1. FYZIKÁLNÍ ZÁKLADY ŠÍŘENÍ TEPLA

1.1 Veličiny, symboly, jednotky

Teplota, teplotní rozdíl

ϑ .... teplota — °C .... stupeň Celsia
Θ .... termodynamická teplota — K .... kelvin
$\Delta\vartheta = \vartheta_2 - \vartheta_1$ .... teplotní rozdíl — °C, K
$\Delta\Theta = \Theta_2 - \Theta_1$ .... teplotní rozdíl — °C, K

Teplota i teplotní rozdíl jsou skalární veličiny. Teplotní pole je pole skalární. Vztahy mezi teplotami :

$$°C + 273.15 = K$$

Teplo

Q .... teplo — J .... joule

Teplo je forma energie. Vztahy mezi jednotkami :

jednotka	**J**	**Wh**	**cal**	**kpm**	**erg**
J	1	$2.778 \cdot 10^{-4}$	0.239	0.102	10^{7}
Wh	3600	1	860	367.1	$3.6 \cdot 10^{10}$
cal	4.186	$1.163 \cdot 10^{-3}$	1	0.427	$4.186 \cdot 10^{7}$
kpm	9.807	$2.724 \cdot 10^{-3}$	2.343	1	$9.807 \cdot 10^{7}$
erg	10^{-7}	$2.778 \cdot 10^{-11}$	$2.389 \cdot 10^{-8}$	$1.020 \cdot 10^{-8}$	1

Tepelná kapacita (akumulované teplo)

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta\vartheta \qquad (J ; kg , J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1} , K)$$

m .... hmotnost tělesa
c .... měrná tepelná kapacita (měrné teplo)
$\Delta\vartheta$ .... teplotní rozdíl

Měrná tepelná kapacita

c .... měrná tepelná kapacita ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)

Vztahy mezi jednotkami :

jednotka	$\mathbf{J{\times}kg^{-1}{\times}K^{-1}}$	$\mathbf{kJ{\times}kg^{-1}{\times}K^{-1}}$	$\mathbf{cal{\times}kg^{-1}{\times}K^{-1}}$	$\mathbf{kcal{\times}kg^{-1}{\times}K^{-1}}$
$\mathbf{J{\times}kg^{-1}{\times}K^{-1}}$	1	10^{-3}	0.2389	$0.2389\cdot10^{-3}$
$\mathbf{kJ{\times}kg^{-1}{\times}K^{-1}}$	10^{3}	1	238.9	0.2389
$\mathbf{cal{\times}kg^{-1}{\times}K^{-1}}$	4.186	$4.186\cdot10^{-3}$	1	10^{-3}
$\mathbf{kcal{\times}kg^{-1}{\times}K^{-1}}$	4186	4.186	10^{3}	1

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

$$q = dP / dA$$

Příklad 1 :

Kolik kcal / hod je 10 W ?

Řešení :

10 (W) = 10 (J/s) = 10·3600 / 4186 (kcal/hod) = 8.6 (kcal/hod)

Příklad 2 :

Kolik cal odpovídá hodnota 5 Wh ?

Řešení :

5 (Wh) = 5/3600 (W/s) = 5/3600·cal/4.186 = 4300 (cal)

Příklad 3 :

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

($3\cdot10^{-8}$ $\Omega\cdot m$)

Příklad 4 :

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

($5\cdot10^{6}$ A/m^2)

Příklad 5 :

Kolika kpm odpovídá hodnota 3 cal ?

(1.278 kpm)

1.1.1 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 :

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 η = **a)** 100 %
b) 50 %

Řešení :

Potřebná tepelná energie :

$Q = m \cdot c \cdot \Delta\vartheta = 1 \cdot 4.186 \cdot 10^3 \cdot 20 = 8.372 \cdot 10^4$ 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 :

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

b) $m = 8.372 \cdot 10^4 \cdot 0.5 / (2 \cdot 9.806) = 2.134 \cdot 10^3$ 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 ϑ_1 = 10 °C do výše h = 100 m. Voda studená se odebírá v místě spotřeby přímo, voda teplá se ohřívá v místě spotřeby na ϑ_2 = 70 °C.

Řešení :

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

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

$W_s = m \cdot g \cdot h / \eta_č = 1 \cdot 9.806 \cdot 100 / 0.15 = 6538$ J

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

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

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

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

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

Příklad 3 :

Jaký příkon by musel mít přímotopný elektrický průtokový ohřívač, aby z vodovodního kohoutku o průměru 10 mm vytékala voda teplá ϑ_2 = 60 °C rychlostí v = 2 m/s ? Voda se ohřívá z teploty ϑ_1 = 10 °C. Účinnost ohřevu je 97 %. Kolik zářivek o příkonu 40 W by mohlo tímto příkonem svítit ?

(33.5 kW , 838 zářivek)

Příklad 4 :

Kolikrát více energie potřebujeme na ohřátí 10 litrů vody o 10 °C, než na zdvižení těchto 10 litrů vody do výše 10m ? Účinnost ohřevu i účinnost zdvíhání uvažujte 100 % .

(427 krát více)

Příklad 5 :

O kolik °C se ohřeje voda ve vodopádu vysokém 200 metrů, jestliže se celá její energie polohy změní v teplo ? Z jaké výšky by musela padat voda 0 °C teplá, aby se uvařila ?

(0.47 °C, 42 692 m)

Příklad 6 :

Do vany si napustíme 100 litrů vody teplé 37 °C, která se ohřívala z 10 °C. Jak vysoko bychom museli tuto vodu vynést, aby energie polohy vody se rovnala energii potřebné pro její ohřev ? Účinnost ohřevu η_o se rovná účinnosti zdvíhání η_z.

(11 527 m)

Příklad 7 :

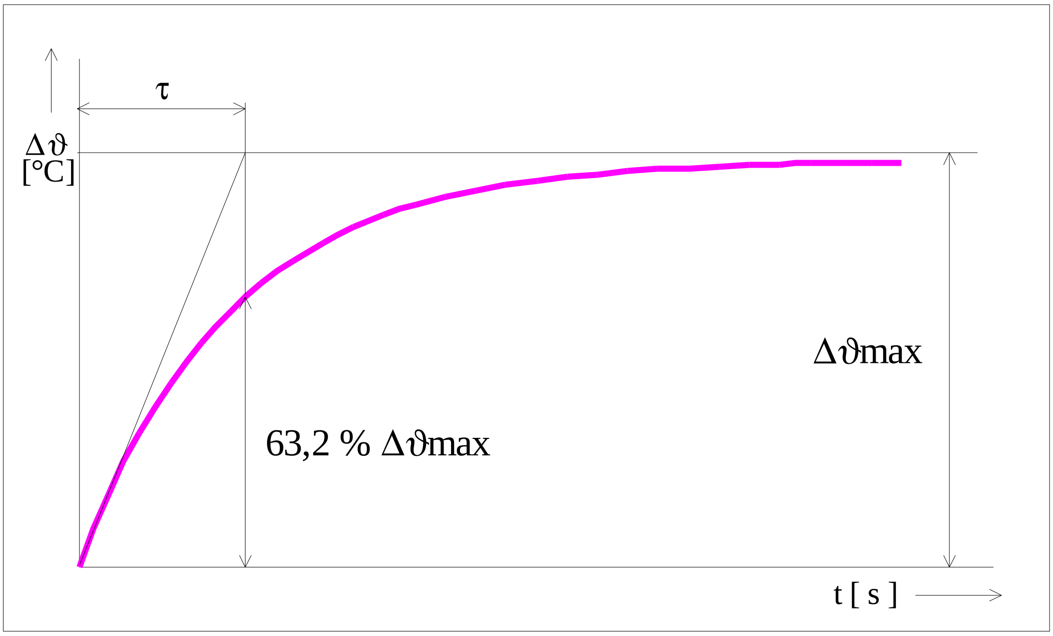
O kolik °C ohřeje energie 1kWh 20 litrů vody při účinnosti ohřevu 90 % ? Kolik lidí 80 kg těžkých se energií 1 kWh dopraví výtahem z přízemí do pátého patra (23 m) při účinnosti výtahu 60 % ?

(38.7 °C , 120 lidí)

1.1.2 Oteplovací a ochlazovací děj

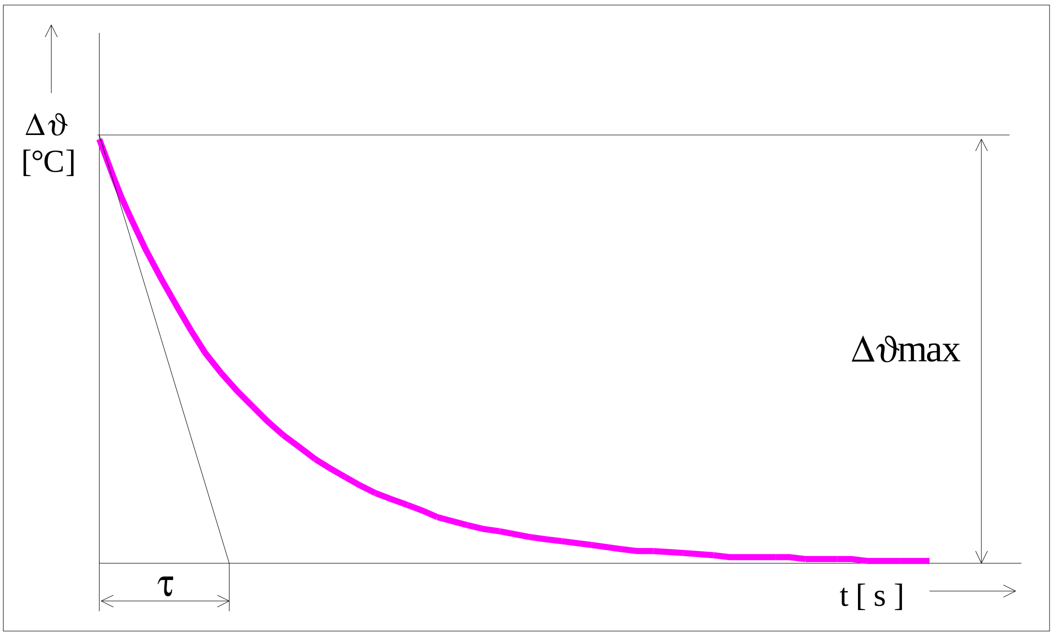
Závislost teploty na čase ohřevu vyjadřuje oteplovací křivka :

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



Závislost teploty na čase ochlazování vyjadřuje ochlazovací křivka :

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

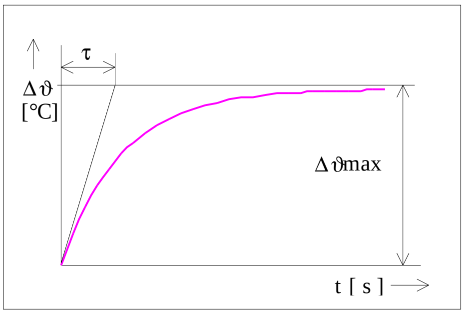


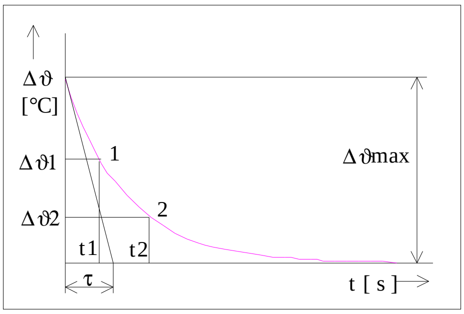
Příklad 1 :

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

bod 1 : $\Delta\vartheta_1 = \Delta\vartheta_{max} \cdot e^{-\frac{t_1}{t}}$ (**1**)

bod 2 : $\Delta\vartheta_2 = \Delta\vartheta_{max} \cdot e^{-\frac{t_2}{t}}$ (**2**)

Podělením rovnice (**1**) rovnicí (**2**) dostaneme rovnici o jedné neznámé :

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

Tuto rovnici zlogaritmujeme a vypočteme z ní neznámou :

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

kde $\Delta\vartheta_1 = \vartheta_1 - \vartheta_0 = 40 - 20 = 20$ °C
$\Delta\vartheta_2 = \vartheta_2 - \vartheta_0 = 30 - 20 = 10$ °C

$t_2 - t_1 = 10$ min $= 600$ sec

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

$3 \cdot \tau = 3 \cdot 865.6 = 2596.9$ sec

1.2 Přenos tepla vedením

Teplo se šíří třemi způsoby buď samostatnými nebo, čistěji, jejich různými kombinacemi :
1. vedením (kondukcí)
2. prouděním (konvekcí)
3. zářením (radiací)

Pro přenos tepla vedením si definujeme součinitel tepelné vodivosti λ jako materiálovou konstantu charakterizující schopnost dané látky předávat teplo vedením (tato schopnost je přímo úměrná velikosti tohoto součinitele).Jednotkou součinitele tepelné vodivosti je $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ a jeho hodnoty pro různé materiály jsou uvedeny v tabulce :

Pro vedení tepla platí vztah :

$$P = \int_S \bar{q} \cdot \bar{dS} = \int_S - l \cdot \mathrm{grad}\Theta \cdot \bar{dS}$$

který pro homogenní teplotní vztah přejde do tvaru :

$$P = l \cdot \frac{S}{l} \cdot \Delta\vartheta$$

Řešení některých konkrétních případů vedení tepla si ukážeme v následujících příkladech.

Příklad 1 - Rovinná stěna :

Určete tepelný výkon procházející stěnou o tloušťce l = 50 mm a ploše S = 1 m^2. Teplota na vnějším povrchu stěny je ϑ_1 = 100 °C , na vnitřním povrchu ϑ_2 = 90 °C. Stěna je :

a) ocelová , λ = 40 W . m^{-1} . K^{-1}
b) betonová , λ = 1,1 W . m^{-1} . K^{-1}
c) diatomitová , λ = 0,11 W . m^{-1} . K^{-1}

Řešení :

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

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

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

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

Příklad 2 - Složená rovinná stěna :

Určete tepelný tok přes stěnu kotle. Stěna je pokryta vrstvou sazí tloušťky l_1=1 mm, λ_1=0,08 W.m^{-1}.K^{-1} a ze strany vody je kotelní kámen tloušťky l_3=2 mm, λ_3=0,8 W.m^{-1}.K^{-1}. Stěna kotle má tloušťku l_2=12 mm, λ_2=50 W.m^{-1}.K^{-1}. Teplota stěny na straně vody je ϑ_4=206°C , na straně ohřevu ϑ_1=685°C. Určete hustotu tepelného toku q , teploty na rozhraní vrstev , střední teploty vrstev. Stěna kotle má plochu S=10 m^2.

Řešení :

Hustota tepelného toku :

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

Teploty na rozhraní :

saze - kotel

$$\vartheta_2 = \vartheta_1 - q \cdot \frac{l_1}{\lambda_1} = 685 - 31\,430 \cdot \frac{0{,}001}{0{,}08} = 292{,}12 \ \text{°C}$$

vodní kámen - kotel

$$\vartheta_3 = \vartheta_4 + q \cdot \frac{l_3}{\lambda_3} = 206 + 31\,430 \cdot \frac{0{,}002}{0{,}8} = 284{,}58 \ \text{°C}$$

Střední teploty vrstev :

saze

$$\vartheta_S = \frac{\vartheta_1 + \vartheta_2}{2} = \frac{685 + 292{,}12}{2} = 488{,}56 \ \text{°C}$$

stěna kotle

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

kotelní kámen

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

Tepelný tok :

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

Příklad 3 - Složená rovinná stěna , λ závislé na teplotě :

Určete ztráty tepla dvouvrstvou stěnou ohřívací pece. Základní šamotová vrstva o tloušťce l_S = 230 mm , λ_{S0} = 0,971 W.m^{-1}.K^{-1}, ξ_S = 0,00058 je izolována pórovitým šamotem o tloušťce l_{iz} = 115 mm , λ_{izo} = 0,23 W.m^{-1}.K^{-1}, ξ_{iz} = 0,0002 . Na vnitřní straně zdiva je teplota ϑ_1 = 930 °C , na vnější straně izolace je teplota ϑ_3 = 70 °C. Platí $\lambda = \lambda_o + \xi \cdot \vartheta_{stř}$, kde $\vartheta_{stř}$ je střední teplota vrstvy.

Řešení :

1) Odhadneme teplotu na rozhraní vrstev - např. ϑ_{20} = 500 °C
2) Vypočteme střední teplotu vrstev :

šamot : $$J_{\mathrm{sI}} = \frac{J_1 + J_{20}}{2} = \frac{930+500}{2} = 715 \quad °\mathrm{C}$$

izolace : $$J_{\mathrm{izI}} = \frac{J_{20} + J_3}{2} = \frac{500+70}{2} = 285 \quad °\mathrm{C}$$

3) Vypočteme tepelnou vodivost při dané střední teplotě vrstvy :

šamot : $\lambda_{sI} = \lambda_{S0} + \xi_S \cdot \vartheta_{sI}$ = 0,971 + 0,00058 · 715 = 1,386 W.m^{-1}.K^{-1}

izolace : $\lambda_{izI} = \lambda_{iz0} + \xi_{iz} \cdot \vartheta_{izI}$ = 0,23 + 0,0002 · 285 = 0,287 W.m^{-1}.K^{-1}

4) Vypočteme hustotu tepelného toku :

$$\bar{q} = \frac{\Delta J}{\sum_{i=1}^{2} \frac{\mathrm{l_i}}{l_i}} = \frac{930-70}{\frac{0{,}23}{1{,}386} + \frac{0{,}115}{0{,}287}} = 1517{,}7 \quad \mathrm{W \cdot m^{-2}}$$

5) Vypočteme teplotu na rozhraní :

$$\vartheta_{2I} = \vartheta_1 - q \cdot \frac{\mathrm{l_S}}{l_S} = 930 - 1517{,}7 \cdot \frac{0{,}23}{1{,}386} = 678 \quad °\mathrm{C}$$

Jelikož se vypočtená teplota na rozhraní ϑ_{2I} = 678 °C liší podstatně od teploty odhadnuté ϑ_{20} = 500 °C, zopakujeme postup **1**, ÷ **5**, se vstupní teplotou na rozhraní vrstev ϑ_{2I}=678 °C. Jednotlivé hodnoty zapíšeme do tabulky.

Veličina / Krok	J_2	J_S	J_{iz}	l_S	l_{iz}	**q**	J_2
	°C	°C	°C	W.m^{-1}.K^{-1}	W.m^{-1}.K^{-1}	W.m^{-2}	°C
I	500	715	285	1,386	0,287	1517,7	678
II	678	804	374	1,437	0,305	1601,2	673
III	673	801,5	371,5	1,436	0,304	1597,2	674

Příklad 4 - Válcová stěna

Určete hustotu tepelného toku q (W·m^{-1}) stěnou žáruvzdorné ocelové trubky o rozměrech d_1 = 32 mm , d_2 = 42 mm. Součinitel tepelné vodivosti materiálu, z něhož je trubka vyrobena λ = 14 W.m^{-1}.K^{-1}. Teplota vnější stěny trubky ϑ_1 = 580 °C, teplota vnitřní stěny trubky ϑ_2 = 450 °C.

Řešení :

Pro složenou válcovou stěnu platí pro přestup tepla vedením vztah :

$$q = \frac{2 \cdot p \cdot \Delta J}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{l_i} \cdot \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}} \qquad (W.m^{-1} ; K , W.m^{-1}.K^{-1}, m)$$

Pro jednovrstvou stěnu a hodnoty našeho zadání :

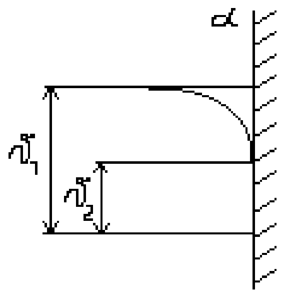
$$q = \frac{2 \cdot p \cdot (580 - 450)}{\frac{1}{14} \cdot \ln \frac{42}{32}} = 42052 \ W.m^{-1}$$

1.3 Přenos tepla prouděním

Zavedeme si součinitel přestupu tepla α s jednotkou $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$, který určuje, jak velký tepelný tok (výkon) protéká jednotkovou plochou při teplotním rozdílu 1 °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 sami měřením na modelu co nejvíce odpovídajícím našemu případu při použití uvedených vztahů v nichž se α vyskytuje.

Při přestupu tepla prouděním platí Newtonův zákon :



$$P = \alpha \cdot S \cdot \Delta\vartheta \qquad (W ; W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}, m^2 , K)$$

Příklad 1 - Šíření tepla čistým prouděním :

Určete tepelné ztráty svislou stěnou o ploše S = 1 m^2. Teplota stěny $\vartheta_1 = 60$ °C, teplota okolí $\vartheta_2 = 10$ °C.

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

v_0 je rychlost proudění média u stěny

Řešení :

a) $P = \alpha \cdot S \cdot \Delta\vartheta = 4 \cdot (\Delta\vartheta)^{0,13} \cdot S \cdot \Delta\vartheta =$

$= 4 \cdot (60 - 10)^{0,13} \cdot 1 \cdot (60 - 10) = 332,6 \text{ W}$

b) $P = \alpha \cdot S \cdot \Delta\vartheta = (5,8 + 3,95 \cdot v_0) \cdot S \cdot \Delta\vartheta =$

$= (5,8 + 3,95 \cdot 5) \cdot 1 \cdot (60 - 10) = 1277,5 \text{ W}$

Příklad 2 :

Určete graficky průběh teploty ve stěně místnosti. Vnitřní teplota je ϑ_1 = 20 °C, venkovní teplota ϑ_5 = -20 °C. Vnitřní zeď je cihlová tloušťky s_1 = 0,36 m, součinitel tepelné vodivosti λ_1 = 0,464 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$, dále je vrstva betonu tloušťky s_2 = 0,13 m, součinitel tepelné vodivosti λ_2 = 1,102 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$. Součinitel přestupu tepla na vnitřním povrchu je α_2 = 17,4 $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$, součinitel přestupu tepla venkovního povrchu je α_1 = 5,8 $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$.

Řešení :

1) Nakreslíme si v měřítku řez složenou stěnou, kterou prostupuje tepelný tok.

2) Na svislé ose si vyznačíme vnitřní a venkovní teplotu.

3) Na úrovni vnitřní teploty si vpravo od stěny zvolíme pól P.

4) Vypočítáme si jednotkové tepelné odpory příslušné danému způsobu šíření tepla a daným parametrům.

5) Na svislou polopřímku v libovolném bodě mezi pólem P a složenou stěnou budeme od úrovně vnitřní teploty směrem k úrovni venkovní teploty postupně v měřítku nanášet jednotkové tepelné odpory :

- proudění na vnitřní straně složené stěny
- vedení vrstvou cihel
- vedení vrstvou betonu
- proudění na venkovní straně složené stěny

6) Spojíme pól P s konci takto vynesených tepelných odporů.

7) V místě, kde nám spojnice pólu s koncovým bodem posledního tepelného odporu protne úroveň venkovní teploty, zkonstruujeme polopřímku svislým směrem.

8) Průsečíky spojnic pólu s koncovými body jednotkových tepelných odporů s takto zkonstruovanou polopřímkou nám udávají teploty na rozhraní jednotlivých vrstev :

- na vnitřní straně složené stěny
- na rozhraní dvou vrstev složené stěny
- na vnější straně složené stěny

9) Vyneseme tyto teploty do patřičných míst složené stěny.

10) Spojením těchto teplot dostaneme požadované grafické znázornění průběhu teplot.

Výpočet jednotkových tepelných odporů :

- proudění u vnitřního povrchu složené stěny

$$R_{q1} = \frac{1}{a_2} = \frac{1}{17,4} = 0,0575 \ \ W^{-1} \cdot K$$

- vedení tepla cihlovou vrstvou

$$R_{q2} = \frac{s_1}{l_1} = \frac{0,36}{0,464} = 0,776 \ \ W^{-1} \cdot K$$

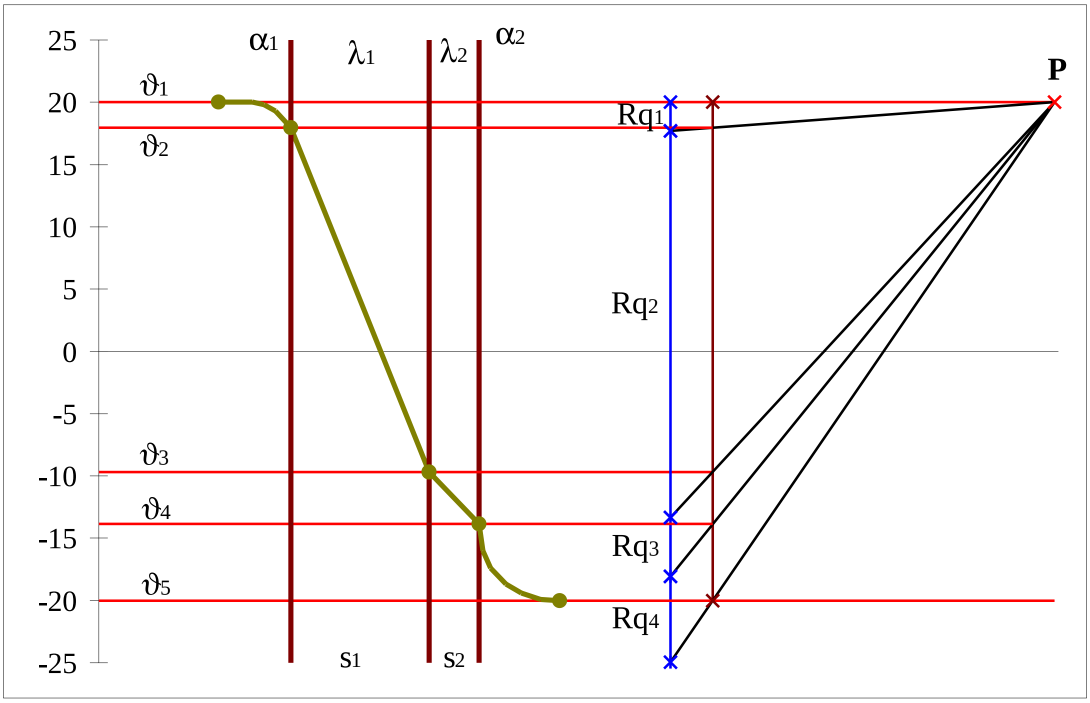
- vedení tepla betonovou stěnou

$$R_{q3} = \frac{s_2}{l_2} = \frac{0,13}{1,102} = 0,118 \ \ W^{-1} \cdot K$$

- proudění u vnějšího povrchu složené stěny

$$R_{q4} = \frac{1}{a_1} = \frac{1}{5,8} = 0,172 \ \ W^{-1} \cdot K$$

Grafická konstrukce :



1.4 Přenos tepla sáláním

Každé těleso, jehož teplota je vyšší než 0 K, vyzařuje svým povrchem tepelnou energii. Je to elektromagnetické vlnění, které se řídí zákony geometrické optiky.

Zákony, jimiž se řídí šíření tepla sáláním :

a) Zákon Stefan-Boltzmannův :

$$P_{č} = \sigma_{č} \cdot \Theta^{4} \qquad (W \cdot m^{-2} ; W \cdot m^{-2} (K/100)^{-4} , K)$$

Stefan-Boltzmannova konstanta $\sigma_{č} = 5{,}6697\ W \cdot m^{-2}\ (K/100)^{-4}$

b) Zákon Planckův :

$$M_{\lambda č} = f (\Theta , \lambda) = \frac{c_1}{l^5 \cdot \left(e^{\frac{c_2}{l \cdot \Theta}} - 1 \right)} \qquad (W \cdot m^{-4} ; m , K)$$

$c_1 = 3{,}73 \cdot 10^{-16}\ W \cdot m^{2}$
$c_2 = 1{,}438 \cdot 10^{-2}\ m \cdot K$

c) Zákon Wienův :

$$\lambda_m = \frac{2892}{\Theta} \qquad (\mu m ; K)$$

d) Tepelný výkon předávaný si dvěma rovnoběžnými, stejně velkými plochami. Každá s plochou A, z nichž jedna má teplotu Θ_1 a emisivitu ε_1 a druhá teplotu Θ_2 a emisivitu ε_2 :

$$P = \frac{A \cdot s_{č}}{\frac{1}{e_1} + \frac{1}{e_2} - 1} \cdot \left[\left(\frac{\Theta_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{\Theta_2}{100} \right)^4 \right] \qquad (W)$$

e) Dvě plochy, z nichž A_2 zcela prostorově obklopuje menší A_1 :

$$P = \frac{A_1 \cdot s_{č}}{\frac{1}{e_1} + \frac{A_1}{A_2} \cdot \left(\frac{1}{e_2} - 1 \right)} \cdot \left[\left(\frac{\Theta_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{\Theta_2}{100} \right)^4 \right] \qquad (W)$$

Příklad 1 :

Určete $P_č$, λ_m , $M_{\lambda mč}$ absolutně černého tělesa o ploše S = 300 cm^2 a teplotě ϑ = 1200°C

Řešení :

Tepelný tok (výkon) :

$$P_č = \sigma_č \cdot \Theta^4 \cdot S = 5.6697 \cdot \left(\frac{1200 + 273.15}{100}\right)^4 \cdot 300.10^{-4} = 8000 \quad W$$

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

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

Spektrální hustota intenzity vyzařování na vlnové délce 1.96 μm :

$$M_{\lambda mč} = \frac{c_1}{l_m^5 \cdot \left(e^{\frac{c_2}{l_m \cdot \Theta}} - 1\right)} = \frac{3.73 \cdot 10^{-16}}{\left(1.96 \cdot 10^{-6}\right)^5 \cdot \left(e^{\frac{1.438 \cdot 0.01}{1.96 \cdot 10^{-6} \cdot 1473.15}} - 1\right)} = 8.9 \cdot 10^{10} \, W \cdot m^{-3}$$

Příklad 2 :

Určete tepelný výkon sálající z tělesa o ploše A_1= 1 cm^2 , teplotě ϑ_1= 1000 °C, emisivitě ε_1= 0.9 na těleso o ploše A_2= 10 cm^2 , teplotě ϑ_2= 0 °C, emisivitě ε_2= 0.9. Druhé těleso zcela prostorově obklopuje první.

Řešení :

$$P = \frac{A_1 \cdot s_č}{\frac{1}{e_1} + \frac{A_1}{A_2} \cdot (\frac{1}{e_2} - 1)} \cdot \left[\left(\frac{\Theta_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{\Theta_2}{100}\right)^4\right]$$

$$P = \frac{1 \cdot 10^{-4} \cdot 5.67}{\frac{1}{0.9} + \frac{1}{10} \cdot \left(\frac{1}{0.9} - 1\right)} \cdot \left[\left(\frac{1273}{100}\right)^4 - \left(\frac{273}{100}\right)^4\right] = 13.25 \quad W$$