Тема 3 (2 час, лекция 1)

Лекция 14

Теплообмен излучением между твердыми телами, разделенными прозрачной (диатермичной*) средой.

Теплообмен излучением между телами, разделенными прозрачной средой. Виды лучистых потоков, их взаимная связь. Интегральные уравнения излучения. Угловые коэффициенты и взаимные поверхности. Определение угловых коэффициентов. Метод Поляка. Зональный метод расчета теплообмена излучением. Расчет теплообмена излучением в системе двух и более тел.

***Диатермичная (диатермическая) среда (от греческого diá- сквозь через, thermáinõ- жар, теплота) – среда прозрачная для теплового потока излучением**

Существует два метода исследования процессов лучистого теплообмена: метод **многократных отражений** и метод **сальдо**.

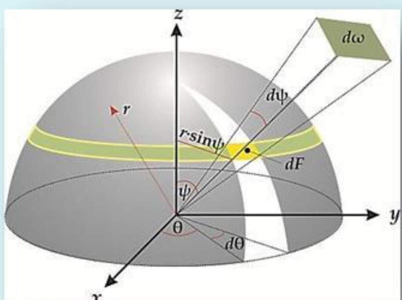
- **Метод многократных отражений** - на зависимостях изменения величины лучистой энергии на отдельных стадиях затухающих поглощений и отражений в процессе лучистого теплообмена с окружающими его телами. Громоздок для сложных геометрических систем.
- **Метод сальдо** - в количественном анализе лучистых процессов, оперируют интегральными величинами, характеризующими конечные эффекты теплообмена между телами, составляющими данную излучающую систему.

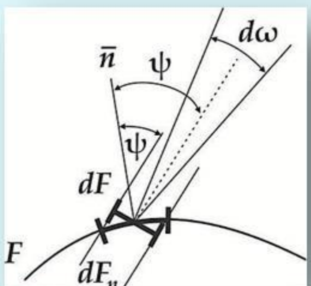
Вводится понятие **вектора плотности теплового потока излучения** $\vec{q}$, в том числе и градиентной (по температуре) форме: $dQ = (\vec{q} \cdot dF)$.

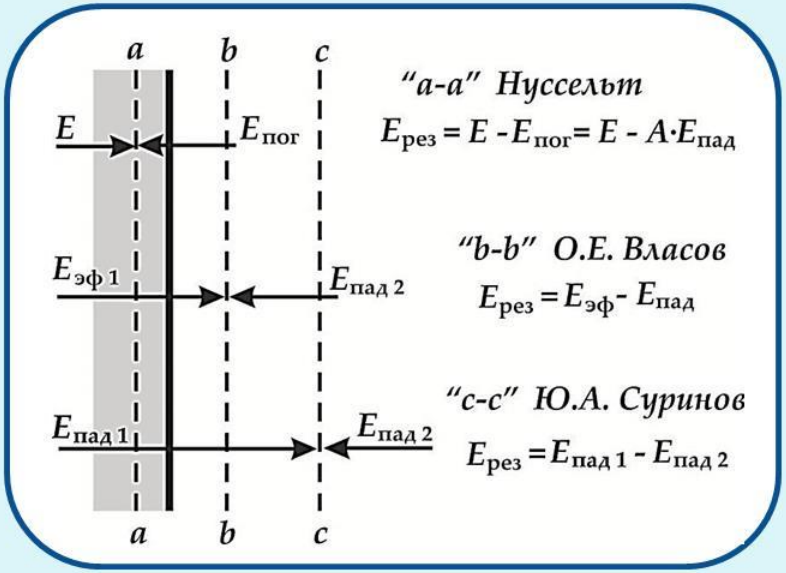
Для системы из нескольких тел вводятся **угловые коэффициенты -** доля потока излучения одного тела, попадающая на другое. Они характеризуют только геометрические особенности излучающей системы - учитывается только «прямое» попадание энергии излучения от одного тела на другое (без посредников). Поэтому для простоты полагается, что тела, которые участвуют в теплообмене излучением, являются абсолютно черными.

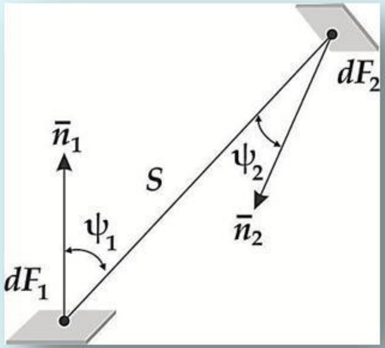
Принимаются следующие допущения:

- все тела, входящие в излучающую систему, подчиняются закону Ламберта в отношении как собственного, так и отраженного излучений;
- тела непрозрачные ($D = 0$) имеют изотермические поверхности, и вся лучистая энергия, поглощаемая ими, переходит в тепловую энергию, причем перенос тепла за счет теплопроводности и конвекции отсутствует;
- коэффициенты поглощения и степени черноты не зависят от температуры, процесс лучистого теплообмена – стационарный.





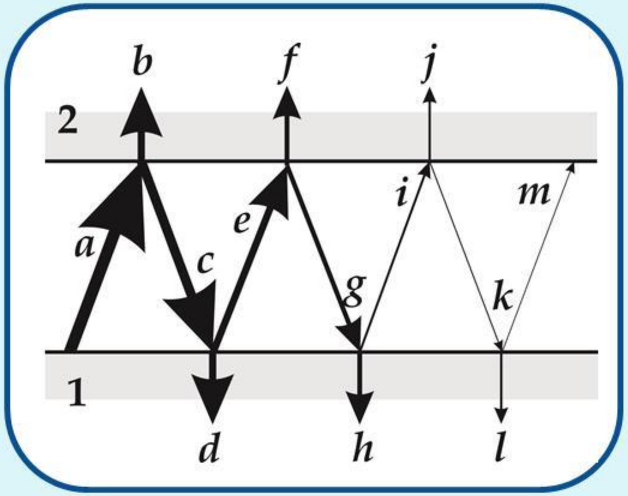




Система тел с плоскопараллельными поверхностями

$a: E_1$
$b: E_1 A_2$
$c: E_1(1-A_2)$
$d: E_1(1-A_2)A_1$
$e: E_1(1-A_2)(1-A_1)$
$f: E_1(1-A_2)(1-A_1)A_2$
$g: E_1(1-A_2)^2(1-A_1)$
$h: E_1(1-A_2)^2(1-A_1)A_1$
$i: E_1(1-A_2)^2(1-A_1)^2$
$j: E_1(1-A_2)^2(1-A_1)^2 A_2$
$k: E_1(1-A_2)^3(1-A_1)^2$
$l: E_1(1-A_2)^3(1-A_1)^2 A_1$
$m: E_1(1-A_2)^3(1-A_1)^3$
....

Метод многократных отражений



Результирующий т. поток : разность собственного излучения тела 1 и поглощенного от собственного и излучения тела 2 :
$E_{рез} = E - E_{погл} = E - A\,E_{пад}$

$a': E_2$
$b': E_2 A_1$
$c': E_2(1-A_1)$
$d': E_2(1-A_1)A_2$
$e': E_2(1-A_1)(1-A_2)$
$f': E_2(1-A_1)(1-A_2)A_1$
$g': E_2(1-A_1)^2(1-A_2)$
$h': E_2(1-A_1)^2(1-A_2)A_2$
$i': E_2(1-A_1)^2(1-A_2)^2$
$j': E_2(1-A_1)^2(1-A_2)^2 A_1$
$k': E_2(1-A_1)^3(1-A_2)^2$
$l': E_2(1-A_1)^3(1-A_2)^2 A_2$
$m': E_2(1-A_1)^3(1-A_2)^3$
....

$$E_1\left(1+k+k^2+\ldots\right)\left(1-A_2\right)A_1=E_1\frac{1}{1-k}\left(1-A_2\right)A_1$$ – поглощенное из соб. излучения I телом

$$k=\left(1-A_1\right)\left(1-A_2\right)$$

$$E_2\left(1+k+k^2+\ldots\right)A_1=E_2\frac{1}{1-k}A_1$$ – поглощенное из соб. излучения II телом

$$E_{\text{рез}1}=E_1-\left(E_{\text{погл от}1}+E_{\text{погл от }2}\right)=E_1-E_1\frac{1}{1-k}\left(1-A_2\right)A_1-E_2\frac{1}{1-k}A_1$$

$$1-k=1-\left(1-A_1\right)\left(1-A_2\right)=A_1+A_2-A_1A_2$$

$$E_{\text{рез}1}=\frac{E_1A_2-E_2A_1}{A_1+A_2-A_1A_2}$$

$$E_1=c_0\varepsilon_1\left(\frac{T_1}{100}\right)^4=c_0A_1\left(\frac{T_1}{100}\right)^4$$

$$E_2=c_0\varepsilon_2\left(\frac{T_2}{100}\right)^4=c_0A_2\left(\frac{T_2}{100}\right)^4$$

$$E_{\text{рез}1}=c_0A_{\text{пр}}\left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4-\left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right]=c_{\text{пр}}\left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4-\left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right]$$

$$A_{\text{пр}}=\frac{1}{\dfrac{1}{A_1}+\dfrac{1}{A_2}-1}=\frac{1}{\dfrac{1}{\varepsilon_1}+\dfrac{1}{\varepsilon_2}-1};\qquad c_{\text{пр}}=\frac{1}{\dfrac{1}{c_1}+\dfrac{1}{c_2}-\dfrac{1}{c_0}}$$

Метод сальдо

$$E_{\text{рез}1} = E_{\text{эфф}1} - E_{\text{пад}1} = E_{\text{эфф}1} - E_{\text{эфф}2} = E_{12}$$

$$E_{12} = -E_{21}$$

$$E_{\text{эфф}1} = E_{12}\left(1 - \frac{1}{A_1}\right) + E_1\frac{1}{A_1}$$

$$E_{\text{эфф}2} = E_{21}\left(1 - \frac{1}{A_2}\right) + E_2\frac{1}{A_2} = -E_{12}\left(1 - \frac{1}{A_2}\right) + E_2\frac{1}{A_2}$$

$$E_{12} = E_{12}\left(1 - \frac{1}{A_1}\right) + E_1\frac{1}{A_1} + E_{12}\left(1 - \frac{1}{A_2}\right) - E_2\frac{1}{A_2}$$

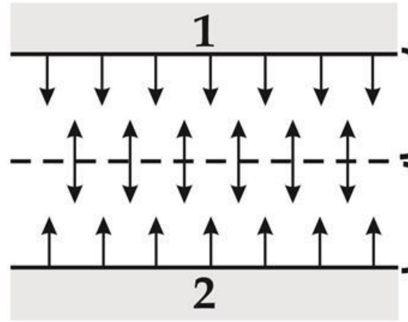
$$E_{12} = \frac{\frac{E_1}{A_1} - \frac{E_2}{A_2}}{\frac{1}{A_1} + \frac{1}{A_2} - 1}$$

$$E_{\text{рез}1} = c_0 A_{\text{пр}}\left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right] = c_{\text{пр}}\left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right]$$

$$A_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{A_1} + \frac{1}{A_2} - 1} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}; \qquad c_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2} - \frac{1}{c_0}}$$

Теплообмен излучением при наличии экранов для плоскопараллельных тел

Пренебрежем термическим сопротивлением экрана



$$E_{1э} = c_0 A_{1э}\left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_э}{100}\right)^4\right] = \frac{c_0}{\frac{1}{A_1}+\frac{1}{A_э}-1}\left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_э}{100}\right)^4\right]$$

$$E_{э2} = c_0 A_{э2}\left[\left(\frac{T_э}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right] = \frac{c_0}{\frac{1}{A_э}+\frac{1}{A_2}-1}\left[\left(\frac{T_э}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right]$$

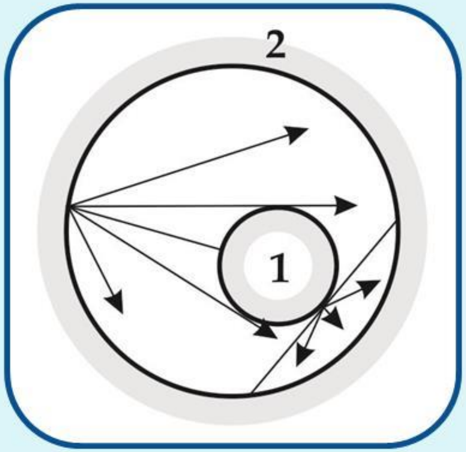
$E_{1э} = E_{э2}$ – стационар

$$\left.\begin{aligned}\frac{E_{1э}}{c_0 A_{1э}} &= \left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_э}{100}\right)^4\\ \frac{E_{э2}}{c_0 A_{э2}} &= \left(\frac{T_э}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\end{aligned}\right\} E_{12} = E_{1э} = E_{э2} = \frac{c_0}{\frac{1}{A_{1э}}+\frac{1}{A_{э2}}}\left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right] = \frac{c_0}{\frac{1}{A_1}+\frac{1}{A_2}+\left(\frac{2}{A_э}-1\right)-1}\left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right]$$

При наличии n экранов результирующий поток уменьшится в $(n+1)$ раз.

$$E_{12} = \frac{c_0}{\frac{1}{A_1}+\frac{1}{A_2}+\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{2}{A_э}-1\right)-1}\left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right]$$

Теплообмен излучением между телом и его оболочкой



$$Q_{\text{рез}1} = Q_{\text{эфф}1} - Q_{\text{пад}1} = Q_{\text{эфф}1} - \overline{\varphi_{21}} Q_{\text{эфф}2} = Q_{12}$$

$$Q_{12} = -Q_{21}$$

$$Q_{\text{эфф}1} = Q_{12}\left(1 - \frac{1}{A_1}\right) + Q_1 \frac{1}{A_1}$$

$$Q_{\text{эфф}2} = Q_{21}\left(1 - \frac{1}{A_2}\right) + Q_2 \frac{1}{A_2} = -Q_{12}\left(1 - \frac{1}{A_2}\right) + Q_2 \frac{1}{A_2}$$

$$Q_{12} = \frac{\dfrac{Q_1}{A_1} - \overline{\varphi_{21}} \dfrac{Q_2}{A_2}}{\dfrac{1}{A_1} + \overline{\varphi_{21}}\left(\dfrac{1}{A_2} - 1\right)}$$

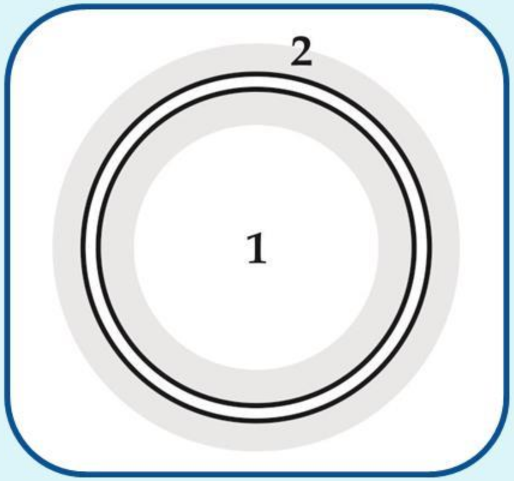
$$Q_1 = c_0 \varepsilon_1 F_1 \left(\frac{T_1}{100}\right)^4 = c_0 A_1 F_1 \left(\frac{T_1}{100}\right)^4$$

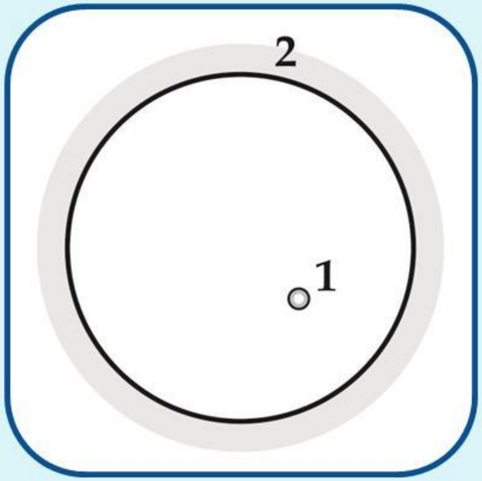
$$Q_2 = c_0 \varepsilon_2 F_2 \left(\frac{T_2}{100}\right)^4 = c_0 A_2 F_2 \left(\frac{T_2}{100}\right)^4$$

$$T_1 = T_2 \Rightarrow \quad Q_{12} = 0 \quad \Rightarrow \quad F_1 - \overline{\varphi_{21}} F_2 = 0 \Rightarrow \overline{\varphi_{21}} = \frac{F_1}{F_2}$$

$$Q_1 = c_0 A_{\text{пр}} F_1 \left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right] = c_{\text{пр}} F_1 \left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right]$$

$$A_{\text{пр}} = \frac{1}{\dfrac{1}{A_1} + \dfrac{F_1}{F_2}\left(\dfrac{1}{A_2} - 1\right)} = \frac{1}{\dfrac{1}{\varepsilon_1} + \dfrac{F_1}{F_2}\left(\dfrac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)}; \qquad c_{\text{пр}} = \frac{1}{\dfrac{1}{c_1} + \dfrac{F_1}{F_2}\left(\dfrac{1}{c_2} - \dfrac{1}{c_0}\right)}$$





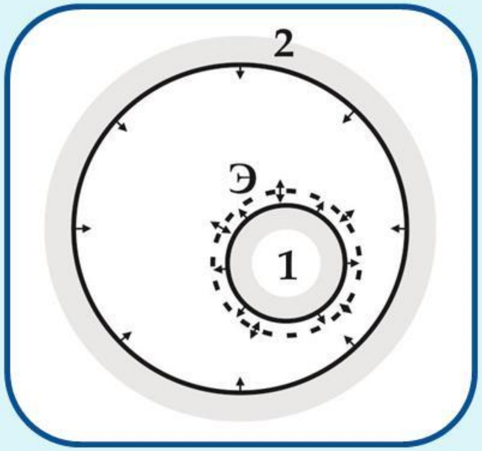
$$Q_1 = c_0 A_{\text{пр}} F_1 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] = c_{\text{пр}} F_1 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]$$

$$A_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{A_1} + \frac{F_1}{F_2}\left(\frac{1}{A_2} - 1\right)} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2}\left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)};$$

$$c_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{c_1} + \frac{F_1}{F_2}\left(\frac{1}{c_2} - \frac{1}{c_0}\right)}$$

Теплообмен при наличии экранов для тела с оболочкой

$$Q_{1Э}=c_0A_{1Э}F_1\left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4-\left(\frac{T_Э}{100}\right)^4\right]\overline{\varphi_{1Э}}=\frac{c_0F_1\overline{\varphi_{1Э}}}{\frac{1}{A_1}+\frac{F_1}{F_Э}\left(\frac{1}{A_Э}-1\right)}\left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4-\left(\frac{T_Э}{100}\right)^4\right]$$



$$Q_{Э2}=c_0A_{Э2}F_Э\left[\left(\frac{T_Э}{100}\right)^4-\left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right]\overline{\varphi_{Э2}}=\frac{c_0F_Э\overline{\varphi_{Э2}}}{\frac{1}{A_Э}+\frac{F_Э}{F_2}\left(\frac{1}{A_2}-1\right)}\left[\left(\frac{T_Э}{100}\right)^4-\left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right]$$

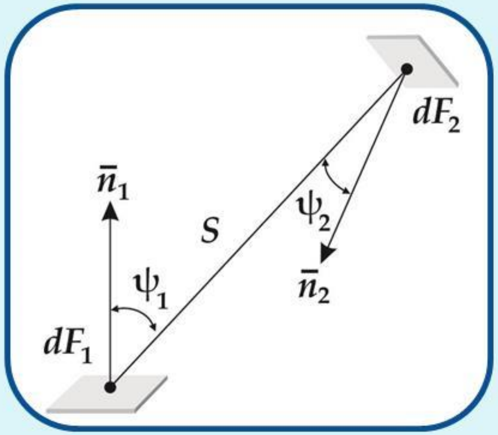
$Q_{1Э}=Q_{Э2}$ – стационар

$$\left.\begin{aligned}\frac{Q_{1Э}}{c_0A_{1Э}F_1\overline{\varphi_{1Э}}}&=\left(\frac{T_1}{100}\right)^4-\left(\frac{T_Э}{100}\right)^4\\ \frac{Q_{Э2}}{c_0A_{Э2}F_Э\overline{\varphi_{Э2}}}&=\left(\frac{T_Э}{100}\right)^4-\left(\frac{T_2}{100}\right)^4\end{aligned}\right\}Q_{12}=Q_{1Э}=Q_{Э2}$$

$$Q_{12}=Q_{1Э}=Q_{Э2}=\frac{c_0}{\frac{1}{A_{1Э}}+\frac{F_1}{F_Э}\frac{1}{A_{Э2}}}\left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4-\left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right]=\frac{c_0}{\frac{1}{A_1}+\frac{F_1}{F_2}\left(\frac{1}{A_2}-1\right)+\frac{F_1}{F_Э}\left(\frac{2}{A_Э}-1\right)}\left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4-\left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right]$$

$$\boxed{Q_{12}=\frac{c_0}{\frac{1}{A_1}+\frac{F_1}{F_2}\left(\frac{1}{A_2}-1\right)+\sum_{i+1}^{N}\frac{F_1}{F_{Э\,i}}\left(\frac{2}{A_{Э\,i}}-1\right)}\left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4-\left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right]}$$

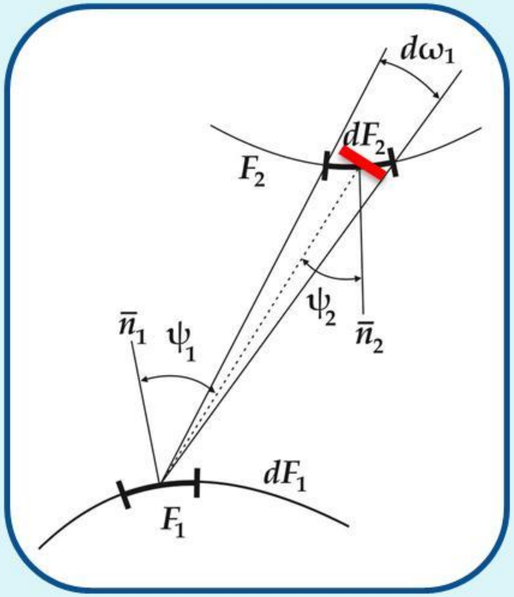
Теплообмен излучением между двумя телами, произвольно расположенными в пространстве. Методы определения угловых коэффициентов излучения.



$$d^2Q_{\text{пад}1\text{-}2} = I_{\psi 1} \cdot d\omega_1 \cdot dF_1 = I_1 \cdot \cos\psi_1 \cdot d\omega_1 \cdot dF_1$$

$$d^2Q_{\text{пад}2\text{-}1} = I_{\psi 2} \cdot d\omega_2 \cdot dF_2 = I_2 \cdot \cos\psi_2 \cdot d\omega_2 \cdot dF_2$$

$$d\omega_1 = \frac{dF_2 \cdot \cos\psi_2}{r^2} \qquad d\omega_2 = \frac{dF_1 \cdot \cos\psi_1}{r^2}$$



$$d^2Q_{\text{пад}1\text{-}2} = d^2Q_{12} = \frac{E_1}{\pi} \cdot \frac{\cos\psi_1 \cdot \cos\psi_2}{r^2} dF_1 \cdot dF_2 = dQ_1 \cdot d\varphi_{12}$$

$$d^2Q_{\text{пад}2\text{-}1} = d^2Q_{21} = \frac{E_2}{\pi} \cdot \frac{\cos\psi_1 \cdot \cos\psi_2}{r^2} dF_1 \cdot dF_2 = dQ_2 \cdot d\varphi_{21}$$

Элементарные угловые коэффициенты

$$d\varphi_{12} = \frac{\cos\psi_1 \cdot \cos\psi_2}{\pi r^2} \cdot dF_2 = \frac{d^2Q_{12}}{dQ_1}$$

$$d\varphi_{21} = \frac{\cos\psi_1 \cdot \cos\psi_2}{\pi r^2} \cdot dF_1 = \frac{d^2Q_{21}}{dQ_1}$$

Элементарные взаимные поверхности излучения

$$\left.\begin{aligned} d^2H_{12} &= d\varphi_{12}\cdot dF_1 = \frac{\cos\psi_1\cdot\cos\psi_2}{\pi r^2}dF_1\cdot dF_2 \\ d^2H_{21} &= d\varphi_{21}\cdot dF_2 = \frac{\cos\psi_1\cdot\cos\psi_2}{\pi r^2}dF_1\cdot dF_2 \end{aligned}\right\} d^2H_{12} = d^2H_{21}$$

$$d^2Q_{\text{пад}1\text{-}2} = d^2Q_{12} = E_1 d^2H_{12}$$

$$d^2Q_{\text{пад}2\text{-}1} = d^2Q_{21} = E_2 d^2H_{21}$$

$$d^2Q_{12} = d^2Q_{\text{пад}1\text{-}2} - d^2Q_{\text{пад}2\text{-}1} = \left(E_1 - E_2\right)d^2H_{12} -\quad \text{между } dF_1 \text{ и } dF_2$$

Местные угловые коэффициенты излучения

$$\varphi_{12} = \int_{F_2} d\varphi_{12} = \int_{F_2}\frac{\cos\psi_1\cdot\cos\psi_2}{\pi r^2}dF_2 \qquad dQ_{\text{пад}1\text{-}2} = \varphi_{12}E_1 dF_1 = \varphi_{12}dQ_1$$

$$\varphi_{21} = \int_{F_1} d\varphi_{21} = \int_{F_1}\frac{\cos\psi_1\cdot\cos\psi_2}{\pi r^2}dF_1 \qquad dQ_{\text{пад}2\text{-}1} = \varphi_{21}E_2 dF_2 = \varphi_{21}dQ_2$$

Местные угловые коэффициенты излучения – угловые коэффициенты излучения от точки (элементарной поверхности) на всю облучаемую поверхность:

φ_{12} - от dF_1 по всей F_2

φ_{21} - от dF_2 по всей F_1

$$dQ_{12} = dQ_{\text{пад}1\text{-}2} - dQ_{\text{пад}2\text{-}1} = \varphi_{12} E_1 dF_1 - \varphi_{21} E_2 dF_2 \Rightarrow$$

между dF_1 и dF_2 через местные угловые коэффициенты излучения

Средние угловые коэффициенты излучения

$$\overline{\varphi_{12}} = \frac{1}{F_1} \int_{F_1} \varphi_{12} dF_1 \qquad \overline{\varphi_{21}} = \frac{1}{F_2} \int_{F_2} \varphi_{21} dF_2$$

$$\left.\begin{aligned} Q_{\text{пад}1\text{-}2} &= \overline{\varphi_{12}} \cdot E_1 \cdot F_1 \\ Q_{\text{пад}2\text{-}1} &= \overline{\varphi_{21}} \cdot E_2 \cdot F_2 \end{aligned}\right\} \quad Q_{12} = Q_{\text{пад}1\text{-}2} - Q_{\text{пад}2\text{-}1} = \overline{\varphi_{12}} \cdot E_1 \cdot F_1 - \overline{\varphi_{21}} \cdot E_2 \cdot F_2$$

$$\overline{\varphi_{12}} = \frac{Q_{\text{пад}1\text{-}2}}{Q_1} \qquad \overline{\varphi_{21}} = \frac{Q_{\text{пад}2\text{-}1}}{Q_2}$$

$$\overline{H_{12}} = \overline{\varphi_{12}} \cdot F_1 \qquad \overline{H_{21}} = \overline{\varphi_{21}} \cdot F_2$$

$$Q_{12} = Q_{\text{пад}\,1\text{-}2} - Q_{\text{пад}\,2\text{-}1} = \overline{\varphi_{12}} \cdot E_1 \cdot F_1 - \overline{\varphi_{21}} \cdot E_2 \cdot F_2$$

$$Q_{12} = \overline{\varphi_{12}} \cdot c_0 \cdot \left(\frac{T_1}{100}\right)^4 \cdot F_1 - \overline{\varphi_{21}} \cdot c_0 \cdot \left(\frac{T_2}{100}\right)^4 \cdot F_2 = c_0 \left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right] \cdot \overline{H_{12}}$$

$$Q_{12} = \overline{\varphi_{12}} \cdot E_{\text{эфф}\,1} \cdot F_1 - \overline{\varphi_{21}} \cdot E_{\text{эфф}\,2} \cdot F_2$$

$$E_{\text{эфф}1} = E_{12}\left(1 - \frac{1}{A_1}\right) + E_1 \frac{1}{A_1}$$

$$E_{\text{эфф}2} = E_{21}\left(1 - \frac{1}{A_2}\right) + E_2 \frac{1}{A_2} = -E_{12}\left(1 - \frac{1}{A_2}\right) + E_2 \frac{1}{A_2}$$

$$Q_{12} = \frac{c_0 \cdot \overline{\varphi_{12}} \cdot F_1 \left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right]}{1 + \overline{\varphi_{12}}\left(\frac{1}{A_1} - 1\right) + \overline{\varphi_{21}}\left(\frac{1}{A_2} - 1\right)}$$

Метод эффективных потоков

$$Q_{\text{эфф}\,k} = Q_{\text{рез}\ k}\left(1-\frac{1}{A_k}\right)+Q_{0\,\text{k}}$$

$$Q_{\text{эфф}\,k} = Q_{0\ k} + \left(1-A_k\right)\sum_{i+1}^{N}\left(\overline{\varphi_{ik}}\cdot Q_{\text{эфф}\ i}\right)$$

Метод результирующих потоков

$$Q_{\text{рез}\ k} = \frac{A_k}{1-A_k}\left(Q_{0\,\text{k}} - Q_{\text{эфф}\,k}\right)$$

$$Q_{\text{рез}\ k} = Q_{\text{эфф}\,k} - \sum_{i+1}^{N}\left(\overline{\varphi_{ik}}\cdot Q_{\text{эфф}\ i}\right)$$

$$\sum_{k+1}^{N} Q_{\text{рез}\,k} = 0$$

Методы нахождения угловых коэффициентов

- аналитический метод;
- графоаналитический метод;
- метод светового моделирования;
- метод поточной алгебры.

Метод поточной алгебры Поляка

Все на сохранении (балансе) потоков

Полный делитель – поверхность, делящая систему на 2 замкнутых поверхности без нарушения целостности отдельных составляющих

$$\overline{\varphi_{ik}} = \frac{\overline{H_{ik}}}{F_i} \qquad i,k = 1 \div n \qquad n^2 \text{ неизвестных}$$

$\overline{H_{ik}} = \overline{H_{ki}}$ – *взаимности*

$F_i = \sum_k \overline{H_{ik}}$ – *замыкаемости (на аддитивности)*

$\overline{H_{ii}} = 0$ – *невогнутости (плоскости)*

$\overline{H_{ik}} = 0$ – *затеняемости*

D – *наличие полного делителя*

Поверхность полного делителя равна сумме системы равна сумме взаимных поверхностей, лучеиспускание которых пересекает делитель

$$z = n^2 - \left[\frac{n(n-1)}{2} + n + n_{\text{нв}} + n_{\text{з}} + n_{\text{D}}\right]$$

$z = 0$!!!!!!