

TEORETICKÉ ZÁKLADY ŠÍŘENÍ TEPLA

G STUDIJNÍ CÍLE

Po prostudování :

- § Pochopíte problematiku šíření tepla.
- § Pochopíte vzájemný vztah mezi tepelnou a mechanickou energií.
- § Dokážete vysvětlit přenos tepla vedením, prouděním a sáláním.
- § Teoretické poznatky dokážete uplatnit při praktických výpočtech.
- § Pochopíte analogii mezi teplotním a elektrickým polem

Ň KLÍČOVÁ SLOVA

teplota, teplotní rozdíl, tepelná kapacita, tepelný výkon, tepelné ztráty.

Ā ČAS POTŘEBNÝ KE STUDIU

180 minut

jednotka	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	$\text{cal}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	$\text{kcal}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	1	10^{-3}	0.2389	$0.2389\cdot 10^{-3}$
$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	10^3	1	238.9	0.2389
$\text{cal}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	4.186	$4.186\cdot 10^{-3}$	1	10^{-3}
$\text{kcal}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	4186	4.186	10^3	1

Tab. 1.2 Převody mezi jednotkami

Tepelný výkon

Tepelný výkon je teplo za jednotku času. Je to skalár.

P tepelný výkon W watt

Hustota tepelného toku

Hustota tepelného toku je tepelný výkon na jednotkovou plochu. Je to vektor - má směr daný normálou na uvažovaný plošný element dA .

q hustota tepelného toku ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)

$$q = dP / dA$$

Ě PŘÍKLADY

Příklad 1 :

Kolik kcal / hod je 10 W ?

(8.6 kcal/hod)

Příklad 2 :

Kolik cal odpovídá hodnota 5 Wh ?

(4300 cal)

Příklad 3 :

Jaký bude měrný odpor hliníku v $\Omega\cdot\text{m}$, je-li v $\Omega\cdot\text{mm}^2/\text{m}$ roven hodnotě 0.03 ?

($3\cdot 10^{-8} \Omega\cdot\text{m}$)

Příklad 4 :

Jaká bude proudová hustota v A/m^2 , je-li v A/mm^2 rovna hodnotě 5 ?

($5\cdot 10^6 \text{ A}/\text{m}^2$)

Příklad 5 :

Kolika kpm odpovídá hodnota 3 cal ?

(1.278 kpm)

Hodnocení: Každý příklad 2 body.

1.2 Vztah mezi tepelnou a mechanickou energií

Pro praxi je dobré si uvědomit, jak poměrně značná mechanická práce přísluší tepelné energii o velikosti jedné kilokalorie. Dokumentovat to budou následující příklady :

PŘÍKLADY

Příklad 1 :

Kolik cementu by bylo možné naložit na 2m vysoké nákladní auto pomocí energie potřebné pro ohřev 1 litru vody o 20 °C ? Účinnost nakládání je $\eta =$

- a) 100 %
- b) 50 %

Řešení :

Potřebná tepelná energie :

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta\vartheta = 1 \cdot 4.186 \cdot 10^3 \cdot 20 = 8.372 \cdot 10^4 \text{ J}$$

Energie potřebná pro nakládání :

$$W = m \cdot g \cdot h / \eta$$

g tíhové zrychlení

h výška nakládání

η účinnost nakládání

Z rovnosti $Q = W$ určíme hmotnost nákladu :

$$\text{a, } m = Q \cdot \eta / (g \cdot h) = 8.372 \cdot 10^4 \cdot 1 / (2 \cdot 9.806) = 4.267 \cdot 10^3 \text{ kg}$$

$$\text{b, } m = 8.372 \cdot 10^4 \cdot 0.5 / (2 \cdot 9.806) = 2.134 \cdot 10^3 \text{ kg}$$

Z výsledků je patrné, že energie potřebná k uvaření několika šálků čaje by stačila pro naložení několika desítek centů cementu na auto nebo vagón.

Příklad 2 :

Kolikrát je energeticky náročnější litr teplé vody z vodovodu než litr vody studené ? Obě vody se čerpají ze stejného zdroje o teplotě $\vartheta_1 = 10$ °C do výše $h = 100$ m. Voda studená se odebírá v místě spotřeby přímo, voda teplá se ohřívá v místě spotřeby na $\vartheta_2 = 70$ °C.

Řešení :

Účinnost čerpání čerpadlem s elektromotorem uvažujeme ve vztahu na prvotní energii $\eta_c = 0.15$ (η elektrárny = 0.3 ; η motoru s čerpadlem = 0.5). Ohřev uvažujeme uhlím s účinností $\eta_o = 0.5$.

Energie potřebná pro studenou vodu (vztaženo na 1 litr):

$$W_s = m \cdot g \cdot h / \eta_c = 1 \cdot 9.806 \cdot 100 / 0.15 = 6538 \text{ J}$$

Energie potřebná pro teplou vodu (vztaženo na 1 litr):

$$W_t = m \cdot g \cdot h / \eta_c + m \cdot c \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_1) / \eta_o$$

$$W_t = 1 \cdot 9.806 \cdot 100 / 0.15 + 1 \cdot 4.186 \cdot 10^3 \cdot (70 - 10) / 0.5 = 6\,538 + 502\,320 = 508\,858 \text{ J}$$

$$n = W_t / W_s = 508\,858 / 6\,538 = 77.8$$

Voda teplá je téměř 78x energeticky náročnější než voda studená.

Ě PŘÍKLADY K PROCVIČOVÁNÍ

Příklad 1 :

Jaký příkon by musel mít přímotopný elektrický průtokový ohřivač, aby z vodovodního kohoutku o průměru 10 mm vytékala voda teplá $\vartheta_2 = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ rychlostí $v = 2 \text{ m/s}$? Voda se ohřívá z teploty $\vartheta_1 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$. Účinnost ohřevu je 97 %. Kolik zářivek o příkonu 40 W by mohlo tímto příkonem svítit ?

(33.5 kW , 838 zářivek)

Příklad 2 :

Kolikrát více energie potřebujeme na ohřátí 10 litrů vody o $10 \text{ }^\circ\text{C}$, než na zdvižení těchto 10 litrů vody do výše 10m ? Účinnost ohřevu i účinnost zdvihání uvažujte 100 % .

(427 krát více)

Hodnocení: Každý příklad 3 body.

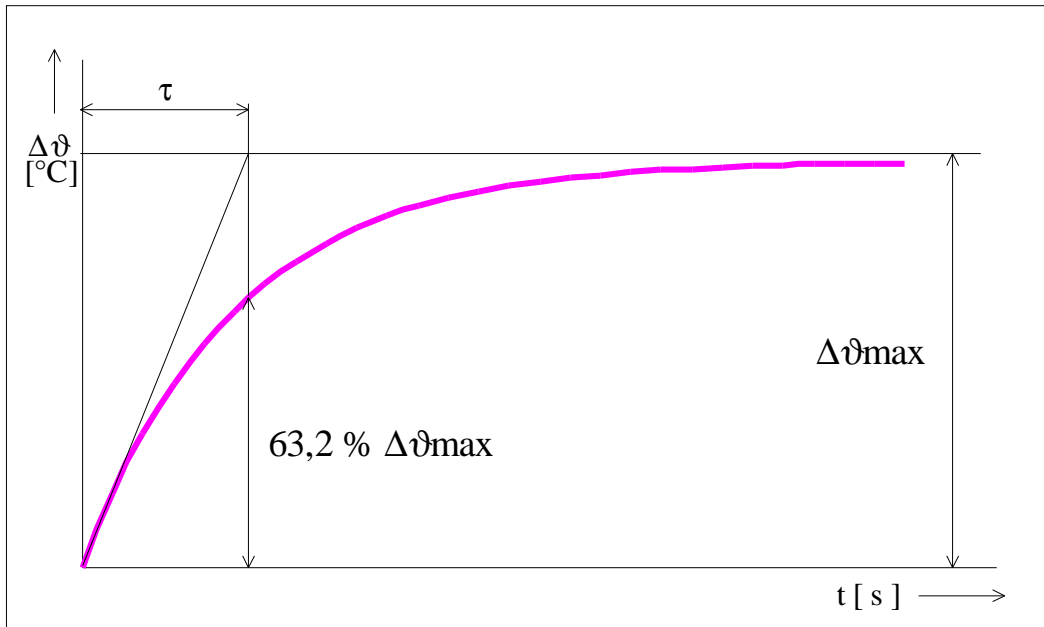
1.3 Oteplovací a ochlazovací děj

Závislost teploty na čase ohřevu vyjadřuje oteplovací křivka (obr. 1.1):

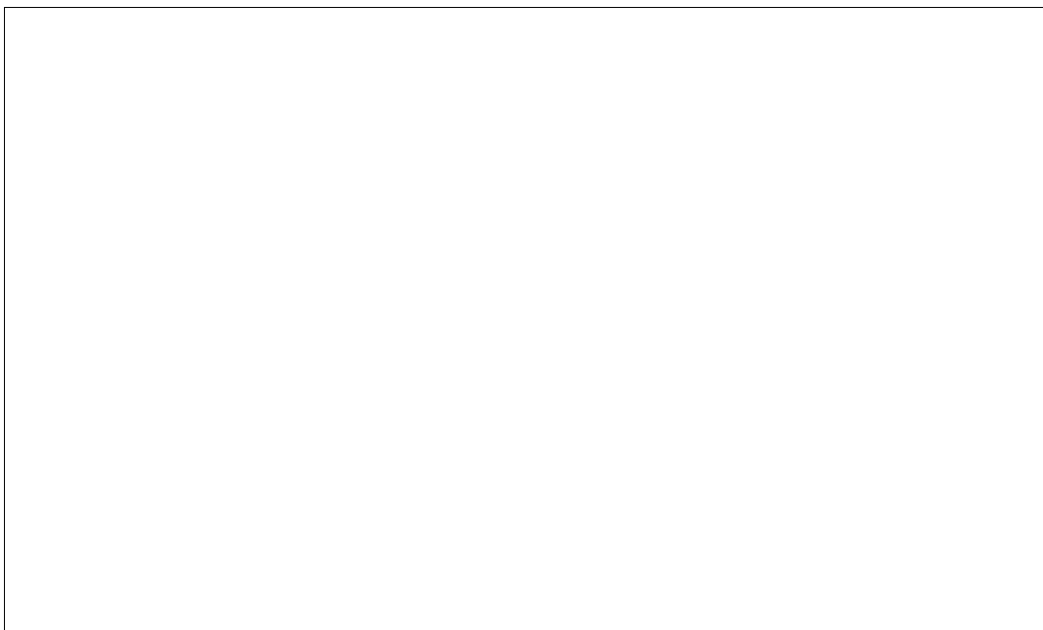
$$\Delta\vartheta = \Delta\vartheta_{\max} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (1.1)$$

Závislost teploty na čase ochlazování vyjadřuje ochlazovací křivka (obr. 1.2) :

$$\Delta\vartheta = \Delta\vartheta_{\max} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1.2)$$



Obr. 1.1 Závislost teploty na čase – oteplovací křivka



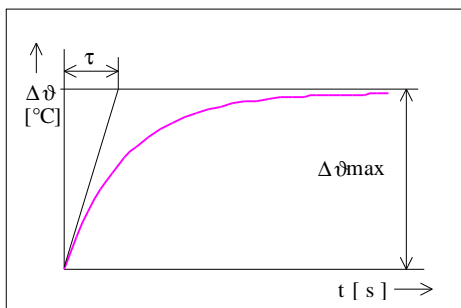
Obr. 1.2 Závislost teploty na čase - ochlazovací křivka

Ě PŘÍKLAD

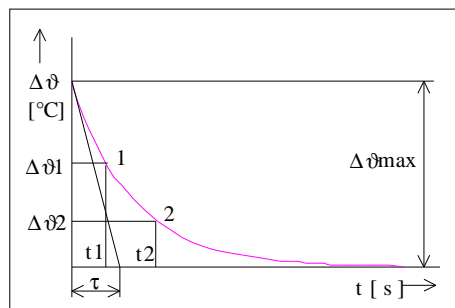
Za jak dlouho se ohřeje voda z 20 °C na 100 °C, ochladí-li se při ochlazování ze 40 °C na 30 °C za 10 minut ? Ochlazovací děj probíhá mezi teplotami 100 °C a 20 °C, časová konstanta oteplování je rovna časové konstantě ochlazování. Ukončený děj uvažujte za dobu tří časových konstant.

Řešení :

Oteplovací křivka :



Ochlazovací křivka :



Na ochlazovací křivce známe dva body, které musí vyhovovat její rovnici:

$$\Delta\vartheta = \Delta\vartheta_{\max} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$\text{bod 1 :} \quad \Delta\vartheta_1 = \Delta\vartheta_{\max} \cdot e^{-\frac{t_1}{\tau}} \quad (1.a)$$

$$\text{bod 2 :} \quad \Delta\vartheta_2 = \Delta\vartheta_{\max} \cdot e^{-\frac{t_2}{\tau}} \quad (1.b)$$

Podělením rovnice (1.a) rovnicí (1.b) dostaneme rovnici o jedné neznámé :

$$\frac{\Delta\vartheta_1}{\Delta\vartheta_2} = \frac{\Delta\vartheta_{\max} \cdot e^{-\frac{t_1}{\tau}}}{\Delta\vartheta_{\max} \cdot e^{-\frac{t_2}{\tau}}} = e^{\frac{t_2 - t_1}{\tau}}$$

Tuto rovnici zlogaritmuje a vypočteme z ní neznámou :

$$\ln \frac{\Delta\vartheta_1}{\Delta\vartheta_2} = \frac{t_2 - t_1}{\tau}$$

$$\text{kde} \quad \Delta\vartheta_1 = \vartheta_1 - \vartheta_0 = 40 - 20 = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta\vartheta_2 = \vartheta_2 - \vartheta_0 = 30 - 20 = 10 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_2 - t_1 = 10 \text{ min} = 600 \text{ sec}$$

$$t = \frac{t_2 - t_1}{\ln \frac{\Delta\vartheta_1}{\Delta\vartheta_2}} = 865.6 \text{ sec}$$

$$3 \cdot \tau = 3 \cdot 865.6 = 2596.9 \text{ sec}$$

1.4 Přenos tepla vedením

Uvnitř pevných těles nebo v jejich těsném dotyku dochází k přenosu tepla vedením. Teplo, podobně jako magnetická nebo elektrická energie, vytváří kolem sebe tzv. tepelné pole. Tepelné pole je množina okamžitých teplot všech bodů zkoumané části prostoru a je polem skalárním:

$$v = f(x, y, z, \tau) \quad (1.3)$$

Platí-li:

$$\frac{\partial J}{\partial t} = 0 \quad (1.4)$$

pak se jedná o pole stacionární:

$$v = f(x, y, z) \quad (1.5)$$

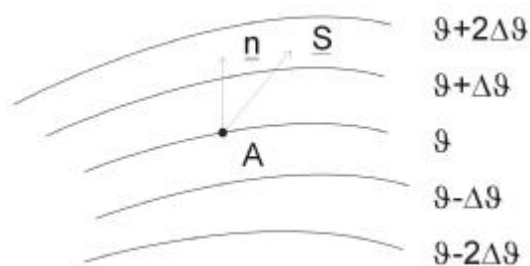
Při výpočtu tepelných ztrát a tepelné pohody prostředí se předpokládá ustálený stav, tj. řeší se případ stacionárního tepelného pole. Skutečné kolísání teplot v čase se zohlední v přídatných koeficientech uplatňovaných v užívaných vztazích.

Spojnice míst se stejnou hladinou tepelné energie se nazývají izotermy (Obr. 1.3), resp. izotermické plochy a jsou to rovněž místa se stejnou teplotou. Největší změny teploty nastávají ve směru normály k izotermické ploše. Limitní hodnotou teplotního spádu je gradient teploty:

$$- \text{grad}(v) = \lim_{n \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta \mathbf{n}} \bar{n}_0 \quad (1.6)$$

Je to vektor kolmý k izotermické ploše. Množina teplotních gradientů tvoří vektorové pole. Existence pole (je-li nenulové) znamená, že v prostoru dochází k šíření tepla. Teplo se tedy nešíří, když platí:

$$v = \text{konst.} \Leftrightarrow \text{grad}(v) = 0 \quad (1.7)$$



Obr. 1.3 Izotermy

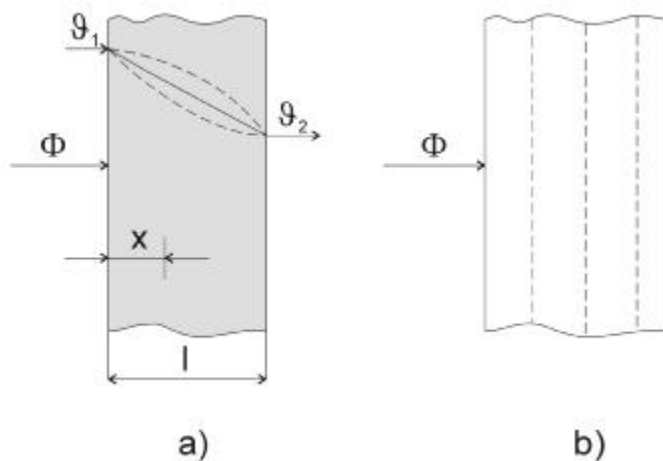
Ve většině technických aplikací je možné problematiku vedení tepla zjednodušit. Nejčastěji řešenými případy pak jsou :

- prostup tepla rovinnou stěnou
- prostup tepla válcovou stěnou

1.4.1 Vedení tepla rovinnou stěnou

Tepelný tok procházející homogenní rovinnou stěnou při stálém rozdílu povrchových teplot (Obr. 1.4) :

$$\Phi = \frac{\lambda}{s} \cdot S \cdot (v_1 - v_2) \quad [\text{W}] \quad (1.8)$$



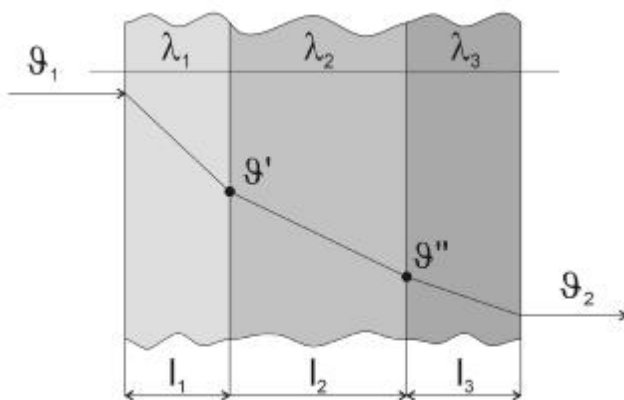
Obr. 1.4 Vedení tepla rovinnou stěnou

Teplota v se zmenšuje lineárně se vzdáleností x z hodnoty v_1 na levém rozhraní na teplotu v_2 na pravém rozhraní.

$$J = \frac{J_2 - J_1}{l} \cdot x + J_1 = J_1 - \frac{J_1 - J_2}{l} \cdot x \quad (1.9)$$

Je-li stěna složena z několika různě silných vrstev materiálů s rozdílnou tepelnou vodivostí (Obr. 1.5), pak tepelný tok touto konstrukcí :

$$\Phi = \frac{l}{\frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{s_n}{\lambda_n}} \cdot S \cdot (v_1 - v_2) \quad [\text{W}] \quad (1.10)$$



Obr. 1.5 Vedení tepla složenou rovinnou stěnou

1.4.2 Vedení tepla válcovou stěnou

Při vedení tepla z vnitřního povrchu tlustostěnné válcové trubky k vnějšímu povrchu se při vzrůstajícím průměru zvětšuje také plocha, kterou teplo prochází. Průběh teplot v závislosti na poloměru má proto tvar logaritmické křivky. Platí vztah :

$$d\Phi = \frac{\lambda}{dr} \cdot \pi \cdot 2 \cdot r \cdot l \cdot dt \quad (1.11)$$

Integrací od r_1 do r_2 obdržíme vztah :

$$\Phi = \frac{2 \cdot \pi}{\frac{1}{\lambda} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}} \cdot l \cdot (v_1 - v_2) \quad [\text{W}] \quad (1.12)$$

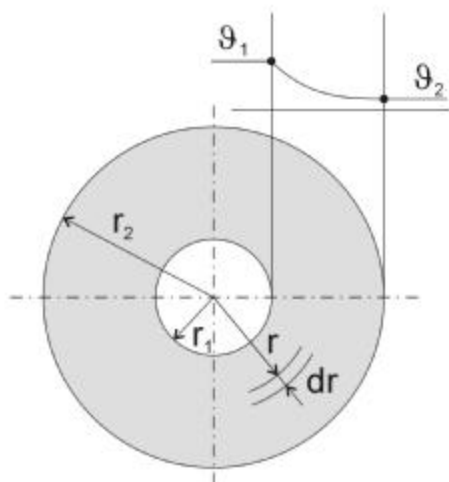
Pro složenou válcovou stěnu pak obdobně platí vztah :

$$\Phi = \frac{2 \cdot \pi}{\frac{1}{\lambda_1} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\lambda_2} \cdot \ln \frac{r_3}{r_2} + \dots + \frac{1}{\lambda_n} \cdot \ln \frac{r_{n+1}}{r_n}} \cdot l \cdot (v_1 - v_2) \quad [\text{W}] \quad (1.13)$$

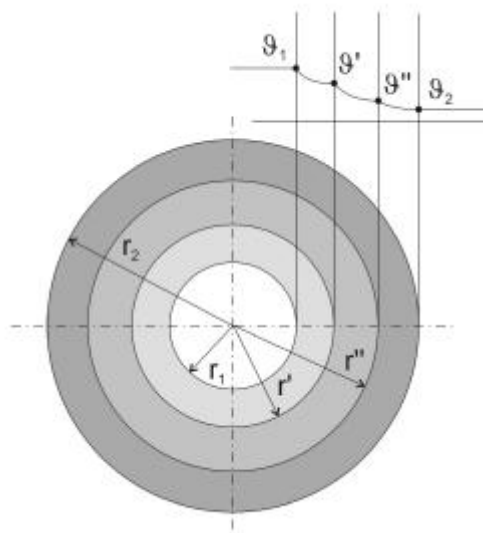
Teploty na rozhraní vrstev pak vypočteme podle vztahů :

$$J = J_1 - \frac{\Phi}{p \cdot l} \cdot \frac{1}{2l_1} \cdot \ln \frac{d'}{d_1} \quad (1.14)$$

$$J'' = J_2 - \frac{\Phi}{p \cdot l} \cdot \frac{1}{2l_3} \cdot \ln \frac{d_2}{d''}$$



Obr. 1.6 Vedení tepla válcovou stěnou



Obr. 1.7 Vedení tepla složenou válcovou stěnou

Ě PŘÍKLADY KE KAPITOLE 1.4

Příklad 1 :

Určete tepelný výkon procházející stěnou o tloušťce $l = 50 \text{ mm}$ a ploše $S = 1 \text{ m}^2$. Teplota na vnějším povrchu stěny je $\vartheta_1 = 100 \text{ }^\circ\text{C}$, na vnitřním povrchu $\vartheta_2 = 90 \text{ }^\circ\text{C}$. Stěna je :

- a, ocelová , $\lambda = 40 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
- b, betonová , $\lambda = 1,1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
- c, diatomitová , $\lambda = 0,11 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Řešení :

$$P = \lambda \cdot \frac{S}{l} \cdot \Delta\vartheta \quad (\text{W} ; \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}, \text{m}^2, \text{m}, \text{K})$$

$$\text{a, } P = 40 \cdot \frac{1}{0,05} \cdot (100 - 90) = 8\,000 \text{ W}$$

$$\text{b, } P = 1,1 \cdot \frac{1}{0,05} \cdot (100 - 90) = 220 \text{ W}$$

$$\text{c, } P = 0,11 \cdot \frac{1}{0,05} \cdot (100 - 90) = 22 \text{ W}$$

Příklad 2 :

Určete tepelný tok přes stěnu kotle. Stěna je pokryta vrstvou sazí tloušťky $l_1=1 \text{ mm}$, $\lambda_1=0,08 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ a ze strany vody je kotelní kámen tloušťky $l_3=2 \text{ mm}$, $\lambda_3=0,8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Stěna kotle má tloušťku $l_2=12 \text{ mm}$, $\lambda_2=50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Teplota stěny na straně vody je $\vartheta_4=206^\circ\text{C}$, na straně ohřevu $\vartheta_1=685^\circ\text{C}$. Určete hustotu tepelného toku \bar{q} , teploty na rozhraní vrstev, střední teploty vrstev. Stěna kotle má plochu $S=10 \text{ m}^2$.

Řešení :

Hustota tepelného toku :

$$\bar{q} = \frac{\vartheta_1 - \vartheta_4}{\frac{l_1}{\lambda_1} + \frac{l_2}{\lambda_2} + \frac{l_3}{\lambda_3}} = \frac{685 - 206}{\frac{0,001}{0,08} + \frac{0,012}{50} + \frac{0,002}{0,8}} = 31\,430 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Teploty na rozhraní :

saze - kotel

$$\vartheta_2 = \vartheta_1 - q \cdot \frac{l_1}{I_1} = 685 - 31\,430 \cdot \frac{0,001}{0,08} = 292,12 \text{ } ^\circ\text{C}$$

vodní kámen - kotel

$$\vartheta_3 = \vartheta_4 + q \cdot \frac{l_3}{I_3} = 206 + 31\,430 \cdot \frac{0,002}{0,8} = 284,58 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Střední teploty vrstev :

saze

$$\vartheta_s = \frac{\vartheta_1 + \vartheta_2}{2} = \frac{685 + 292,12}{2} = 488,56 \text{ } ^\circ\text{C}$$

stěna kotle

$$\vartheta_{SK} = \frac{\vartheta_2 + \vartheta_3}{2} = \frac{292,12 + 284,58}{2} = 288,35 \text{ } ^\circ\text{C}$$

kotelní kámen

$$\vartheta_{KK} = \frac{\vartheta_3 + \vartheta_4}{2} = \frac{284,58 + 206}{2} = 245,29 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Tepelný tok :

$$P = q \cdot S = 31\,430 \cdot 10 = 3,143 \cdot 10^5 \text{ W}$$

Ě PŘÍKLAD K PROCVIČENÍ KE KAPITOLE 1.4

Určete hustotu tepelného toku q ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) stěnou žáruvzdorné ocelové trubky o rozměrech $d_1 = 32$ mm , $d_2 = 42$ mm. Součinitel tepelné vodivosti materiálu, z něhož je trubka vyrobena $\lambda = 14 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Teplota vnější stěny trubky $\vartheta_1 = 580$ °C, teplota vnitřní stěny trubky $\vartheta_2 = 450$ °C.

(42 052 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)

Hodnocení: 3 body

1.5 Přenos tepla prouděním

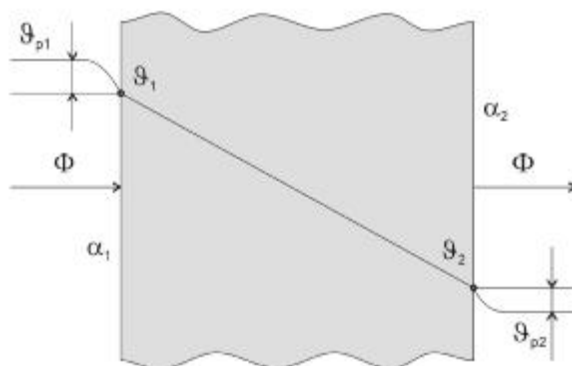
Zavedeme si součinitel přestupu tepla α_p s jednotkou $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$, který určuje, jak velký tepelný tok (výkon) protéká jednotkovou plochou při teplotním rozdílu $1 \text{ }^\circ\text{C}$. Přestup tepla tímto způsobem se uplatňuje při přestupu z nějaké pevné plochy do okolního prostředí nebo naopak (obvykle v kombinaci se sáláním).

Šíření tepla prouděním patří k nejobtížnějším výpočtovým problémům v tepelné technice. Zabývá se jím mnoho odborné literatury. V důležitých případech je nejlépe, určíme-li si součinitel přestupu tepla α_p sami měřením na modelu co nejvíce odpovídajícím našemu případu při použití uvedených vztahů v nichž se α_p vyskytuje.

Při přestupu tepla prouděním (Obr. 1.8) platí Newtonův zákon :

$$\Phi = a_1 \cdot (J_{p1} - J_1) \cdot S \quad [W; W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}, K, m^2] \quad (1.15)$$

$$\Phi = a_2 \cdot (J_2 - J_{p2}) \cdot S \quad [W; W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}, K, m^2] \quad (1.16)$$



Obr. 1.8 Přenos tepla prouděním

V kapalném a plynném prostředí dochází k sdílení tepla prouděním kapaliny nebo plynu. Pohyb může být způsoben jak vnějšími vlivy (nucené proudění), tak i závislostí měrné hmotnosti na teplotě, tedy gravitací.

Součinitel přestupu tepla prouděním α_p , je závislý na tlaku, teplotě a rychlosti proudění tekutiny, na druhu proudění (laminární nebo turbulentní), a na fyzikálních vlastnostech kapaliny (hustota, měrná tepelná kapacita, měrná tepelná vodivost a vizkozita) a dále na tvaru, rozměrech a drsnosti obtékaného tělesa. V praxi může α_p dosahovat pro klidný vzduch $3 \div 20 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$, pro kondenzující vodní páru $1000 \div 60000 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$. Pro tento značný rozsah mohou empirické vztahy na výpočet α_p platit jen v omezeném rozmezí nezávisle proměnných parametrů.

	$\alpha_{min} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$	$\alpha_{max} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$
Klidný vzduch	3,5	35
Proudící vzduch	11	584
Proudící kapalina	2300	5800
Vroucí kapalina	4660	6970
Kondenzující páry	8055	13580

Tab. 1.3 Hodnoty součinitele α

\hat{e} PŘÍKLAD

Určete tepelné ztráty svíslou stěnou o ploše $S = 1 \text{ m}^2$. Teplota stěny $\vartheta_1 = 60 \text{ }^\circ\text{C}$, teplota okolí $\vartheta_2 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$.

- a) přirozenou konvekcí $\alpha = 4 \cdot (\Delta\vartheta)^{0,13}$, $v_0 = 0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
b) ofukováním $\alpha = 5,8 + 3,95 \cdot v_0$, $v_0 = 5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

v_0 je rychlost proudění média u stěny

Řešení :

a) $P = a_p \cdot \Delta u \cdot S$ (332,6 W)

b) (1277,5 W)

Hodnocení: 2 body

1.6 Přenos tepla sáláním

Posledním principem sdílení tepla je záření. Každé těleso s teplotou větší než $\Theta=0 \text{ K}$ vyzařuje do svého okolí energii ve formě elektromagnetických vln, které se šíří v průzračném prostředí přímočaře a všemi směry. Na těleso rovněž dopadá tepelný tok od ostatních těles v prostoru. K ohřevu tělesa pochopitelně dochází, přijímá-li ze svého okolí více energie, než samo vyzáří a naopak. Množství vyzařované energie je úměrné ploše aktivního povrchu tělesa a čtvrté mocnině jeho termodynamické teploty. Je rovněž závislé na charakteru povrchu tělesa. Tok energie dopadlý na těleso lze rozdělit na tři části:

- odražený tok
- prostupující tok
- pohlcený (absorbovaný) tok

Musí platit, že :

$$a + b + c = 1 \quad (1.17)$$

Lze definovat tyto extrémy:

- $a = 1$...absolutně černý povrch (celá energie tepelného toku je tělesem pohlcena)
- $b = 1$...absolutně bílý povrch (veškerá energie je tělesem odražena)
- $c = 1$...průzračné (průteplivé) prostředí - dvouatomové plyny a vzduch
- $c = 0$...tepelně neprůzračné prostředí - např. kovy

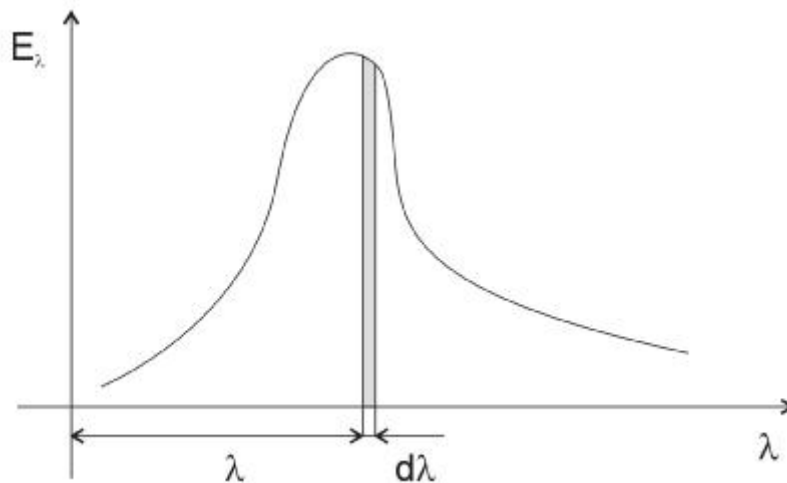
Tyto koeficienty mohou být závislé na frekvenci elektromagnetické vlny, proto je možné definovat jejich spektrální hodnoty a pro všechny vlnové délky musí platit, že:

$$a_l + b_l + c_l = 1 \quad (1.18)$$

Přenos tepla zářením se řídí fyzikálními zákony:

Zákony záření absolutně černého povrchu

Povrch zahřátého absolutně černého tělesa vyzařuje souvislé spektrum záření o různých vlnových délkách (Obr. 1.9).



Obr. 1.9 Průběh spektrální zářivosti v závislosti na vlnové délce λ

Kirchhofův zákon

$$\frac{E_{\lambda}}{A_{\lambda}} = f(\Theta) = \frac{E_{\lambda c}}{A_{\lambda c}} = E_{\lambda c} \quad (1.19)$$

Poměr zářivosti a relativní pohltivost šedého tělesa je závislý pouze na absolutní teplotě tělesa T a nezávisí na barvě povrchu. Můžeme tedy napsat Kirchhofův zákon pro záření také v této podobě – pro spektrální zářivost:

$$\frac{E_{\lambda s}}{A_{\lambda s}} = f(\Theta; I) = E_{\lambda c} \quad (1.20)$$

Stefan-Boltzmanův zákon

$$E_c = \sigma_c \cdot \Theta^4 \quad (\text{W} \cdot \text{m}^2) \quad (1.21)$$

kde $\sigma_c = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$

Zářivost černého tělesa je úměrná jen čtvrté mocnině absolutní teploty.

Planckův vyzařovací zákon

$$E_{\lambda c} = f(\Theta; I) = \frac{C_1}{I^5 \left(e^{\frac{C_2}{I \cdot \Theta}} - 1 \right)} \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-3}) \quad (1.22)$$

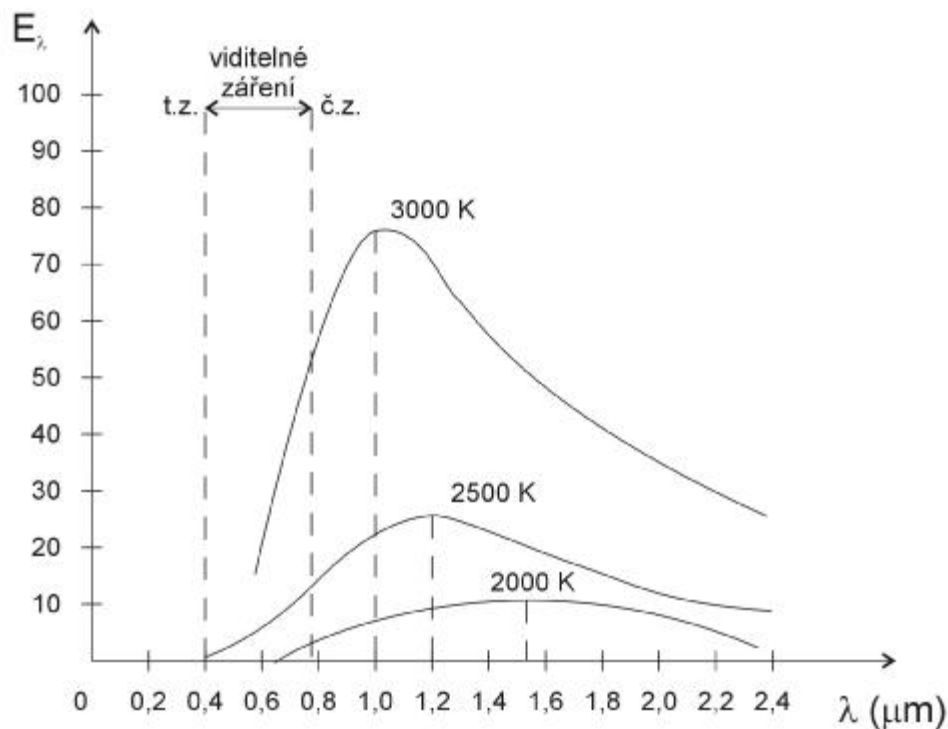
kde konstanty c_1, c_2 jsou vypočtené z Planckovy konstanty ($c_1 = 5,95 \cdot 10^{-17} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, $c_2 = 1,4388 \cdot 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$).

Planckův zákon popisuje závislost spektrální intenzity záření absolutně černého tělesa na jeho povrchové teplotě.

Zákon Wienův

$$I_{\max} = \frac{2,892 \cdot 10^{-3} E_{\dot{c}}}{\Theta} \quad (\text{m}) \quad (1.23)$$

Spektrální záření E_{λ} je za dané teploty nejintenzivnější pro vlnovou délku λ_{\max} , která je nepřímo úměrná této teplotě Θ . Z toho vyplývá, že těleso vyzařuje svým povrchem při nízké teplotě pouze dlouhovlnné (infračervené) záření. S rostoucí teplotou tedy nejen stoupá zářivost tělesa, ale maximum vyzařovaného spektra se rovněž posouvá ke kratším vlnovým délkám – Wienův posunovací zákon (Obr. 1.10).



Obr. 1.10 Wienův posunovací zákon

Pro tepelný výkon předávaný si dvěma rovnoběžnými, různě velkými plochami A_1 , A_2 , z nichž jedna má teplotu Θ_1 a emisivitu ε_1 a druhá teplotu Θ_2 a emisivitu ε_2 , platí:

$$P = \frac{A_1 \cdot s_{\dot{c}}}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)} \cdot \left[\left(\frac{\Theta_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{\Theta_2}{100}\right)^4 \right] \quad (\text{W}) \quad (1.24)$$

Ě PŘÍKLAD

Určete $P_{\check{c}}$, λ_m , $E_{\lambda m\check{c}}$ absolutně černého tělesa o ploše $S=300 \text{ cm}^2$ a teplotě $\vartheta=1200^\circ\text{C}$

Řešení :

Tepelný tok (výkon) :

$$E_{\check{c}} = \sigma_{\check{c}} \cdot \Theta^4 \cdot S = 5.6697 \cdot \left(\frac{1200 + 273.15}{100} \right)^4 \cdot 300 \cdot 10^{-4} = 8000 \text{ W}$$

Vlnová délka, na níž je maximum spektrální hustoty intenzity vyzařování :

$$\lambda_m = 2892 / \Theta = 2892 / (1200 + 273.15) = 1.96 \text{ }\mu\text{m}$$

Spektrální hustota intenzity vyzařování na vlnové délce $1.96 \text{ }\mu\text{m}$:

$$E_{\lambda m\check{c}} = \frac{c_1}{I_m^5 \cdot \left(e^{\frac{c_2}{I_m \cdot \Theta}} - 1 \right)} = \frac{3.73 \cdot 10^{-16}}{\left(1.96 \cdot 10^{-6} \right)^5 \cdot \left(e^{\frac{1.438 \cdot 0.01}{1.96 \cdot 10^{-6} \cdot 1473.15}} - 1 \right)} = 8.9 \cdot 10^{10} \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$$

Ě PŘÍKLAD K PROCVIČENÍ

Určete tepelný výkon sálající z tělesa o ploše $A_1= 1 \text{ cm}^2$, teplotě $\vartheta_1= 1000 \text{ }^\circ\text{C}$, emisivitě $\varepsilon_1= 0.9$ na těleso o ploše $A_2= 10 \text{ cm}^2$, teplotě $\vartheta_2= 0 \text{ }^\circ\text{C}$, emisivitě $\varepsilon_2= 0.9$. Druhé těleso zcela prostorově obklopuje první.

(13.25 W)

Hodnocení: 3 body

S KONTROLNÍ OTÁZKY TEORETICKÉ

1. (2 body) Co je tepelný výkon a měrná tepelná kapacita?
2. (2 body) Jakou závislost má průběh teplot ve válcové stěně v závislosti na poloměru ?
3. (1 bod) Co vyjadřuje koeficient $b=1$ při přenosu tepla sáláním ?
4. (2 body) Co popisuje Planckův zákon ?
5. (2 body) Co je to vlnová délka a spektrální hustota intenzity vyzařování?

SHRNUTÍ

Nové poznatky:

- vztah mezi tepelnou a mechanickou energií
- ochlazovací a oteplovací děj
- výpočet tepelného toku a výkonu
- výpočet tepelných ztrát při přestupu tepla složenou rovinnou a válcovou stěnou

Nové pojmy :

teplota, teplotní rozdíl, tepelná kapacita, tepelný výkon, tepelné ztráty.

Ñ KLÍČ K TEORETICKÝM OTÁZKÁM

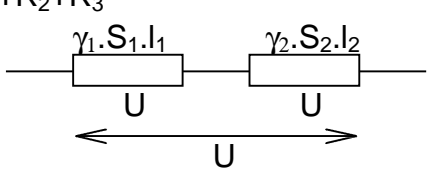
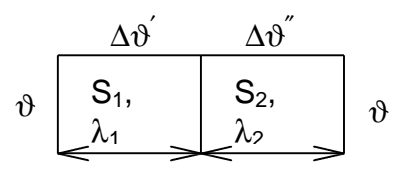
1. Kapitola 1.1
2. Kapitola 1.4.2
3. Kapitola 1.6
4. Kapitola 1.6, rovnice 1.18
5. Kapitola 1.6

\$ AUTOKONTROLA

Pokud jste získali minimálně 15 bodů z příkladů a 6 bodů z teoretických otázek, můžete pokračovat dále ve studiu. V opačném případě si ve zkráceném čase kapitolu zopakujte.

2. ANALOGIE MEZI TEPLOTNÍM A ELEKTRICKÝM POLEM

Analogie mezi polem elektrickým a teplotním je velmi výrazná a pro elektrotechniku užitečná. Uspodňuje výpočty tepla v jednodušších soustavách a v ustáleném stavu. V Tab. 2.1 jsou uvedeny základní analogie :

Pole elektrické	Pole teplotní
1. Potenciál V [V]	1. Termodynamická teplota Θ [K]
2. Napětí $U = V_1 - V_2$ [V]	2. Teplotní rozdíl $\Delta\Theta = \Theta_1 - \Theta_2$ [K]
3. Konduktivita (měrná vodivost) γ [$S \cdot m^{-1}$]	3. Součinitel tep. vodivosti λ [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]
4. Elektrická vodivost $G = \frac{\gamma \cdot S}{l}$ [S]	4. Tepelná vodivost $G = \frac{\lambda \cdot S}{l}$ [$W \cdot K^{-1}$]
5. Hustota proudu \bar{J} [$A \cdot m^{-2}$]	5. Hustota tepelného toku \bar{q} [$W \cdot m^{-2}$] Tok tepla za jednotku času připadající na jednotku plochy
6. Elektrický proud $I = \int_S \bar{J} \cdot d\bar{S}$ [A]	6. Tepelný tok $= \int_S \bar{q} \cdot d\bar{S}$ [W]
7. Odpory v sérii $R = R_1 + R_2 + R_3$ 	7. Vedení tepla složenou stěnou $R = R_1 + R_2 + R_3$ 

Tab. 2.1 Analogie mezi teplotním a elektrickým polem

