

Часть 2

Основы теории теплообмена

Занятие 11

Лучистый теплообмен. Основные свойства и характеристики. Законы лучистого теплообмена. Теплообмен излучением системы тел в прозрачной среде. Использование экранов для защиты от излучения

Лучистый теплообмен

- результат превращения внутренней энергии тел в энергию электромагнитных колебаний

Характеризуется:

1. Длиной волны λ

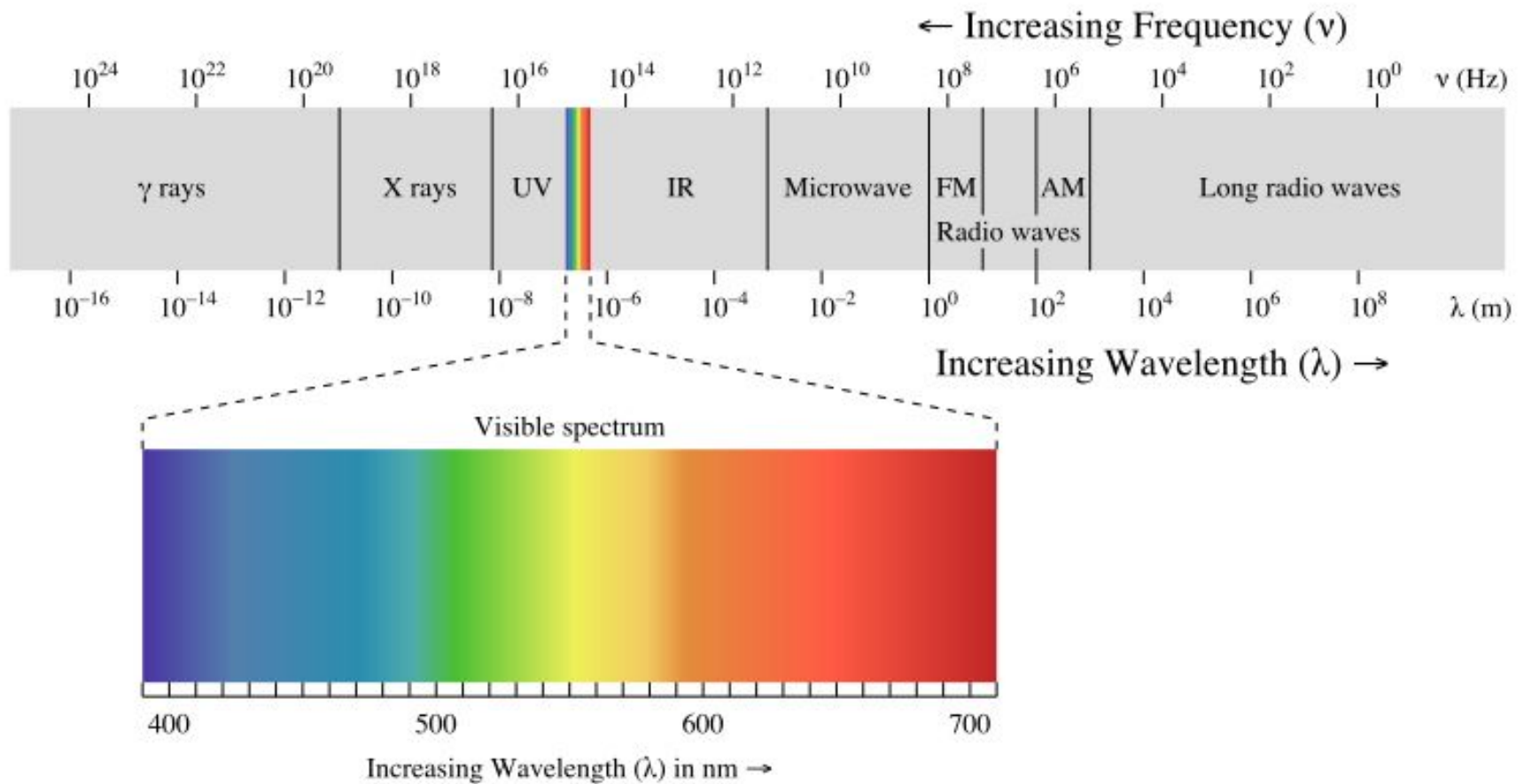
$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

Излучение



Фильм 087

Лучистый теплообмен



Тепловое излучение: $\lambda=0,8\div 80$ мкм

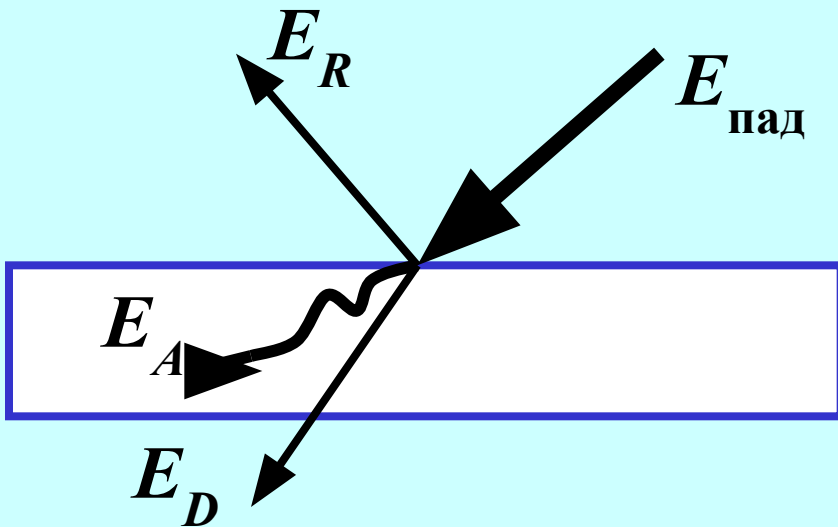
Лучистый теплообмен

Характеризуется:

2. Поверхностная плотность интегрального излучения

E , Вт/м

- тепловой поток, излучаемый на всех длинах волн с ед.поверхности тела по всем направлениям



$$\frac{E_{\text{пад}}}{E_{\text{пад}}} = \frac{E_A + E_R + E_D}{E_{\text{пад}}}$$

$$1 = A + R + D$$

Лучистый теплообмен

$$A = \frac{E_A}{E_{\text{пад}}}$$

ПОГЛОЩЕНИЯ

$$R = \frac{E_R}{E_{\text{пад}}}$$

- коэффициенты

ОТРАЖЕНИЯ

$$D = \frac{E_D}{E_{\text{пад}}}$$

ПРОПУСКАНИЯ

А.Ч.Т (A=1) – тело, поглощающее все падающее на него излучение

Лучистый теплообмен

Эффективное излучение тела –

сумма потоков собственного и отраженного телом излучения:

$$E_{\text{эф}} = E + RE_{\text{пад}}$$

Лучистый теплообмен –

суммарный процесс взаимного испускания, поглощения, отражения и пропускания энергии излучения в системах тел

Закон Стефана-Больцмана

Чех

(опыт 1879)

Австриец

(теор.док-во 1881)

Для АЧТ поверхностная плотность интегрального излучения E_0 описывается:

$$E_0 = \sigma_0 T^4$$

$\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ – постоянная Стефана-Больцмана

Закон Стефана-Больцмана

Для любого тела:

$$E = \varepsilon C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4$$

$C_0 = \sigma_0 \cdot 10^8$ – коэффициент излучения АЧТ

ε - степень черноты тела

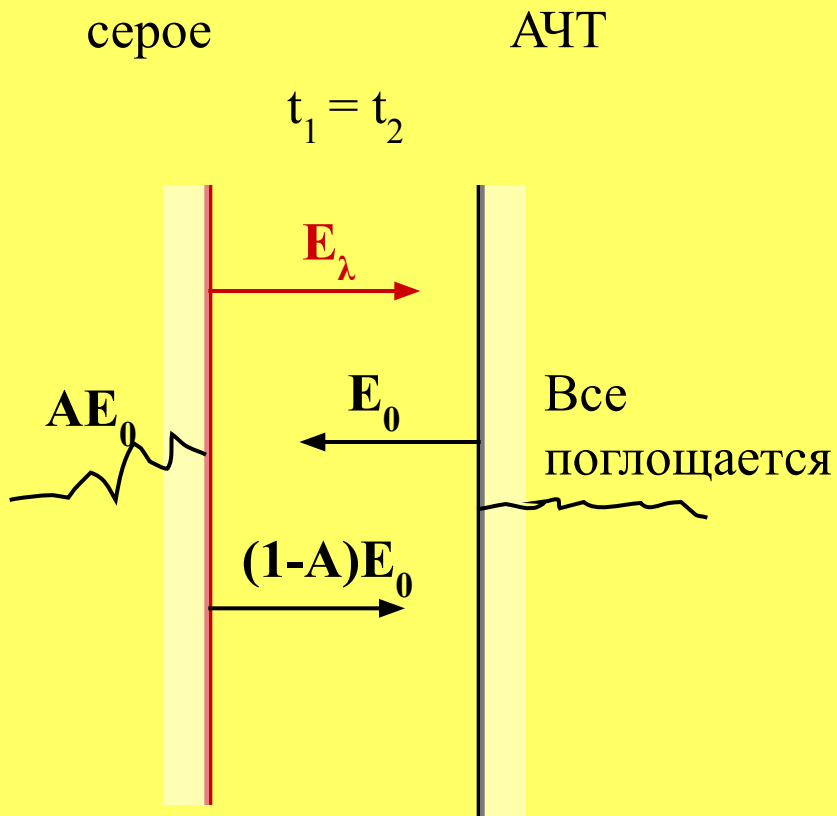
$$\varepsilon = \frac{E}{E_0}$$

$$0 < \varepsilon < 1$$

Материал	$t, ^\circ\text{C}$	ε
Алюминий шероховатый.	26	0,055
Алюминий, окисленный при 600 °С.	200—600	0,11—0,19
Железо окисленное гладкое	125—525	0,78—0,82
Золото полированное.	225-635	0,018—0,035
Латунь прокатанная.	22	0,06
Латунь, окисленная при 60 °С	200—600	0,61—0,59
Медь полированная.	80—115	0,018—0,023
Медь, окисленная при 600 °С	200—600	0,57—0,87
Молибденовая нить.	725—2 600	0,096—0,292
Никель технический полированный	225—375	0,07—0,087
Никелевая проволока.	185—1000	0,096—0,186
Никель, окисленный при 600 °С.	200—600	0,37—0,48
Платина чистая, полированная пластина. . .	225—625	0,054—0,104
Платиновая проволока.	225—1375	0,73—0,182
Серебро полированное, чистое.	225—625	0,020—0,032
Асбестовый картон.	40—370	0,93—0,950
Бумага тонкая	19	0,92
Кирпич красный.	20	0,93
Кирпич огнеупорный.	-	0,8—0,9
Лак белый и черный	40—95	0,80—0,98
Масляные краски различных цветов	100	0,92—0,86
Сажа, свечная копоть.	95—270	0,95
Продольная нить	1040—1405	0,53
Штукатурка шероховатая, известковая.	10—88	0,91

Закон Кирхгофа

Рассмотрим 2 тела:



Передача теплоты:

$$E_0 = E_\lambda + (1-A)E_0$$

$$\Rightarrow E_\lambda = -E_0 + AE_0 + E_0$$

$$\Rightarrow E_\lambda = AE_0$$

$$\frac{E_\lambda}{E_0} = A$$

$$\epsilon = A$$

Закон Кирхгофа

$$\varepsilon = A$$

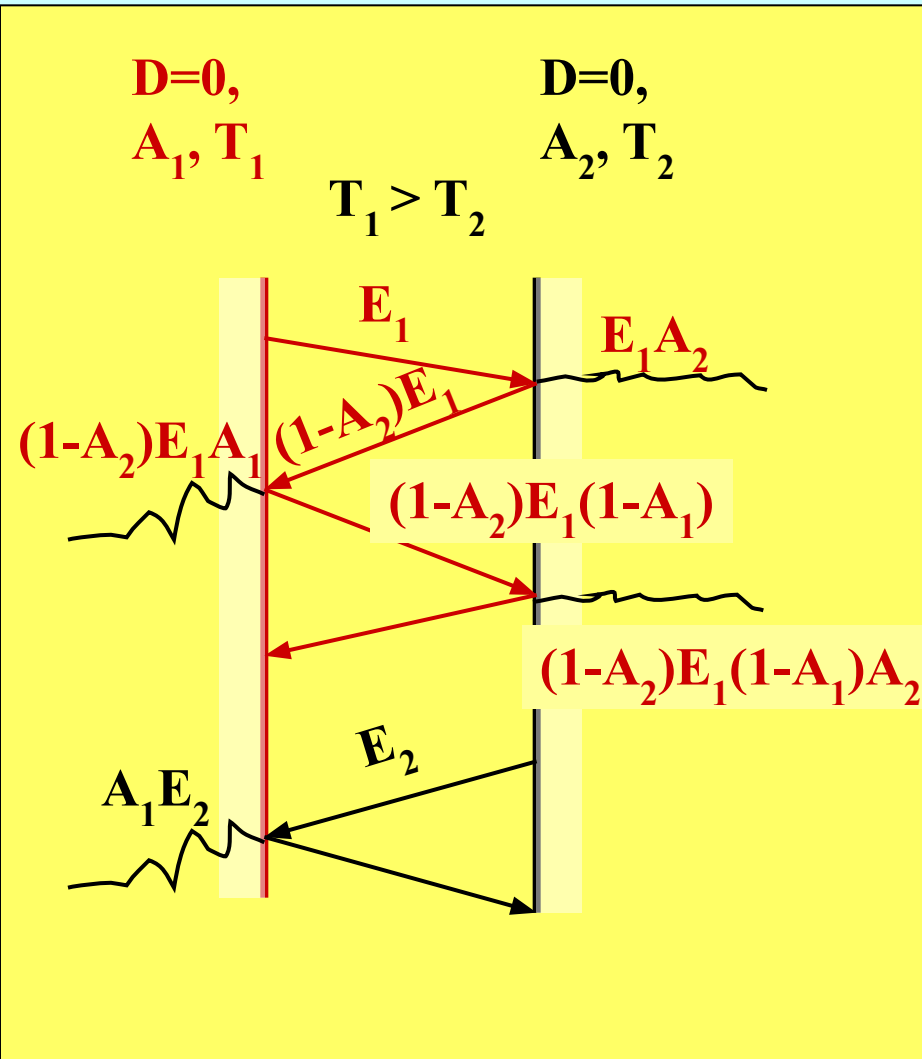
Степень черноты тела в состоянии термодинамического равновесия численно равна его коэффициенту поглощения при той же температуре

При увеличении $A \rightarrow$ увеличивается E

$$\frac{E_{\lambda}}{E_0} = A$$

Теплообмен излучением системы тел в прозрачной среде

Рассмотрим 2 тела:



Для непрозрачных тел:

$$D=0, R=(1-A)$$

E_1 – излучение 1-го тела на второе
 E_2 – излучение 2-го тела на первое

$$E_{\text{эф}} = E + RE_{\text{пад}}$$

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


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

Плотность теплового потока:

$$q = E_{\text{эф1}} - E_{\text{эф2}}$$

Теплообмен излучением системы тел в прозрачной среде

Подставим выражение 1 в 2:

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

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

Получим:

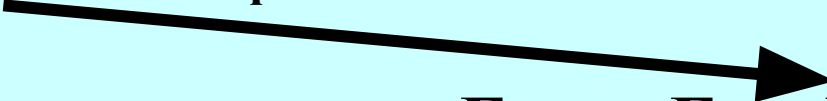
$$\mathbf{E_{эф2} = E_2 + (E_1 + E_{эф2}(1-A_1))(1-A_2)}$$

$$E_{эф2} = \frac{E_2 + E_1 - A_2 E_1}{A_1 + A_2 - A_1 A_2}$$

Теплообмен излучением системы тел в прозрачной среде

Аналогично получаем выражение для $E_{\text{эф1}}$:

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


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

Получим:

$$E_{\text{эф1}} = E_1 + (E_2 + E_{\text{эф1}}(1-A_2))(1-A_1)$$

$$E_{\text{эф1}} = \frac{E_2 + E_1 - A_1 E_2}{A_1 + A_2 - A_1 A_2}$$

Теплообмен излучением системы тел в прозрачной среде

Плотность теплового потока:

$$q = E_{\text{эф1}} - E_{\text{эф2}}$$

$$q_{1,2} = \frac{A_2 E_1 - A_1 E_2}{A_1 + A_2 - A_1 A_2}$$

Применяя закон Стефана-Больцмана: $E = \varepsilon C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4$

И закон Кирхгофа: $A = \varepsilon$

$$q_{1,2} = \frac{\varepsilon_2 \varepsilon_1 C_0 \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \varepsilon_1 \varepsilon_2 C_0 \left(\frac{T_2}{100} \right)^4}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 - \varepsilon_1 \varepsilon_2} =$$

Теплообмен излучением системы тел в
прозрачной среде

$$= \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} C_0 \left(\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right)$$

$$q_{1,2} = \varepsilon_{\text{пр}} C_0 \left(\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right)$$

Приведенная степень
черноты системы тел:

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}$$

Теплообмен излучением системы тел в прозрачной среде

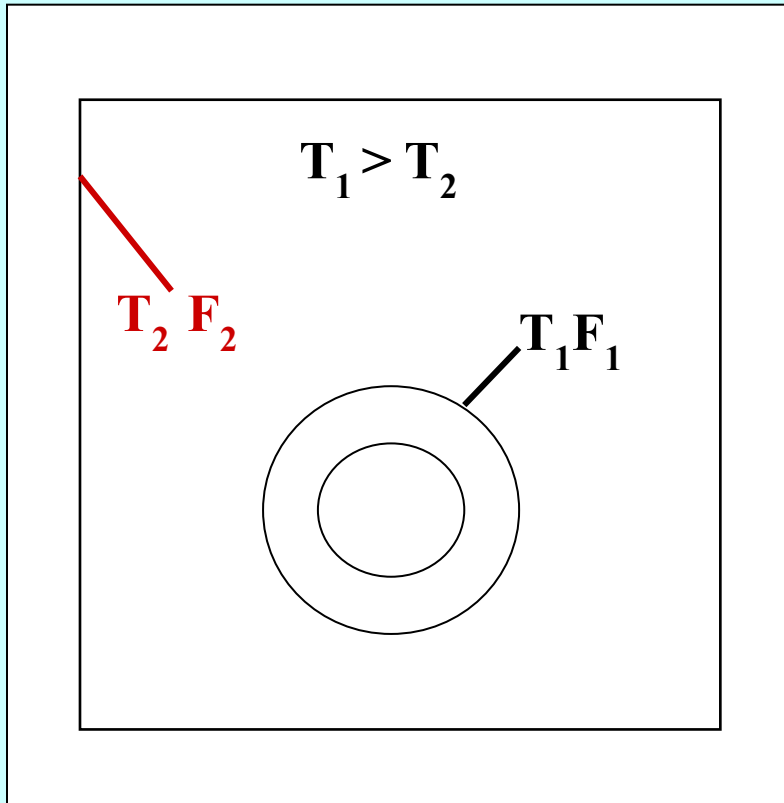
Полный тепловой
поток:

$$Q_{1,2} = \varepsilon_{\text{пр}} C_0 F \left(\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right)$$

При разных площадях ТО $F_1 \neq F_2$:

$$Q_{1,2} = \varphi_{1,2} \varepsilon_{\text{пр}} C_0 F \left(\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right)$$

Теплообмен излучением системы тел в прозрачной среде



$\phi_{1,2}$ – коэффициент
облученности тела

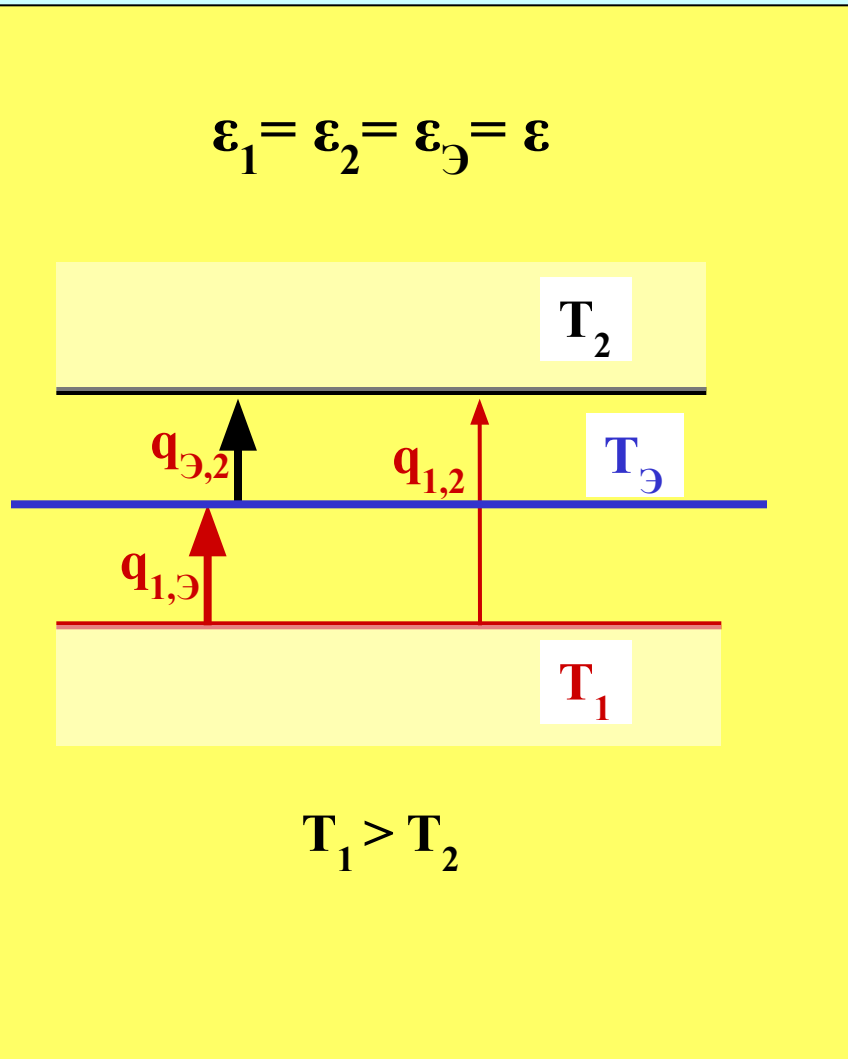
$$\phi_{1,2} = 1$$

$$\phi_{2,1} = \frac{F_1}{F_2}$$

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}$$

Использование экранов для защиты от излучения

Рассмотрим 2 тела:



$$\varepsilon_{\text{пр1}} = \varepsilon_{\text{пр2}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon} + \frac{1}{\varepsilon} - 1} = \frac{\varepsilon}{2 - \varepsilon}$$

$$q_{1,3} = \varepsilon_{\text{пр}} C_0 \left(\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_3}{100} \right)^4 \right)$$

$$q_{3,2} = \varepsilon_{\text{пр}} C_0 \left(\left(\frac{T_3}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right)$$

В стационарном режиме:

$$q_{1,3} = q_{3,2}$$

Использование экранов для защиты от излучения

$$\varepsilon_{\text{пр}} C_0 \left(\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{Э}}}{100} \right)^4 \right) = \varepsilon_{\text{пр}} C_0 \left(\left(\frac{T_{\text{Э}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right)$$

$$\Rightarrow \left(\frac{T_{\text{Э}}}{100} \right)^4 = \frac{1}{2} \left(\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 + \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right)$$

Тогда, тепловой поток при наличии экрана:

$$q_{1,\text{Э}} = q_{\text{Э},2} = \frac{1}{2} \varepsilon_{\text{пр}} C_0 \left(\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right)$$

Использование экранов для защиты от излучения

Тепловой поток без экрана:

$$q_{1,2} = \varepsilon_{\text{пр}} C_0 \left(\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right)$$

Т.е. при наличии экрана тепловой поток излучением снижается в 2 раза !!!

При наличии n экранов и $\varepsilon_{\text{э}} \neq \varepsilon$ тепловой поток уменьшается:

$$\frac{q_{1,2}}{q_{1,2}^{\text{э}}} = \frac{(1+n)\varepsilon(2-\varepsilon_{\text{э}})}{\varepsilon_{\text{э}}(2-\varepsilon)}$$

Использование экранов для защиты от излучения

Например для окисленной стальной поверхности $\varepsilon=0,8$ и при наличии 1 экрана с $\varepsilon_{\text{э}}=0,1$:

$$\frac{q_{1,2}}{q_{1,2}^{\text{э}}} = \frac{(1+n)\varepsilon(2-\varepsilon_{\text{э}})}{\varepsilon_{\text{э}}(2-\varepsilon)} = \frac{(1+1)0,8(2-0,1)}{0,1(2-0,8)} = \mathbf{25}$$

при наличии 2-х экранов:

$$\frac{q_{1,2}}{q_{1,2}^{\text{э}}} = \frac{(1+2)0,8(2-0,1)}{0,1(2-0,8)} = \mathbf{38 \text{ раз}}$$