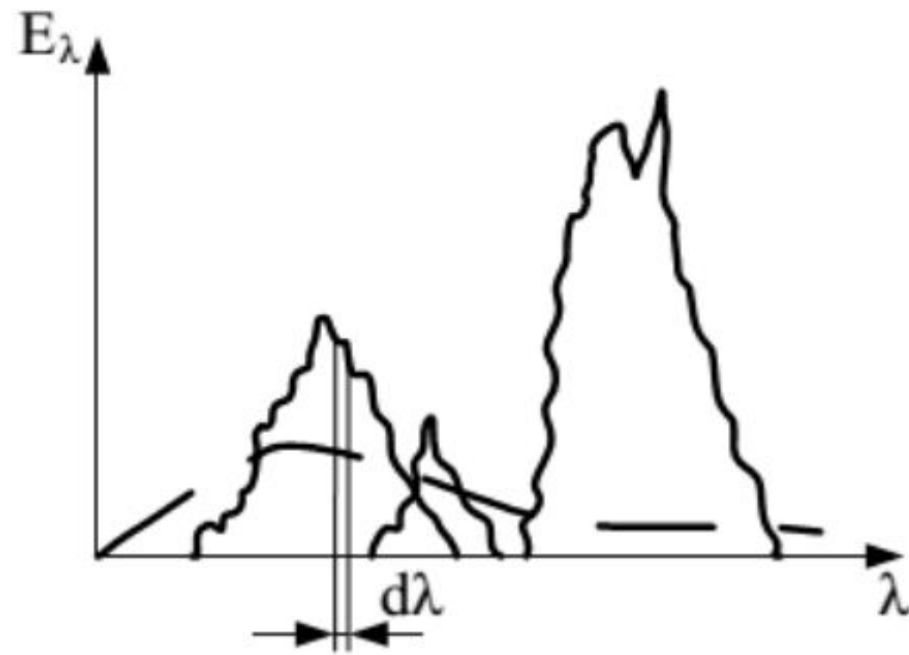
- **Спектром излучения** называют распределение лучистой энергии по длине волны $E_\lambda = f(\lambda)$.

E_λ (Вт/м³) – 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°C до 100°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

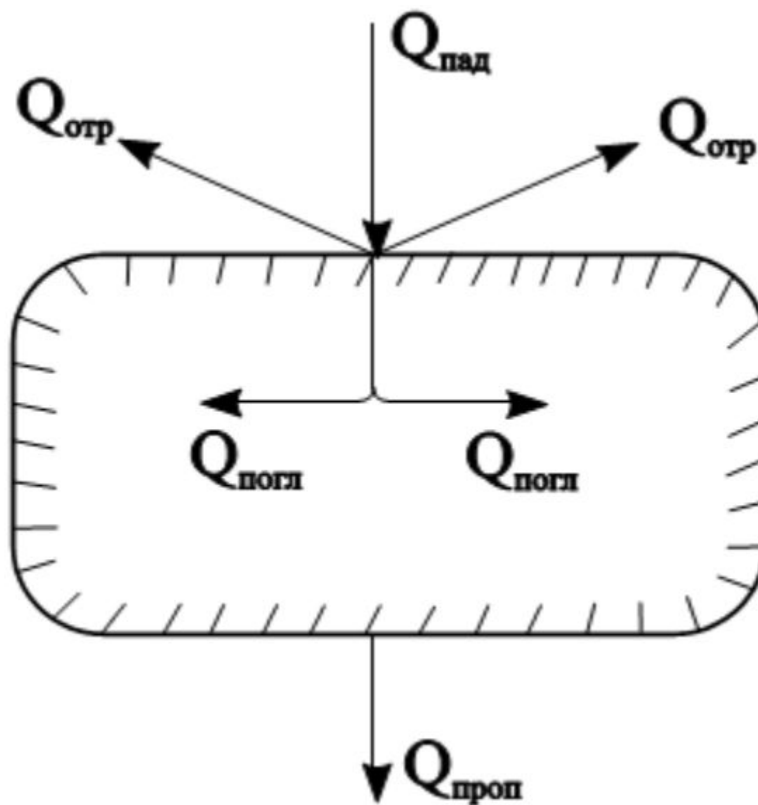


Схема радиационного теплообмена для полупрозрачного тела

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

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.

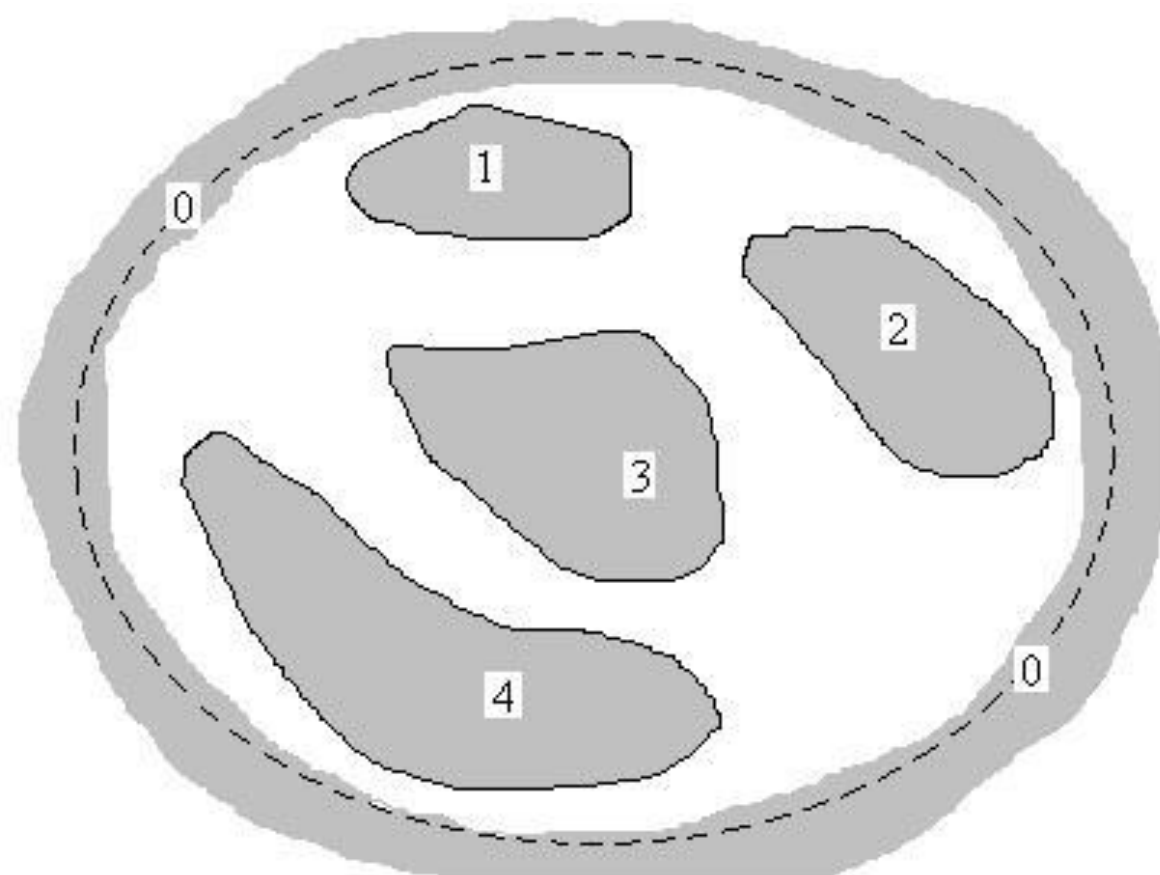
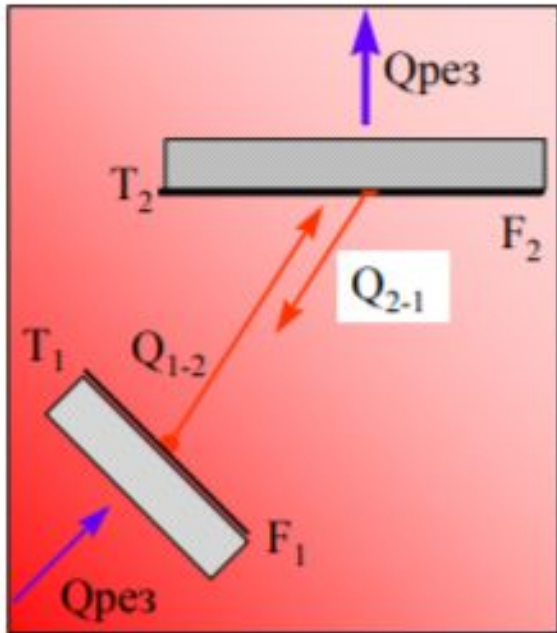


Рис. 1. К общей постановке задачи радиационного теплообмена

Понятие углового коэффициента излучения



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

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

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

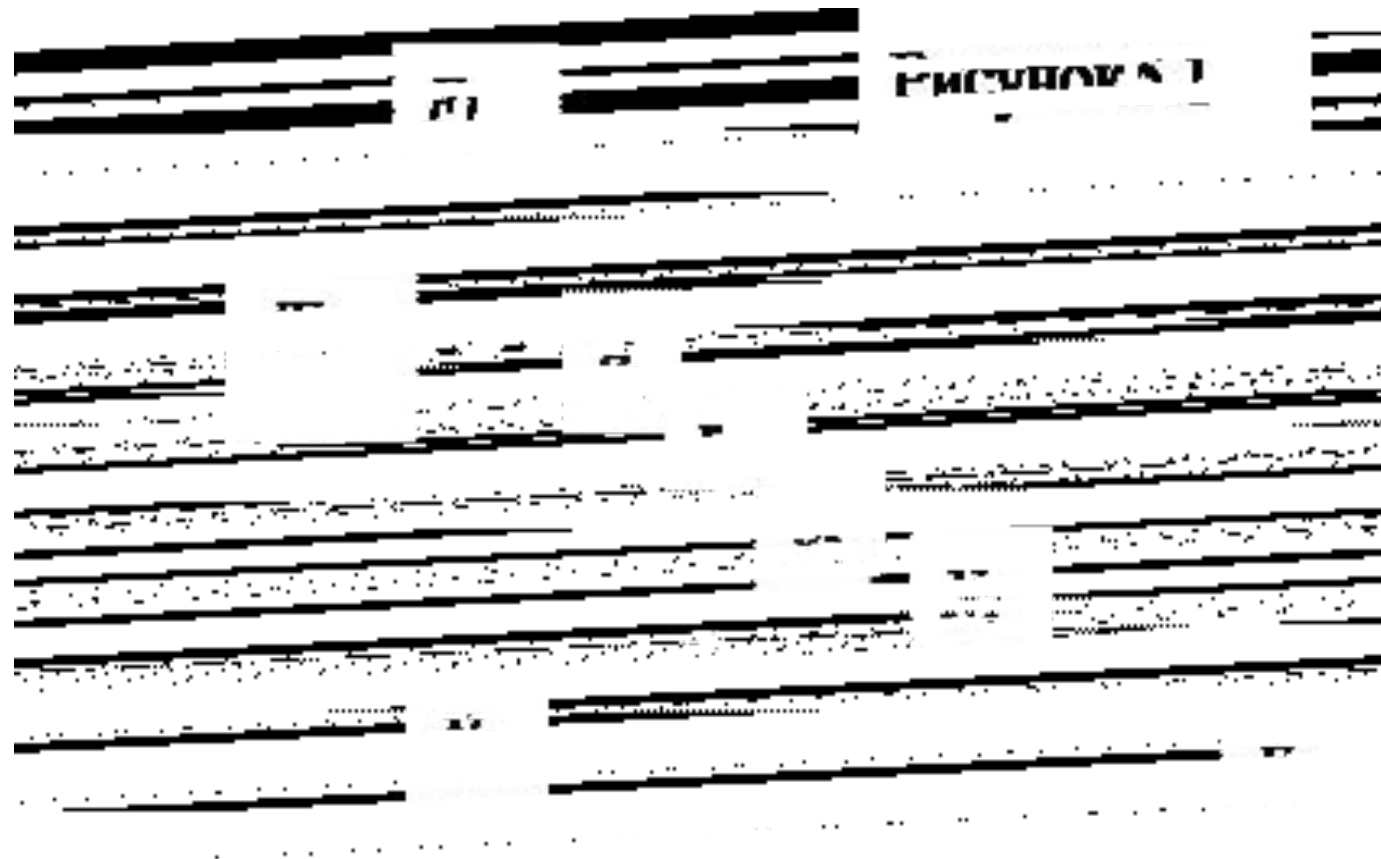
$$Q_{2 \rightarrow 1} = E_{0,2}F_2\varphi_{21}.$$

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

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

Методы определения угловых коэффициентов излучения

- Элементарный
- Локальный
- Средний



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

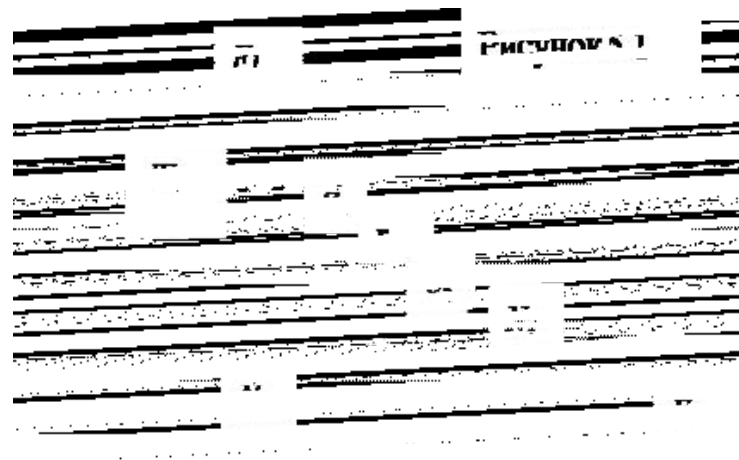
Поскольку для серых поверхностей $B_1^{\text{эф}} = q_1^{\text{эф}} / \pi$, а $d\omega_1 = dF_2 \cos \theta_2 / r^2$, то

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

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

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

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 $d\varphi_{12}$, поскольку изменятся величины углов θ_1 и θ_2 и расстояние r .



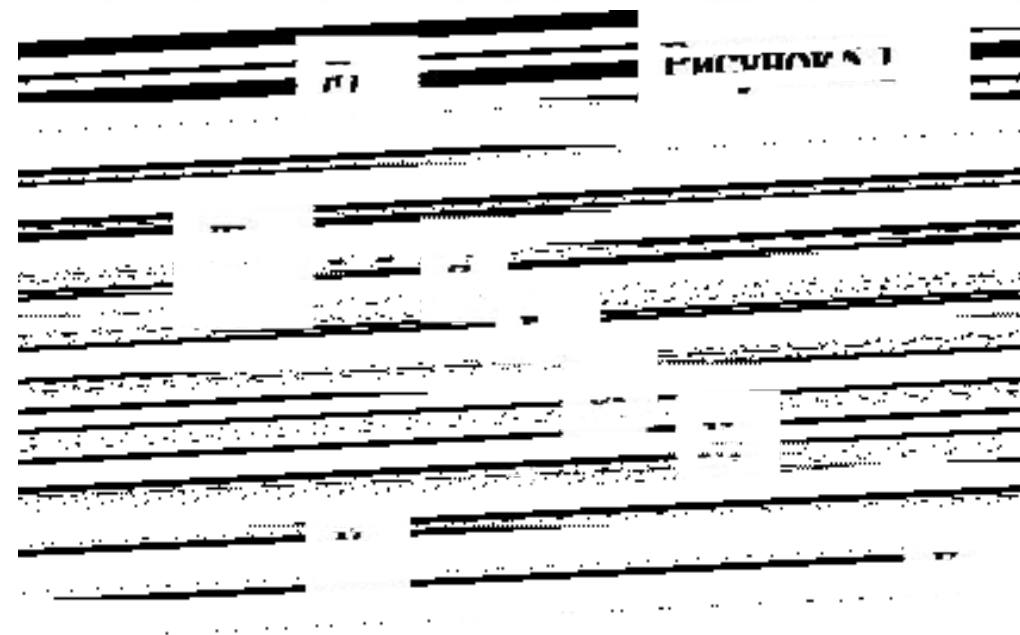
Проводя аналогичные рассуждения для излучения площадки dF_2 на dF_1 , можно получить

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

Тогда величина

$$d\varphi_{21} = \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{R^2} dF_2$$

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



Локальный (местный) угловой коэффициент излучения φ

- Локальный (местный) угловой коэффициент излучения φ 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

$$dQ_1^{\text{пад}} = \int_{F_2} d^2 Q_1^{\text{пад}} = q_1^{\text{эф}} \cdot dF_1 \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{R^2} dF_2$$

$$\text{И } dQ_1^{\text{пад}} = \int_{F_1} d^2 Q_1^{\text{пад}} = q_1^{\text{эф}} \cdot dF_2 \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{R^2} dF_1$$

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

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

$$\text{И } \phi'_{21} = \int_{F_1} \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{R^2} dF_1$$

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 φ

- 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.

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

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

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

или

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

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 $q_1^{\text{эф}}$ постоянна в пределах F_2 , можно записать

$$Q_1^{\text{пад}} = q_1^{\text{эф}} \iint_{F_1 F_2} \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{r^2} dF_2 dF_1$$

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

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 φ_{21} .

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

При противоположном направлении переноса энергии можно написать:

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

В общем случае для системы из n поверхностей справедливы соотношения:

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

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

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_{φ} 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.

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

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

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

$$\varphi_{44} + \varphi_{41} + \varphi_{42} + \varphi_{43} = 1$$

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

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

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: $\varphi_{11}, \varphi_{13}, \varphi_{31}, \varphi_{22}, \varphi_{23}, \varphi_{32}, \varphi_{33}, \varphi_{12}, \varphi_{21}$.

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

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

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

$$\varphi_{31} \cdot F_2 = \varphi_{13} \cdot F_1$$

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

т.к. $\varphi_{31} = 1$, то $\varphi_{13} = \frac{F_2}{F_1}$, поскольку $\varphi_{11} + \varphi_{13} = 1$, то $\varphi_{11} + \frac{F_2}{F_1} = 1$, то $\varphi_{11} = 1 - \frac{F_2}{F_1}$.

Из соотношения $\varphi_{11} + \varphi_{12} = 1$ следует, что $\varphi_{12} = 1 - 1 + \frac{F_2}{F_1} = \frac{F_2}{F_1}$.

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

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

В этой схеме следует обратить внимание на тот факт, что по свойству взаимности $\varphi_{31} \cdot F_2 = \varphi_{13} \cdot F_1$ и тогда $\varphi_{13} = \frac{F_2}{F_1} = \varphi_{12}$. 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

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

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

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

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 $Q_i^{эф}$ и $Q_k^{эф}$ являются известными, их можно представить в виде:

$$Q_i^{эф} = Q_i^{<<Б} + Q_i^{отр} \quad \text{и} \quad Q_k^{эф} = Q_k^{<<Б} + Q_k^{отр}, \text{ где}$$

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

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

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

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

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

$$Q^{эф} = \frac{1-A}{A} \cdot Q^{пад} + \frac{Q^{<<Б}}{A} \quad (8.4)$$

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

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

где $Q^\diamond = \frac{Q^{<<Б}}{A} = \frac{Q^{<<Б}}{\varepsilon}$ – 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 ($k=1$), $i=1, 2, 3$.

$$Q^{n1} = \left(\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1} \cdot Q^{n2} + Q^0 \right) \cdot \varpi_1 + \left(\frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2} \cdot Q^{n3} + Q^0 \right) \cdot \varpi_2 + \left(\frac{1-\varepsilon_3}{\varepsilon_3} \cdot Q^{n3} + Q^0 \right) \cdot \varpi_3 - \left(\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1} \cdot Q^{n1} + Q^0 \right) \quad (8.7)$$

Зона 2 ($k=2$), $i=1, 2, 3$.

$$Q^{n2} = \left(\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1} \cdot Q^{n1} + Q^0 \right) \cdot \varpi_1 + \left(\frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2} \cdot Q^{n3} + Q^0 \right) \cdot \varpi_2 + \left(\frac{1-\varepsilon_3}{\varepsilon_3} \cdot Q^{n3} + Q^0 \right) \cdot \varpi_3 - \left(\frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2} \cdot Q^{n2} + Q^0 \right) \quad (8.8)$$

Зона 3 ($k=3$), $i=1, 2, 3$.

$$Q^{n3} = \left(\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1} \cdot Q^{n1} + Q^0 \right) \cdot \varpi_1 + \left(\frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2} \cdot Q^{n2} + Q^0 \right) \cdot \varpi_2 + \left(\frac{1-\varepsilon_3}{\varepsilon_3} \cdot Q^{n3} + Q^0 \right) \cdot \varpi_3 - \left(\frac{1-\varepsilon_3}{\varepsilon_3} \cdot Q^{n3} + Q^0 \right) \quad (8.9)$$

Второй способ расчета потока энергии результатирующего излучения

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

$$Q_k^{\text{рез}} = Q_k^{\text{полл}} - Q_k^{\text{соб}},$$

Так как по определению

$$Q_k^{\text{полл}} = A_k \cdot Q_k^{\text{полл}} = A_k \cdot \sum_{i=1}^N Q_i^{\text{эф}} \cdot \varphi_{ik},$$

то

$$Q_k^{\text{рез}} = A_k \cdot \sum_{i=1}^N Q_i^{\text{эф}} \cdot \varphi_{ik} - Q_k^{\text{соб}} \quad (8.10)$$

или

$$Q_k^{\text{рез}} = A_k \cdot \sum_{i=1}^N \left(\frac{1 - \varepsilon_i}{\varepsilon_i} \cdot Q_i^{\text{рез}} + Q_i^{\text{св}} \right) \cdot \varphi_{ik} - Q_k^{\text{соб}}. \quad (8.11)$$

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

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

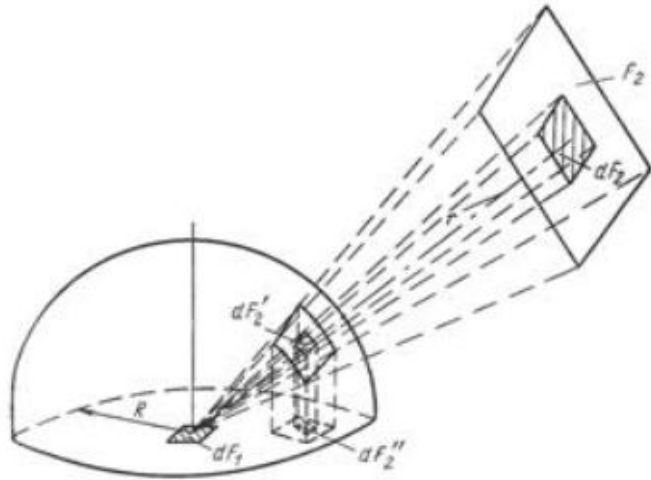
$$\cos \psi_1 = \frac{1 + R \cos \alpha}{r}; \quad \cos \psi_2 = \frac{h}{r}; \quad dF_2 = R dR d\alpha.$$

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

$$d\varphi_{1,2} = \frac{h}{\pi} \frac{1 + R \cos \alpha}{(h^2 + 1 + R^2 + 2R \cos \alpha)^{3/2}} R dR d\alpha.$$

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.

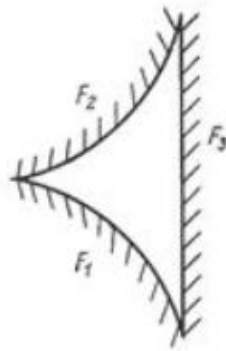


Схема замкнутой системы из трех выпуклых (плоских) тел поверхностями F_1 , F_2 , F_3 .

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

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

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

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

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

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

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

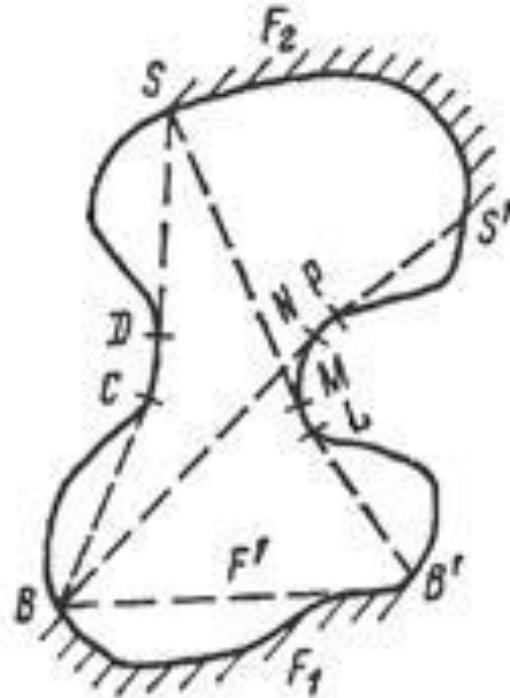
По свойству взаимности $\overline{H}_{2,3} = \overline{H}_{3,2}$; $\overline{\varphi}_{2,3}F_2 = \overline{\varphi}_{3,2}F_3$, следовательно

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

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
5. ISSN 181433296. Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури, випуск 201433(107)