

9. Prednáška

Prestup tepla - prestup tepla prúdením (konvekcií)
- sálaním (radiací)

Prestup tepla prúdením (přenos tepla konvekci)

- Uplatňuje sa pri styku tekutiny so stenou
- Rýchlosť prestupu tepla je väčšia ako v nehybnej vrstve v dôsledku premiešavania
- Závisí od: **fyzikálnych vlastností tekutiny**
 - **geometrických rozmerov zariadenia**
 - **hydrodynamických podmienok v tekutine:**

Prestup tepla pri nútenom prúdení – vyvolaný pôsobením vonkajšej mechanickej sily (čerpadlom, ventilátorom, miešadlom...)

Prestup tepla pri voľnom (prirodzenom) prúdení – v dôsledku rôznych hustôt, gravitačnej sily...

Newtonov zákon

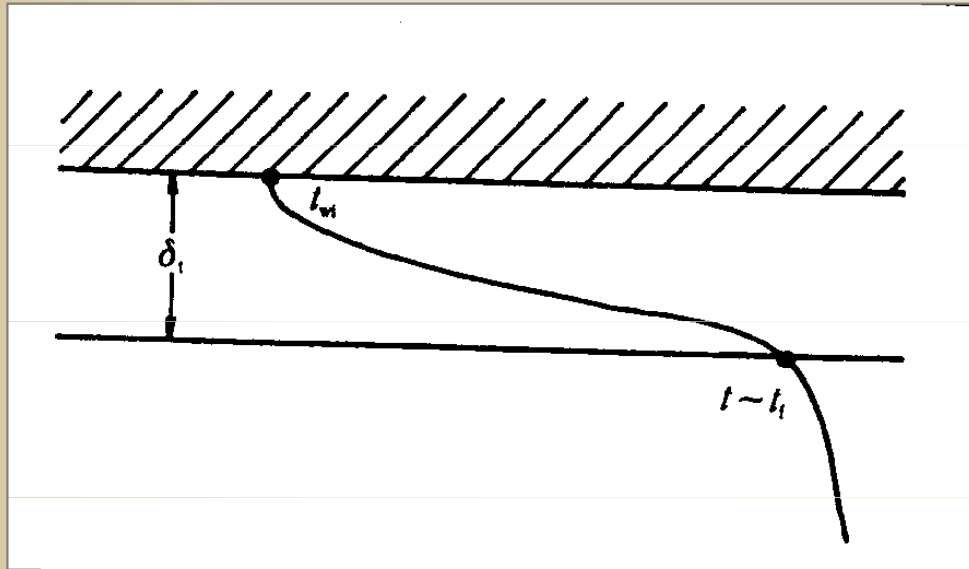
$$\dot{Q} = \alpha A (t_w - t_f)$$

α -súčiniteľ
prestupu tepla
prúdením

$$\dot{Q} = \frac{t_w - t_f}{\frac{1}{\alpha A}}$$

Tepelný odpor tekutiny

Prestup tepla prúdením – mechanizmus prestupu tepla



Stena

Laminárna vrstva (medzná vrstva),
hrúbka δ závisí od: w , teploty steny t_w a
teploty tekutiny t_f , (smeru toku tepla)

Turbulentné jadro tektiny

Predstava o prestupe tepla pri prúdení

V turbulentnom jadre tektiny je dokonalé miešanie, 0-vý teplotný rozdiel, 0-vý odpor

V medznej vrstve sa prestup tepla realizuje vedením – V NEJ je sústredený ODPOR

$$\alpha = \frac{\lambda}{\delta}$$

α - súčiniteľ prestupu tepla prúdením – nie je látkový parameter, vo veľkej miere závisí od w (turbulencia) a geometrie priestoru

Prestup tepla prúdením – kritériálne rovnice

$$\alpha = \alpha(\rho, c_p, \mu, \lambda, \beta, \Delta_{\text{vyp}}, H, P^*, t_w, t_f, w, \tau, l_1, l_2 \dots)$$

Kritériálne rovnice

$$Nu = Nu\left(Re, Pr, Gr, Gz, Ra, \dots, \frac{l_1}{l_2}, \frac{\mu}{\mu_w}, \frac{Pr}{Pr_w} \dots \right)$$

Nusseltovo číslo

$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda}$$

Fourierovo číslo

$$Fo = \frac{a \tau}{l^2} = \frac{\lambda \tau}{c_p \rho l^2}$$

Prandtlovo číslo

$$Pr = \frac{\mu c_p}{\lambda} = \frac{\nu}{a}$$

Reynoldsovo číslo

$$Re = \frac{l w \rho}{\mu}$$

Grashofovo číslo

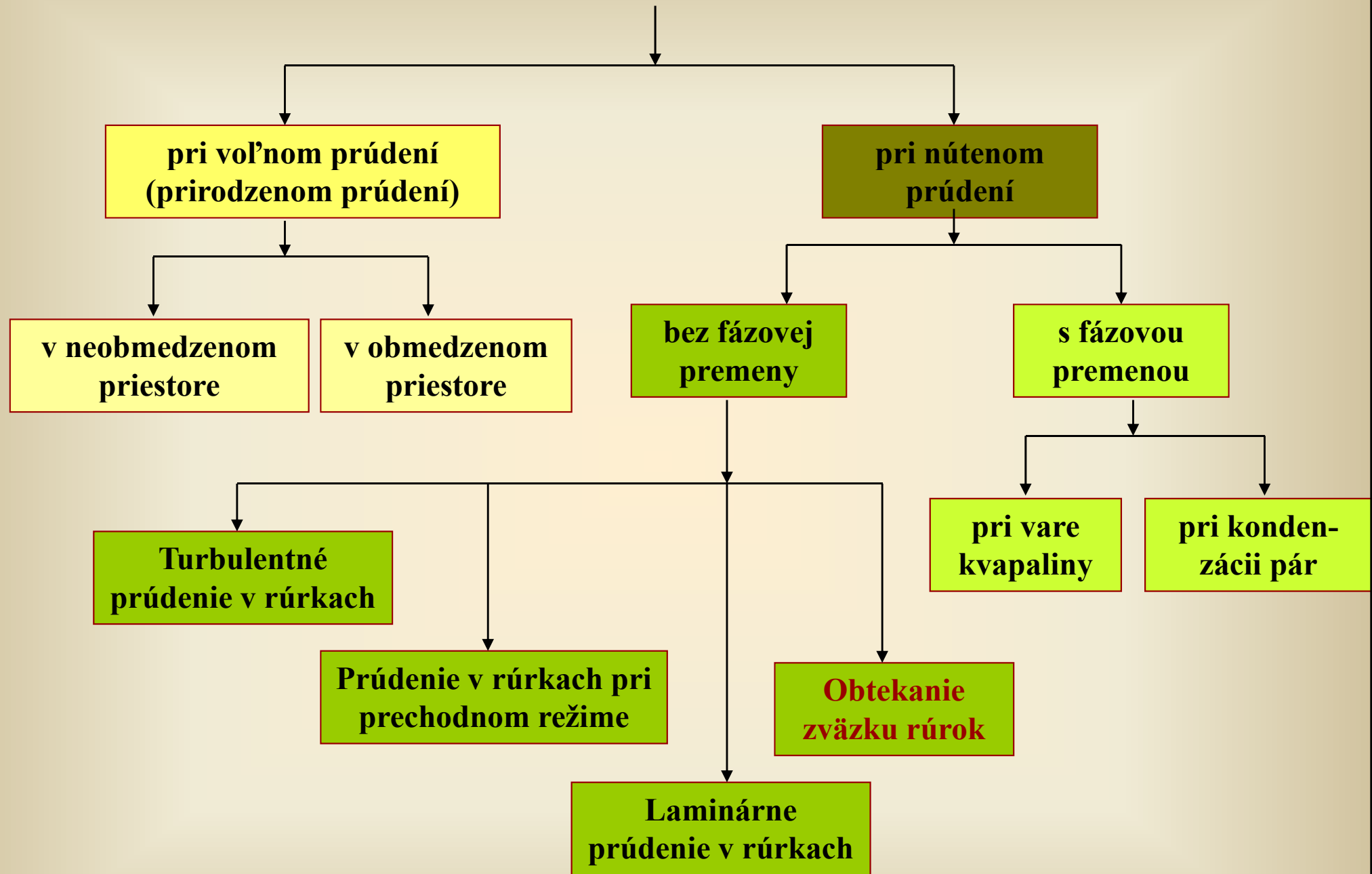
$$Gr = \frac{l^3 \rho^2 g \beta \Delta t}{\mu^2}$$

Charakteristický rozmer L, d ; **Určujúca teplota:**

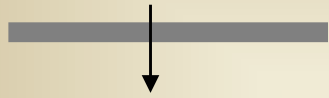
$$t_m = \frac{t_w + t_f}{2}$$

$$t_f = \frac{t_{f1} + t_{f2}}{2}$$

Prestup tepla prúdením – analýza prúdenia



Prestup tepla pri voľnom - prirodzenom prúde



$$t_w \neq t_f$$

V neobmedzenom priestore (ohrev miestností, ohrev tekutín v nádobách)

samovoľný pohyb tekutiny v dôsledku rozdielnej teploty
(↑ tlak pri stene)

$$Nu = Nu(Gr, Pr)$$

$$Nu = C(GrPr)^n$$

Určujúca teplota t_m ; charakteristický rozmer: d alebo L
Konštanty C a n závisia od súčinu $Gr.Pr$

V obmedzenom priestore (v úzke medzery):

$$q = \frac{\lambda_e}{\delta} (t_{w1} - t_{w2})$$

Fourierova rovnica, hnacia sila - rozdiel teplôt stien, δ - hrúbka medzery, λ_e - ekvivalentná tepelná vodivosť
korekcia ε_k závisí od súčinu ($Gr.Pr$);
určujúca teplota - aritmetický stred teplôt stien

$$\lambda_e = \varepsilon_k \lambda$$

Prestup tepla pri nútenom prúdeaní tekutín – vplyv rôznych faktorov

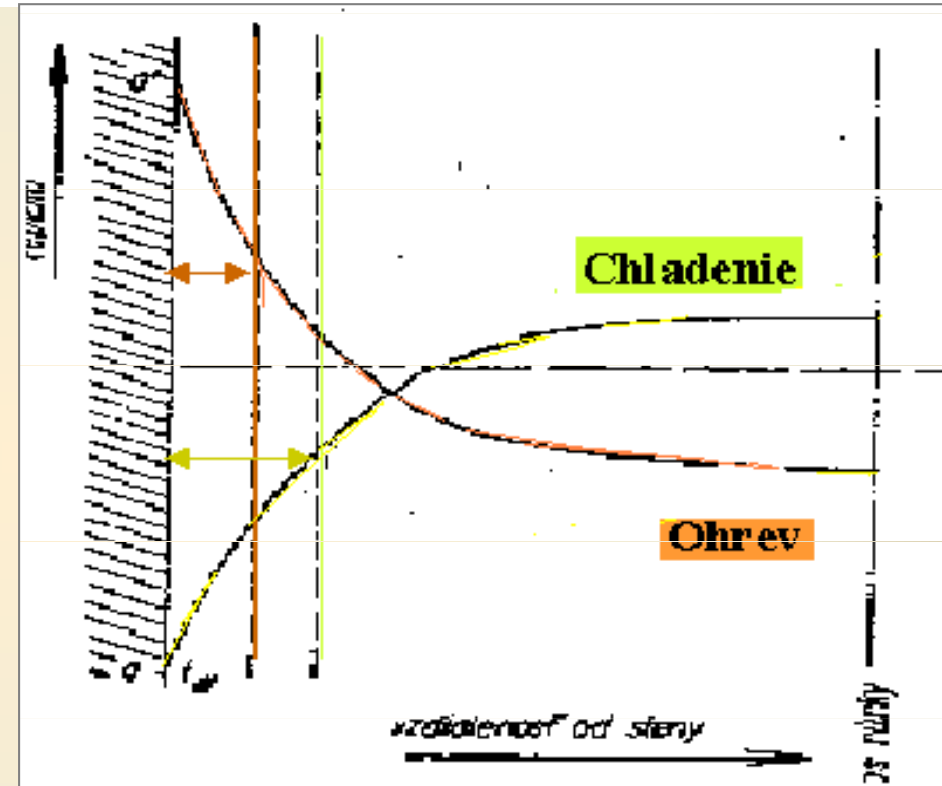
Vyvolaný je pôsobením vonkajšej mechanickej sily (čerpádlom, ventilátorom, miešadlom...)

•So vzrastajúcou rýchlosťou prúdiacej tekutiny klesá δ - hrúbka medznej vrstvy \Rightarrow znižuje sa vplyv **voľného prúdenia** na rýchlosť toku tepla (Re, Gr)

•Rozdielne hodnoty α pri ohreve tekutín a chladení tekutín - rôzna hrúbka medznej vrstvy $\delta \Rightarrow$ rozdielny odpor \Rightarrow rôzne α

\Rightarrow rôzne exponenty
v KR, alebo

$$\frac{\mu}{\mu_w} \quad \frac{Pr}{Pr_w}$$



•Vplyv rozvírenia tekutiny – korekcia na dĺžku rúrky (d/L) - prepočítavacie faktory; prepážky, zmena smeru tekutiny – zväčšenie hodnoty α

•Smer obtekania rúrky (rôzne δ) – korekcia ($\sin\phi$)

•Vplyv polohy potrubia: Ak sa vo zvislých rúrkach tekutina ohrieva a prúdi smerom hore – nižšie hodnoty Nu (α), smerom dole – vyššie Nu (α); (pri chladení naopak) - korekcie

Prestup tepla pri nútenom prúdeaní tekutín

Turbulentné prúdeanie v rúrkach

! Voľné prúdeanie nemá vplyv na rýchlosť toku tepla

$$Nu = Nu \left(Re, Pr, \frac{l_1}{l_2}, \frac{\mu}{\mu_w} \right)$$

t_w

$$Nu = 0.23 Re^{0.8} Pr^n$$

Ohrev: $n=0.4$

Chladienie: $n=0.3$

$Re > 10\,000; L/d > 50; \mu < 2 \cdot 10^{-3} \text{ Pas}$

Určujúca teplota – stredná teplota tekutiny

Pre viskóznejšie kvapaliny ($\mu > 2 \cdot 10^{-3} \text{ Pas}$):

$$Nu = 0.027 \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14} Re^{0.8} Pr^{0.3}$$

$Re > 10\,000; L/d > 50; \mu > 2 \cdot 10^{-3} \text{ Pas}$

Určujúca teplota – stredná teplota tekutiny

$$Nu = 0.116 (Re^{2/3} - 125) Pr^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14} \left[1 + \left(\frac{d}{L} \right)^{2/3} \right]$$

$2300 < Re < 10\,000; \mu > 2 \cdot 10^{-3} \text{ Pas}$

$L/d < 50$ (vyšia turbulencia)

UT – stredná teplota tekutiny

Prestup tepla pri nútenom prúdení

Laminárne prúdenie v rúrkach

Uplatňuje sa **aj voľné prúdenie a aj nútené prúdenie** (pri laminárnom prúdení teplo prešupuje vedením v smere kolmom na smer prúdenia) a to **súčasne**

$$Nu = Nu \left(Re, Pr, Gr, \frac{Pr}{Pr_w} \right)$$

$$Nu = 0.15 Re^{0.33} Pr^{0.43} Gr^{0.1} \left(\frac{Pr}{Pr_w} \right)^{0.25}$$

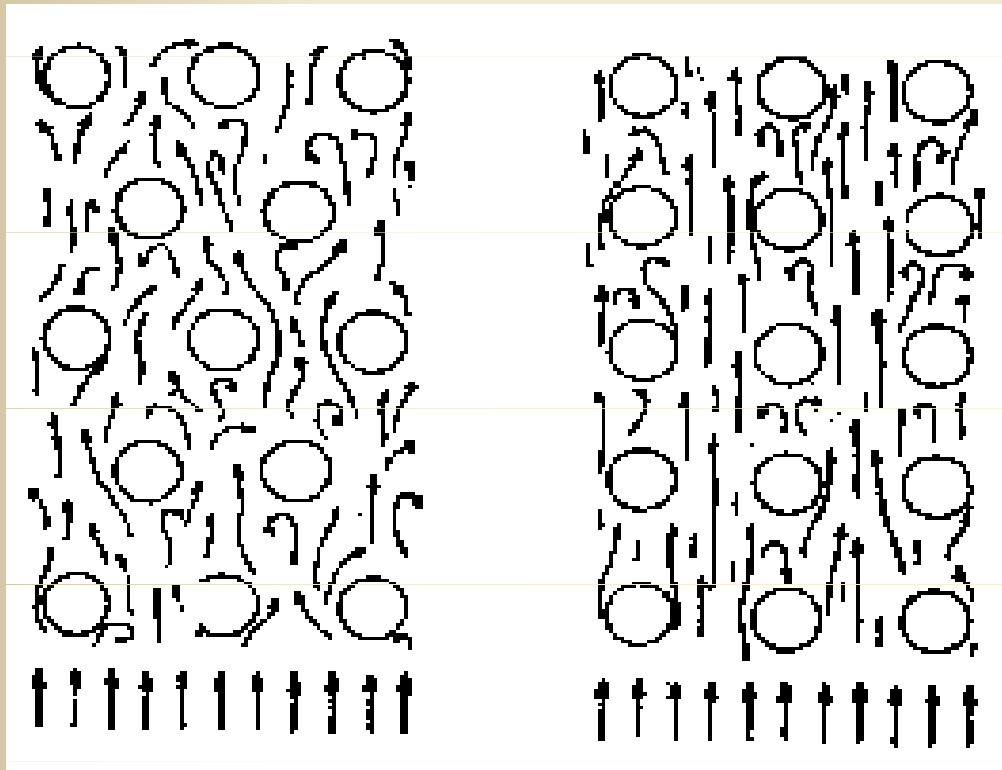
Určujúca teplota – stredná teplota tekutiny

t_w

$Re < 2300; l/d > 50$

Prestup tepla pri nútenom prúdení. Obtekanie zväzku rúrok

Kotlový výmenník tepla

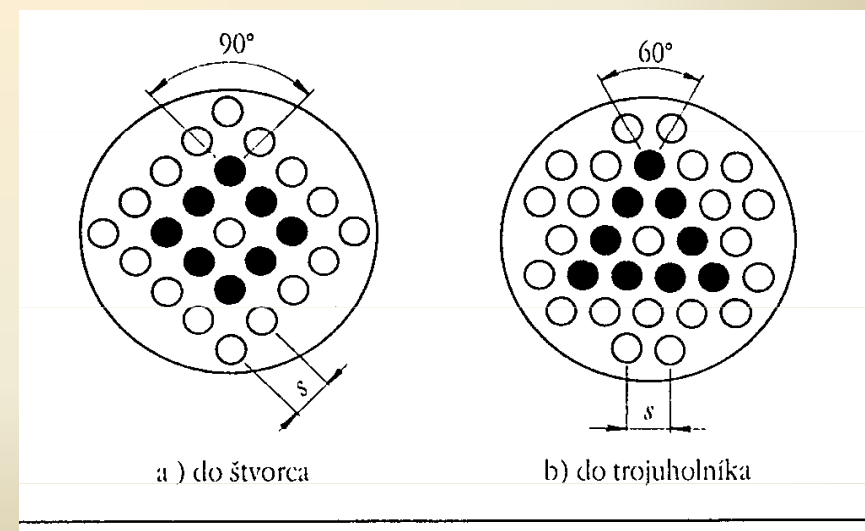


striedavé usporiadanie rúrok

usporiadanie rúrok za sebou

Intenzita vírenia je rozdielna v jednotlivých radoch:

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, (\alpha_4 \dots)$ – výpočet α_{str} pre celý zväzok rúrok



a) do štvorca

b) do trojuholníka

Prestup tepla pri kondenzácii pár

- Pri styku nasýtenej pary so studenou stenou
- Kondenzácia, prudké zníženie tlaku nasýtených pár pri stene (podtlak) \Rightarrow **Intenzívne jednosmerné prúdenie pár smerom k stene** (niekoľkonásobne vyššie ako turbulentný tok)

• Druhy kondenzácie:

blanová (filmová)

kvapková

Rýchlosť prestupu tepla závisí od hrúbky filmu:

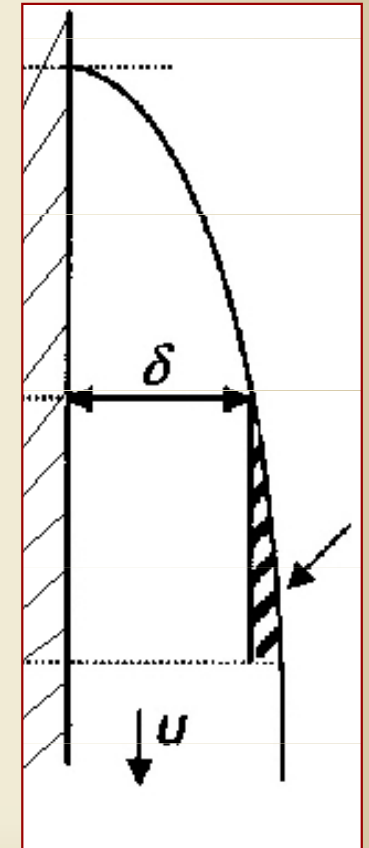
- Geometrický tvar povrchu
- Rýchlosti a smer toku pár
- Poloha kondenzačného povrchu (vodorovné a zvislé rúrky) - smer toku kondenzátu v gravitačnom poli

Prestup tepla je intenzívnejší (kondenzát nezmáča povrch steny)
 $\alpha = 10^5 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$

Rôzne vzťahy pre výpočet α pre kondenzáciu na **zvislých** a **vodorovných** stenách rúrky

- Ak kondenzácia na zväzku rúrok – ich vzájomné usporiadanie

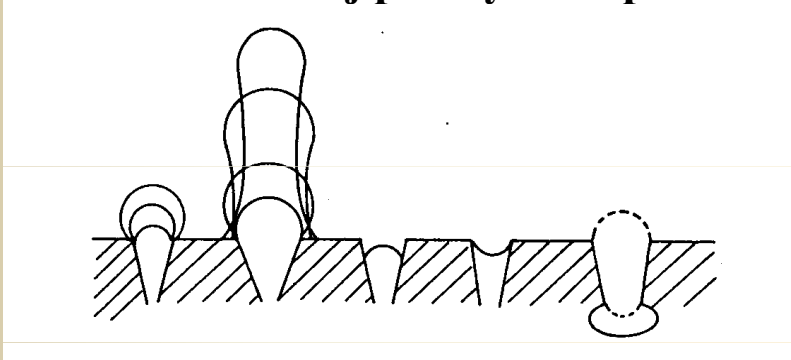
$\alpha = 10^3 - 10^4 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$



Prestup tepla pri vare kvapaliny

•Var kvapaliny – odparovanie z jej celého objemu, (vyrovnanie tlaku nasýtenej pary a vonkajšieh tlaku, stav rovnováhy kvapalina – para)

Kontakt ohrevnej plochy s kvapalinou:



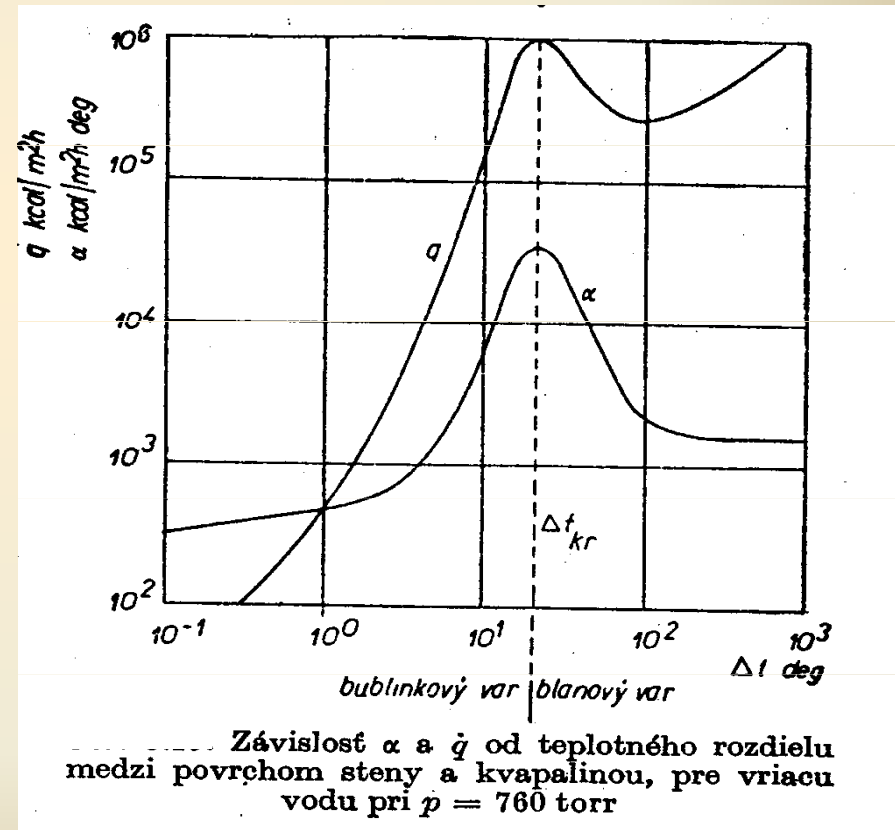
Intenzita premiešavania – počet bubliniek a rýchlosť ich postupu smerom nahor

? Vplyv – fyzikálne vlastnosti tekutiny a pary a **hustota tepelného toku cez výhrevnú plochu !**

⇒ Rôzne režimy varu →

$\Delta_{vyp} H, P^* \Delta t$ rozdiel medzi teplotou ohrevného povrchu a tekutiny, P

Vznikajúce pary majú rádovo menšiu špecifický objem a spôsobujú rýchlu cirkuláciu **(voľné prúdenie, ale omnoho účinnejšie)**



Blanový var je nežiadúci (prestup tepla iba vedením)!

V praxi sa udržiava vždy bublinový var!

Prestup tepla prúdením – porovnanie koeficientov prestupu tepla prúdením

Spôsob prúdenia tekutiny	Hodnoty α [$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$]
Volné prúdenie plynov	10^0
Volné prúdenie kvapalín	$10^1\text{-}10^2$
Nútené prúdenie plynov	10^1
Nútené prúdenie kvapalín	$10^2\text{-}10^3$
Var kvapalín	$10^3\text{-}10^4$
Blanová kondenzácia pár	$10^3\text{-}10^4$
Kvapková kondenzácia pár	10^5

Prestup tepla sálaním (radiací)

Každé teleso vyžaruje elektromagnetické žiarenie určitých vlnových dĺžok (0-∞)

! Infračervené žiarenie – žiarenie, ktoré pri dopade sa mení na tepelnú energiu
(0.8 až 400 μm)

Hustota toku tepla
(sálavého toku):

$$q = \frac{Q}{A}$$

Tepelný tok sálaním a tuhé teleso ?

časť sa môže pohltiť, časť odraziť, časť prejsť telesom

Absolutne čierne teleso: pohltí (vyžiarí) celý tepelný tok

$$q = \sigma T^4$$

Stefan – Boltzmannov zákon

$$\sigma = 5.670 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$$

$$q = C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4$$

$C_0 = 5.670 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ – koeficient sálenia
absolutne čierneho telesa

Absolutne biele teleso: odrazí celý tepelný tok

Prestup tepla sálaním (radiací)

Šedé teleso: časť sa pohltí, časť odrazí, časť prejde telesom

$$q = C \left(\frac{T}{100} \right)^4$$

$$C = \varepsilon C_0$$

Emisivita, žiarivosť
(stupeň čiernosti)

Tabelované údaje: závisí od materiálu ,
úpravy povrchu, (znečistenia povrchu...)

Prestup tepla sálaním medzi dvoma
telesami o teplote T_1 a T_2

$$\dot{Q} = \varphi_{1,2} \varepsilon_n A C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]$$

Uhlový
súčiniteľ

Koef. sálenia čierneho telesa

Plocha

Stupeň žiarivosti

Prestup tepla sálaním (radiací)

Pr.: Prestup tepla sálaním medzi dvoma dokonale rovnobežnými stenami

$$\dot{Q} = C_{1,2} A \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]$$

Úhrnný koeficient sálenia $C_{1,2}$

$$C_{1,2} = \frac{C_0}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}$$

Pr.: Prestup tepla sálaním medzi dvoma telesami v uzavretom priestore, menšie teleso má vypuklý tvar, plochu A_1 a je uzavreté väčším telesom o ploche A_2

$$\dot{Q} = C_{1,2} A_1 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]$$

Úhrnný koeficient sálenia $C_{1,2}$

$$C_{1,2} = \frac{C_0}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}$$

Vedľa sálania prebieha
aj voľné prúdenie
(? prevládajúci vplyv)

