

- část technické termomechaniky zabývající se **zákony šíření tepla**
- složitý děj \Rightarrow zjednodušení
 - sdílení tepla vedením (kondukcí)
 - sdílení tepla prouděním (konvekcí, přestupem)
 - sdílení tepla sáláním (radiací, zářením)
- **vedení** – v nestejnoměrně ohřátém tělese, tepelná energie se předává přímo se stýkajícími se částmi tělesa, nezávisí na pohybu tělesa ani jeho částic
- **proudění** – jen u plynů a kapalin pohybem jejich částic, vždy spojeno s šířením tepla vedením
- **sálání** – přeměna tepelné energie na energii zářivou a předávání zářivé energie (elmag. vlny) do prostoru kolem tělesa

SDÍLENÍ TEPLA VEDENÍM ROVINNOU STĚNOU

- ponecháme-li pohrabáč v ohni delší dobu, bude i jeho držadlo horké \Rightarrow energie se přenáší z ohně do držadla **vedením** podél celého pohrabáče
- tok tepla je ustálený (stacionární) – teplota a tok tepla v libovolném místě desky jsou stejné a nemění se s časem

$$q = \frac{\lambda}{d} (t_1 - t_2)$$

$$Q = \frac{\lambda}{d} \cdot S \cdot (t_1 - t_2)$$

$$q [W \cdot m^{-2}]$$

... jednotkový tepelný tok

$$Q [W]$$

... celkový tepelný tok

$$\Delta t [K]$$

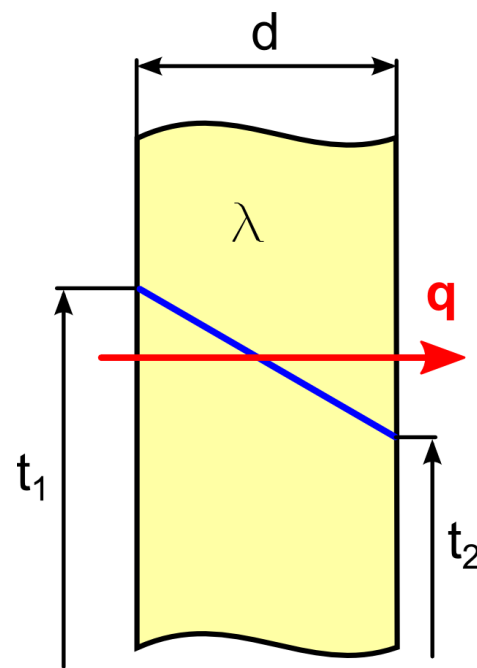
... rozdíl povrchových teplot

$$\lambda [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$$

... součinitel tepelné vodivosti

$$d [m]$$

... tloušťka stěny



- **součinitel tepelné vodivosti** charakterizuje, jakým způsobem daná látka vede teplo

SDÍLENÍ TEPLA VEDENÍM ROVINNOU STĚNOU

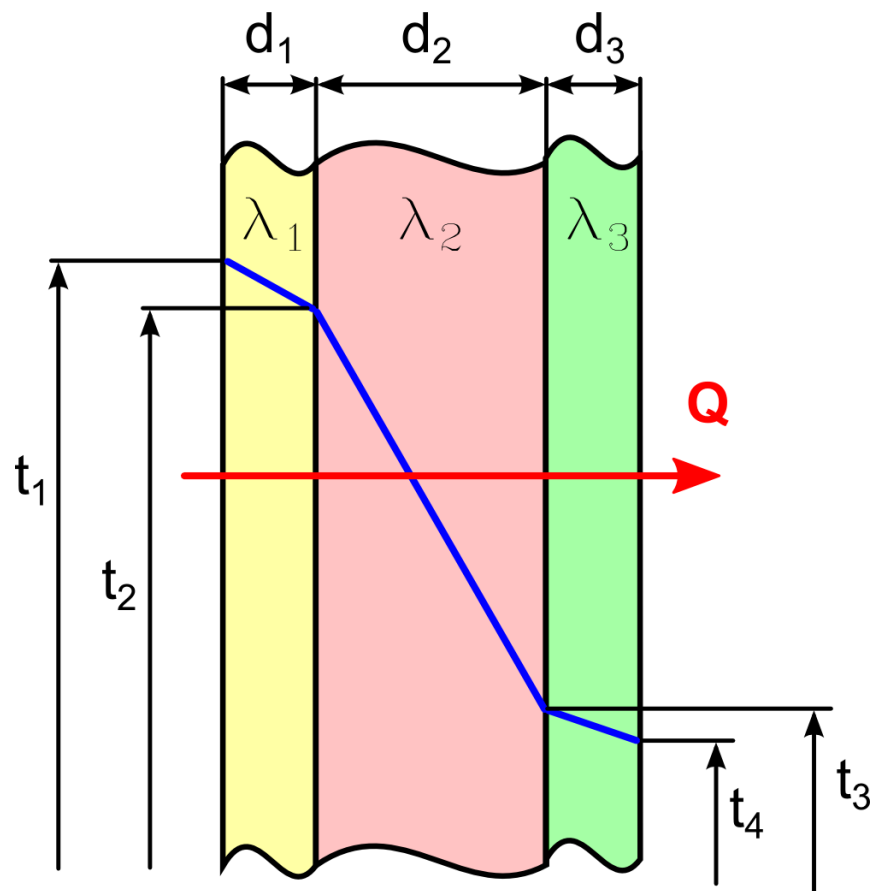
$$Q_1 = \frac{\lambda_1}{d_1} \cdot S \cdot (t_1 - t_2)$$

$$Q_2 = \frac{\lambda_2}{d_2} \cdot S \cdot (t_2 - t_3)$$

$$Q_3 = \frac{\lambda_3}{d_3} \cdot S \cdot (t_3 - t_4)$$

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q$$

$$Q = \frac{t_1 - t_4}{\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3}} \cdot S$$



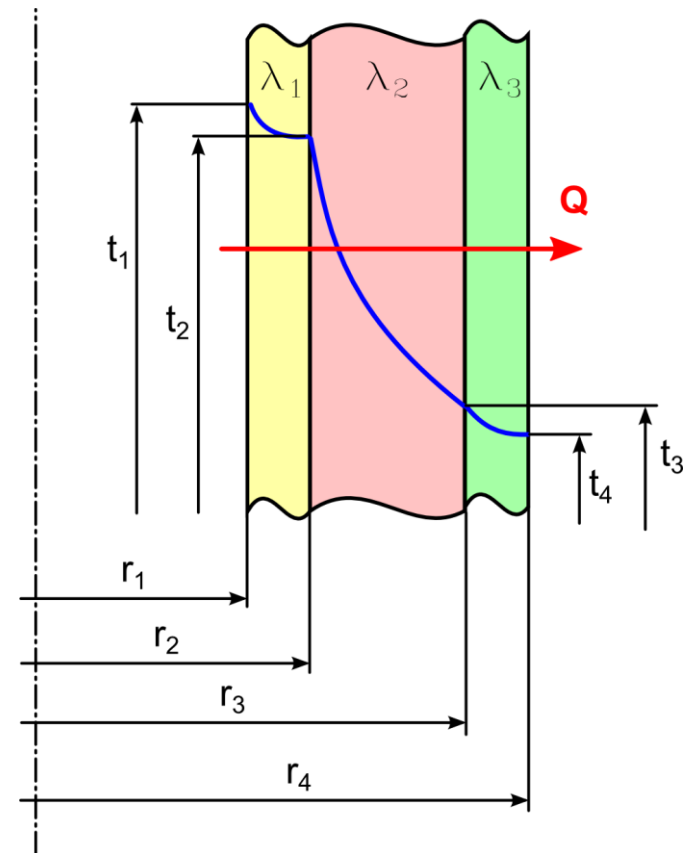
SDÍLENÍ TEPLA VEDENÍM VÁLCOVOU STĚNOU

jednoduchá válcová stěna:

$$Q = \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot l}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \cdot (t_1 - t_2)$$

složená válcová stěna:

$$Q = \frac{2 \cdot \pi \cdot l}{\frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{r_3}{r_2} + \frac{1}{\lambda_3} \ln \frac{r_4}{r_3}} \cdot (t_1 - t_4)$$



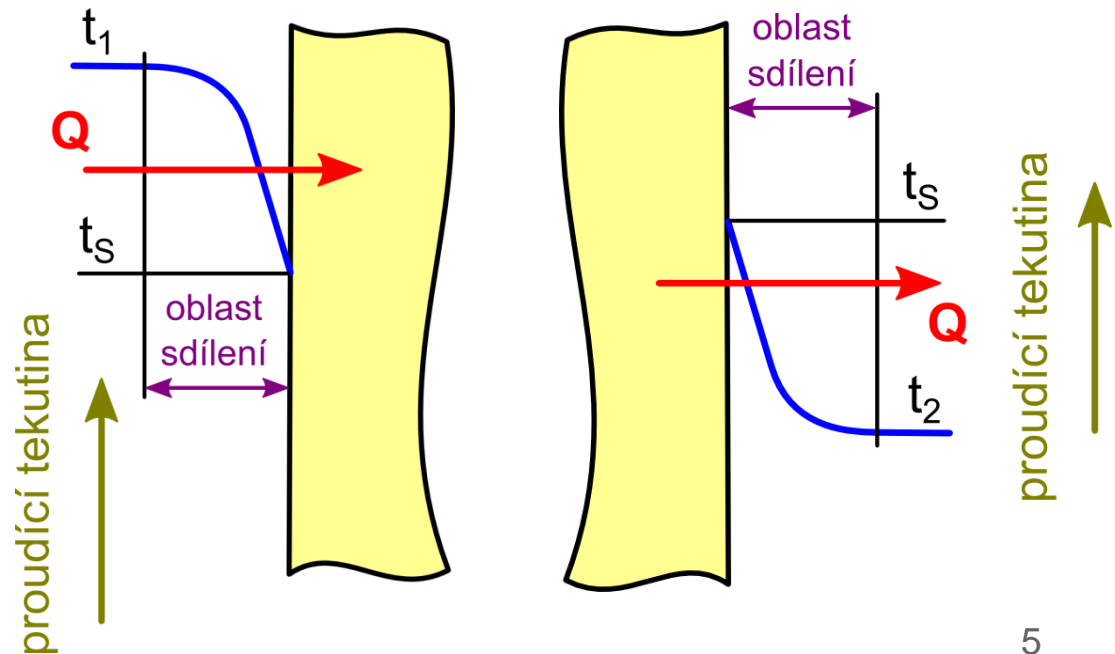
- při styku kapaliny nebo plynu s pevnou stěnou
- dochází k ochlazování (ohřívání) tenké vrstvy tekutiny při stěně \Rightarrow rozdíl hustot \Rightarrow **přirozená konvekce**
- výměna tepla prouděním lze zvýšit nuceným oběhem (čerpadla, ventilátory) \Rightarrow **nucená konvekce**
- je vždy spojeno se sdílením tepla vedením

$$Q = \alpha \cdot S \cdot \Delta t$$

$$\alpha [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$



součinitel přestupu tepla



- **součinitel přestupu tepla** udává tepelný tok přestupující z kapaliny do stěny
- jeho velikost závisí na rychlosti proudění tekutiny, na tvaru, rozměrech a délce trubky, na tepelné vodivosti, hustotě, tlaku, měrném teple a viskozitě tekutiny, na drsnosti stěny trubky...
- nelze ho vyjádřit jednoduchým výpočtovým vztahem, je nutno různé případy sdílení tepla počítat podle výpočtových vztahů – **kriteria podobnosti** (bezrozměrná čísla)
- dva jevy jsou si podobné, jestliže jsou si geometricky podobné a jejich kriteria podobnosti jsou číselně totožná
- lze je odvodit z diferenciálních rovnic proudění a sdílení tepla nebo diametrální analýzou
- jednoduché případy – hodnotu součinitele lze najít v literatuře

- Nusseltovo číslo: $Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda}$ $Nu = f(Gr, Pr, Re)$
- Reynoldsovo číslo: $Re = \frac{w \cdot l}{\nu}$
- Grashoffovo číslo: $Gr = \gamma \cdot \Delta T \cdot \frac{g \cdot l^3}{\nu^2}$
- Prandtlovo číslo: $Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{\nu \cdot \rho \cdot c_p}{\lambda}$

a ... součinitel teplotní vodivosti

γ ... izobarický součinitel objemové roztažnosti

I. Volné proudění

Určující teplota: $t = \frac{t_1 + t_2}{2}$

1. Svislá deska, váleček

$$a) \quad Nu = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 (Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2 = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda}$$

$$b) \quad Nu = 0,68 + \frac{0,67 (Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{4}}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{4}{9}}} = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda}, \text{ přesnější pro } Gr \cdot Pr < 10^9$$

L [m] – délka; $D > \frac{35 \cdot L}{Gr^{\frac{1}{4}}}$ [m] – průměr válce

2. Vodorovná deska

$$a) \quad Nu = 0,54 \cdot (Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{4}} = \frac{\alpha \cdot S}{\lambda} \quad 10^4 < Gr \cdot Pr < 10^7$$

$$b) \quad Nu = 0,15 \cdot (Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{3}} = \frac{\alpha \cdot S}{\lambda} \quad 10^7 < Gr \cdot Pr < 10^{11}$$

S [m²] – plocha; O [m] – obvod

3. Vodorovný váleček

$$Nu = \left\{ 0,6 + \frac{0,387 (Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + \left(\frac{0,559}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2 = \frac{\alpha \cdot D}{\lambda} \quad Gr \cdot Pr < 10^{12}$$

D [m] – průměr válce

II. Nucené proudění

Určující teplota: $t = \frac{t_1 + t_2}{2}$

1. Deska

$$a) \quad Nu = 0,664 Re^{\frac{1}{2}} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda} \quad \text{laminární proudění } Re < 5 \cdot 10^5$$

$$b) \quad Nu = 0,037 Re^{\frac{4}{5}} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda} \quad \text{turbulentní proudění se zanedbáním laminární oblasti}$$

$$0,6 < Pr < 60; 5 \cdot 10^5 < Re < 10^7$$

$$c) \quad Nu = \left(0,037 Re^{\frac{4}{5}} - 871 \right) \cdot Pr^{\frac{1}{3}} = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda} \quad \text{turbulentní proudění s uvažováním laminární oblasti}$$

oblasti

$$0,6 < Pr < 60; 5 \cdot 10^5 < Re < 10^7$$

L [m] – délka

2. Váleček, hladký povrch

$$Nu = 0,3 + \frac{0,62 Re^{\frac{1}{2}} \cdot Pr^{\frac{1}{3}}}{\left[1 + \left(\frac{0,4}{Pr} \right)^{\frac{2}{3}} \right]^{\frac{1}{4}}} \left[1 + \left(\frac{Re}{282000} \right)^{\frac{5}{8}} \right]^{\frac{4}{5}} = \frac{\alpha \cdot D}{\lambda} \quad Re \cdot Pr > 0,2$$

D [m] – průměr válce

PROSTUP TEPLA ROVINNOU STĚNOU

- kombinace sdílení tepla **vedením** a **prouděním**
- výpočtové vztahy – výpočty výměníků tepla, tepelné ztráty budov

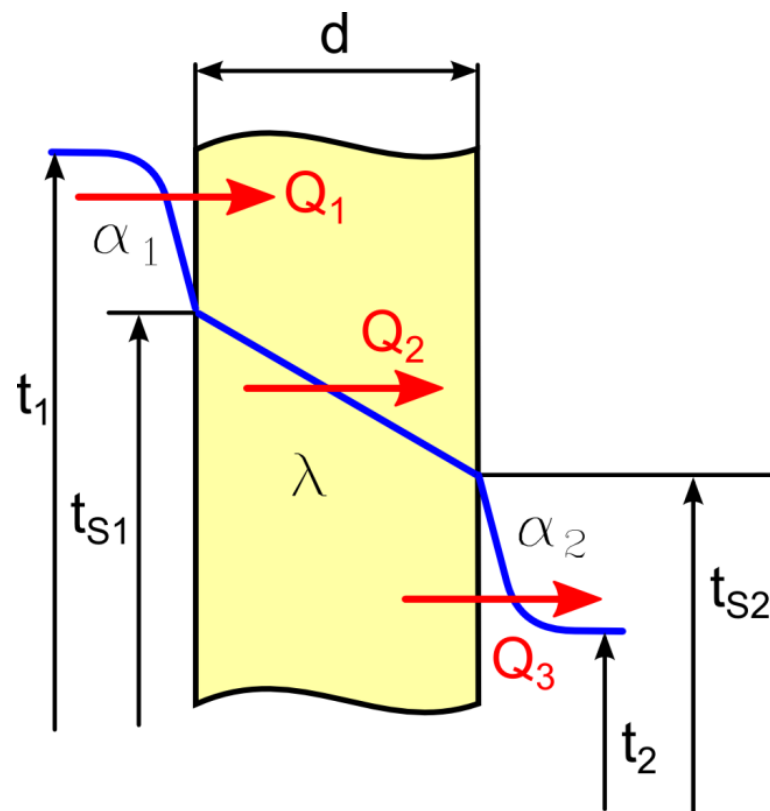
$$Q_1 = \alpha_1 \cdot S \cdot (t_1 - t_{s1})$$

$$Q_2 = \frac{\lambda}{d} \cdot S \cdot (t_{s1} - t_{s2})$$

$$Q_3 = \alpha_2 \cdot S \cdot (t_{s2} - t_2)$$

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q$$

$$Q = \frac{t_1 - t_2}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \cdot S$$



PROSTUP TEPLA SLOŽENOU ROVINNOU STĚNOU

$$Q = \frac{t_1 - t_2}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_2}} \cdot S$$

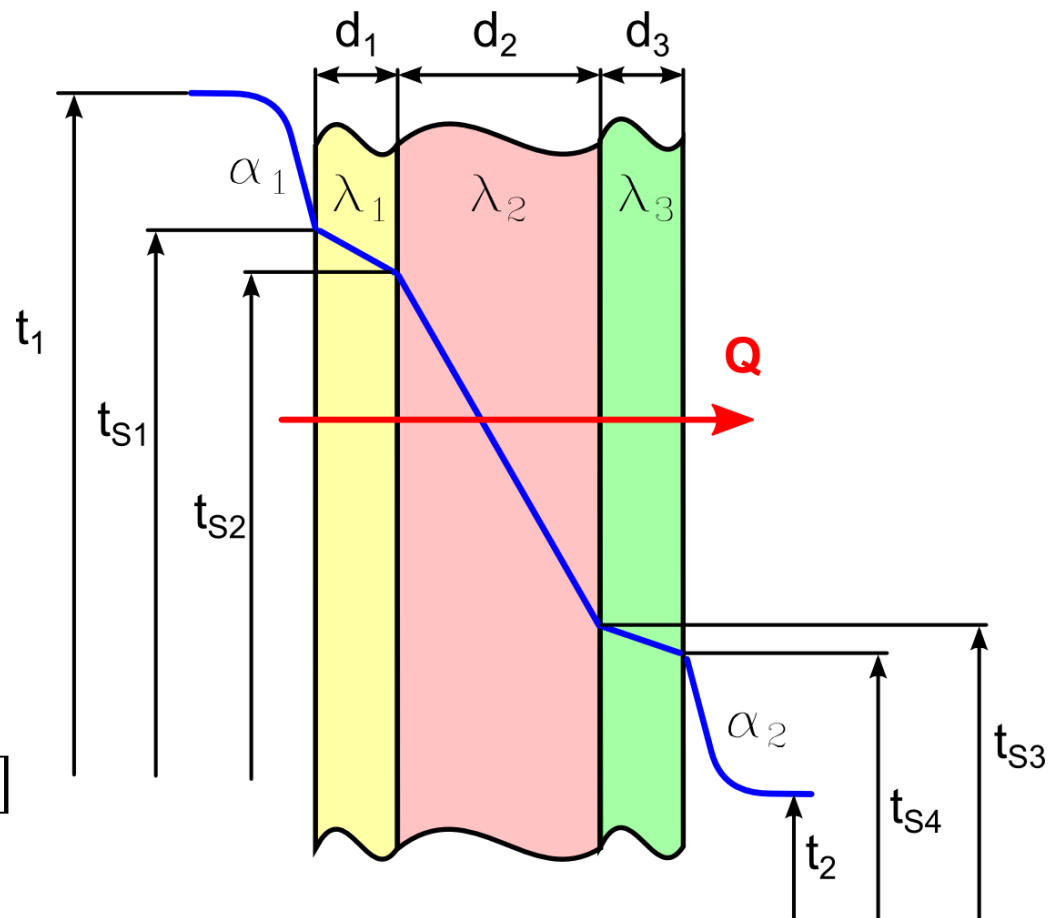
$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_2}}$$



součinitel prostupu tepla [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]



$$Q = k \cdot S \cdot \Delta t$$



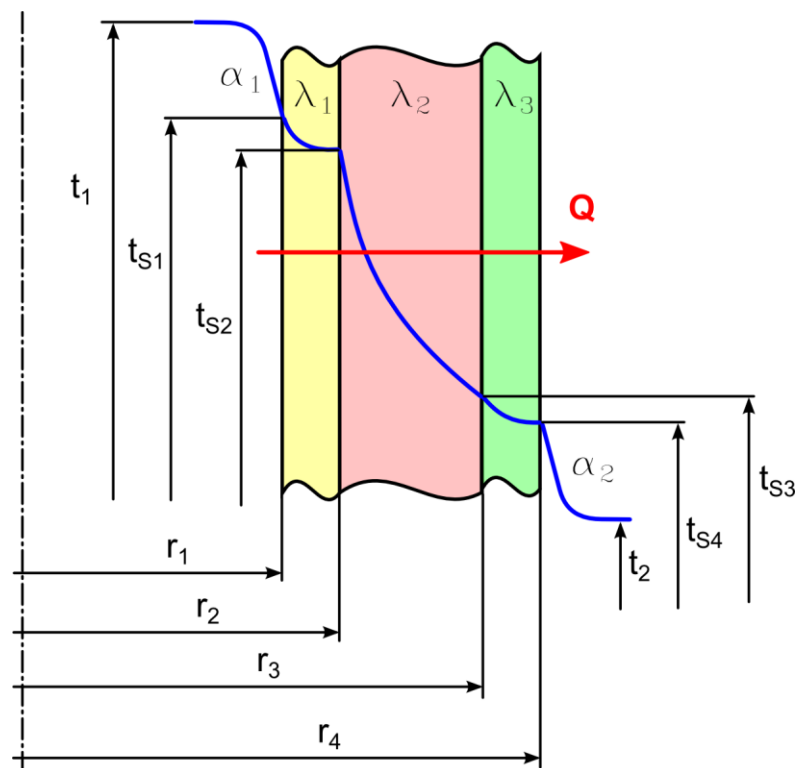
PROSTUP TEPLA SLOŽENOU VÁLCOVOU STĚNOU

jednoduchá válcová stěna:

$$Q = \frac{2 \cdot \pi \cdot l \cdot (t_1 - t_2)}{\frac{1}{r_1 \cdot \alpha_1} + \frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{r_2 \cdot \alpha_2}}$$

složená válcová stěna:

$$Q = \frac{2 \cdot \pi \cdot l \cdot (t_1 - t_2)}{\frac{1}{r_1 \cdot \alpha_1} + \frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{r_3}{r_2} + \frac{1}{\lambda_3} \ln \frac{r_4}{r_3} + \frac{1}{r_4 \cdot \alpha_2}}$$



$$k = \frac{2 \cdot \pi}{\frac{1}{r_1 \cdot \alpha_1} + \frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{r_3}{r_2} + \frac{1}{\lambda_3} \ln \frac{r_4}{r_3} + \frac{1}{r_4 \cdot \alpha_2}} \quad [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$$