

S T U . .
.
. S j F . .
.

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
Strojnícka fakulta



**PODKLADY K CVIČENIAM A KU SKÚŠKE
Z PRENOSU TEPLA**

PRENOS TEPLA – TERMOKINETIKA

Prenos tepla je veda, ktorá skúma akým spôsobom sa šíri energia teplom v priestore a čase a ako sa dopravuje do skúmaného systému.

Rozlišujeme tri základne spôsoby prenosu tepla, a to:

- *vedením* (kondukcia) - je transport tepla mikropohybom molekúl hmotnosti,
- *prúdením* (konvekcia) - je transport tepla makropohybom molekúl a zhluku molekúl v prúdiacej tekutine,
- *žiarením* (radiácia) - je transport tepla elektromagnetickým vlnením s dĺžkou vlny v rozsahu $0,8 \cdot 10^{-6}$ m až $0,8 \cdot 10^{-3}$ m.

1 Vedenie tepla - kondukcia

Je prevládajúci jav transportu tepla v tuhých látkach. Pre hustotu tepelného toku vedením platí Fourierov zákon

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{S} = -\lambda \cdot \text{grad } t \quad (\text{W/m}^2) \quad (12-1)$$

kde λ [W/(m.K)] je koeficient tepelnej vodivosti. Je to fyzikálna vlastnosť látky udávaná pre rozličné materiály v tabuľkách a diagramoch ako funkcia teploty,

\dot{Q} (W) - tepelný tok,

$\text{grad } t = \frac{dt}{dn}$ (°C/m) - rozdiel teplôt na jednotke dĺžky teplotového poľa v smere normály (n) k izotermickej ploche - teplotný spád,

S (m²) - povrchová plocha skúmaného systému.

Teplotné pole v najvšeobecnejšej forme popisuje Fourierova-Kirchhoffova diferenciálna rovnica vedenia tepla v tvare

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + c_x \frac{\partial T}{\partial x} + c_y \frac{\partial T}{\partial y} + c_z \frac{\partial T}{\partial z} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\dot{q}_v}{\rho c_p} \quad (12-2)$$

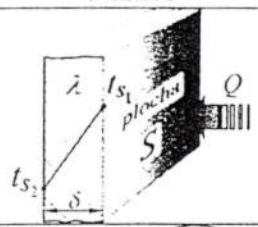
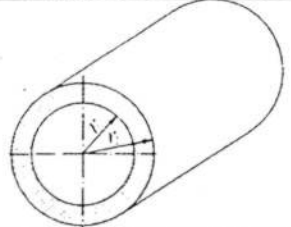
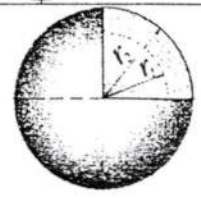
kde $a = \frac{\lambda}{\rho c_p}$ (m²/s) je teplotná vodivosť látky, v ktorej vyšetrujeme teplotné pole,

\dot{q}_v (W/m³) - zdroj tepla v jednotke objemu uvažovaného systému za jednotku času.

2 Stacionárne vedenie tepla

Riešením uvedených rovníc pre stacionárny tok tepla vedením telesami jednoduchých tvarov je uvedené v nasledovnej tabuľke.

Tabuľka 12.1 : Stacionárny tok tepla vedením \dot{Q} (W) stenou jednoduchou a zloženou z n vrstiev s povrchovými teplotami $T_{s1} > T_{s2}$ (K) a tepelnými vodivosťami λ, λ_i (W/(m.K))

Geom. tvar	Nákres	Jednoduchá	Zložená
Rovinná stena $S(\text{m}^2)$		$\dot{Q} = \frac{T_{s1} - T_{s2}}{\frac{\delta}{\lambda}} \cdot S$ (12-3)	$\dot{Q} = \frac{T_{s1} - T_{s_{n+1}}}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}} \cdot S$ (12-4)
Valcová stena $r_2 > r_1$ (m) i -ta vrstva: $r_{i-1} > r_i$ dĺžka valca : L		$\dot{Q} = \frac{T_{s1} - T_{s2}}{\frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{r_2}{r_1}} \cdot L$ (12-5)	$\dot{Q} = \frac{T_{s1} - T_{s_{n+1}}}{\frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{r_{i+1}}{r_i}} \cdot L$ (12-6)
		Hustota toku na jednotku dĺžky $\dot{q}_l = \dot{Q}/L$ (12-7)	
Gul'a $r_2 > r_1$ (m) i -ta vrstva: $r_{i-1} > r_i$		$\dot{Q} = \frac{T_{s1} - T_{s2}}{\frac{1}{4\pi\lambda} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)}$ (12-8)	$\dot{Q} = \frac{T_{s1} - T_{s_{n+1}}}{\frac{1}{4\pi} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} \left(\frac{1}{r_i} - \frac{1}{r_{i+1}} \right)}$ (12-9)

3 Nestacionárne vedenie tepla

Riešenie problémov nestacionárneho (neustáleho) vedenia tepla znamená nájsť závislosť teploty a hustoty tepelného toku na čase pre ľubovoľný bod telesa. Známe sú riešenia:

- analytické – sú možné len pre telesá jednoduchých tvarov (nekonečná doska, valec.. atď.), matematicky náročne (Fourierové rady) atď.,
- numerické iteračné metódy riešenia pomocou počítača (metóda konečných rozdielov, konečných prvkov ...atď.),
- experimentálnymi metódami – modelovaním (napr. telesá zložitých tvarov).

Analytické riešenia pre telesá jednoduchých tvarov sú vypracované graficky a formou tabuliek pomocou kritérií (F_o, Bi) ako funkcie bezrozmernej teploty θ .

$$\theta = f(Bi, F_o, x) \quad , \quad \theta = f(Bi, F_o)$$

Bezrozmerná teplota $\theta = \frac{T - T_t}{T_o - T_t}$, bezrozmerná dĺžka $\chi = \frac{x}{L}$ (12-10, a,b)

Fourierovo kritérium, charakterizuje podmienky nestacionárneho vedenia tepla

$$F_o = \frac{\alpha_m \tau}{L^2} \quad (12-11, a,b)$$

Biotovo kritérium vyjadruje vplyv okolia na teleso pri nestacionárnom vedení tepla v tuhých telesách

$$Bi = \frac{\alpha L}{\lambda_m} \quad (12-12)$$

kde $a_m = \frac{\lambda_m}{\rho_m \cdot c_m}$ (m^2/s) je teplotná vodivosť materiálu telesa,

- τ (s) - čas,
 λ_m (W/(m.K)) - tepelná vodivosť tuhého materiálu,
 L (m) - charakteristický rozmer telesa (doska $L=h/2$, h je hrúbka dosky),
 α (W/(m².K)) - koeficient prestupu tepla,
 ρ_m (kg/m³) - hustota materiálu,
 c_m (J/(kg.K)) - špecifická tepelná kapacita materiálu,
 T (K) - teplota v mieste x v čase τ ,
 T_r (K) - teplota okolitého prostredia,
 T_o (K) - počiatočná teplota telesa.

1.2 Kritická hrúbka izolácie

Nevhodná izolácia na malých priemeroch rúrok (drôtov) môže spôsobiť zvýšenie tepelného toku z dôvodu zmenšenia tepelného odporu medznej vrstvy z jej povrchu. Lineárnu hustotu tepelného toku z rúrky v ktorej tečie tekutina o teplote t_{t_1} do okolia cez stenu a izoláciu udáva rovnica:

$$\dot{q}_L = \frac{t_{t_1} - t_{t_2}}{\underbrace{\frac{1}{\pi d_1 \alpha_1}}_{R_1} + \underbrace{\frac{1}{2 \pi \lambda} \ln \frac{d_2}{d_1}}_{R_2} + \underbrace{\frac{1}{2 \pi \lambda_i} \ln \frac{d_3}{d_2}}_{R_3} + \underbrace{\frac{1}{\pi d_3 \alpha_2}}_{R_4}} \quad (\text{W/m}) \quad (1.8)$$

d_1 a d_2 sú priemery na rúrke (vnútorný a vonkajší) (m)

d_3 je vonkajší priemer izolácie (m)

λ koef. tepelnej vodivosti rúrky (W.m⁻¹K⁻¹)

λ_i koef. tepelnej vodivosti izolácie (W.m⁻¹K⁻¹)

$R_1 \div R_4$ sú tepelné odpory vrstiev a MV (mK.W⁻¹)

Ak budeme hľadať maximálne \dot{q}_L pomocou derivácie odporov R_3 a R_4 , ktoré sa menia s priemerom d_3 dostaneme

$$\frac{d(R)}{d(d_3)} = 0 \quad \frac{\alpha_2 d_{kr}}{\lambda_i} = 2 = Bi$$

aby izolácia plnila svoju funkciu musí byť $d_k \leq d_2$ alebo $\lambda_i \leq \frac{\alpha_2 d_2}{2}$

1.3 Ekonomická hrúbka izolácie na plochej stene

Pri zatepľovaní plochých stien s nedostatočným tepelným odporom je možné nájsť optimálnu hrúbku δ priloženej izolácie z pohľadu hľadania minima nákladov na stratu tepla N_Q a investičných (kapitálových) nákladov N_i .

$$N_Q + N_i = N_c \quad (1.10)$$

$$\frac{d N_c}{d(\delta)} = 0$$

$$N_Q = q C_Q \tau$$

δ je hrúbka izolácie hľadaná (ekonomická)

q - hustota tepelného toku stenou (W/m^2)

C_Q - cena tepla (Sk/kWh)

τ - doba kúrenia počas roka (asi 4000 h)

q sa počíta zo vzťahov pre prechod tepla stenou

$$N_i = C_i a = (C_1 + B \delta_i) a \quad (1.11)$$

C_1 - základná cena $1 m^2$ izolácie udanej hrúbky výrobcom (Sk/m^2)

B - dodatková cena pre jednotkovú hrúbku aj s montážou $\left(\frac{Sk}{m^2 m}\right)$

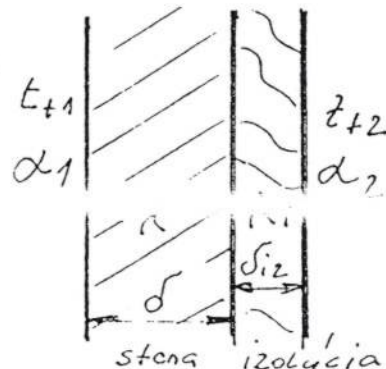
a - odpisová sadzba v % (1/rok)

Výpočtový vzťah bude

$$\delta_{eki} = \sqrt{\frac{(t_{t1} - t_{t2}) C_Q \tau \lambda_i}{B a}} - \lambda_i \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \right) \quad (m) \quad (1.12)$$

λ_i koef. tepelnej vodivosti izolácie (W/mk)

Pre označenie veličín je platný obrázok



1.4 Ekonomická hrúbka izolácie na valcovej stene

Princípy riešenia sú totožné s ekonomickou hrúbkou izolácií na plochej stene. Pretože v tomto prípade ide o izolovanie obyčajne kovových potrubí ktorých tepelný odpor je zanedbateľný a v nich prúdi tekutina s veľkým súčiniteľom prestupu tepla α_1 t.j. so zanedbateľným tepelným odporom je možné riadiacu rovnicu tepelnej straty prechodom tepla napr. zo state 1.2 zjednodušiť takto (pre 1 m rúrky):

$$\dot{q}_L = \frac{t_{t_1} - t_{t_2}}{\frac{1}{2\pi\lambda_i} \ln \frac{d_i}{d_2} + \frac{1}{\pi d_i \alpha_2}} \quad d_3 \equiv d_i \quad (1.13)$$

$N_Q = \dot{q}_L C_Q \tau$ - označenie je zhodné s plochou stenou

Pre náklady na izoláciu platí

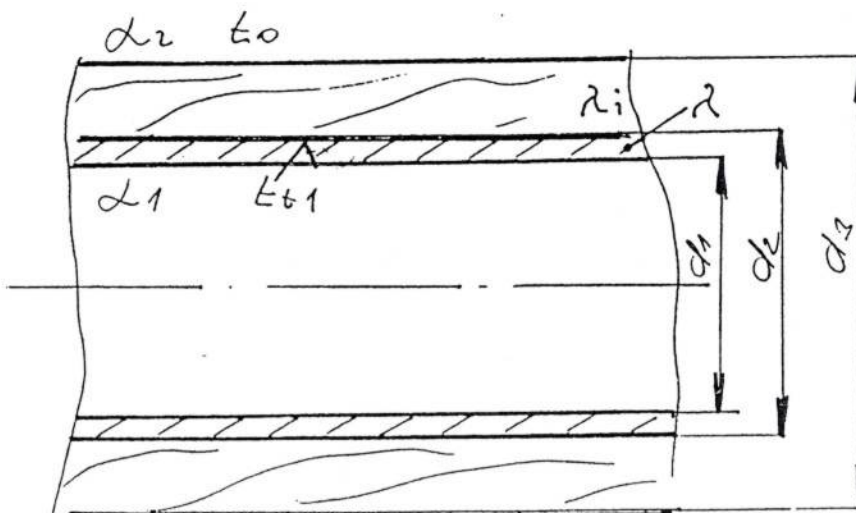
$$N_i = \left[C_1 + \pi d_i \left(\frac{d_i}{2} - \frac{d_2}{2} \right) B \right] a = A a + \frac{\pi d_i a B}{2} (d_i - d_2) \quad (1.14)$$

Výsledný vzťah pre EH vyjde v tvare transcendentnej rovnice $\frac{d(N_c)}{d(d_i)} = 0$

$$\sqrt{\frac{2d_{ie} - d_2}{d_{ie} - 2\frac{\lambda_i}{\alpha_2}} \left(\frac{d_{ie}}{2} \ln \frac{d_{ie}}{d_2} + \frac{\lambda_i}{\alpha_2} \right)} = \sqrt{\frac{\lambda_i C_Q \tau (t_{t_1} - t_{t_2})}{B a}} \quad (1.15)$$

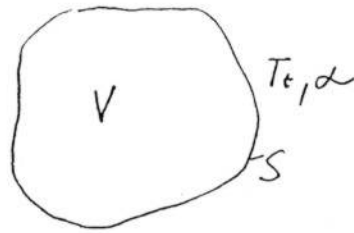
a, B, C_1 majú zhodné významy ako pri plochej stene.

Pre označenie veličín pozri nasledujúci obrázok.



2. JEDNODUCHÉ PRÍPADY NEUSTÁLENÉHO VEDENIA TEPLA PRECHOD Z JEDNÉHO ROVNOVÁŽNEHO STAVU DO DRUHÉHO

2.1 Prípad kedy tepelný odpor telesa je zanedbateľný proti odporu medznej vrstvy, cez ktorú sa uskutočňuje prestup tepla, t.j.



$Bi < 0,1$ čo znamená, že v telese bude teplota závislá len na čase a nie na mieste.

$$Bi = \frac{\alpha L}{\lambda}; \quad L = \frac{V}{S} \quad (m) \quad (2.1)$$

kde L je charakteristický rozmer telesa, ako pomer objemu k povrchu

α - súčiniteľ prestupu tepla konvekciou ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)

λ - koef. tepelnej vodivosti telesa ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)

V tomto prípade je možné vypočítať t -profil z rovnice

$$\Theta = e^{-\frac{\alpha S}{\rho V c_p} t} \quad (2.2)$$

$$\Theta = \frac{T - T_t}{T_o - T_t} \quad (2.3)$$

Θ je bezrozmerná teplota telesa

T_o - začiatočná teplota telesa (K)

T_t - teplota okolia telesa (K)

T - hľadaná teplota telesa v čase t od začiatku ohrevu (K)

ρ - hustota materiálu telesa ($kg \cdot m^{-3}$)

c_p - špec. tepelná kapacita telesa ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)

t - čas (s)

Výraz $\frac{\rho c_p V}{\alpha S} = \tau$ má rozmer času - je to časová konštanta telesa. Ak je τ veľké mení sa

teplota telesa pomaly a naopak.

Tepelný tok medzi telesom a okolím za časový interval t dostaneme z rovnice

$$Q = \int_0^t \dot{Q} dt = \int_0^t \left[\alpha S (T_o - T_t) e^{-\frac{t}{\tau}} \right] dt \quad (2.4)$$

$$Q = \rho c_p V (T_o - T_t) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (J) \quad (2.5)$$

2.2 Prípady kedy $Bi \gg 1$ a je možné použiť grafické riešenie úlohy symetrického chladnutia alebo ohrievania dosky

2.2.1 Nekonečná doska podľa obrázku 3.14 zo skrípt Kabát, E. „Termomechanika-Termokinetika“

$$Bi = \frac{\alpha b}{\lambda}; \quad \Theta = \frac{T - T_t}{T_o - T_t}; \quad X = \frac{x}{b}; \quad Fo = \frac{a \cdot t}{b^2} \quad (2.6)$$

Riešenie sa hľadá v grafoch uvedených v časti tabuliek

$$\Theta = f(X, Bi, Fo) \quad (2.7)$$

v miestach $X = 0$ t.j. v jadre steny
v miestach $X = 1$ t.j. na povrchu steny

2.2.2 Rovnako je možné riešiť aj úlohu symetrického ochladzovania valca pomocou grafov

V tomto prípade sú bezrozmerné výrazy vyjadrené takto

$$Bi = \frac{\alpha r_o}{\lambda}; \quad R = \frac{r}{r_o} \text{ bezrozmerná koordináta}; \quad Fo = \frac{at}{r_o^2} \quad (2.8)$$

Zasa sa hľadá v grafoch riešenie pre 2 polohy

$R = 0$ t.j. v osi valca
 $R = 1$ t.j. na povrchu valca

$$\Theta = f(R, Bi, Fo) \quad (2.9)$$

2.3 Vedenie tepla v telesách s vnútornými zdrojmi rovnomerne rozloženými

$$(\dot{q}_{o,v} [\text{W} \cdot \text{m}^{-3}])$$

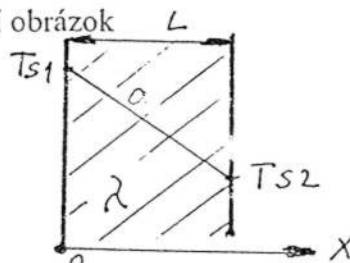
2.3.1 Plochá stena s okrajovými podmienkami 1 druhu, teda dané sú povrchové teploty

$$(T_{s_1}, T_{s_2}) \text{ a } \lambda = \text{konšt.}$$

Riešenie je v tvare

$$T = T_{s_1} - \frac{\dot{q}_{o,v}(x^2 - Lx)}{2\lambda} - (T_{s_1} - T_{s_2})\left(\frac{x}{L}\right) \quad (2.10)$$

Pre označenie veličín platí obrázok



prípady a značí riešenie bez zdrojov.

Ak $T_{s_1} = T_{s_2}$ je profil parabolický s teplotou maximálnou v strede. Hustotu tepelného toku vyrátame z Fourierovho zákona

$$\dot{q} = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad \text{resp. } x=0 \quad \text{resp. } x=L \quad (2.11)$$

$$\frac{dT}{dx} = \dot{q}_{ov} \frac{2x - L}{2\lambda} \quad (2.12)$$

2.3.2 Plný valec s okrajovými podmienkami 3 druhu t.j. daná je teplota okoli a α pri $\lambda = \text{konšt.}$

Riešenie je v tvare

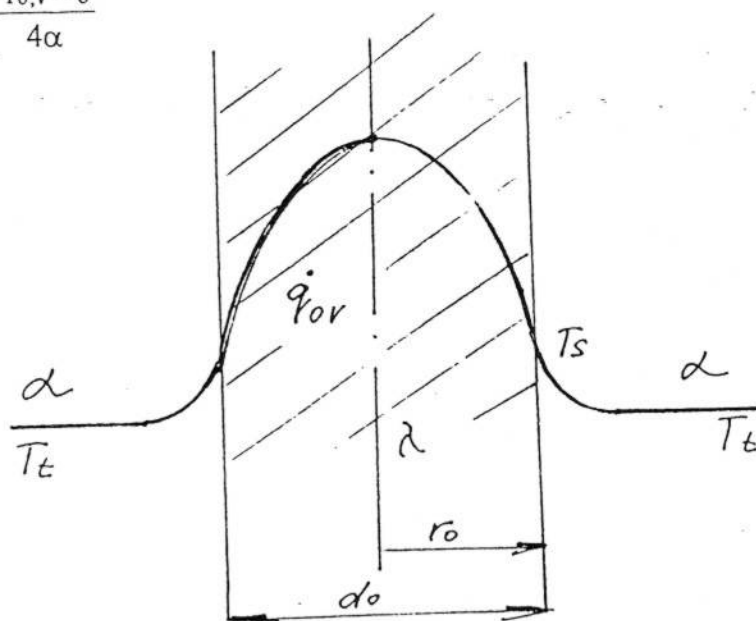
$$T = T_t + \frac{\dot{q}_{o,v}}{4} d_o \left\{ \frac{1}{\alpha} + \frac{d_o}{4\lambda} \left[1 - \left(\frac{r}{r_o} \right)^2 \right] \right\} \quad (2.13)$$

Označenia sú podľa obrázku

$\dot{q}_{o,v}$	(W.m ⁻³)
α	(W.m ⁻² .K ⁻¹)
λ	(W.m ⁻¹ .K ⁻¹)
T	(K) resp (°C)
r, d	(m)

Ak $r = r_o$ dostaneme teplotu na povrchu valca

$$T_s = T_t + \frac{\dot{q}_{o,v} d_o}{4\alpha} \quad (2.14)$$



3. PRESTUP TEPLA PRI VOĽNOM PRÚDENÍ – PRIRODZENÁ KONVEKCIA

Hustotu toku pri šírení sa tepla konvekciou, t. j. pri jeho prestupe z povrchu tuhej látky do prúdiaceho prostredia počítame z Newtonovho vzťahu

$$\dot{q} = \alpha (t_w - t_f) \quad (\text{W/m}^2) \quad (13-1)$$

Koeficient prestupu tepla α (W/(m².K)) nie je fyzikálnou vlastnosťou látky a určujeme ho z kritériálnych rovníc odvodených teóriou podobnosti alebo teóriou rozmerov. Celkový tepelný tok

$$\dot{Q} = \dot{q} \cdot S = \alpha \cdot S \cdot (t_w - t_f) \quad (\text{W}) \quad (13-2)$$

kde S (m²) je povrch telesa

13.1 Pretup tepla konvekciou do neobmedzeného priestoru

Pre výpočet koeficienta prestupu tepla používame kritériálnu rovnicu

$$Nu_m = C [Gr \cdot Pr]_m^n \quad (13-3)$$

kde

m je index, vzťahujúci sa na strednú teplotu medznej vrstvy

Nu - Nusseltovo kritérium, resp. číslo,

Gr - Grashofovo kritérium, resp. číslo,

Pr - Prandtlovo kritérium, resp. číslo,

C - konštanta, n je exponent a sú závislé od hodnôt súčinu $Gr \cdot Pr$ a pre ich určenie platí tabuľka (13-1).

Tabuľka 13-1

$Gr \cdot Pr$	C	n
$0 \div 1 \cdot 10^{-3}$	0,45	0,0
$1 \cdot 10^{-3} \div 5 \cdot 10^2$	1,18	0,125
$5 \cdot 10^2 \div 2 \cdot 10^7$	0,54	0,25
$2 \cdot 10^7 \div 10^{13}$	0,135	0,333

Ak ohrievaný povrch dosky je umiestnený smerom nahor, je koeficient α o 30 % vyšší ako vypočítaný podľa kritériálnej rovnice (13-3), ak povrch je umiestnený smerom nadol je koeficient α o 30 % nižší.

Základné kritéria tepelnej podobnosti pri voľnom prúdení (konvekcii):

- *Nusseltovo číslo* Nu - vyjadruje intenzitu tepelného toku medznou vrstvou

$$Nu = \frac{\alpha \cdot \ell}{\lambda} \quad (13-4)$$

kde α je koeficient prestupu tepla (W/(m².K))

ℓ - charakteristický (určujúci) dĺžkový rozmer, pričom pri rúrkách je $\ell = d$ a pri vertikálnych stenách je $\ell = H$. Na horizontálne uložených povrchoch je charakteristický rozmer kratšia stena povrchu dosky.

λ - tepelná vodivosť (W/(m.K)).

- *Prandtlovo číslo* Pr - vyjadruje pomer viskozity k teplotnej vodivosti, t. j. charakterizuje fyzikálne vlastnosti tekutín

$$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{\eta \cdot c_p}{\lambda} \quad (3-5)$$

kde ν je kinematická viskozita (m^2/s),
 a - koeficient teplotnej vodivosti (m^2/s),
 η - dynamická viskozita ($\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$),
 c_p - špecifická tepelná kapacita ($\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$).

- *Grashofovo číslo* Gr - charakterizuje pomer vztlakových a trecích síl a má rozhodujúci význam pri voľnej konvekcii

$$Gr = \frac{g \cdot \ell^3}{\nu^2} \cdot \beta_m \cdot \Delta t \quad (3-6)$$

kde g je gravitačné zrýchlenie,
 Δt - teplotný rozdiel, $\Delta t = (t_{st} - t_t)$ ($^{\circ}\text{C}$), t_{st} - teplota steny, t_t - teplota tekutiny

$$\beta_m = \frac{1}{T_m} \quad \text{- koeficient objemovej rozťažnosti (1/K),}$$

$$t_m \text{ - určujúca teplota (stredná teplota medznej vrstvy), } t_m = \frac{t_{st} + t_t}{2}.$$

Uvedené veličiny, vystupujúce v predchádzajúcich kritériách sú fyzikálne vlastnosti tekutín a sú udané v tabuľkách.

13.2 Prestup tepla konvekciou do obmedzeného priestoru

V prípade konvekcie do obmedzeného priestoru počítame hustotu tepelného toku z Fourierovho vzťahu

$$\dot{q} = \frac{\lambda_{ekv}}{\delta} (t_{st_1} - t_{st_2}) \quad (\text{W}/\text{m}^2) \quad (3-7)$$

kde $\lambda_{ekv} = \varepsilon_k \cdot \lambda$ je ekvivalentná tepelná vodivosť tekutiny v medzere,

ε_k - koeficient konvekcie, pričom $\varepsilon_k = 0,18 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,25}$. Tento vzťah platí pre rozsah $10^3 < (Gr \cdot Pr)_{st} < 10^{10}$.

Určujúca teplota je $t_{st} = \frac{(t_{st_1} + t_{st_2})}{2}$.

Určujúci (charakteristický) rozmer je šírka medzery δ .

4. PRESTUP TEPLA PRI VYNÚTENOM PRÚDENÍ TEKUTÍN V RÚRKACH

Hustotu tepelného toku počítame zo vzťahu

$$\dot{q} = \alpha (t_{st} - t_f) \quad (\text{W/m}^2) \quad (4-1)$$

Pre prestupy tepla v jednotlivých oblastiach prúdenia existuje veľa kritériálnych rovníc rôznych autorov pre rôzne tekutiny.

V týchto skriptách uvedieme univerzálne kritériálne rovnice platné pre plyny a kvapaliny v oblasti laminárneho a turbulentného prúdenia odvodené *Michejevom* a *Siederom-Tateom*.

14.1 Laminárne prúdenie v rúrke

Prúdenie je laminárne, ak platí, že $Re < 2300$. Potom pre prestup tepla platí *kritériálna rovnica podľa Michejeva*

$$Nu_t = 0,17 \cdot Re_t^{0,33} \cdot Pr_t^{0,43} \cdot Gr_t^{0,1} \cdot \left(\frac{Pr_t}{Pr_{st}} \right)^{0,25} \quad (4-2)$$

kde Pr_{st} je Prandtlovo kritérium (pri teplote steny),

Re - Reynoldsovo kritérium ; charakterizuje pomer zotrvačných a trecích síl a má rozhodujúci význam pri vynútenej konvekcii

$$\text{pričom } Re = \frac{c \cdot \ell}{\nu}, \quad (4-3)$$

ℓ - charakteristický rozmer, pričom v prípade rúrky či kanála s priemerom d je $\ell = d$, pri nekruhovom kanáloch $d = d_{ekv} = 4 A/O$

kde A je prierezová plocha kanála, O je omočený obvod kanála,

c - rýchlosť tekutiny v rúrke,

ostatné kritéria - pozri kapitolu 15.

Treba dodať, že rovnica (4-2) platí pre $\ell/d \geq 50$, ak $\ell/d < 50$ treba výsledok opraviť súčiniteľom ε_t podľa tab. 14-1.

Tabuľka 14-1. Opravný súčiniteľ na stabilizáciu prúdu

ℓ/d	1	2	5	10	15	20	30	40	50
ε_t	1,9	1,7	1,44	1,28	1,18	1,13	1,05	1,02	1

Určujúca teplota je stredná teplota tekutiny $t_t = 0,5 \cdot (t_{t1} + t_{t2})$

Pre laminárne prúdenie viskózných kvapalín (olejov) udáva *Sieder-Tate rovnica*

$$Nu_t = 1,86 \cdot \left[Re_t \cdot Pr_t \cdot \frac{d}{\ell} \right]^{1/3} \cdot \left(\frac{\eta_t}{\eta_{st}} \right)^{0,14} \quad (4-4)$$

14.2 Turbulentné prúdenie v rúrkach a kanáloch

Prúdenie je turbulentné, ak platí, že $Re \geq 10^4$. Prestup tepla pri turbulentnom prúdení tekutín v rúrkach môžeme počítať podľa *kritériálnej rovnice Michejevovej*

$$Nu_t = 0,021 \cdot Re_t^{0,8} \cdot Pr_t^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_t}{Pr_{st}} \right)^{0,25} \cdot \varepsilon_t \quad (4-5)$$

pričom : - rozsah platnosti tejto rovnice je $Re_t = 10^4 \div 5 \cdot 10^6$ a $Pr_t = 0,6 \div 2500$

- pre plyny platí $\left(\frac{Pr_t}{Pr_{st}} \right)^{0,25} \approx 1$,

- určujúca teplota je stredná teplota tekutiny $t_t = 0,5 \cdot (t_{t1} + t_{t2})$,

- určujúci rozmer je priemer alebo ekvivalentný priemer,

ε_t - je oprava na počiatočný úsek, pričom platí, že pre $\ell/d \geq 50$ je $\varepsilon_t = 1$, ak ℓ/d je menšie, treba hodnotu súčiniteľa ε_t určiť v závislosti od veľkosti pomeru ℓ/d a Re_t podľa tab. 14-2.

Tabuľka 14-2

Re_t	ℓ/d								
	1	2	5	10	15	20	30	40	50
10^4	1,65	1,50	1,34	1,23	1,17	1,13	1,07	1,03	
$2 \cdot 10^4$	1,51	1,40	1,27	1,18	1,13	1,10	1,05	1,02	1,0
$5 \cdot 10^4$	1,34	1,27	1,18	1,13	1,10	1,08	1,04	1,02	

5. PRESTUP TEPLA PRI OBTEKANÍ TELIES

Pri obtekaní telies prúdom tekutiny sa všeobecne dosahujú kritické hodnoty Reynoldsových čísel odlišne ako pri prúdení v potrubíach.

Pre *pozdlžne obtekanie rovinatej steny*, *pozdlžne obtekanie zväzku rúrok* ako aj *priečne obtekanie valca* (rúrky) a *priečne obtekanie zväzku rúrok* napr. vo výmenníkoch tepla majú kriteriálne rovnice najčastejšie tvar

$$Nu_t = C Re_t^m Pr_t^n \left(\frac{Pr_t}{Pr_s} \right)^{0,25} K \quad (5-1)$$

kde K je opravný súčiniteľ,

hodnoty C , m , n a ďalšie podmienky sú uvedené v tab. 5.1

Tabuľka 5-1

Obtekanie	Teleso	Hodnoty			Charakter. Rozmer L	Rozsah platnosti Re_t	Opravný súčiniteľ K
		C	m	n			
Pozdlžne	Rovinná stena	0,664	0,5	0,33	ℓ	$< 4,85 \cdot 10^5$	žiadny
		0,037	0,8	0,33	ℓ	$> 4,85 \cdot 10^5$	
	Zväzok rúrok	0,021	0,8	0,43	d_{ekv}	$> 10^4$	$\left(\frac{s_1 s_2}{d^2} \right)^{0,18}$
Priečne	Valec	0,59	0,47	0,38	d	$10 \leq Re_t \leq 10^3$	ε_φ - pozri tab. 15.2
		0,21	0,62	0,38	d	$10^3 \leq Re_t \leq 2 \cdot 10^5$	
	Zväzok rúr usporiadaných za sebou	0,23	0,65	0,33	d	$2 \cdot 10^2 \leq Re_t \leq 2 \cdot 10^5$	$K = \varepsilon_\varphi \varepsilon_s$
	Zväzok rúr striedavo usporiad.	0,41	0,6	0,33	d	$2 \cdot 10^2 \leq Re_t \leq 2 \cdot 10^5$	$K = \varepsilon_\varphi \varepsilon_s$

Poznámky k tabuľke 5-1:

- Poznámka 1

d_{ekv} je určujúci rozmer celého zväzku a vonkajšieho plášťa definovaný

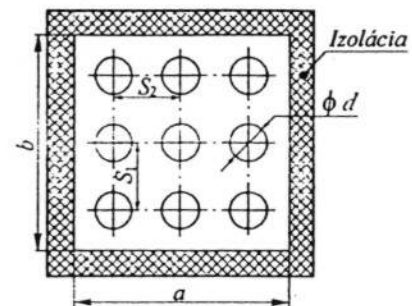
$$d_{ekv} = 4 \frac{A}{S} \ell \quad \text{resp.} \quad d_{ekv} = 4 \frac{A}{O} \quad (15-2, a, b)$$

A - prierezová plocha prúdiacej tekutiny v kanáli,

S - povrchová plocha prestupu tepla medzi tekutinou a zväzkom rúrok,

ℓ - dĺžka rúrok v smere prúdenia,

O - omočený obvod teplovýmennej plochy.



Obr. 5.1 Výmenník tepla vzduch-voda

- Poznámka 2 : s_1, s_2 sú rozostupy rúrok vo vodorovnom a zvislom smere zväzku.

- Poznámka 3 : Hodnoty opravného súčiniteľa pre uhol nábehu $\varphi < 90^\circ$ sú uvedené v tab. 5.2.

- Poznámka 4
Opravný súčiniteľ na rozostupy rúrok
vo zväzku

Tabuľka 5.2

φ	90	80	70	60	50	40	30	20	10
ε_φ	1	1	0,98	0,94	0,88	0,78	0,67	0,52	0,42

$$\varepsilon_s = \left(\frac{s_1}{s_2} \right)^{1/6} \quad \text{pre } \frac{s_1}{s_2} < 2 \quad ; \quad \varepsilon_s = 1,12 \quad \text{pre } \frac{s_1}{s_2} \geq 2 \quad (5-3, a, b)$$

- Poznámka 5
Pre zväzok rúrok prične obtekaných vypočítaný súčiniteľ prestupu tepla platí pre tretí rad rúrok a ďalší. Pre rúrky prvého a druhého radu je potrebná oprava podľa vzťahov

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \varepsilon_1 \alpha = 0,6 \alpha && \text{pre obe usporiadania} \\ \alpha_2 &= \varepsilon_2 \alpha && \text{kde } \varepsilon_2 = 0,9 \text{ pre usporiadanie za sebou (štvorcové)} \\ &&& \varepsilon_2 = 0,7 \text{ pre usporiadanie striedavé (šachovnicové)} \end{aligned}$$

Stredný súčiniteľ prestupu tepla celého zväzku:

$$\alpha = \frac{\alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \dots + \alpha_n S_n}{S_1 + S_2 + \dots + S_n} \quad (5-4)$$

kde $S_1 \dots S_n$ sú povrchové plochy jednotlivých radov rúrok,

$\alpha_1 \dots \alpha_n$ - stredné súčinitele prestupu tepla jednotlivých radov rúrok

Kritériálna rovnica platí pre ľubovoľnú tekutinu (kvapalinu, plyn).

$$\text{Pre plyn} \quad \left(\frac{Pr_t}{Pr_s} \right)^{0,25} \cong 1 \quad (5-5)$$

Určujúca teplota pri obtekaní telies je stredná teplota prúdiacej tekutiny, t. j.

$$t_t = 0,5 (t_{t_1} + t_{t_2}) \quad (5-6)$$

Pri pozdĺžnom obtekaní steny sa dosiahnu presnejšie hodnoty s určujúcou teplotou

$$t_m = 0,5 (t_s + t_t) \quad (5-7)$$

6. PRESTUP TEPLA PRI ZMENE SKUPENSTVA

6.1 Prestup tepla pri kondenzácii pár

Pre laminárne prúdenie (stekanie) kondenzátu pri blanovej kondenzácii sýtej pary na zvislej rúrke teoretické Nusseltovo riešenie pre hrúbku blany kondenzátu vo vzdialenosti x od horného okraja je:

$$\delta_x = \left(\frac{4 \lambda_k \eta_k \Delta t x}{\rho_k^2 g \ell_v} \right)^{1/4} \quad (6-1)$$

miestny súčiniteľ prestupu tepla

$$\alpha_x = \frac{\lambda_k}{\delta_x} \quad (6-2)$$

Pre stredný súčiniteľ prestupu tepla pri blanovej kondenzácii sýtej pary sa používa upravený vzťah

$$\alpha = K b \left(\frac{\ell_v}{\Delta t} \right)^{0,25} \frac{1}{L^{0,25}} \quad (6-3)$$

kde $b = \left(\frac{\rho_k^2 \lambda_k^3 g}{\eta_k} \right)^{0,25} \quad (6-4)$

$L = d$ resp. $h \Rightarrow$ podľa tab. 16.1
 $K \Rightarrow$ podľa typu rúrky z tab. 16.1

Tabuľka 16.1

Typ rúrky	K	L - charakt. rozmer
vodorovná	0,72	d - priemer rúrky
zvislá	1,15	h - výška rúrky

Pre fyzikálne vlastnosti kondenzátu je určujúca teplota $t_m = \frac{t_s + t_p''}{2}$ (6-5)

Pre výparné teplo je určujúca teplota t_p'' - teplota sýtej pary.

6.2 Prestup tepla pri vare tekutiny

Pre bublinkový var tekutiny vo veľkom objeme platí podľa literatúry [10] kriteriálna rovnica pre $Re \geq 10^{-2}$

$$Nu = 0,125 Re^{0,65} Pr^{1/3} \quad (6-6)$$

pre $Re \leq 10^{-2}$ platí: $Nu = 0,0625 Re^{0,5} Pr^{1/3}$ (6-7)

kde $Re = \frac{\dot{q} \ell}{\ell \rho^* v} \quad (6-8)$

$$Nu = \frac{\alpha \ell}{\lambda} \quad (6-9)$$

$$\ell = \frac{c_p \rho^* \sigma T_s}{(\ell_v \rho^*)^2} \quad (m) \quad (6-10)$$

Rovnice platia pre oblasť $0,86 \leq Pr \leq 7,6$; $10^{-5} \leq Re \leq 10^4$ a pre tlaky $0,0045 \leq p \leq 17,5$ MPa.

Fyzikálne parametre sa určujú na základe teploty sýtosti t_s (varu), σ je povrchové napätie kvapaliny, ℓ_v - výparné teplo, q - hustota tepelného toku, ostatné veličiny už poznáme.

Hodnoty ℓ a $[\ell/(\ell_v \cdot \rho'' \cdot \nu)]$ pre vodu v závislosti od teploty sýtosti sú uvedené v tab. P-7.

Pre kritické tepelné zaťaženie pri vare platí podľa [10]

$$Re_{kr} = 68 Ar^{4/9} Pr^{-1/3} \quad (6-11)$$

$$\text{kde } Ar = g \frac{\ell^3 \rho' - \rho''}{\nu^2 \rho'} \quad (6-12)$$

$$\text{pričom tiež platí } Re_{kr} = \frac{\dot{q}_{kr} \ell}{\ell_v \rho'' \nu} \quad (6-13)$$

Platnosť kritériálnej rovnice (6-11) je pre Prandtlovo kritérium $0,86 \leq Pr \leq 13,1$ a tlak $0,1 \leq p \leq 18,5$ MPa.

Pre oblasť bublinkového varu pri atmosférickom tlaku odvodil **Fritz** [18] nasledovné empirické vzťahy:

$$\alpha = 1,573 q^{0,75} \quad \text{alebo} \quad \alpha = 5,581 \Delta T^3 \quad (6-14) \text{ a } (6-15)$$

Pre oblasť varu v rozmedzí tlakov $p = (0,01 \text{ až } 15)$ MPa odvodil **Fritz** nasledovné empirické vzťahy:

$$\alpha = 0,646 q^{0,72} p^{0,24} \quad \text{alebo} \quad \alpha = 0,21 \Delta T^{2,57} p^{0,857} \quad (6-16) \text{ a } (6-17)$$

Do týchto vzťahov sa dosadzujú: q [W/m²], p [kPa], ΔT [K]

7. PRECHOD TEPLA CEZ JEDNODUCHÚ A ZLOŽENÚ DELIACU STENU A VO VÝMENNÍKOCH TEPLA

7.1 Prechod tepla cez deliacu stenu

Prechodom tepla cez deliacu stenu sa nazýva prenos energie z teplejšej prúdiacej tekutiny do chladnejšej cez deliacu stenu. Je to kombinácia prestupu tepla prúdením a vedením. Tepelný tok prechodom tepla je

$$\dot{Q} = k S (t_{t_1} - t_{t_2}) \quad (\text{W}) \quad (7-1)$$

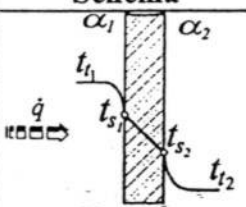
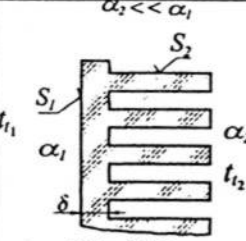
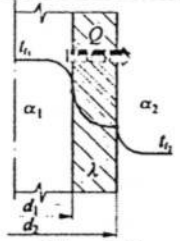
kde k - je súčiniteľ prechodu tepla, $k = f(\alpha_1, \lambda_i, \delta_i, \alpha_2)$ - [W/(m².K)]

S - plocha deliacej steny

t_{t_1}, t_{t_2} - teploty médií na obidvoch stranách deliacej steny

Súčinitele prechodu tepla pre jednotlivé deliace steny sú uvedené v tab. 7.1

Tabuľka 7.1

Stena	Schéma	Jednoduchá	Zložená z n vrstiev
Rovinná	 <p>Obr. 7.1</p>	$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (7-2)$	$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (7-3)$
		jednotka k je [W/(m ² .K)] $\dot{Q} = k S (t_{t_1} - t_{t_2}) \quad (\text{W}) \quad (7-4)$	
Rovinná z jednej strany orebrovaná $\psi = \frac{S_1}{S_2}$	 <p>Obr. 7.2</p>	$k_1 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{\psi}{\alpha_2}} \quad (7-5)$	$k_1 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{\psi}{\alpha_2}} \quad (7-6)$
		jednotka k_1 je [W/(m ² .K)] $\dot{Q} = k_1 S_1 (t_{t_1} - t_{t_2}) \quad (\text{W}) \quad (7-7)$	
Valcová $d_{n+1} > d_1$	 <p>Obr. 7.3</p>	$k_l = \frac{1}{\frac{1}{\pi} \left(\frac{1}{d_1 \alpha_1} + \frac{1}{2 \lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{d_2 \alpha_2} \right)} \quad (7-8)$	$k_l = \frac{1}{\frac{1}{\pi} \left(\frac{1}{d_1 \alpha_1} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} \right) + \frac{1}{d_{n+1} \alpha_2} \right)} \quad (7-9)$
		jednotka k_l je [W/(m.K)] $\dot{Q} = k_l \ell (t_{t_1} - t_{t_2}) \quad (\text{W}) \quad (7-10)$	

7.2 Ekonomická hrúbka tepelnej izolácie na rovinatej stene

Pri veľkých tepelných stratách sú veľké i finančné náklady na vykurovanie. Únik tepla sa zabraňuje tepelnými izoláciami. Hrúbku vrstvy izolačného materiálu volíme tak, aby celkové ročné náklady na vykurovanie boli minimálne. Celkové finančné náklady na

vykurovanie N_{cel} pozostávajú z finančných nákladov prevádzkových, únik tepla cez steny budovy N_Q a z finančných nákladov na investície N_i (nákup a urobienie izolácie) – obr. 7.4.

$$N_{cel} = N_Q + N_i = \dot{q} c_Q \tau + (C_1 + B_{1m} \delta_i) a \quad [(\text{Sk}/\text{m}^2)/\text{rok}] \quad (7-11)$$

kde \dot{q} je hustota tepelného toku cez zloženú stenu s n vrstvami ($\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{m})$)

c_Q - cena tepla (Sk/kWh)

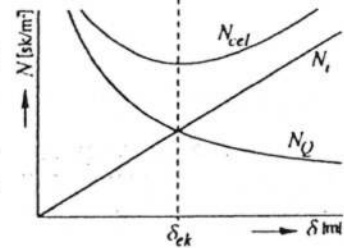
τ - počet prevádzkových hodín za vykurovaciu sezónu (h)

B_{1m} - cena izolácie hrúbky 1 m za 1 m^2 plochy ($\text{Sk}/\text{m}^2 \cdot \text{m}$)

a - amortizácia - odpisová ročná sadzba

δ_i - hrúbka izolácie (m)

C_1 - pevná cena za práce spojené s izoláciou (Sk/m^2)



Obr. 7.4 Závislosť finančných nákladov od hrúbky izolácie

Minimalizáciou nákladov ($dN_{cel}/d\delta_i = 0$) pre ekonomickú hrúbku izolácie platí vzťah

$$\delta_i = \sqrt{\frac{(t_{i_1} - t_{i_2}) C_Q \tau \lambda_i}{B_{1m} a}} - \lambda_i \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \sum_{k=1}^n \frac{\delta_k}{\lambda_k} \right) \quad (7-12)$$

Do vzorca sa dosadzujú λ_i [$\text{kW}/(\text{m} \cdot \text{K})$]; α_1, α_2 [$\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$]

7.3 Prechod tepla vo výmenníkoch tepla

Tepelný tok prechodom tepla cez deliacu stenu výmenníka tepla

$$\dot{Q} = k S \Delta t_{str} \quad (7-13)$$

Vo väčšine prípadov treba určiť pre daný tepelný tok teplovýmennú plochu výmenníka tepla. Podľa typu výmenníka (doskový, rúrkový) vypočítame súčiniteľ prechodu tepla (pozri tab. 7.1) k [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$] resp. k_f .

Stredný rozdiel teplôt Δt_{str} určujeme nasledovne:

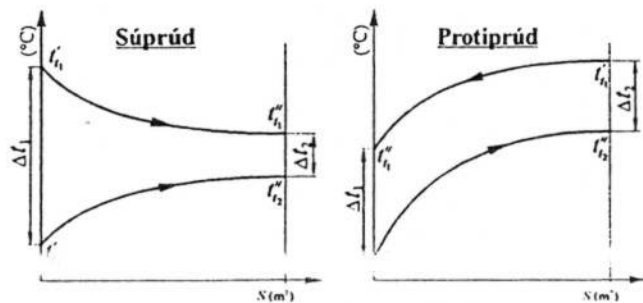
1. Ak teplota médií sa na obidvoch stranách stien nemení $\Delta t_{str} = t_{i_1} - t_{i_2}$ (7-14)

2. Ak teplota médií sa na obidvoch stranách stien mení relatívne málo, t. j. ak platí, že $0,5 < (\Delta t_1 / \Delta t_2) < 2$ môžeme Δt_{str} určiť ako aritmetický stredný rozdiel (tým sa dopustíme chyby $< 4\%$)

$$\Delta t_{str,ar} = \frac{\Delta t_1 + \Delta t_2}{2} = \frac{(t'_{i_1} - t'_{i_2}) + (t''_{i_1} - t''_{i_2})}{2} = \frac{t'_{i_1} + t''_{i_1}}{2} - \frac{t'_{i_2} + t''_{i_2}}{2} \quad (7-15)$$

3. Ak sa teplota médií v smere výmennej plochy mení viac, t. j. ak platí, že $0,5 > (\Delta t_1 / \Delta t_2) > 2$, určíme Δt_{str} ako stredný logaritmický rozdiel (platí pre súprúd a protiprúd – obr. 7.5)

$$\Delta t_{str,ln} = t_{in} - t_{out} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2} \right)} \quad (7-16)$$



Obr. 7.5 Priebeh teplôt v súprúdovom a protiprúdovom výmenníku tepla

Tieto vzťahy môžeme použiť pre

súprúdové a protiprúdové výmenníky tepla – obr 7.5. Pre krížový prúd sa Δt_{str} vypočítané

8. PRENOS TEPLA ŽIARENÍM

Žiarivý tok ϕ (\dot{Q}) je tepelný výkon prenášaný elektromagnetickým žiarením pri všetkých vlnových dĺžkach

$$\phi = \dot{Q} = \frac{dQ}{d\tau} \quad \left(\frac{J}{s} = W \right) \quad (8-1)$$

Žiara (plošná hustota žiarivosti) L je podiel žiarivého toku ktorý vychádza, dopadá alebo prechádza nekonečne malou plochou s nekonečne malým priestorovým uhlom (obr. 18.1)

$$L = \frac{d^2\phi}{d\Omega dS \cos\Theta} \quad \left(\frac{W}{sr \cdot m^2} \right) \quad (18-2)$$

Spektrálna hustota intenzity vyžarovania dokonale čierneho telesa je časť intenzity vyžarovania pripadajúca na určitú vlnovú dĺžku – **Plankov zákon**.

$$M_{\lambda_0} = \frac{dM_0}{d\lambda} = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1} \quad (W/m^3) \quad (8-3)$$

Intenzita vyžarovania dokonale čierneho telesa je žiarivý tok vyžarovaný jednotkou plochy žiariča vo všetkých vlnových dĺžkach (**Stefanov-Boltzmanov zákon**)

$$M_0 = \int_{\lambda=0}^{\infty} M_{\lambda_0} d\lambda = \sigma_0 T^4 = C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4 \quad (W/m^2) \quad (8-4)$$

Lambertov kosínový zákon

$$L_{\Theta} = L_n \cos\Theta; \text{ kde } L_n \equiv M_{0,n} = \frac{M_0}{\pi} \quad (W/(m^2 \cdot sr)) \quad (8-5)$$

L_n - žiarivý tok v smere normály

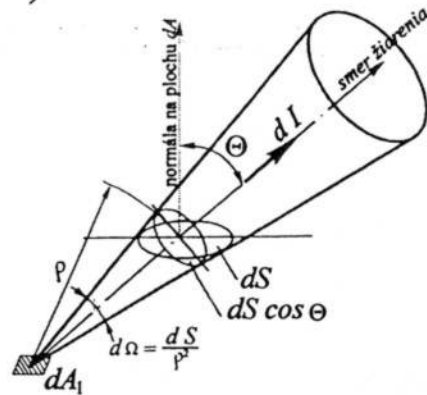
Emisivita sivého telesa

$$\varepsilon = \frac{M}{M_0} = \frac{\sigma}{\sigma_0} = \frac{C}{C_0} < 1 \quad (8-6)$$

Pre nepriepustné sivé telesá ($\alpha + \rho = 1$) v stave termodynamической rovnováhy sa emisivita sivého telesa rovná jeho pohltivosti

$$\varepsilon = \alpha \quad (8-7)$$

Poznámka: $c_1 = 3,741 \cdot 10^{-16}$ ($W \cdot m^2$) - prvá konštanta Planckovho zákona,
 $c_2 = 1,4385 \cdot 10^{-2}$ (m.K) - druhá konštanta Planckovho zákona,
 $\sigma_0 = 5,77 \cdot 10^{-8}$ ($W/(m^2 \cdot K^4)$) - súčiniteľ vyžarovania absolútne čierneho telesa,
 $C_0 = 10^8 \cdot \sigma_0 = 5,77$ ($W/(m^2 \cdot K^4)$) - súčiniteľ vyžarovania absolútne čierneho telesa.



Obr. 8.1 Grafické znázornenie žiary

Intenzita ožiarenia E_d je podiel žiarivého toku dopadajúci na teleso plochy S

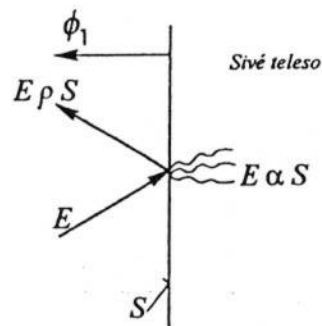
$$E_d = \frac{d\phi_d}{dS} \quad (\text{W/m}^2) \quad (8-8)$$

Sivé teleso $\alpha + \rho = 1$

$\phi_l = M_l S$ – vlastný žiarivý tok,

$E \rho S$ – odrazený žiarivý tok z dopadajúceho žiarenia,

$E \alpha S$ – pohltенý žiarivý tok plochou S sivého telesa.



Obr. 18.2 Žiarivý tok sivého telesa

Efektívny žiarivý tok sivého telesa

$$\phi_{ef} = \phi_l + E \rho S = \varepsilon \sigma_0 T^4 S + E \alpha S \left(\frac{1}{\alpha} - 1 \right) \quad (8-9)$$

Výsledný žiarivý tok sivého telesa

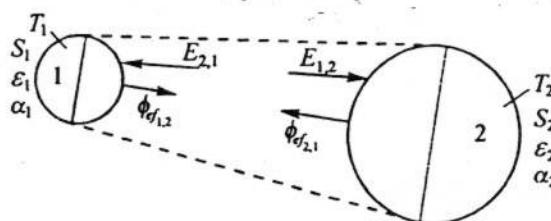
$$\phi_{vysl} = \phi_l - E \alpha S = \varepsilon \sigma_0 T^4 S - E \alpha S \quad (8-10)$$

Prenos žiarivej energie medzi dvoma ľubovoľnými telesami

Pre výsledný tok žiarivej energie prenášanej medzi dvoma ľubovoľnými telesami (obr. 8.3) platí

$$\phi_{vysl} = \dot{Q}_{1,2} = \phi_{ef_1} - \phi_{ef_2} = \varphi_{12} S_1 \frac{\sigma_0 (T_1^4 - T_2^4)}{1 + \left(\frac{1}{\alpha_1} - 1 \right) \varphi_{12} + \left(\frac{1}{\alpha_2} - 1 \right) \varphi_{21}} \quad (8-11)$$

kde $\varphi_{1,2} = E_{1,2} S_2 / \phi_{ef_1}$ je súčiniteľ ožiarenia, vyjadruje časť efektívneho toku žiarenia z telesa 1 s povrchom S_1 , ktorý dopadne na teleso 2 s povrchom S_2 .



Obr. 8.3 Prenos žiarivej energie medzi dvoma ľubovoľnými telesami

V prípade termodynamickej rovnováhy medzi telesami platí

$$\varphi_{12} S_1 = \varphi_{21} S_2 \quad (8-12)$$

Prenos energie žiarením medzi dvoma rovnobežnými stenami

Pre rovnobežné steny približne platí $\varphi_{12} = \varphi_{21} = 1$; $\alpha = \varepsilon$

$$\phi_{vysl} = \dot{Q}_{12} = S_1 \frac{\sigma_0 (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} = S_1 \frac{\sigma_0 (T_1^4 - T_2^4)}{\left(\frac{1}{\varepsilon_1} - \frac{1}{2} \right) + \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - \frac{1}{2} \right)} \quad (8-13)$$

kde $\left(\frac{1}{\varepsilon} - \frac{1}{2} \right) = R$ – tepelný odpor plochy telesa proti žiareniu

Zníženie hustoty žiarivého toku radiačnými štítlami

Pri použití n radiačných štítov vložených medzi dve paralelné steny sa zvýši tepelný odpor o $n \times 2$ nové povrchy. Ak $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon$, výsledný tok žiarením bude

$$\phi_{vysl} = \dot{Q}_{12} = \frac{S_1 \sigma_0 (T_1^4 - T_2^4)}{\left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 0,5\right) + \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 0,5\right) + 2n \left(\frac{1}{\varepsilon_1} - \frac{1}{2}\right)} \quad (8-14)$$

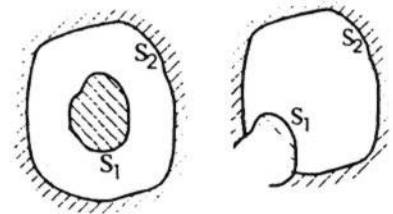
Prenos energie žiarením medzi dvoma telesami, ktorých plochy tvoria uzavretý systém

Ak teleso 1 je uzavreté plochou telesa 2 ($S_1 < S_2$), $\varphi_{12} = 1$ a výsledný žiarivý tok je

$$\phi_{vysl} = \dot{Q}_{12} = S_1 \frac{\sigma_0 (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{S_1}{S_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)} = \varepsilon_{12} S_1 \sigma (T_1^4 - T_1^4) \quad (8-15)$$

$$\text{kde } \varepsilon_{12} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{S_1}{S_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)}$$

(8-16)



Obr. 8.4 Prenos energie žiarením v uzavretom systéme

Koeficient tepelnej vodivosti a špeciálnej tepelnej vodivosti

Materiál	t [°C]	ρ [kg/m ³]	λ [W/m.K]	c [kJ/kg.K]
Azbestové dosky	30	770	0,115	0,816
Azbestové vlákna	50	470	0,11	0,816
Asfalt	20	2 110	0,69	0,158
Betón	20	2 300	1,28	1,134
Drevo: balza	30	128	0,052	1,758
dub na vlákna	20	800	0,207	2,390
dub = s vláknami	20	800	0,362	2,390
Guma	0	1 200	0,163	1,381
Korková doska	30	190	0,042	1,884
Kotolný kameň	100	300 ÷ 2 700	0,08 ÷ 2,3	-
Krieda	50	2 000	0,93	0,879
Koža podrážková	30	1 000	0,159	-
Ľad	0	920	2,250	2,261
Linoleum	20	1 180	0,186	-
Mramor	90	2 700	1,302	0,419
Porcelán	95	2 400	1,035	1,088
Pôda suchá	-	1 500	0,138	-
Pôda vlhká	-	1 700	0,657	2,009
Sklo obyčajné	20	2 500	0,744	0,669
Sneh	-	560	0,465	2,093
Tehla pálená červená	0	1 700	0,700	0,88
Uhlie kamenné	20	1 400	0,186	1,306
Hliník	0	2 710	204	0,871
Meď čistá	20	8 930	395	0,386
Mosadz	20	8 600	81 ÷ 116	0,380
Oceľ (18 % Cr, 8 % Ni)	20	7 900	14,5	0,477
Železo kujné	0	7 850	59	0,465

Tabuľka 13

Fyzikálne parametre suchého vzduchu pri tlaku 0,10133 Mpa

t [°C]	ρ [$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$]	c_p [$\frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$]	$\lambda \cdot 10^2$ [$\frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$]	$a \cdot 10^6$ [$\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$]	$\eta \cdot 10^5$ [$\frac{\text{N}\cdot\text{s}}{\text{m}^2}$]	$\nu \cdot 10^6$ [$\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$]	Pr
-50	1,584	1,013	2,033	12,7	1,461	9,23	0,728
-40	1,515	1,013	2,14	13,8	1,520	10,04	0,728
-30	1,453	1,013	2,196	14,9	1,569	10,80	0,723
-20	1,395	1,009	2,277	16,2	1,618	12,79	0,716
-10	1,342	1,009	2,359	17,4	1,667	12,43	0,712
0	1,293	1,004	2,440	18,8	1,716	13,28	0,707
10	1,247	1,004	2,509	20,0	1,765	14,16	0,705
20	1,205	1,004	2,591	21,4	1,815	15,06	0,703
30	1,165	1,004	2,672	22,9	1,864	16,00	0,701
40	1,128	1,004	2,753	24,3	1,913	16,96	0,699
50	1,093	1,004	2,823	25,7	1,962	17,95	0,698
60	1,060	1,004	2,893	27,2	2,011	18,97	0,696
70	1,029	1,009	2,963	28,6	2,060	20,02	0,694
80	1,000	1,009	3,044	30,2	2,109	21,09	0,692
90	0,972	1,009	3,125	31,9	2,148	22,10	0,690
100	0,946	1,009	3,207	33,6	2,187	23,13	0,688
120	0,898	1,009	3,335	36,8	2,285	25,45	0,686
140	0,854	1,013	3,486	40,3	2,374	27,80	0,684
160	0,815	1,017	3,637	43,9	2,452	30,09	0,682
180	0,779	1,021	3,776	47,5	2,530	32,49	0,681
200	0,746	1,025	3,927	51,4	2,599	34,85	0,680
250	0,674	1,038	3,264	61,0	2,737	40,61	0,677
300	0,615	1,046	4,601	71,6	2,972	48,33	0,674
350	0,566	1,059	4,903	81,9	3,139	55,46	0,676
400	0,524	1,067	5,205	93,1	3,306	63,09	0,678
500	0,456	1,092	5,400	115,3	3,619	80,04	0,687
600	0,404	1,113	6,217	138,3	3,914	96,89	0,699
700	0,362	1,134	6,704	163,4	4,179	115,4	0,706
800	0,329	1,155	7,169	188,8	4,434	134,8	0,713
900	0,301	1,172	7,622	216,2	4,669	155,1	0,717
1000	0,277	1,187	8,061	245,9	4,905	177,1	0,722

Príklad odčítania: λ pri $t = 20 \text{ °C} \Rightarrow \lambda = 2,591 \cdot 10^{-2} \text{ (W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}\text{)}$

Fyzikálne parametre vody na dolnej medznej krivke

t [°C]	p [MPa]	ρ [$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$]	c_p [$\frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$]	$\lambda \cdot 10^2$ [$\frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$]	$a \cdot 10^8$ [$\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$]	$\eta \cdot 10^5$ [$\frac{\text{N}\cdot\text{s}}{\text{m}^2}$] [kg/ms]	$\nu \cdot 10^6$ [$\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$]	$\beta \cdot 10^4$ [$\frac{1}{\text{K}}$]	Pr
0	0,1013	999,9	4,212	55,07	13,1	178,83	1,789	-0,63	13,67
10	0,1013	999,7	4,191	57,40	13,7	130,57	1,306	0,70	9,52
20	0,1013	998,2	4,183	59,84	14,3	100,45	1,006	1,82	7,02
30	0,1013	995,7	4,174	61,70	14,9	80,15	0,805	3,21	5,42
40	0,1013	999,2	4,174	63,32	15,3	65,33	0,659	3,87	4,31
50	0,1013	998,1	4,174	64,72	15,7	54,94	0,556	4,49	3,54
60	0,1013	983,2	4,178	65,88	16,0	46,98	0,478	5,11	2,98
70	0,1013	977,8	4,187	66,70	16,3	40,61	0,415	5,70	2,55
80	0,1013	971,8	4,1952	67,39	16,6	35,51	0,365	6,32	2,21
90	0,1013	965,3	4,208	67,97	16,8	31,49	0,326	6,95	1,95
100	0,1013	958,4	4,220	68,20	16,9	28,25	0,295	7,52	1,75
110	0,143	951,0	4,233	68,44	17,0	25,89	0,268	8,00	1,58
120	0,198	943,1	4,250	68,56	17,1	23,74	0,252	8,64	1,47
130	0,270	934,8	4,266	68,56	17,2	21,77	0,233	9,19	1,36
140	0,361	926,1	4,287	68,44	17,2	20,11	0,217	9,72	1,26
150	0,476	917,0	4,312	68,32	17,3	18,64	0,203	10,3	1,17
160	0,618	907,4	4,346	68,20	17,3	17,36	0,191	10,7	1,10
170	0,792	897,3	4,379	67,86	17,3	16,28	0,181	11,3	1,05
180	1,003	886,9	4,417	67,39	17,2	15,30	0,173	11,9	1,00
190	1,255	876,0	4,459	66,93	17,1	14,42	0,165	12,6	0,96
200	1,555	863,0	4,505	66,23	17,0	13,63	0,158	13,3	0,93
210	1,908	852,8	4,555	65,42	16,9	13,04	0,153	14,1	0,91
220	2,320	840,3	4,614	64,49	16,6	12,46	0,148	14,8	0,89
230	2,798	827,3	4,681	63,67	16,4	11,96	0,145	15,9	0,88
240	3,348	813,6	4,756	62,75	16,2	11,48	0,141	16,8	0,87
250	3,978	799,0	4,844	61,70	15,9	10,98	0,137	18,1	0,86
260	4,694	784,0	4,949	60,42	15,6	10,59	0,135	19,7	0,87
270	5,505	768,0	5,070	58,91	15,1	10,20	0,133	21,6	0,88
280	6,419	750,7	5,229	57,40	14,6	9,81	0,131	23,7	0,90
290	7,445	732,3	5,485	55,75	13,9	9,41	0,129	26,2	0,93
300	8,592	712,5	5,736	53,91	13,2	9,12	0,128	29,2	0,97
310	9,870	691,1	6,071	52,29	12,5	8,83	0,128	32,9	1,03
320	11,290	667,1	6,573	50,54	11,5	8,53	0,128	38,2	1,11
330	12,865	640,2	7,243	48,34	10,4	8,14	0,127	43,2	1,22
340	14,608	610,1	8,164	45,66	9,17	7,75	0,127	53,4	1,39
350	16,537	574,4	9,504	42,99	7,88	7,26	0,126	66,8	1,60
360	18,674	528,0	13,984	39,51	5,36	6,67	0,126	109,0	2,55
370	21,053	450,5	40,320	33,7	1,86	5,69	0,126	264,0	6,79

Tabuľka 15

Fyzikálne vlastnosti transformátorového oleja

t	ρ	c_p	λ	$\eta \cdot 10^4$	$\nu \cdot 10^6$	$a \cdot 10^8$	$\beta \cdot 10^4$	Pr
°C	kg/m ³	kJ/kg.K	W/m.K	Ns/m ²	m ² /s	m ² /s	1/K	-
0	892,5	1,549	0,1123	629,8	70,5	8,14	6,80	866
10	886,4	1,620	0,1115	335,5	37,9	7,83	6,85	484
20	880,3	1,666	0,1106	198,2	22,5	7,56	6,90	298
30	874,2	1,729	0,1098	128,5	14,7	7,28	6,95	202
40	868,2	1,788	0,1090	89,4	10,3	7,03	7,00	146
50	862,1	1,846	0,1082	65,3	7,58	6,80	7,05	111
60	856,0	1,905	0,1072	49,5	5,78	6,58	7,10	87,8
70	850,0	1,964	0,1064	38,6	4,54	6,36	7,15	71,3
80	843,9	2,026	0,1056	30,8	3,66	6,17	7,20	59,3
90	837,8	2,085	0,1047	25,4	3,03	6,00	7,25	50,5
100	831,8	2,144	0,1038	21,3	2,56	5,83	7,30	43,9
110	825,7	2,202	0,1030	18,1	2,20	5,67	7,35	38,8
120	819,6	2,261	0,1022	15,7	1,92	5,50	7,40	34,9

Tabuľka 16

Fyzikálne vlastnosti dymových plynov

(p = 0,10133 MPa; $x_{CO_2} = 0,13$; $x_{H_2O} = 0,11$; $x_{N_2} = 0,76$)

t	ρ	c_p	$\lambda \cdot 10^2$	$a \cdot 10^6$	$\eta \cdot 10^6$	$\nu \cdot 10^6$	Pr
°C	kg/m ³	kJ/kg.K	W/m.K	m ² /s	N.s/m ²	m ² /s	-
0	1,295	1,042	2,28	16,9	15,8	12,20	0,72
100	0,950	1,068	3,13	30,8	20,4	21,54	0,69
200	0,748	1,097	4,01	48,9	24,5	32,80	0,67
300	0,617	1,122	4,84	69,9	28,2	45,81	0,65
400	0,525	1,151	5,70	94,3	31,7	60,38	0,64
500	0,457	1,185	6,56	121,1	34,8	76,30	0,63
600	0,405	1,214	7,42	150,9	37,9	93,61	0,62
700	0,363	1,239	8,27	183,8	40,7	112,1	0,61
800	0,330	1,264	9,15	219,7	43,4	131,8	0,60
900	0,301	1,290	10,00	258,0	45,9	152,5	0,59
1000	0,275	1,306	10,90	303,4	48,4	174,3	0,58
1100	0,257	1,323	11,75	345,5	50,7	197,1	0,57
1200	0,240	1,340	12,62	392,4	53,0	221,0	0,56

Normálna pomeraná emisivita niektorých materiálov

Materiál	t [°C]	ϵ
Hliník leštený	225÷575	0,039÷0,075
Hliník neleštený	26,0	0,055
Železo leštené	425÷1020	0,144÷0,377
Železo čerstvo opracované šmirglovým papierom	20,0	0,242
Železo oxidované	100,0	0,736
Železo oxidované hladké	125÷525	0,780÷0,820
Železo liate neopracované	925÷1115	0,870÷0,950
Oceľové odliatky leštené	770÷1040	0,520÷0,560
Oceľový plech brúsený	940÷1100	0,550÷0,610
Oceľový plech s lesklou vrstvou kysličníka	25,0	0,820
Liatina brúsená	830÷990	0,600÷0,700
Kysličník železa	500÷1200	0,850÷0,950
Valcovaný mosadzný plech	22,0	0,060
Valcovaný mosadzný plech hrubo opracovaný	22,0	0,200
Mosadzný plech matný	50÷350	0,220
Meď elektrolytická vysokoleštená	80÷115	0,018÷0,023
Meď opracovaná ale bez zrkadlového lesku	22,0	0,072
Kysličník medi	800÷1100	0,660÷0,540
Nikel technický čistý leštený	225÷375	0,070÷0,087
Niklová oceľ leptaná neleštená	20,0	0,110
Nikel oxidovaný pri 600 °C	200÷600	0,370÷0,480
Kysličník niklu	650÷1255	0,590÷0,860
Cín a pocínovaný leštený plech	25,0	0,043÷0,064
Platina čistá, leštená	225÷625	0,0544÷0,104
Platnový pás	925÷1115	0,120÷0,170
Ortuť veľmi čistá	0÷100	0,090÷0,120
Olovo čierne oxidované	25÷50	0,281
Olovo oxidované pri 200 °C	200,0	0,630
Striebro čisté leštené	225÷625	0,0198÷0,0324
Chróm	100÷1000	0,080÷0,260
Zinok obchodnej akosti, leštený	225÷325	0,045÷0,053
Pozinkovaný oceľový plech, leštený	28,0	0,228
Pozinkovaný oceľový plech, oxidovaný	24,0	0,276
Azbestová lepenka	24,0	0,960
Papier tenký, nalepený na plech	19,0	0,924
Voda	0÷100	0,950÷0,963
Sadra	20,0	0,903
Dub ohobľovaný	20,0	0,895
Kremík plavený drsný	20,0	0,932
Pálené tehly bez veľkých nerovností	20,0	0,930

Pomocné hodnoty komplexov pre výpočet koeficientu
prestupu tepla pri varení vody

t_s °C	$l^* \cdot 10^6$ m	$\frac{l^*}{l_v \rho'' v} 10^6$ m ² /W	$\frac{\lambda}{l_v \rho'' v} 10^2$ 1/K	t_s °C	$l^* \cdot 10^6$ m	$\frac{l^*}{l_v \rho'' v} 10^6$ m ² /W	$\frac{\lambda}{l_v \rho'' v} 10^2$ 1/K
30	16 450	276 870	1 040	220	0,296	0,123	27,5
40	5 950	73 345	782	210	0,200	0,0718	23,5
50	2 305	20 894	587	220	0,136	0,0426	20,2
60	960	6 543	450	230	0,0938	0,0254	17,3
70	423	2 201	347	240	0,0646	0,0165	15,1
80	197	798	273	250	0,0451	0,00989	13,6
90	96,0	304	216	260	0,0318	0,00593	11,4
100	48,7	122,4	172	270	0,0224	0,00373	9,80
110	25,9	51,8	138	280	0,0158	0,00243	8,80
120	14,2	22,8	110	290	0,0114	0,00153	7,47
130	8,05	10,7	96,0	300	0,00800	0,000911	6,16
140	4,70	5,13	75,0	310	0,00565	0,000609	5,64
150	2,82	2,58	60,5	320	0,00398	0,000388	4,93
160	1,73	1,33	52,6	330	0,00278	0,000249	4,34
170	1,08	0,710	44,5	340	0,00192	0,000158	3,77
180	0,715	0,396	37,5	350	0,00126	0,0000989	3,36
190	0,450	0,216	32,2				

θ teplota
p tlak
ρ hustota

c_p špecifická tepelná kapacita
 β objemová rozťažnosť

λ tepelná vodivosť
 η dynamická viskozita
 ν kinematická viskozita

a teplotná vodivosť
Pr Pr číslo
 σ povrchové napätie

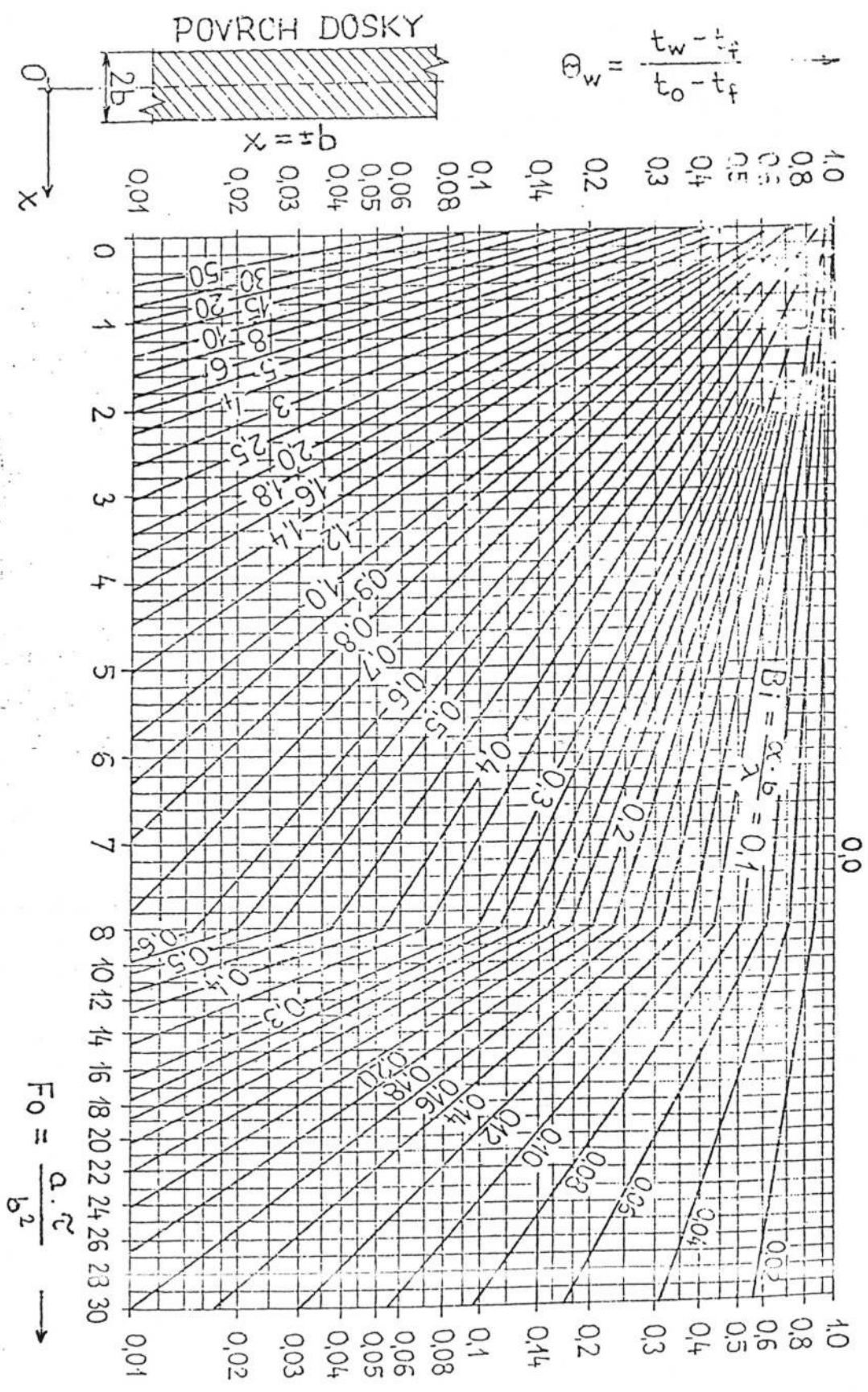
l_v výparné teplo
g 9,80665 m/s²

ρ_s a kvapalina
sýta para

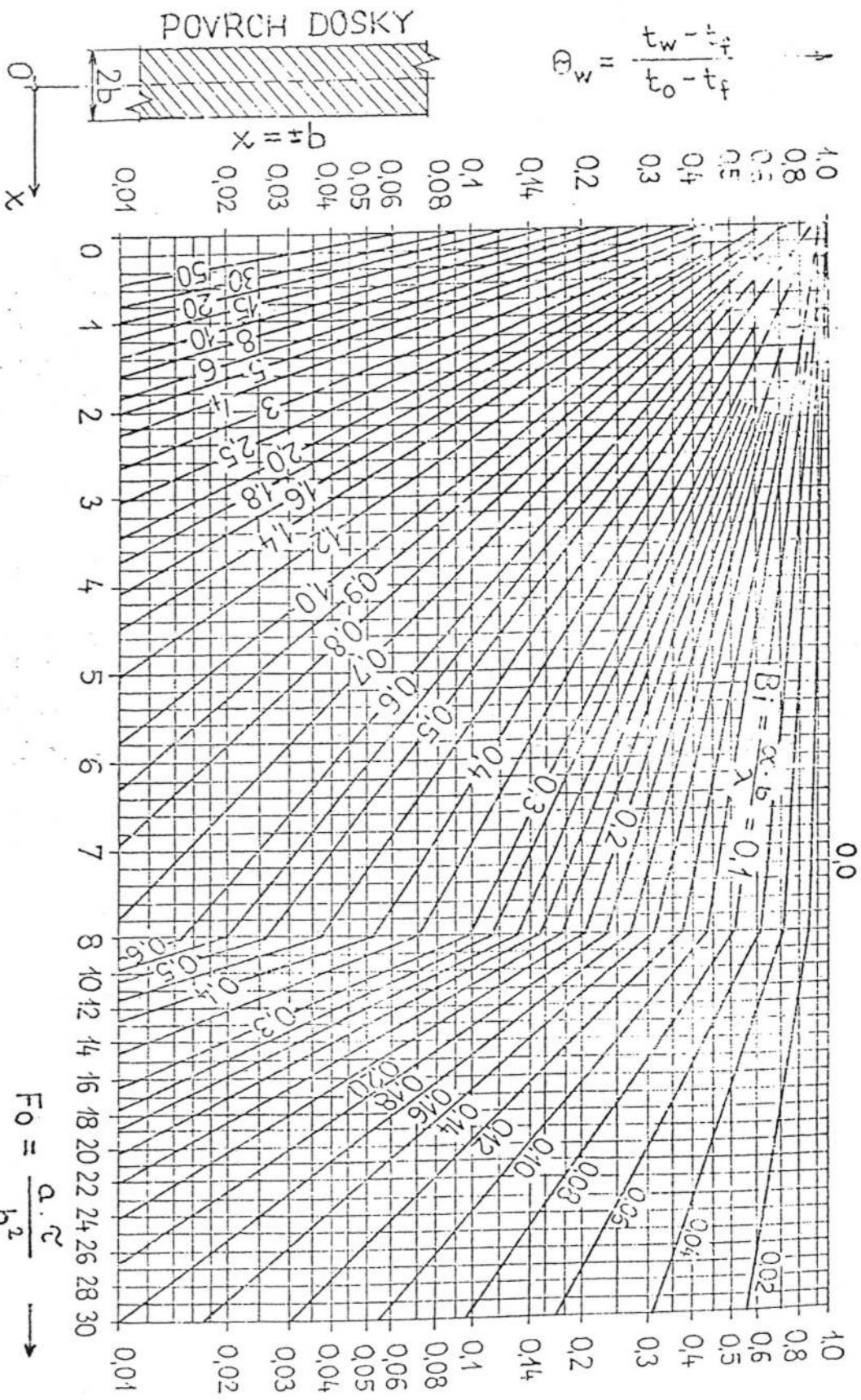
$$b = \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho' - \rho'')}}$$

θ °C	p 10 ⁵ Pa	ρ' kg/m ³	ρ''	c _p kJ/kg K	c _p '	β' 10 ⁻³ /K	β''	λ' 10 ⁻³ W/m K	λ''	η' 10 ⁻⁶ kg/m s	η''	ν' 10 ⁻⁶ m ² /s	ν''	a' 10 ⁻⁶ m ² /s	a''	Pr'	Pr''	σ 10 ⁻³ N/m	b 10 ⁻³ m	l _v kJ/kg
0,01	0,006117	999,78	0,004855	4,229	1,868	-0,08044	3,672	561,0	17,07	1792	9,216	1,792	1898	0,1327	1883	13,51	1,008	75,65	2,778	2500,5
10,00	0,012281	999,69	0,009405	4,188	1,874	0,08720	3,548	580,0	17,62	1306	9,461	1,307	1006	0,1385	999,8	9,434	1,006	74,22	2,752	2476,9
20,00	0,023388	998,19	0,01731	4,183	1,882	0,2089	3,435	598,4	18,23	1002	9,727	1,004	562,0	0,1433	559,6	7,005	1,004	72,74	2,726	2453,3
30,00	0,042455	995,61	0,03040	4,183	1,892	0,3050	3,332	615,4	18,89	797,7	10,01	0,8012	329,3	0,1478	328,3	5,422	1,003	71,20	2,700	2429,7
40,00	0,073814	992,17	0,05121	4,182	1,904	0,3859	3,240	630,5	19,60	653,2	10,31	0,6584	201,3	0,1519	200,9	4,333	1,002	69,60	2,675	2405,9
50,00	0,12344	987,99	0,08308	4,182	1,919	0,4572	3,156	643,5	20,36	547,1	10,62	0,5537	127,7	0,1558	127,7	3,555	1,001	67,95	2,648	2381,9
60,00	0,19932	983,16	0,13030	4,183	1,937	0,5222	3,083	654,3	21,18	466,6	10,93	0,4746	83,91	0,1591	83,92	2,983	1,000	66,24	2,621	2357,6
70,00	0,31176	977,75	0,19823	4,187	1,958	0,5827	3,018	663,1	22,07	404,1	11,26	0,4132	56,80	0,1620	56,85	2,551	0,9992	64,49	2,594	2333,1
80,00	0,47373	971,79	0,29336	4,194	1,983	0,6403	2,964	670,0	23,01	354,5	11,59	0,3648	39,51	0,1644	39,56	2,219	0,9989	62,68	2,565	2308,1
90,00	0,70117	965,33	0,42343	4,204	2,011	0,6958	2,919	675,3	24,02	314,5	11,93	0,3258	28,17	0,1664	28,20	1,958	0,9989	60,82	2,535	2282,7
100,00	1,0132	958,39	0,59750	4,217	2,044	0,7501	2,884	679,1	25,09	281,9	12,27	0,2941	20,53	0,1680	20,55	1,750	0,9994	58,92	2,505	2256,7
110,00	1,4324	951,00	0,82601	4,232	2,082	0,8038	2,860	681,7	26,24	254,8	12,61	0,2680	15,27	0,1694	15,26	1,582	1,001	56,97	2,473	2229,9
120,00	1,9848	943,16	1,1208	4,249	2,126	0,8576	2,846	683,2	27,46	232,2	12,96	0,2462	11,56	0,1705	11,53	1,444	1,003	54,97	2,439	2202,4
130,00	2,7002	934,88	1,4954	4,267	2,176	0,9123	2,844	683,7	28,76	213,0	13,30	0,2278	8,894	0,1714	8,840	1,329	1,006	52,94	2,405	2174,0
140,00	3,6119	926,18	1,9647	4,288	2,233	0,9683	2,855	683,3	30,14	196,6	13,65	0,2123	6,946	0,1720	6,869	1,234	1,011	50,86	2,369	2144,6
150,00	4,7572	917,06	2,5454	4,312	2,299	1,026	2,878	682,1	31,59	182,5	13,99	0,1991	5,496	0,1725	5,399	1,154	1,018	48,75	2,331	2114,1
160,00	6,1766	907,50	3,2564	4,339	2,374	1,087	2,916	680,0	33,12	170,3	14,34	0,1877	4,402	0,1727	4,285	1,087	1,027	46,60	2,292	2082,3
170,00	7,9147	897,51	4,1181	4,369	2,460	1,152	2,969	677,1	34,74	159,6	14,68	0,1779	3,365	0,1727	3,430	1,030	1,039	44,41	2,252	2049,2
180,00	10,019	887,06	5,1539	4,403	2,558	1,221	3,039	673,4	36,44	150,2	15,02	0,1693	2,915	0,1724	2,764	0,9822	1,055	42,20	2,209	2014,5
190,00	12,542	876,15	6,3896	4,443	2,670	1,296	3,128	668,8	38,23	141,8	15,37	0,1619	2,405	0,1718	2,241	0,9423	1,073	39,95	2,164	1978,2
200,00	15,536	864,74	7,8542	4,489	2,797	1,377	3,238	663,4	40,10	134,4	15,71	0,1554	2,001	0,1709	1,825	0,9093	1,096	37,68	2,118	1940,1
210,00	19,062	852,82	9,5807	4,542	2,943	1,467	3,372	657,1	42,07	127,7	16,06	0,1497	1,676	0,1696	1,492	0,8825	1,123	35,39	2,069	1900,0
220,00	23,178	840,34	11,607	4,604	3,109	1,567	3,534	649,8	44,15	121,6	16,41	0,1447	1,414	0,1680	1,224	0,8614	1,155	33,08	2,017	1857,8
230,00	27,951	827,25	13,976	4,675	3,299	1,680	3,729	641,4	46,35	116,0	16,76	0,1403	1,199	0,1659	1,005	0,8456	1,193	30,75	1,963	1813,1
240,00	33,447	813,52	16,739	4,759	3,519	1,808	3,963	632,0	48,70	110,9	17,12	0,1363	1,023	0,1633	0,8268	0,8351	1,237	28,40	1,907	1765,7
250,00	39,736	799,07	19,956	4,857	3,772	1,955	4,245	621,4	51,23	106,2	17,49	0,1329	0,8766	0,1601	0,6804	0,8299	1,288	26,05	1,847	1715,4
260,00	46,894	783,83	23,700	4,973	4,068	2,127	4,586	609,4	53,98	101,7	17,88	0,1298	0,7542	0,1564	0,5598	0,8302	1,347	23,70	1,783	1661,9
270,00	54,999	767,68	28,061	5,111	4,418	2,331	5,002	596,1	57,04	97,56	18,27	0,1271	0,6512	0,1519	0,4602	0,8365	1,415	21,35	1,716	1604,6
280,00	64,132	750,52	33,152	5,279	4,836	2,578	5,519	581,4	60,52	93,57	18,70	0,1247	0,5640	0,1467	0,3775	0,8496	1,494	19,00	1,644	1543,1
290,00	74,380	732,16	39,119	5,485	5,345	2,884	6,170	565,2	64,59	89,72	19,15	0,1225	0,4896	0,1407	0,3089	0,8707	1,585	16,68	1,566	1476,7
300,00	85,838	712,41	46,154	5,746	5,981	3,273	7,010	547,7	69,49	85,96	19,65	0,1207	0,4257	0,1338	0,2517	0,9018	1,691	14,37	1,483	1404,7
310,00	98,605	690,95	54,525	6,084	6,799	3,785	8,127	529,0	75,61	82,22	20,20	0,1190	0,3706	0,1258	0,2040	0,9457	1,817	12,10	1,392	1325,8
320,00	112,79	667,36	64,615	6,542	7,898	4,491	9,674	509,4	83,59	78,46	20,84	0,1176	0,3226	0,1167	0,1638	1,008	1,969	9,875	1,293	1238,5
330,00	128,52	641,00	77,013	7,201	9,458	5,530	11,94	489,2	94,48	74,58	21,60	0,1163	0,2805	0,1060	0,1297	1,098	2,163	7,713	1,181	1140,3
340,00	145,94	610,77	92,691	8,238	11,87	7,210	15,55	468,6	110,2	70,45	22,55	0,1153	0,2433	0,09313	0,1002	1,239	2,428	5,636	1,053	1027,5
350,00	165,21	574,69	113,48	10,13	16,11	16,37	22,12	447,6	134,6	65,88	23,81	0,1146	0,2098	0,07692	0,07365	1,490	2,849	3,675	0,9014	893,03
360,00	186,55	528,10	143,64	14,69	25,80	18,30	37,71	427,2	178,0	60,39	25,71	0,1144	0,1790	0,05507	0,04804	2,077	3,726	1,886	0,7073	721,06
370,00	210,30	453,13	200,29	41,96	78,75	68,20	126,7	428,0	299,4	52,26	29,57	0,1153	0,1477	0,02251	0,01898	5,122	7,780	0,3948	0,3991	450,42
373,976	220,55	322,0	322,00	∞	∞	∞	∞	1419	1419	43,16	43,16	0,1341	0,1341	0,00000	0,00000	∞	∞	0,0000	0,0000	0,0000

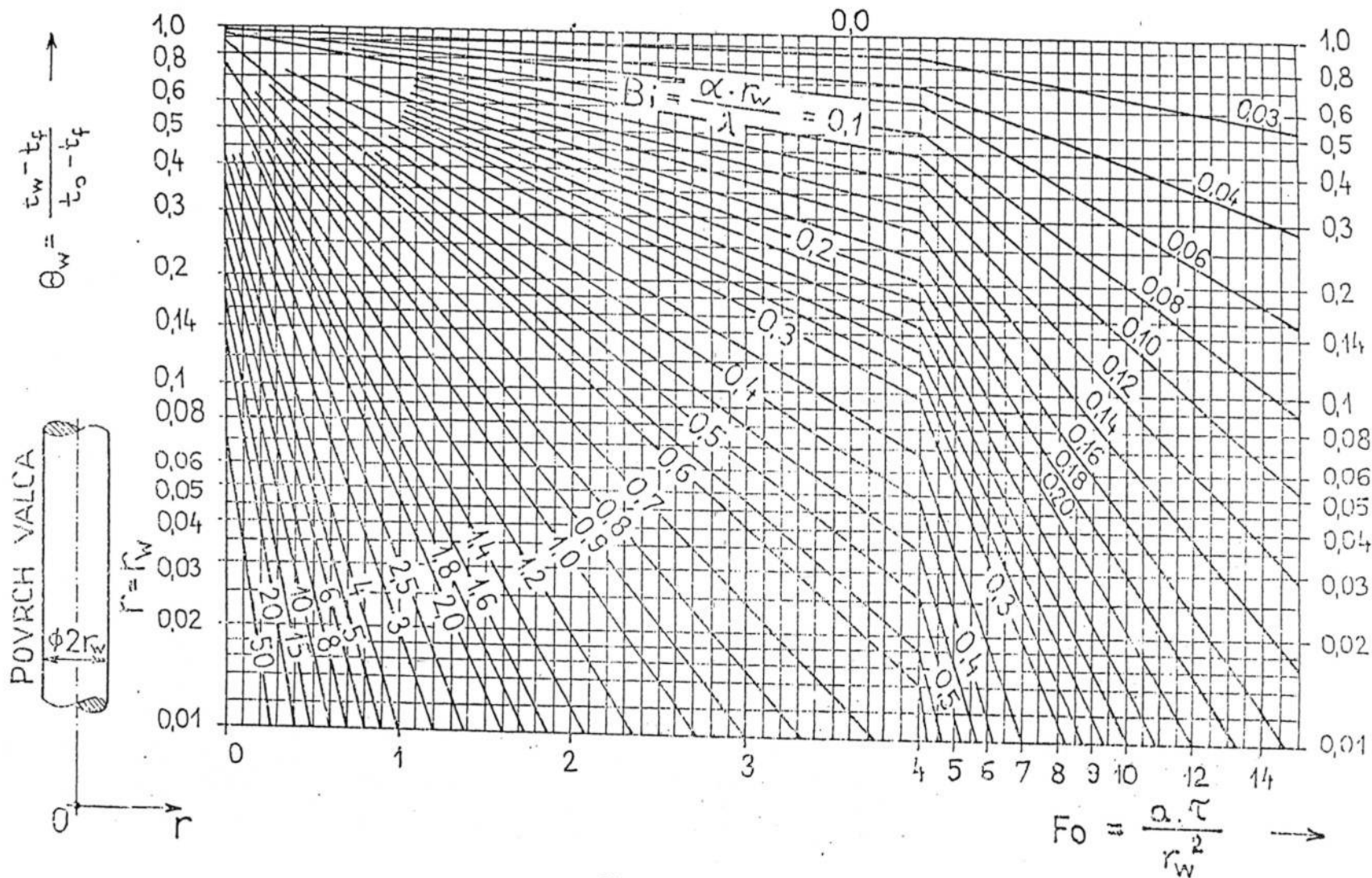
Materiál	t [$^{\circ}\text{C}$]	ϵ
Šamotové tehly polievané	1100,0	0,750
Ohňovzdorné tehly	-	0,800÷0,900
Lak biely, smaltový na železnom plechu	23,0	0,906
Lak čierny, lesklý na železnom plechu	25,0	0,875
Lak čierny matný	40,0÷95,0	0,960÷0,980
Lak biely	40,0÷95,0	0,800÷0,950
Šelak čierny, lesklý na pocínovanom plechu	21,0	0,821
Šelak čierny matný	75÷145	0,910
Olejové nátery rôznej farby	100,0	0,920÷0,960



Obr. 2.7.2
Závislosť $\Theta_w = f_1(Bi, Fo)$ pre povrch dosky

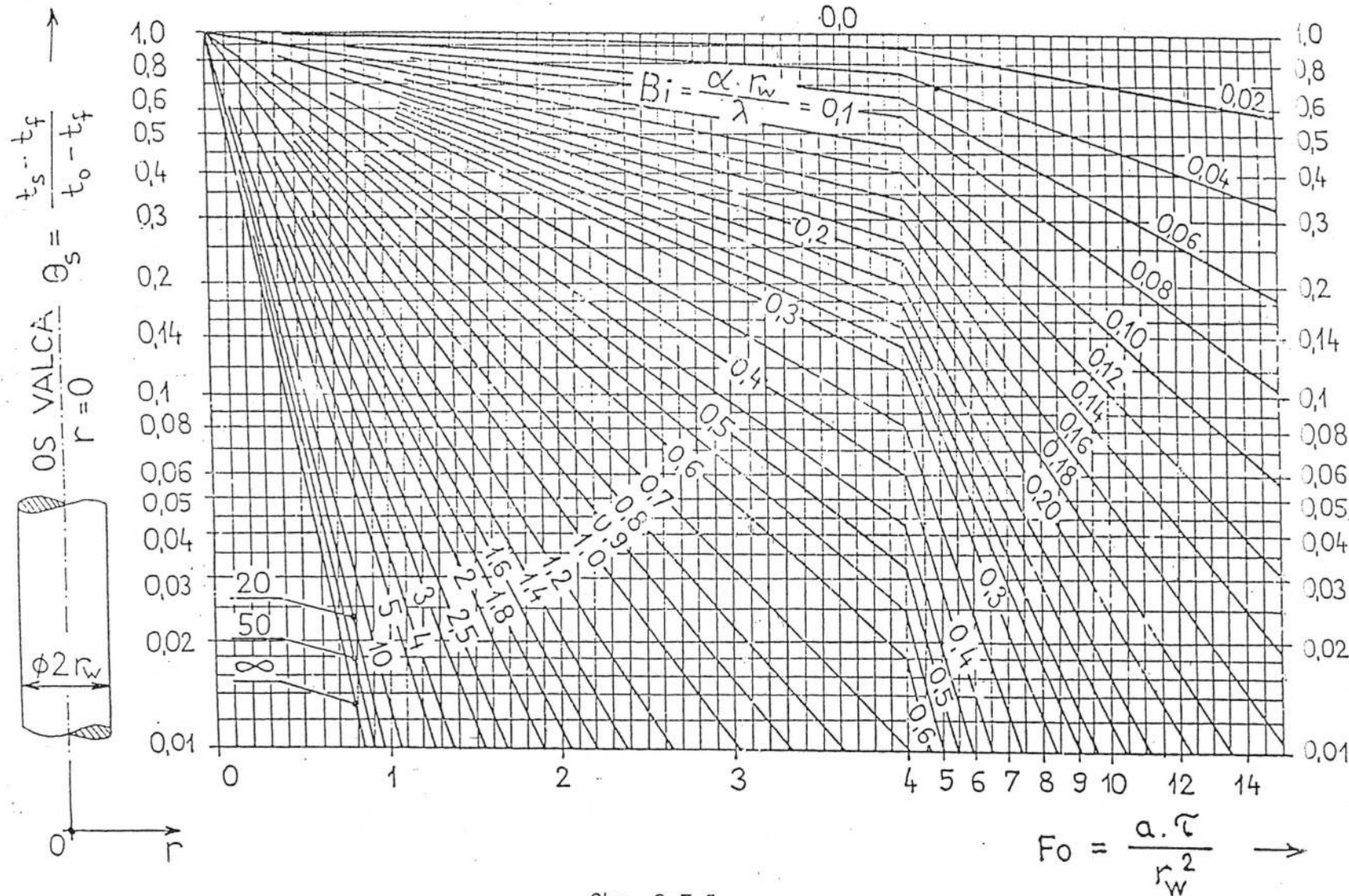


Obr. 2.7.2
Závislosť $\Theta_w = f_1(Bi, Fo)$ pre povrch dosky



Obr. 2.7,4

Závislost $\theta_w = f_3(Bi, Fo)$ pro povrch valca



Obr. 2.7.5

Závislosť $\theta_s = f_4(Bi, Fo)$ pre os valca