

1 PRESTUP TEPLA

Prestup tepla je prenos tepelnej energie z teplejšieho objektu na chladnejší. Tepelné procesy, napr. ohrievanie, chladenie, kondenzácia a odparovanie sa riadia zákonmi prenosu tepla, ktoré sú podrobnejšie uvádzané v literatúre zaoberajúcej sa termodynamikou.

Pri návrhu technických zariadení sa tieto poznatky uplatňujú v rozsahu a spôsobom potrebným pre určitý typ zariadenia.

Prestup tepla je proces, ktorý je dôležitý v každom odvetví priemyslu. Spracovaný materiál sa musí ohriať na potrebnú teplotu, treba mu dodať či odobrať reakčné teplo, dodať výparné teplo pri odparovaní kvapalín, alebo naopak, odobrať skupenské teplo pri kondenzácii pár a pod.

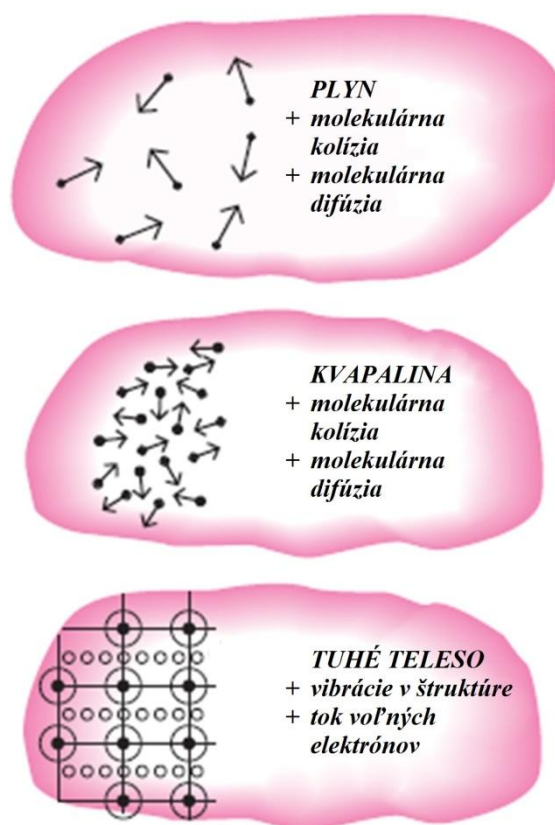
Veľmi často sa požaduje, aby prestup tepla bol čo najintenzívnejší, v iných prípadoch je naopak treba, aby výmena tepla s okolím bola čo najmenšia.

Prestup tepla má veľký význam najmä preto, že vo väčšine prevádzok predstavuje energia na vykurovanie a chladenie najväčšiu položku zo všetkých spotrebovaných energií.

ZÁKLADNÉ SPÔSOBY ŠÍRENIA TEPLA

VEDENIE (KONDUKCIA)

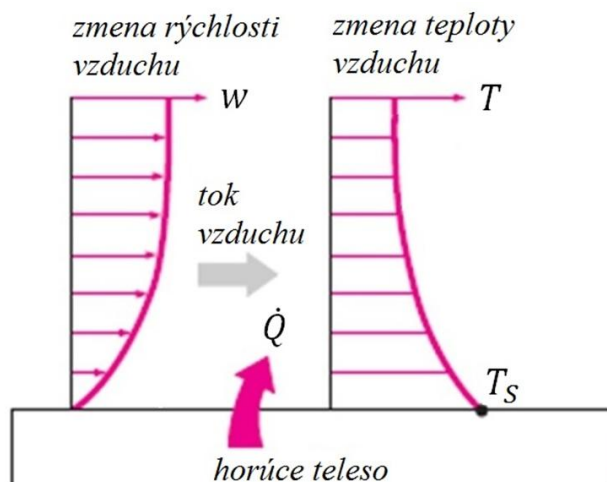
Vedenie tepla je charakterizované tým, že je to odovzdávanie energie na mikroskopickej úrovni, t. j. medzi atómami a molekulami systému. Vedenie tepla sa uplatňuje predovšetkým v tuhých telesách, ktorých rôzne časti majú rôznu teplotu. Teplo sa vedením šíri tiež v kvapalinách a plynoch, kde sa však uplatňuje tiež prenos tepla prúdením.



Obr. 1.1. Mechanizmus šírenia tepla vedením v plyne, kvapaline a tuhom telese [4]

PRÚDENIE (KONVEKCIA)

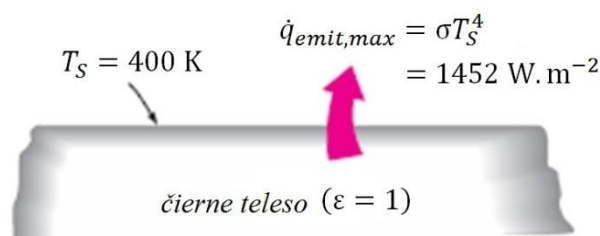
Prúdenie sa vyskytuje v tekutinách a predstavuje odovzdávanie energie na makroskopickej úrovni, t. j. medzi časticami tekutiny obsahujúcimi veľké množstvo molekúl či atómov. Je vždy sprevádzané vedením tepla a relatívny podiel oboch závisí od hydrodynamických podmienok. Prestup tepla prúdením je podstatne rýchlejší, ako vedenie tepla v tekutinách.



Obr. 1.2. Prestup tepla z povrchu horúceho telesa do vzduchu konvekciou [4]

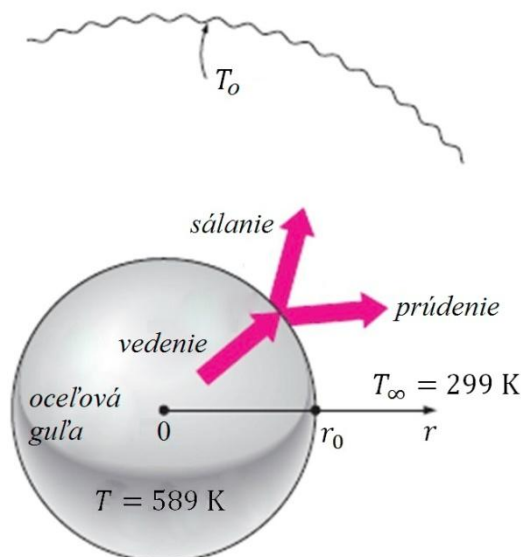
SÁLANIE (RADIÁCIA)

Prestup tepla sálaním je zásadne odlišný od predchádzajúcich dvoch spôsobov. Pri sálaní sa teplo šíri vo forme elektromagnetického vlnenia a na to, aby mohlo prechádzať z jedného telesa na druhé, nepotrebuje hmotné prostredie (na rozdiel od prvých dvoch).

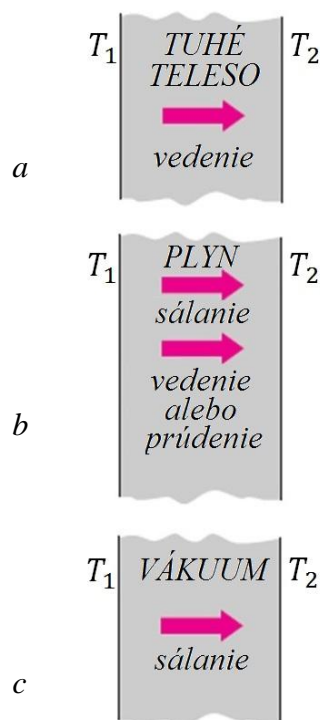


Obr. 1.3. Radiácia čierneho telesa pri jeho danej teplote do okolia [4]

Je dôležité zdôrazniť, že všetky tri mechanizmy šírenia tepla pôsobia spolu. Obyčajne niektorý z nich buď prevláda, alebo sa vôbec neobjavuje. Obrázok 1.4 znázorňuje situáciu ochladzovania horúceho telesa. Z povrchu horúcej gule prestupuje teplo a šíri sa obyčajne konvekciou (voľnou alebo nútenou), zároveň sa vyžaruje teplo sálaním, čo možno pocítiť, ak je pozorovateľ v blízkosti takejto gule. Týmto mechanizmom sa povrch gule ochladzuje. Jadro má však stále vysokú teplotu. Preto nastane prenos tepla kondukciou z jadra gule k jej povrchu.

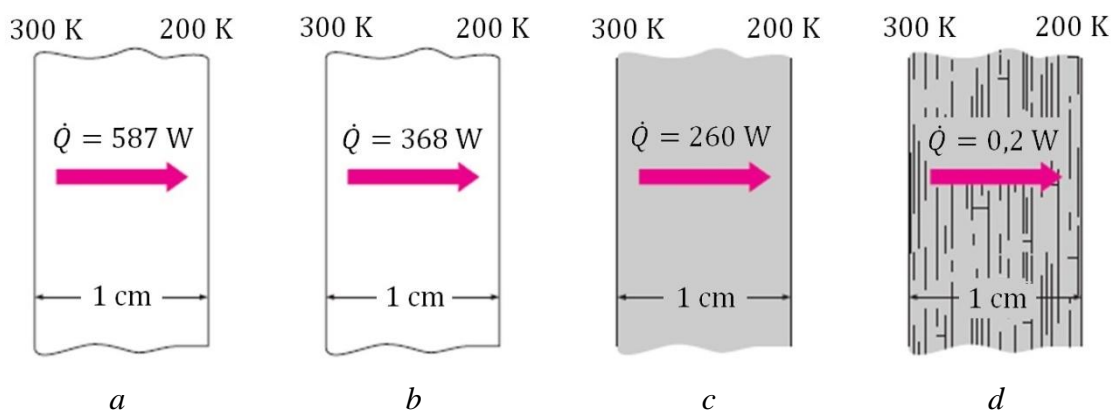


Obr. 1.4. Mechanizmus šírenia tepla v guľi a z povrchu horúcej guľe do okolia [4]



Obr. 1.5 Zobrazenie mechanizmu prestupu tepla v rôznych médiách [4]:
 a – vedenie tepla v tuhom telese, b – radiácia s vedením alebo prúdením v plyne,
 c – radiácia vo vákuu

To, aký mechanizmus sa prejaví, alebo bude prevládajúci, rozhoduje prostredie, v ktorom sa teplo šíri (obr. 1.5). V tuhých telesách sa teplo šíri len vedením. Vo vákuu len radiáciou. Plyny však veľmi slabou absorbujú radiáciu, obyčajne len určitých vlnových dĺžok. Napríklad ozón absorbuje len ultrafialové žiarenie. Kvapaliny absorbujú žiarenie veľmi dobre. V plyne a kvapaline sa teda môžu uplatniť všetky tri mechanizmy. Ktorý z mechanizmov bude prevládať, závisí od teploty a hydrodynamických podmienok.



Obr. 1.6. Prenos tepla v rôznych izoláciách pri konštantnej ploche [4]:
 a – vzduch, b – vákuum, c – izolácia, d – superizolant

HNACIA SILA

PRENOS TEPLA VEDENÍM A PRÚDENÍM

Hnacou silou prestupu tepla vedením a prúdením je rozdiel teplôt medzi rôznymi miestami sústavy (tuhé teleso, kvapalina, plyn), teda gradient teploty. Teplo sa šíri na molekulárnej úrovni odovzdávaním energie medzi molekulami.

Pri konvekčii je vhodné ešte použiť aj nasledujúce rozdelenie:

- *Voľná konvekcia* nastáva účinkom gravitácie a smer prenosu tepla má zvislý smer. Teplo stúpa nahor, pretože teplejšie časti kvapalín a plynov majú menšiu hustotu.
- *Nútená konvekcia* nastáva, ak je prúdenie nútené (napríklad ventilátorom v miestnosti), vtedy smer prenosu tepla závisí od smeru prúdenia tekutiny.

PRENOS TEPLA SÁLANÍM

Špeciálny prípad je prenos tepla sálaním, keď sa neuplatňuje ani konvekcia a ani kondukcia. Radiáciou sa teplo môže šíriť aj cez vákuum. Intenzita tepelného žiarenia závisí od určitej mocniny teploty vyžarovaného telesa. Žiarením je prenášaná napríklad energia zo Slnka na Zem, časti tepla sa Zem vlastným žiarením zbavuje.

Každý z týchto troch spôsobov prestupu tepla môže byť:

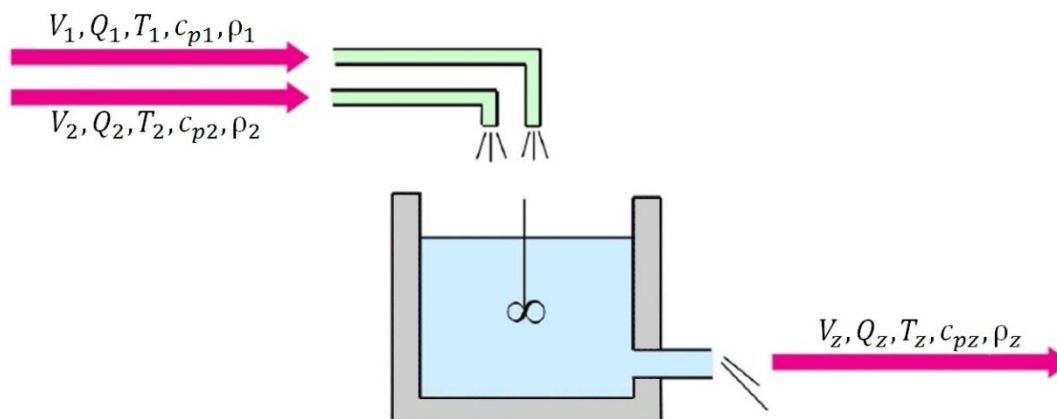
- *ustálený (stacionárny)*
 Ustálený prenos tepla je charakterizovaný tým, že na rôznych miestach teplovýmennnej plochy môžu byť teploty rozdielne, ale v priebehu času sa nemenia. Taký dej prebieha v kontinuálne pracujúcich výmenníkoch tepla pri prestupe tepla pri použití plyných alebo kvapalných látok.
- *neustálený (nestacionárny)*
 Neustálený prenos tepla sa v technickej praxi vyskytuje veľmi často, najmä v periodickej prevádzke ohrievacích alebo chladiacich aparátov a nádob, pri ohreve, chladení alebo zmrazovaní látok tuhého skupenstva a pod. Tento typ prestupu tepla sa vyznačuje tým, že teploty v ktoromkoľvek mieste zúčastnenej sústavy sa v priebehu času menia.

PRINCÍP VÝPOČTU PRENOSU TEPLA

PRIAMY OHREV

Pri priamom ohreve látok prichádza k ich vzájomnému styku, ktoré je obyčajne spojené s ich premiešaním. Tým sa dosiahne vyrovnaná teplota v celom objeme.

Príkladom takéhoto ohrevu je priame zmiešavanie vodnej pary s vodou v kondenzátoroch. V tomto prípade obyčajne nastáva kondenzácia pary, teda fázová premena vodnej pary na horúcu vodu. Najjednoduchší príklad je zmiešanie teplej a studenej vody (obr. 1.7).



Obr. 1.7. Princíp priameho ohrevu alebo chladenia [4]

Do nádoby pritekajú dvomi potrubiami kvapaliny teplotami T_1 a T_2 , tepelnými kapacitami pri konštantnom tlaku c_{p1} a c_{p2} , hustotami ρ_1 a ρ_2 a prietokmi V_1 a V_2 tak, ako je znázornené na obrázku 1.7. V nádobe je miešadlo, ktoré zabezpečuje vzájomné premiešanie látok pritekajúcich z potrubí. Po ich zmiešaní vyteká z nádoby kvapalina o teplote T_z , ktorá je výsledkom zmiešania pritekajúcich tekutín a výmeny tepla medzi nimi pri zmiešaní.

- *prestup tepla medzi látkami rovnakého skupenstva*

Najjednoduchší prípad priameho ohrevu (chladenia) je prestup tepla medzi látkami rovnakého skupenstva. Je to z toho dôvodu, že vtedy neprichádza k fázovej premene (var, kondenzácia, topenie, tuhnutie...), ale len k odovzdaniu tepla z horúcejšej tekutiny do chladnejšej.

Tento dej možno pokladať za zmiešavanie, ak platí zákon zachovania energie, takže do systému vnesené tepla dvoch alebo viac látok sa rovnajú celkovému teplu.

Nech do sústavy vstupuje n látok s rôznymi teplotami, špecifickými tepelnými kapacitami a hmotnostnými tokmi. Ak je každé z tepiel $Q_1 \dots Q_n$, ktoré je týmito látkami dopravované do zmiešavacej nádoby, vyjadrené rovnicou

$$Q = m c T \tag{1.1}$$

kde

c	– špecifická tepelná kapacita látky	$(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
m	– hmotnosť látky	(kg)
T	– teplota	(K)
Q	– množstvo tepla	(J)

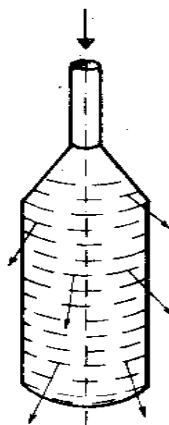
potom teplota zmesi T_z sa vypočíta z rovnice

$$T_z = \frac{m_1 c_1 T_1 + m_2 c_2 T_2 + \dots + m_n c_n T_n}{m_1 c_1 + m_2 c_2 + \dots + m_n c_n} \quad (1.2)$$

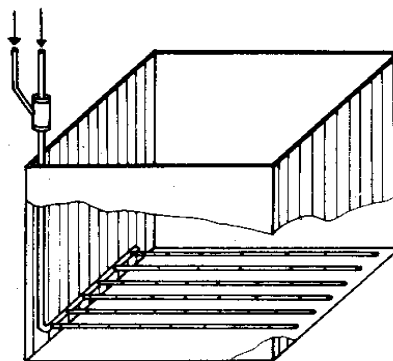
- *prestup tepla medzi látkami rôzneho skupenstva*

Patrí sem napr. priamy ohrev vodných roztokov sýtou parou. Najjednoduchší spôsob ohrevu kvapaliny, ak ide o vodu, vodné roztoky či suspenzie, je priamy prívod pary, ktorá v kvapaline, roztoku alebo suspenzii kondenzuje a odovzdáva jej svoje skupenské teplo. Kondenzát sa mieša s kvapalinou.

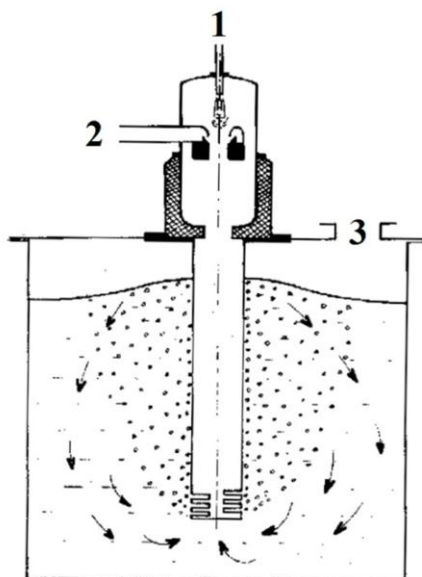
Najjednoduchšie zariadenie na tento pochod je parná rúrka alebo parná hadica, ponorená otvoreným koncom smerom ku dnu nádoby. Kondenzujúca para spôsobuje hluk, a preto sa používajú rôzne úpravy konca rúrky, ktoré okrem zníženia hluku majú vplyv na dosiahnutie väčšej rovnomernosti teploty v celom ohrievanom objeme (obr. 1.8; obr. 1.9). Sem patrí aj ohrev kvapalín vháňanými spalinami, na čo sa najčastejšie používa ponorný horák (obr. 1.10).



Obr. 1.8. Rozdeľovací kôš [9]



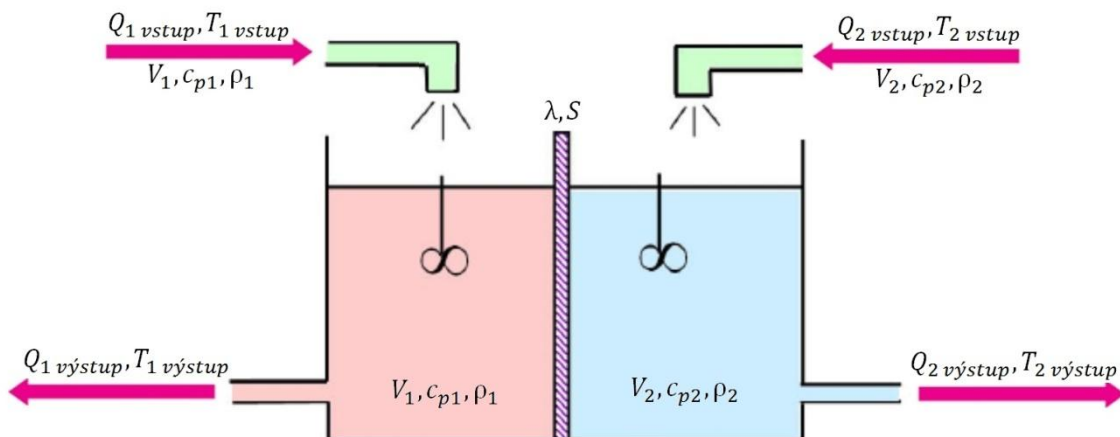
Obr. 1.9. Rozdeľovací rošt [9]



Obr. 1.10. Ponorný horák [9]:
1 – vstup paliva, 2 – vstup vzduchu, 3 – odplyn

NEPRIAMY OHREV

Uskutočňuje sa v zariadeniach špeciálnej konštrukcie, ktoré sa nazývajú výmenníky tepla. V nich sú obidve médiá oddelené stenou, takže nedochádza k vzájomnému kontaktu a premiešaniu.



Obr. 1.11. Princíp nepriameho ohrevu alebo chladenia [4]

V krátkom prehľade budú uvedené základné vzťahy pre výpočet zariadení na výmenu tepla, kde je sledovaná kvapalina ohrievaná alebo chladená bez toho, aby menila svoje skupenstvo, pričom prestup tepla je ustálený (stacionárny).

Konštrukčné riešenia výmenníkov sú uvedené v nasledujúcej kapitole. Z hľadiska výpočtu je cieľom návrhu výmenníkov tepla obyčajne určenie teplovýmennej plochy (počtu rúrok, dosák a pod). Vzťahy uvedené v ďalšej časti textu predstavujú obecný postup výpočtu, platný pre všetky typy výmenníkov tepla bez fázovej premeny. V prípade výpočtu a návrhu konkrétneho typu výmenníka sa musia použiť modifikácie týchto vzťahov pre ich jednotlivé typy, ktoré sú dostupné v odbornej literatúre. Tento údaj ďalej slúži ako podklad pre konštrukčné usporiadanie výmenníka tepla.

Ako už bolo spomenuté, väčšinou sa počíta veľkosť potrebnej teplovýmennej plochy, ktorá má zabezpečiť, že pri vzájomnom kontakte tekutín oddelených touto plochou príde k takému prestupu tepla, aby tekutina na výstupe dosiahla požadovanú teplotu. Zvýšenie alebo zníženie tejto teploty sa dosiahne naopak na úkor zníženia alebo zvýšenia teploty vyhrievacieho média. Takže veľkosť teplovýmennej plochy potrebnej na ohriatie alebo ochladenia tekutiny o teplotný rozdiel ΔT_s sa vypočíta zo vzťahu:

$$A = \frac{\dot{Q}}{k \Delta T_s} \tag{1.3}$$

kde

- k – úhrnný súčiniteľ prestupu tepla (W · m⁻² · K⁻¹)
- A – teplovýmenná plocha (m²)
- \dot{Q} – tepelný tok (W)
- ΔT_s – stredná teplotná diferencia (K)

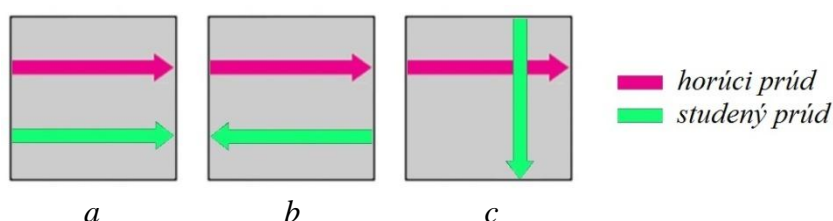
Určiť tepelný tok nebýva ťažké, zvyčajne sa vypočíta zo základnej tepelnej bilancie vyjadrenej vzťahom

$$\dot{Q} = \dot{m} c_p (T_2 - T_1) \quad (1.4)$$

kde

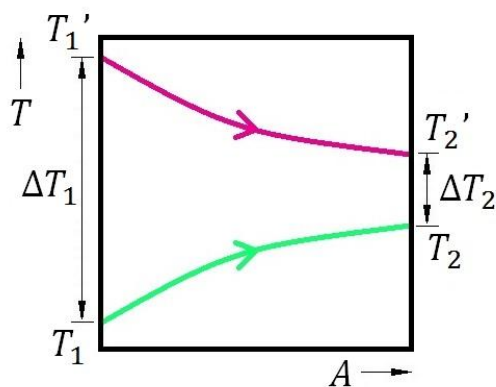
c_p	– špecifická tepelná kapacita pri konštantnom tlaku	$(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \text{K}^{-1})$
\dot{m}	– hmotnostný tok	$(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$
T_1	– nižšia teplota	(K)
T_2	– vyššia teplota	(K)

Výmenník tepla pracuje s dvomi prúdmi, jeden slúži na ohrievanie, druhý je ohrievaný. Tieto prúdy sa do výmenníka privádzajú cez hrdlá. Ak obidva prúdy vstupujú na jednej strane a tečú rovnakým smerom, takéto zapojenie sa nazýva *súprúdne* (obr. 1.12a). Ak prúdy vstupujú do výmenníka na jeho opačných stranách a tečú proti sebe, takéto zapojenie sa nazýva *protiprúdne* (obr. 1.12b).

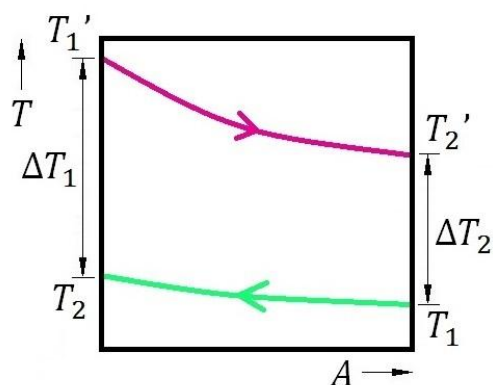


Obr. 1.12. Usporiadanie prúdov výmenníka tepla [4]:
a – súprúd, b – protiprúd, c – krížový prúd

Priebeh teplôt pozdĺž teplovýmennej plochy jednoduchého výmenníka tepla pri súprúdnom zapojení je na obrázku 1.13 a pri protiprúdnom zapojení je na obrázku 1.14. Tekutiny vstupujú pri teplotách $T_1; T_1'$ a výstupujú pri teplotách $T_2; T_2'$.



Obr. 1.13. Priebeh teplôt pozdĺž teplovýmennej plochy pri súprúdnom zapojení výmenníka tepla [4]



Obr. 1.14. Priebeh teplôt pozdĺž teplovýmennej plochy pri protiprúdnom zapojení výmenníka tepla [4]

Stredná teplotná diferencia v rovnici (1.3) môže byť definovaná niekoľkými spôsobmi. Najpoužívanejšia je aritmetická teplotná diferencia ΔT_{ar} a logaritmická teplotná diferencia ΔT_{ln} .

Stredná aritmetická teplotná diferencia ΔT_{ar} je definovaná vzťahom

$$\Delta T_{ar} = \frac{1}{2}(\Delta T_1 + \Delta T_2) \quad (1.5)$$

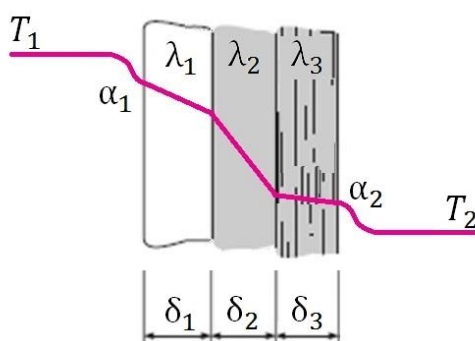
Stredná logaritmická teplotná diferencia ΔT_{ln} je definovaná vzťahom

$$\Delta T_{ln} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} \quad (1.6)$$

kde

ΔT_1 – vyššia teplotná diferencia (K)

ΔT_2 – nižšia teplotná diferencia (K)



Obr. 1.15. Úhrnný súčiniteľ prestupu tepla pre rovinnú stenu [4]

Poslednou veličinou, ktorú je potrebné poznať pre výpočet teplovýmennej plochy je úhrnný súčiniteľ prestupu tepla (súčiniteľ prechodu tepla) k . Pre prípad rovinatej steny (obr. 1.15) je definovaný vzťahom

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (1.7)$$

kde

k	– úhrnný súčiniteľ prestupu tepla	$(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$
α_1	– súčiniteľ prestupu tepla z tekutiny na stenu	$(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$
α_2	– súčiniteľ prestupu tepla zo steny do tekutiny	$(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$
δ_i	– hrúbka i -tej steny	(m)
λ_i	– tepelná vodivosť i -tej steny	$(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$

Súčiniteľ prechodu tepla je prevrátená hodnota súčtu jednotlivých tepelných odporov, pričom odporom jednoduchej alebo zloženej rovinnej steny je výraz $\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}$.

Pri výpočte prestupu tepla cez rúrku je nutné vypočítať lineárny súčiniteľ prestupu tepla k_L ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$).

$$k_L = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 D_1} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{D_2}{D_1} + \frac{1}{\alpha_2 D_2}} \quad (1.8)$$

kde

D_1	– vnútorný priemer rúrky	(m)
D_2	– vonkajší priemer rúrky	(m)
λ	– tepelná vodivosť steny rúrky	$(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$

Ak by sa rúrka skladala z i vrstiev rôznych materiálov, vo vzťahu (1.8) by sa prestup tepla vedením $\frac{1}{2\lambda} \ln \frac{D_2}{D_1}$ nahradil výrazom $\sum_{i=1}^n \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{D_{i+1}}{D_i}$, pričom súčiniteľ prestupu tepla zo steny do tekutiny α_2 by bol naviazaný na vonkajší priemer najvrchnejšej vrstvy D_{i+1} .

Výpočet pomocou lineárneho súčiniteľa prestupu tepla k_L sa využíva napríklad pri výpočtoch výmenníkov tepla rúrka v rúrke, kde sa výpočet teplovýmennej plochy A zmení na výpočet dĺžky výmenníka tepla L so známymi priermi rúrky D_1 a D_2

$$L = \frac{\dot{Q}}{\pi k_L \Delta T_s} \quad (1.9)$$

Výpočet veľkosti teplovýmennej plochy (resp. dĺžky), prípadne množstva pretekajúceho tepla danou plochou sa v podstate redukuje na spoľahlivé určenie koeficientov prestupu tepla. Rovnica, ktorá by umožnila výpočet súčiniteľa prestupu tepla α musí obsahovať vplyvy všetkých fyzikálnych vlastností tekutiny a charakteristiku jej prúdenia počas daných podmienok. Väčšina prípadov prestupu tepla je taká zložitá, že usporiadanie týchto parametrov do jedinej rovnice iba na teoretickom základe je takmer nemožné. V tomto prípade je veľmi užitočná rozmerová analýza, ktorá umožňuje zoskupiť jednotlivé parametre do rôznych bezrozmerných skupín. Najdôležitejšie z nich pre prípady prestupu tepla sú:

- *Nusseltovo číslo*

$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda} \quad (1.10)$$

- *Reynoldsovo číslo*

$$Re = \frac{\bar{w} l \rho}{\eta} \quad (1.11)$$

- *Prandtlovo číslo*

$$Pr = \frac{c_p}{\lambda} \eta \quad (1.12)$$

- *Grasshofovo číslo*

$$Gr = \frac{g l^3}{\nu^2} \beta \Delta T \quad (1.13)$$

- *Pecletovo číslo*

$$Pe = Re Pr \quad (1.14)$$

kde okrem už zavedeného označovania

l	– charakteristický rozmer	(m)
g	– tiažové zrýchlenie	(m. s ⁻²)
\bar{w}	– stredná rýchlosť	(m. s ⁻¹)
β	– súčiniteľ objemovej rozťažnosti	(K ⁻¹ .)
ρ	– hustota	(kg. m ⁻³)
η	– dynamická viskozita	(Pa. s)
ν	– kinematická viskozita	(m ² . s ⁻¹)
ΔT	– rozdiel teplôt medzi povrchom telesa a strednou teplotou okolia (hnacia sila)	(K)

Rovnica na výpočet súčiniteľa prestupu tepla v najvšeobecnejšom prípade pre newtonovskú kvapalinu bez zmeny skupenstva bude mať tvar podľa

$$Nu = f\left(Re; Gr; Pr; \frac{L}{D}; \dots\right) \quad (1.15)$$

kde

D	– priemer potrubia	(m)
L	– dĺžka potrubia	(m)

Pretože prúdenie podľa Reynoldsovho čísla Re delíme na laminárne, prechodové a turbulentné a podľa veľkosti Prandtlovho čísla Pr delíme tekutiny na plyny, vodu, vodné roztoky, kvapaliny s nízkou a vysokou viskozitou je zrejmé, že pre každý druh prúdenia alebo tekutiny bude vyhovovať iný typ základnej rovnice.

V nasledujúcej časti textu budú uvedené príklady kritériálnych rovníc výpočtu súčiniteľa prestupu tepla pomocou Nusseltovho čísla Nu pre rôzne prúdenie tekutiny v rúrke a medzi rúrkami pre laminárny a turbulentný režim prúdenia.

- ***laminárne prúdenie vnútri rúrok***

Pre laminárne prúdenie ($Re < 2300$) vnútri vodorovných alebo zvislých rúrok pri zanedbaní vplyvu voľnej konvekcie (prirodzeného prúdenia) možno odporučiť rovnicu

$$Nu = 1,615 \left(Re Pr \frac{D}{L} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1.16)$$

- **vplyv prirodzenej konvekcie**

Ak je tekutina v styku s ohrievanou stenou, dochádza k prirodzenej cirkulácii tekutiny vplyvom zmeny hustoty s teplotou. Rýchlosť cirkulácie závisí od tvaru nádoby, v ktorej sa tekutina pohybuje a od usporiadania ohrievanej steny. Podobne ako pri vynútenej konvekcii má hlavný význam kritérium Re , pri prirodzenej konvekcii je charakteristické kritérium Gr . Parameter l v tomto kritériu je lineárny rozmer ohrievaného povrchu. Pri horizontálnom valci je l jeho vonkajší priemer, pri zvislom valci alebo doske je to zvyčajne ich výška. Strednú hodnotu súčiniteľa prestupu tepla počítame zo závislostí, ktoré majú tvar podľa

$$Nu = f(Gr Pr) \quad (1.17)$$

Napríklad pre *zvislé plochy*, pre rozsah $10^{-1} \leq Gr Pr \leq 10^{12}$ nadobúda tvar (1.18), [32]

$$Nu = \left\{ 0,825 + 0,387 [Gr Pr f_1(Pr)]^{\frac{1}{6}} \right\}^2 \quad (1.18)$$

Funkcia $f_1(Pr)$, pre rozsah $10^{-3} < Pr < \infty$, sa vypočíta zo vzťahu

$$f_1(Pr) = \left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{-\frac{16}{9}} \quad (1.19)$$

Všetky fyzikálne parametre kvapaliny sa dosadzujú pri strednej aritmetickej teplote kvapaliny.

- **turbulentné prúdenie vo vnútri rúrok**

Pre plne vyvinuté turbulentné prúdenie $Re \geq 10^4$ a $0,6 < Pr < 100$; $\frac{L}{D} > 50$ platí rovnica

$$Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^b \quad (1.20)$$

kde pre chladenie platí $b = 0,3$ a pre ohrev $b = 0,4$.

- **nútené prúdenie v rúrkach pri podmienkach prechodného charakteru prúdenia**

$$Nu = 0,116 \left(Re^{\frac{2}{3}} - 125 \right) Pr^{\frac{1}{3}} \left[1 + \left(\frac{D}{L} \right)^{\frac{2}{3}} \right] \left(\frac{\eta}{\eta_s} \right)^{0,14} \quad (1.21)$$

Rovnica (1.21) platí pre rozsah $2300 \leq Re < 10^6$; $0,6 \leq Pr \leq 500$; $0 < \frac{D}{L} < 1$.

- *nútené obtekanie jednotlivkej rúrky alebo tyče kolmo na os* [32]

$$Nu = C Re^n Pr^{\frac{1}{3}} \quad (1.22)$$

kde

- n – konštanta (1)
- C – konštanta (1)
- Re – Reynoldsovo číslo (1)

$$Re = \frac{D_v w_\infty}{\nu} \quad (1.23)$$

kde

- w_∞ – rýchlosť prúdu v dostatočnej vzdialenosti od povrchu rúrky (m. s⁻¹)
- D_v – vonkajší priemer rúrky (m)

Tabuľka 1.1. Hodnoty konštánt C a n pre kruhové prierezy v závislosti od hodnoty Re

Re (1)	C (1)	n (1)
0,4 – 4	0,989	0,33
4 – 40	0,911	0,385
40 – 4000	0,683	0,466
4000 – 40000	0,193	0,618
40000 – 400000	0,0266	0,805

Z predchádzajúcich vzťahov je vidieť, že súčiniteľ prestupu tepla α závisí od mnohých faktorov a je potrebné ho presne stanoviť s použitím vhodnej kritériálnej rovnice. Niekedy však pre rýchly odhad jeho hodnoty možno použiť hodnoty uvedené v tabuľke 1.2.

Tabuľka 1.2. Typické hodnoty súčiniteľa prestupu tepla

Typ prúdenia	α (W. m ⁻² . K ⁻¹)
Voľná konvekcia plynov	2 – 25
Voľná konvekcia kvapalín	10 – 1000
Nútená konvekcia plynov	25 – 250
Nútená konvekcia kvapalín	50 – 20000
Var a kondenzácia	2500 – 100000

VÝPOČET PRENOSU TEPLA SÁLANÍM

Výpočet je zložitejší, ako pri predchádzajúcom mechanizme prenosu tepla. Základom je teória žiarenia absolútne čierneho telesa [5]. Radiácia vyžiarená takýmto telesom, ktorá závisí od teploty telesa a vyžarovanej vlnovej dĺžky, je považovaná za difúznú a nezávisí od smeru. Tomuto väčšinou zodpovedajú aj technické materiály, a preto žiarenie z nich môže byť považované za difúzne.

Radiácia je priestorový jav a všetky tuhé telesá, kvapaliny a plyny emitujú, absorbujú alebo prepúšťajú radiáciu na určitej úrovni [4]. Avšak radiácia je zvyčajne považovaná za

povrchový jav pre tuhé telesá, pretože sú nepriepustné pre radiáciu a tá je obyčajne pohltená na vrchných vrstvách tuhých telies.

Maximálny radiačný tok, ktorý môže byť vyžarovaný z povrchu pri absolútnej teplote T_s , je daný Stefan–Boltzmanovým zákonom

$$\dot{Q}_{emit\ max} = \sigma A_s T_s^4 \quad (1.24)$$

kde $\dot{Q}_{emit\ max}$ (W) je tok tepla radiáciou a $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ je Stefan–Boltzmanova konštanta. Radiačný tok podľa rovnice (1.24) vyžaruje dokonale čierne teleso a nazýva sa vyžarovanie dokonale čierneho telesa (obr. 1.3). Vyžarovanie skutočných telies je slabšie a možno ho vypočítať na základe korekcie vyžarovania dokonale čierneho telesa

$$\dot{Q}_{emit\ max} = \varepsilon \sigma A_s T_s^4 \quad (1.25)$$

kde

$$\varepsilon \quad - \quad \text{emisivita povrchu skutočného telesa.} \quad (1)$$

Tabuľka 1.3. Emisivita niektorých materiálov pri teplote 300 K

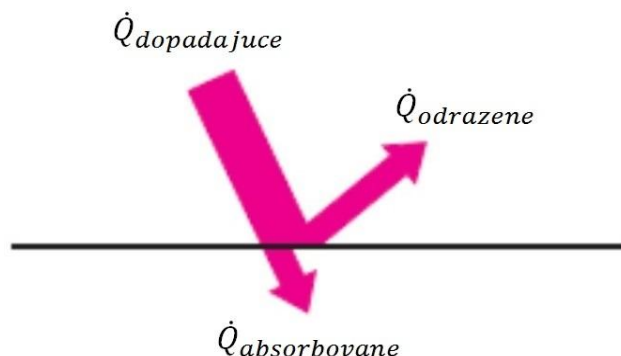
Materiál	ε (1)
Hliníková fólia	0,07
Eloxovaný hliník	0,82
Leštená meď	0,03
Leštené zlato	0,03
Leštené striebro	0,02
Leštená nerezová oceľ	0,17
Čierny náter	0,98
Biely náter	0,90
Biely papier	0,92 – 0,97
Asfaltový chodník	0,85 – 0,93
Červená tehla	0,93 – 0,96
Ľudská koža	0,95
Drevo	0,82 – 0,92
Zemina	0,93 – 0,96
Voda	0,96
Vegetácia	0,92 – 0,96

Ďalší dôležitý parameter radiácie je pohltivosť α , ktorý udáva pomer medzi žiarením dopadajúcim na teleso a žiarením, ktoré je absorbované. Pre čierne teleso sa jeho hodnota rovná jednej.

$$\dot{Q}_{absorbovane} = \alpha \dot{Q}_{dopadajuce} \quad (1.26)$$

Kirchhoffov zákon hovorí, že emisivita a pohltivosť povrchu telesa pri danej teplote a vlnovej dĺžke sú rovnaké. Vo veľa praktických aplikáciách sú povrchová teplota a teplota zdroja dopadajúceho žiarenia rovnakej magnitúdy a priemerná absorpcnosť povrchu je počítaná z jeho priemerného vyžarovania. Úroveň, na ktorej povrch absorbuje žiarenie, je podľa

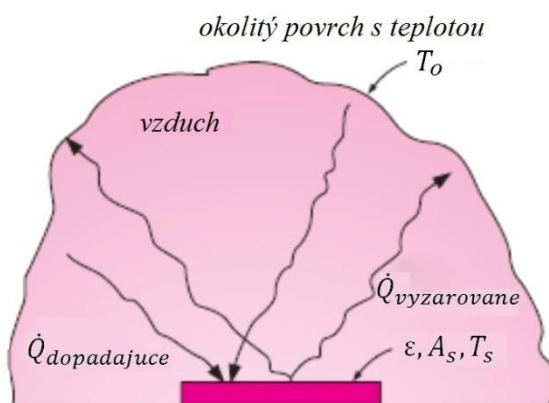
obrázku 1.16 daná rovnicou (1.26). Žiarenie, ktoré nie je pohltené povrchom telesa je odrazené.



Obr. 1.16. Absorpcia radiácie dopadajúcej na nepriehľadný povrch [4]

Rozdiel medzi radiáciou vyžiarenou povrchom a absorbovanou predstavuje čistý prenos tepla žiarením. Ak množstvo absorbovanej tepelnej energie je väčšie ako vyžiarenej, povrch telesa získava energiu žiarením. V opačnom prípade energiu radiáciou stráca.

Zložitejšia situácia je pri dvoch povrchoch, pretože prenos tepla radiáciou závisí od oboch povrchov, ich vzájomnej orientácie a od interakcie s médium, ktoré je medzi nimi, napr. vzduch (obr. 1.17).



Obr. 1.17. Prenos tepla radiáciou medzi dvoma povrchmi [4]

Ak vyžarovanie povrchu je ϵ , jeho plocha A_s , absolútna teplota T_s a teleso je úplne uzavreté iným oveľa väčším (alebo čiernym) povrchom s absolútnou teplotou T_o , pričom tieto povrchy sú oddelené plynnou fázou (napr. vzduch), ktorý neabsorbuje radiáciu, potom prenos tepla radiáciou medzi týmito dvoma povrchmi je daný rovnicou

$$\dot{Q}_{rad} = \epsilon \sigma A_s (T_s^4 - T_o^4) \quad (1.27)$$

V tomto špeciálnom prípade emisivita okolitého povrchu a plocha okolitého povrchu nemajú vplyv na celkový prenos tepla radiáciou.

Prenos tepla radiáciou na, alebo z povrchu obklopeného plynom, je podobný ako pri kondukcii alebo konvekcii. Treba zdôrazniť, že napriek skutočnosti, že plyn sa neohrieva z radiálneho prenosu tepla, ohrieva sa však od povrchov emitujúcich, resp. absorbujúcich teplo. V takto ohriatom plyne sa potom uplatňujú mechanizmy prenosu tepla prúdením a

vedením. Celkové množstvo tepla, ktoré sa preniesie z jedného povrchu na druhý, pozostáva z príspevkov prenosu tepla radiáciou, kondukciou a konvekciou. Pre zjednodušenie výpočtu sa používa kombinovaný koeficient prenosu tepla h_{kom} , ktorý zahrňuje všetky tieto spôsoby prenosu tepla.

Potom možno pre výpočet použiť vzťah

$$\dot{Q}_{celkove} = h_{kom} A_S (T_S - T_{\infty}) \quad (1.28)$$

Radiácia je často podobná kondukcii alebo voľnej konvekcie, ale zanedbateľná vo vzťahu k nútenej konvekcie. Preto je radiácia v nútenej konvekcie obyčajne zanedbateľná, obzvlášť pri nižších teplotách.

ZOZNAM SYMBOLOV

b	– parameter kriteriálnej rovnice	(1)
c	– špecifická tepelná kapacita látky	(J. kg ⁻¹ . K ⁻¹)
c_p	– špecifická tepelná kapacita pri konštantnom tlaku	(J. kg ⁻¹ K ⁻¹)
c_{pi}	– špecifická tepelná kapacita pri konštantnom tlaku i -teho prúdu	(J. kg ⁻¹ K ⁻¹)
g	– tiažové zrýchlenie	(m. s ⁻²)
h_{kom}	– kombinovaný koeficient prenosu tepla	(W. m ⁻² . K ⁻¹)
k	– úhrnný súčiniteľ prestupu tepla	(W. m ⁻² . K ⁻¹)
k_L	– lineárny súčiniteľ prestupu tepla	(W. m ⁻¹ . K ⁻¹)
l	– charakteristický rozmer	(m)
m	– hmotnosť látky	(kg)
\dot{m}	– hmotnostný tok	(kg. s ⁻¹)
n	– parameter kriteriálnej rovnice	(1)
w	– rýchlosť	(m. s ⁻¹)
w_{∞}	– rýchlosť prúdu v dostatočnej vzdialenosti od povrchu rúrky	(m. s ⁻¹)
\bar{w}	– stredná rýchlosť	(m. s ⁻¹)
A	– teplovýmenná plocha	(m ²)
A_S	– veľkosť radiačnej plochy	(m ²)
C	– parameter kriteriálnej rovnice	(1)
D	– priemer potrubia	(m)
D_1	– vnútorný priemer rúrky	(m)
D_2	– vonkajší priemer rúrky	(m)
D_v	– vonkajší priemer rúrky	(m)
Gr	– Grasshofovo číslo	(1)
L	– dĺžka potrubia, dĺžka rúrky výmenníka tepla	(m)
Nu	– Nusseltovo číslo	(1)
Pe	– Pecletovo číslo	(1)
Pr	– Prandtlovo číslo	(1)
Q	– množstvo tepla	(J)
Q_i	– množstvo tepla i -tého prúdu	(J)
\dot{Q}	– tepelný tok	(W)
$\dot{Q}_{celkove}$	– celkový tok tepla sálaním, prúdením a vedením	(W)
$\dot{Q}_{emit max}$	– maximálny tok tepla sálaním	(W)

\dot{Q}_{rad}	– prenos tepla radiáciou medzi dvomi povrchmi	(W)
Re	– Reynoldsovo číslo	(1)
T	– teplota	(K)
T_i	– teplota i -tej steny, teplota i -tého prúdu	(K)
T_s	– teplota povrchu dokonale čierneho telesa	(K)
T_o	– teplota povrchu obklopujúceho telesa	(K)
T_∞	– teplota okolia obklopujúceho telesa	(K)
V_i	– objem i -tého prúdu	(m ³)
α	– súčiniteľ prestupu tepla	(W. m ⁻² . K ⁻¹)
α	– pohltivosť	(1)
α_1	– súčiniteľ prestupu tepla z tekutiny na stenu	(W. m ⁻² . K ⁻¹)
α_2	– súčiniteľ prestupu tepla zo steny do tekutiny	(W. m ⁻² . K ⁻¹)
β	– súčiniteľ objemovej rozťažnosti	(K ⁻¹ .)
δ_i	– hrúbka i -tej steny	(m)
ε	– emisivita povrchu skutočného telesa	(1)
η	– dynamická viskozita	(Pa. s)
ν	– kinematická viskozita	(m ² . s ⁻¹)
λ	– tepelná vodivosť steny rúrky	(W. m ⁻¹ . K ⁻¹)
λ_i	– tepelná vodivosť i -tej steny	(W. m ⁻¹ . K ⁻¹)
ρ	– hustota	(kg. m ⁻³)
ρ_i	– hustota i -tého prúdu	(kg. m ⁻³)
σ	– Stefan – Boltzmanova konštanta	(W. m ⁻² . K ⁻⁴)
ΔT	– rozdiel teplôt medzi povrchom telesa a strednou teplotou okolia (hnacia sila)	(K)
ΔT_{ar}	– aritmetická teplotná diferencia	(K)
ΔT_{ln}	– logaritmickej teplotná diferencia	(K)
ΔT_s	– stredná teplotná diferencia	(K)
ΔT_1	– vyššia teplotná diferencia	(K)
ΔT_2	– nižšia teplotná diferencia	(K)