ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ

Теплопередача:

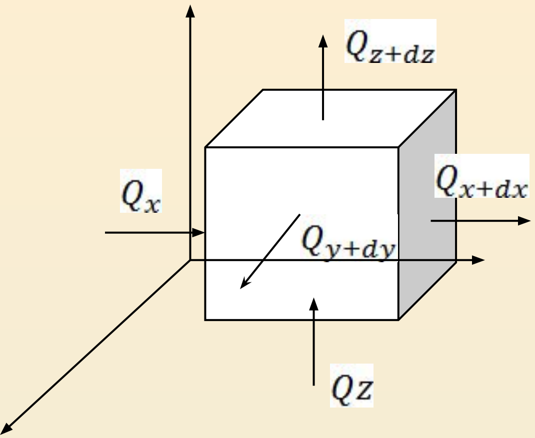
- Теплопроводность;
- Конвекция;
- Тепловое излучение.

$$dQ = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} dF d\tau$$

Закон Фурье:
Количество тепла dQ, проходящее через элементарную поверхность dF за промежуток времени $d\tau$ пропорционально температурному градиенту, величине поверхности и времени


КТЖ 0,9-1,2 мм
Одинаково сохраняют тепло
Пенополиуритан 17-22 мм
Минеральная вата 34-37 мм
Вспененный полиэтилен 35 - 50 мм
Базальт 200 мм
Бетон 480 мм
Кирпич 580 мм

Дифференциальное уравнение теплопроводности



$$Qx = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} dydzd\tau$$

$$Qy = -\lambda \frac{\partial t}{\partial y} dxdzd\tau$$

$$Qz = -\lambda \frac{\partial t}{\partial z} dxdyd\tau$$

$$Q_{x+dx} = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} dydzd\tau + \left[-\lambda \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial t}{\partial x}\right) dxdydzd\tau\right]$$

$$Q_{y+dy} = -\lambda \frac{\partial t}{\partial y} dxdzd\tau + \left[-\lambda \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\partial t}{\partial y}\right) dxdydzd\tau\right]$$

$$Q_{z+dz} = -\lambda \frac{\partial t}{\partial z} dxdyd\tau + \left[-\lambda \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\partial t}{\partial z}\right) dxdydzd\tau\right]$$

$$dQ_x = Q_x - Q_{x+dx} = \lambda \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} dxdydzd\tau$$

$$dQ_y = Q_y - Q_{y+dy} = \lambda \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} dxdydzd\tau$$

$$dQ_z = Q_z - Q_{z+dz} = \lambda \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} dxdydzd\tau$$

Тогда полное приращение тепла за промежуток времени dτ в объеме будет:

$$dQ = dQ_x + dQ_y + dQ_z = \lambda \underbrace{\left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}\right)}_{\nabla^2 t} dxdydzd\tau$$

$\nabla^2 t$ - оператор Лапласа

$$dQ = \lambda \nabla^2 t dV d\tau$$

$$dQ = C\gamma \frac{\partial t}{\partial \tau} d\tau dV$$

$$\lambda \nabla^2 t dV d\tau = C\gamma \frac{\partial t}{\partial \tau} d\tau dV$$

$$\frac{\lambda}{C\gamma} = a$$

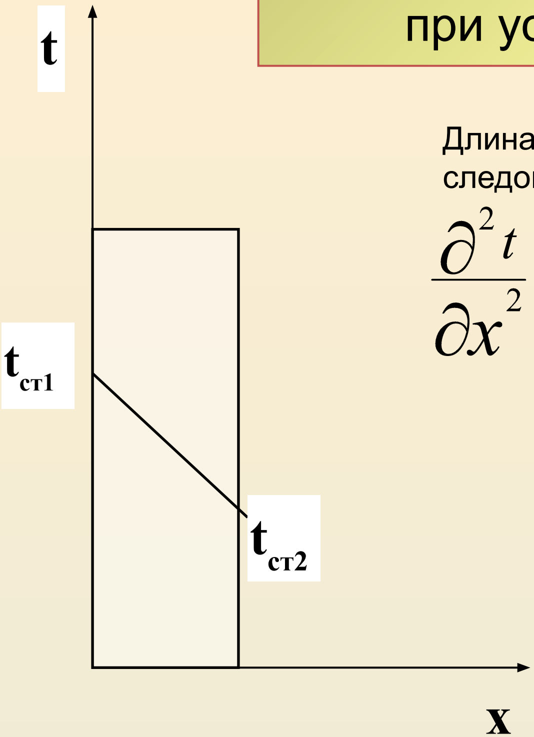
$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t$$

Дифф.уравнение теплопроводности в неподвижной среде

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = 0$$

Уравнение теплопроводности

Теплопроводность плоской стенки при установившемся тепловом потоке



Длина и ширина стенки безгранично велики по сравнению с толщиной, следовательно:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} = 0 \longrightarrow \int \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} = \frac{\partial t}{\partial x} + C_1 \longrightarrow \int \partial t = \int \partial x \, C_1 \longrightarrow$$

$$\longrightarrow t = C_1 x + C_2$$

$x=0$ $\quad t=t_{ст1} \longrightarrow t_{ст1} = C_2$

$x = \delta$ $\quad t = t_{ст2}$ $\quad t_{ст2} = C_1 \delta + t_{ст1}$

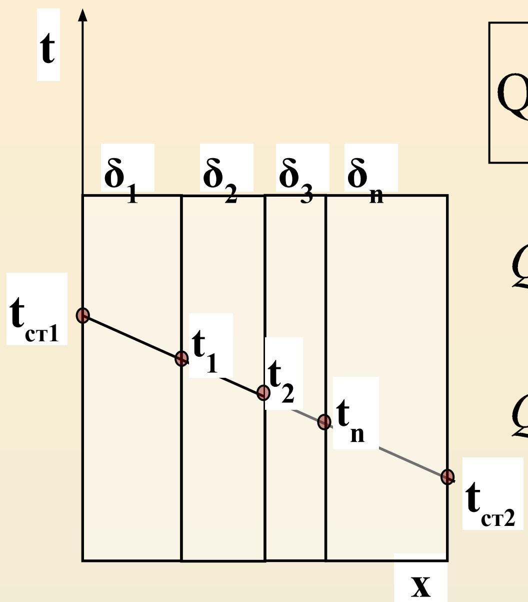
$$C_1 = \frac{t_{cm2} - t_{cm1}}{\delta} \qquad t = \frac{t_{cm2} - t_{cm1}}{\delta} x + t_{cm1}$$

$$\frac{\partial t}{\partial n} = \frac{t_{cm2} - t_{cm1}}{\delta}$$ (изменение температуры по толщине стенки)

Подставляем в уравнение Фурье: $\mathrm{dQ} = -\lambda \frac{\partial \mathrm{t}}{\partial \mathrm{n}} dF d\tau \longrightarrow \mathrm{dQ} = -\lambda \frac{t_{cm2} - t_{cm1}}{\delta} dF d\tau$

или: $$\boxed{\mathrm{Q} = -\frac{\lambda}{\delta}(t_{cm1} - t_{cm2}) F\tau}$$

Теплопроводность плоской многослойной стенки



$$\boxed{Q = -\frac{\lambda}{\delta}(t_{cm1} - t_{cm2})F\tau}$$

$$Q = \frac{\lambda_1}{\delta_1}(t_{\text{ст}1} - \text{t}_1)\text{F}\cdot\tau \qquad \text{или:} \qquad Q\frac{\delta_1}{\lambda_1} = (t_{\text{ст}1} - \text{t}_1)\text{F}\cdot\tau$$

$$Q = \frac{\lambda_2}{\delta_2}(t_1 - \text{t}_2)\text{F}\cdot\tau \qquad Q\frac{\delta_2}{\lambda_2} = (t_1 - \text{t}_2)\text{F}\cdot\tau$$

$$Q = \frac{\lambda_n}{\delta_n}(t_n - \text{t}_{\text{ст}2})\text{F}\cdot\tau \qquad Q\frac{\delta_n}{\lambda_n} = (t_n - \text{t}_{\text{ст}2})\text{F}\cdot\tau$$

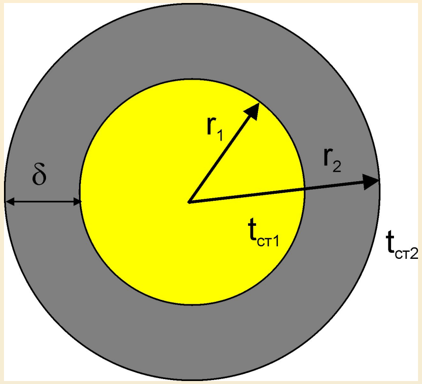
$$Q\left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \ldots + \frac{\delta_n}{\lambda_n}\right) = (t_{cm1} - \text{t}_1 + t_1 - \text{t}_2 + t_2 - \text{t}_\text{n} + t_n - \text{t}_{\text{ст}2})\text{F}\cdot\tau$$

$$Q\sum_{i=1}^{i=n}\left(\frac{\delta_i}{\lambda_i}\right) = (t_{cm1} - \text{t}_{\text{ст}2})\text{F}\cdot\tau$$

$$\boxed{Q = \frac{(t_{cm1} - t_{cm2})F\tau}{\sum_{i=1}^{i=n}\frac{\delta_i}{\lambda_i}}}$$

Уравнение теплопроводности многослойной стенки

Теплопроводность цилиндрической стенки



$$Q = -\frac{\lambda}{\delta}(t_{cm1} - t_{cm2})F\tau$$

$$t_{cm1} > t_{cm2}$$

$$F = 2\pi rL$$

$$Q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial \delta} 2\pi rL\tau$$

$$\delta = r_2 - r_1$$

$$\partial\delta = \partial r$$

$$Q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial r} 2\pi rL\tau$$

$$Q\frac{\partial r}{r} = -\lambda 2\pi L\tau\partial t$$

$$Q\int_{r_1}^{r_2}\frac{\partial r}{r} = -\lambda 2\pi L\tau \int_{t_{cm1}}^{t_{cm2}}\partial t$$

$$Q\ln\frac{r_2}{r_1} = \lambda 2\pi L\tau(t_{cm1} - t_{cm2})$$

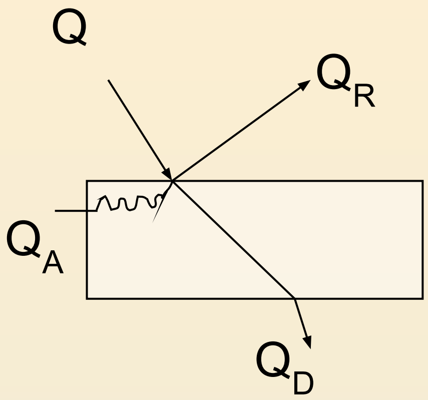
$$Q = \frac{2\pi L\tau(t_{cm1} - t_{cm2})}{\frac{1}{\lambda}2{,}3\lg\frac{r_2}{r_1}}$$

Уравнение теплопроводности для цилиндрической однослойной стенки

$$Q = \frac{2\pi L\tau(t_{ст1} - t_{ст2})}{2{,}3\lg\frac{r_{i+1}}{r_i}\cdot\frac{1}{\lambda_i}}$$

Уравнение теплопроводности для многослойной цилиндрической стенки

Тепловое излучение



$Q_A + Q_R + Q_D = Q$

$$\frac{Q_A}{Q} + \frac{Q_R}{Q} + \frac{Q_D}{Q} = 1$$

A+R+D=1

A=1	R=D=0 – абсолютно черное тело
R=1	A=D=0 – абсолютно белое тело
D=1	A=R=0 – абсолютно прозрачное тело (диатермическое)

Лучеиспускательная способность тела:

$$\boxed{E = \frac{Q_л}{F\tau}}$$

$$\boxed{E = C\left(\frac{T}{100}\right)^4}$$

$$\varepsilon = \frac{C}{C_0}$$

степень черноты

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

Лучистый теплообмен между телами

Взаимное излучение двух твердых тел:

$$Q = C_{1-2} F \tau \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \varphi$$

$$C_{1-2} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{1}{C_2} - \frac{1}{4{,}96} \right)}$$

При излучении в замкнутом пространстве

$$C_{1-2} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} - \frac{1}{4{,}96}}$$

При излучении двух, параллельно расположенных тел

Конвекция

Закон охлаждения Ньютона:

$$\boxed{dQ = \alpha(t_{ст} - t_{ж})dFd\tau}$$

Уравнение Фурье-Кирхгофа:

$$W_x \frac{\partial t}{\partial x} + W_y \frac{\partial t}{\partial y} + W_z \frac{\partial t}{\partial z} = \alpha\left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}\right)$$

$$\alpha = f(\mathrm{Re}, \mathrm{Pr}, Gr, Nu)$$

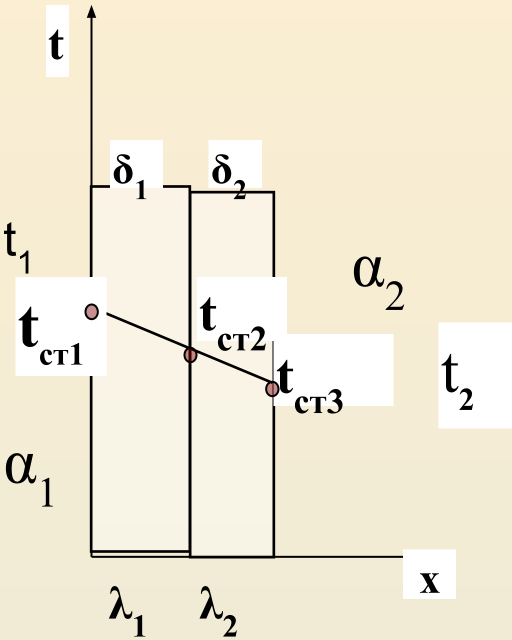
Критерий Прандтля: $\boxed{\mathrm{Pr} = \frac{3600\mu g C_p}{\lambda}}$

Критерий Нуссельта: $\boxed{Nu = \frac{\alpha \cdot d(илиL)}{\lambda}}$

Критерий Грасгофа: $\boxed{Gr = \frac{d^3\gamma^2\beta T}{\mu^2 g}}$

Критерий Рейнольдса: $\boxed{\mathrm{Re} = \frac{wd\rho}{\mu}}$

Уравнение теплопередачи при постоянной температуре для плоских стенок



$$Q = \alpha_1 (t_1 - t_{ст1}) F\tau$$

$$Q = \frac{\lambda_1}{\delta_1}(t_{ст1} - t_{ст2}) F \cdot \tau$$

$$Q = \frac{\lambda_2}{\delta_2}(t_{ст2} - t_{ст3}) F \cdot \tau$$

$$Q = \alpha_2 (t_{ст3} - t_2) F\tau$$

$$Q\frac{1}{\alpha_1} = (t_1 - t_{ст1}) F\tau$$

$$Q\frac{\delta_1}{\lambda_1} = (t_{ст1} - t_{ст2}) F \cdot \tau$$

$$Q\frac{\delta_2}{\lambda_2} = (t_{ст2} - t_{ст3}) F \cdot \tau$$

$$Q\frac{1}{\alpha_2} = (t_{ст3} - t_2) F\tau$$

$$Q\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_2}\right) = F\tau\left(t_1 - t_2\right)$$

Коэффициент теплопередачи:

$$\boxed{K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^{n}\frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}} \quad \left[\frac{ккал}{м^2 \cdot час \cdot {}^oC}\right]$$

Уравнение теплопередачи:

$$\boxed{Q = KF\tau(t_1 - t_2)}$$