

10.-11. Prednáška

Prechod tepla v ustálenom stave

Výmenníky tepla

Výmenníky tepla

- **Zariadenie** na odovzdávanie tepla z jedného média do druhého média

- ? Prevedené teplo $\dot{Q} (q_L)$.

Teplovýmenná plocha A

Dĺžka výmenníka tepla (rúrok) L

- Opis výmenníkov tepla:

Tepelné bilancie (prevedené teplo \dot{Q} , q_L , teplota prúdov...)

Rýchlostné rovnice prechodu tepla (rozmery výmenníka)

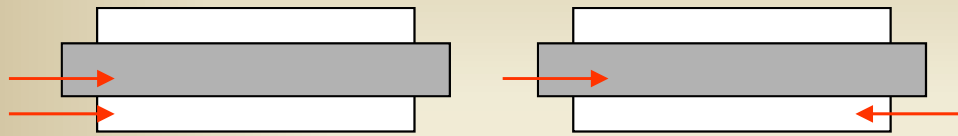
- Rôzne tvary rýchlostných rovníc prechodu tepla \Leftrightarrow pozdĺž dĺžky, alebo plochy výmenníka tepla **sa mení hnacia sila ($t_{f1}-t_{f2}$) a zároveň hodnota k (jednotlivé R)**

\Rightarrow Integrálne formy rovníc nemôžeme bežne použiť

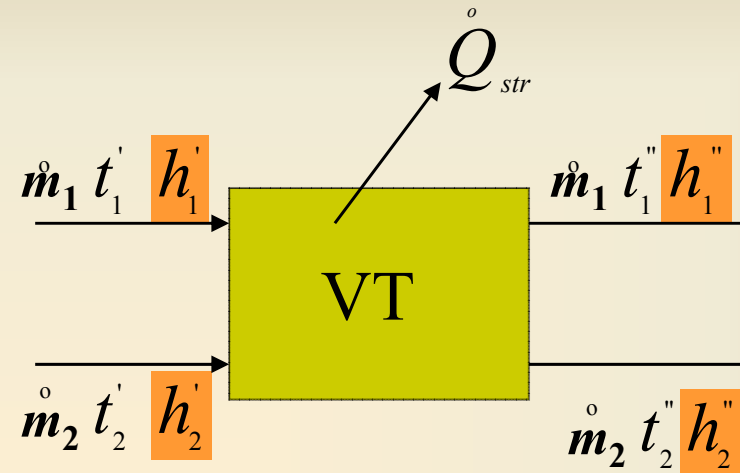
v uvedenej forme

$$\dot{Q} = kA(t_{f1} - t_{f2})$$

Výmenníky tepla – tepelné bilancie



Súprúdové a protiprúdové
usporiadanie prúdov



Všeobecný tvar tepelnej bilancie

$$\dot{m}_1 h_1' + \dot{m}_2 h_2' = \dot{m}_1 h_1'' + \dot{m}_2 h_2'' + \dot{Q}_{str}$$

$$\dot{Q}_{str} = 0$$

$$\dot{Q} = \dot{m}_1 (h_1' - h_1'') = \dot{m}_2 (h_2'' - h_2')$$

Ref. stav pre (horúcu) tekutinu
1: výstupný stav tekutiny – t_1'' ,
zodpovedajúci skup. stav

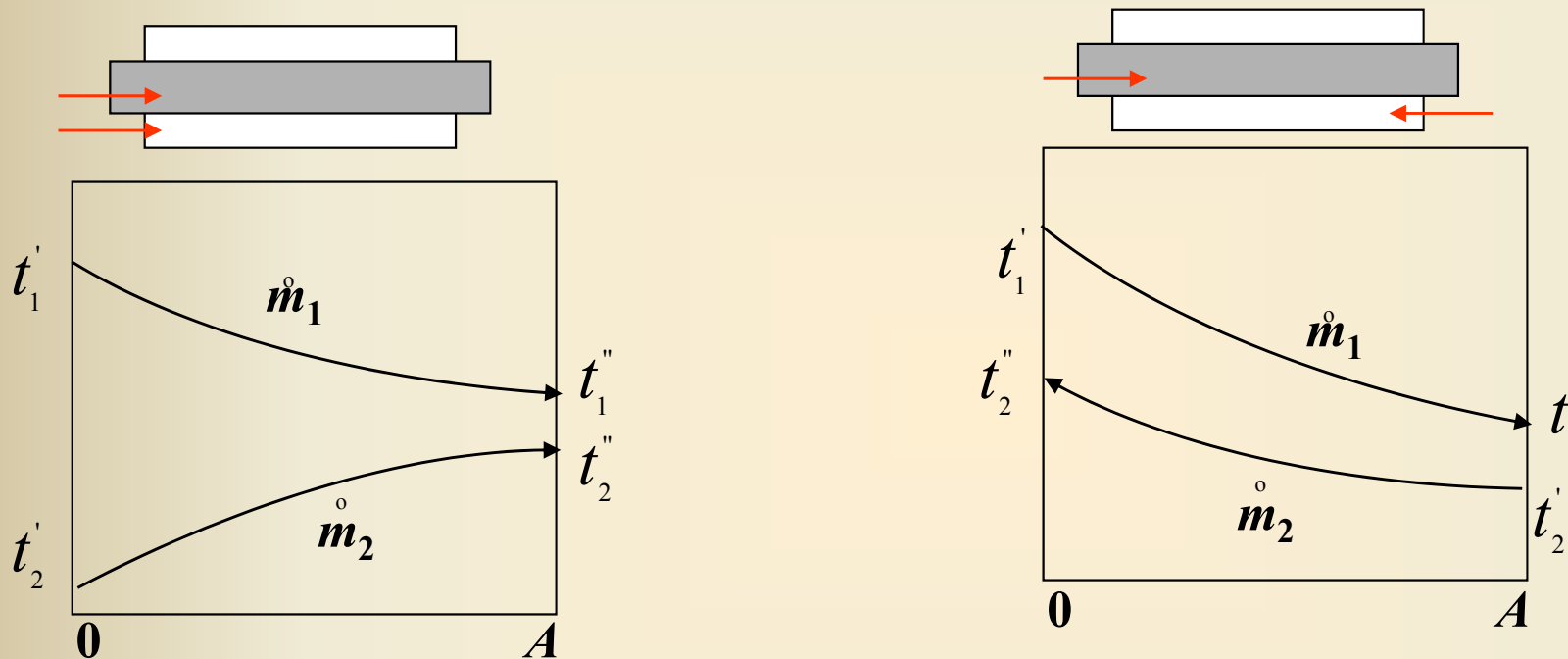
Ref. stav pre (studenú) tekutinu
2: vstupný stav tekutiny – t_2' ,
zodpovedajúci skup. stav

Výhody zadania ref. stavov – rozdiel entalpií v zátvorkách počítame priamo – ako
zmenu entalpie: z referenčného stavu → do daného stavu

Tepelné bilancie a teplotné profily výmenníkov tepla

$$\dot{Q} = \dot{m}_1 (h_1' - h_1'') = \dot{m}_2 (h_2'' - h_2')$$

Príklad 1.: Horúca tekutina (1) sa ochladzuje; studená tekutina (2) sa ohrieva



Výpočet zmeny entalpií: z referenčného stavu → do daného stavu

$$t_1''(l) \rightarrow t_1'(l)$$

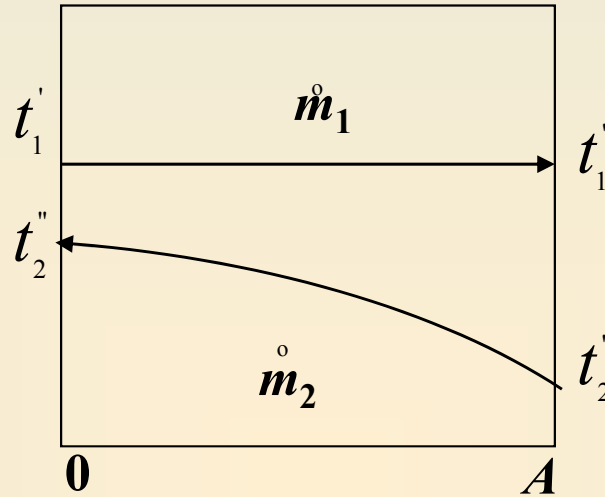
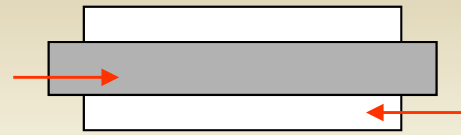
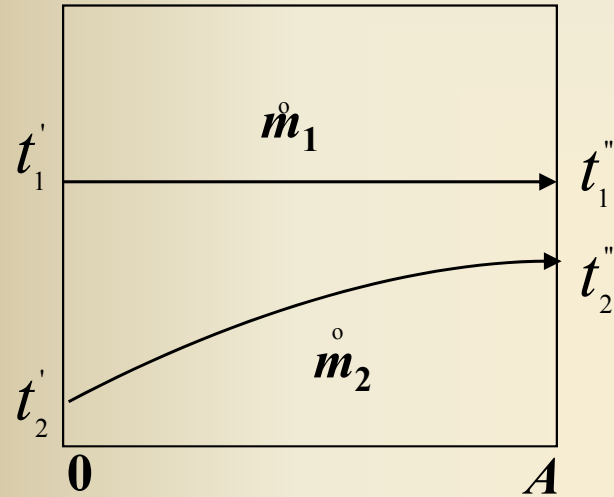
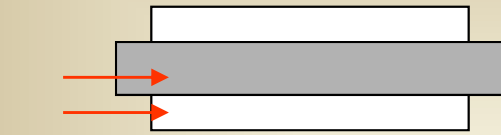
$$(h_1' - h_1'') = c_{P1} (t_1' - t_1'')$$

$$t_2'(l) \rightarrow t_2''(l)$$

$$(h_2'' - h_2') = c_{P2} (t_2'' - t_2')$$

$$\dot{Q} = \dot{m}_1 c_{P1} (t_1' - t_1'') = \dot{m}_2 c_{P2} (t_2'' - t_2')$$

Príklad 2.: Nasýtená para (1) kondenzuje pri t_v ; studená tekutina (2) sa ohrieva



$$\dot{Q} = \dot{m}_1 (h_1' - h_1'') = \dot{m}_2 (h_2'' - h_2')$$

!!! Zmena skupenského stavu
 $[T, P] \Rightarrow t_1'' = t_1' = t_{v1}$

Výpočet zmeny entalpií: z referenčného stavu \rightarrow do daného stavu

$$t_{v1} (l) \rightarrow t_{v1} (g)$$

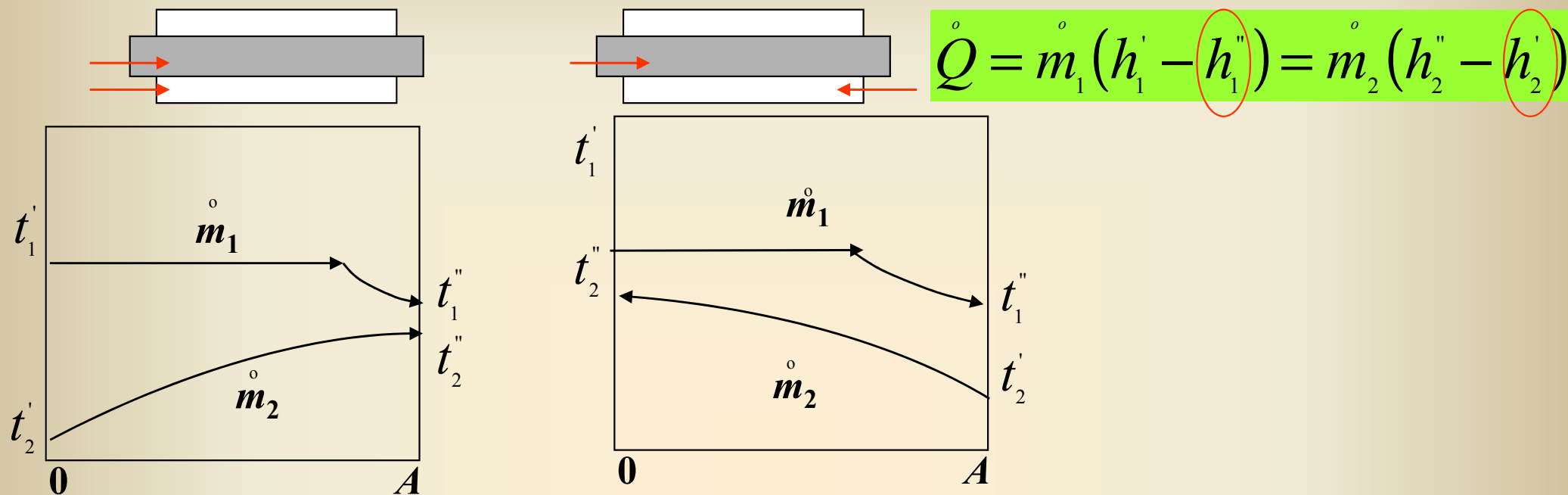
$$(h_1' - h_1'') = \Delta_{\text{vyp}} h_{t_{v1}}$$

$$t_2' (l) \rightarrow t_2'' (l)$$

$$(h_2'' - h_2') = c_{P2} (t_2'' - t_2')$$

$$\dot{Q} = \dot{m}_1 \Delta_{\text{vyp}} h_{t_{v1}} = \dot{m}_2 c_{P2} (t_2'' - t_2')$$

Príklad 3.: Nasýtená para skondenzuje pri t_v , vriaca kvapalina sa ochladí pod teplotu varu – na t_1'' ; studená tekutina (2) sa ohrieva



Výpočet zmeny entalpií: z referenčného stavu → do daného stavu

$$t_1'' (l) \rightarrow t_{v1} (l) \rightarrow t_{v1} (g)$$

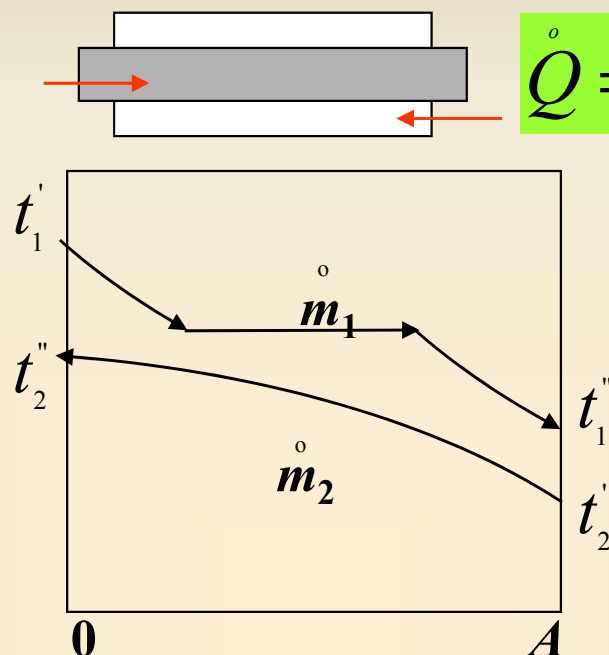
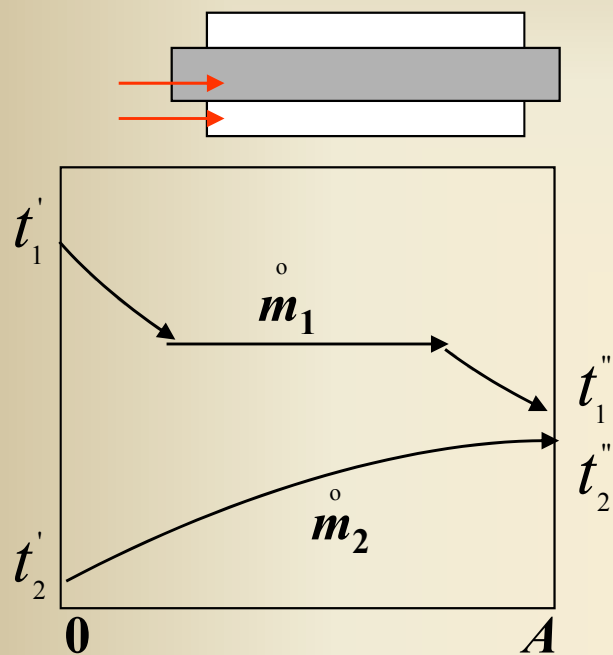
$$t_2' (l) \rightarrow t_2'' (l)$$

$$(h_1' - h_1'') = \left[c_{P1}^l (t_{v1} - t_1'') + \Delta_{vyp} h_{t_{v1}} \right]$$

$$(h_2'' - h_2') = c_{P2} (t_2'' - t_2')$$

$$\dot{Q} = \dot{m}_1 \left[\Delta_{vyp} h_{t_{v1}} + c_{P1}^l (t_{v1} - t_1'') \right] = \dot{m}_2 c_{P2} (t_2'' - t_2')$$

Príklad 4.: Prehriata para (1) sa ochladí na t_v , nasýtená para skondenzuje pri t_v , vriaca kvapalina sa ochladí pod teplotu varu – na t_1'' ; studená tekutina (2) sa ohrieva



$$\dot{Q} = \dot{m}_1 (h_1' - h_1'') = \dot{m}_2 (h_2'' - h_2')$$

Výpočet zmeny entalpií: z referenčného stavu → do daného stavu

$$t_1'' (l) \rightarrow t_{v1} (l) \rightarrow t_{v1} (g) \rightarrow t_1' (g)$$

$$(h_1' - h_1'') = \left[c_{P1}^l (t_{v1} - t_1'') + \Delta_{vyp} h_{t_{v1}} + c_{P1}^g (t_1' - t_{v1}) \right]$$

$$t_2' (l) \rightarrow t_2'' (l)$$

$$(h_2'' - h_2') = c_{P2} (t_2'' - t_2')$$

$$\dot{Q} = \dot{m}_1 \left[c_{P1}^g (t_1' - t_{v1}) + \Delta_{vyp} h_{t_{v1}} + c_{P1}^l (t_{v1} - t_1'') \right] = \dot{m}_2 c_{P2} (t_2'' - t_2')$$

Výmenníky tepla – rychlostné rovnice prechodu tepla

$$d\dot{Q} = k\Delta t dA$$

!!! integrácia výrazu

Zmena hnacej sily - (Δt)
pozdĺž dĺžky výmenníka
tepla

Zmena úhrnného koeficienta k
s teplotou (so zmenou teplôt
pozdĺž dĺžky výmenníka tepla

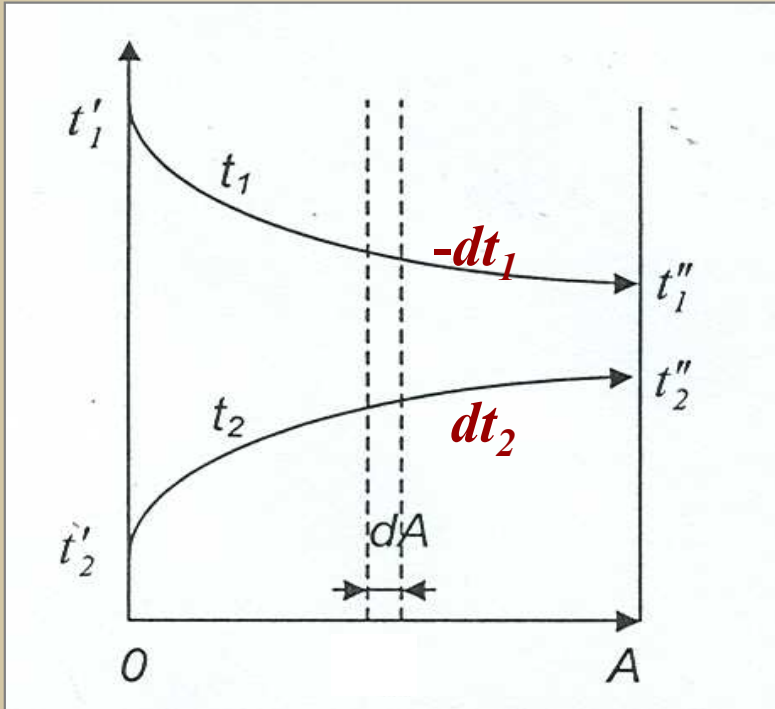
! Integrácia rovnice podľa veľkosti priebehu zmeny k s teplotou

Zmena úhrnného koeficienta s teplotou:

- $k = \text{konšt.}$, nemení sa, alebo sa mení len nepatrne
- $k = f(t)$, pričom k sa mení lineárne
- $k = f(t)$, pričom k sa mení nelineárne

$$\dot{Q} = kA\Delta t_{ls}$$

A. Výpočet plochy povrchu výmenníka tepla pri $k=\text{konšt.}$, súprudové usporiadanie



Entalpická bilancia pre diferenciálny úsek výmenníka dA

$$d\overset{\circ}{Q} = -\overset{\circ}{m}_1 c_{P1} dt_1 = \overset{\circ}{m}_2 c_{P2} dt_2$$

$$d\overset{\circ}{Q} = -\overset{\circ}{C}_1 dt_1 = \overset{\circ}{C}_2 dt_2$$

Rýchlostná rovnica pre diferenciálny úsek výmenníka dA

$$d\overset{\circ}{Q} = k\Delta t dA$$

$$-dt_1 = \frac{k dA \Delta t}{\overset{\circ}{C}_1}$$

$$dt_2 = \frac{k dA \Delta t}{\overset{\circ}{C}_2}$$

$$-(dt_1 - dt_2) = \frac{k dA \Delta t}{\overset{\circ}{C}_1} + \frac{k dA \Delta t}{\overset{\circ}{C}_2}$$

$$d\Delta t$$

Lokálna hnacia sila

A. Pokračovanie (k =konšt., súprudové usporiadanie)

$$-\frac{d\Delta t}{\Delta t} = k \left(\frac{1}{\dot{C}_1} + \frac{1}{\dot{C}_2} \right) dA$$

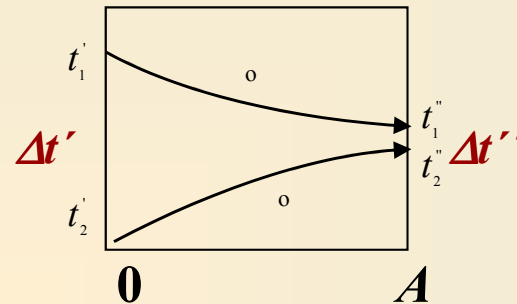
$$\dot{C}_1 = \frac{\dot{Q}}{t_1' - t_1''} = \dot{m}_1 c_{p1}$$

$$\dot{C}_2 = \frac{\dot{Q}}{t_2'' - t_2'} = \dot{m}_2 c_{p2}$$

Integrujeme v hraniciach:

Hnacej sily: $\Delta t' \rightarrow \Delta t''$

Plochy: $0 \rightarrow A$



$$\dot{Q} = kA \frac{(t_1' - t_2') - (t_1'' - t_2'')}{\ln \frac{(t_1' - t_2')}{(t_1'' - t_2'')}}$$

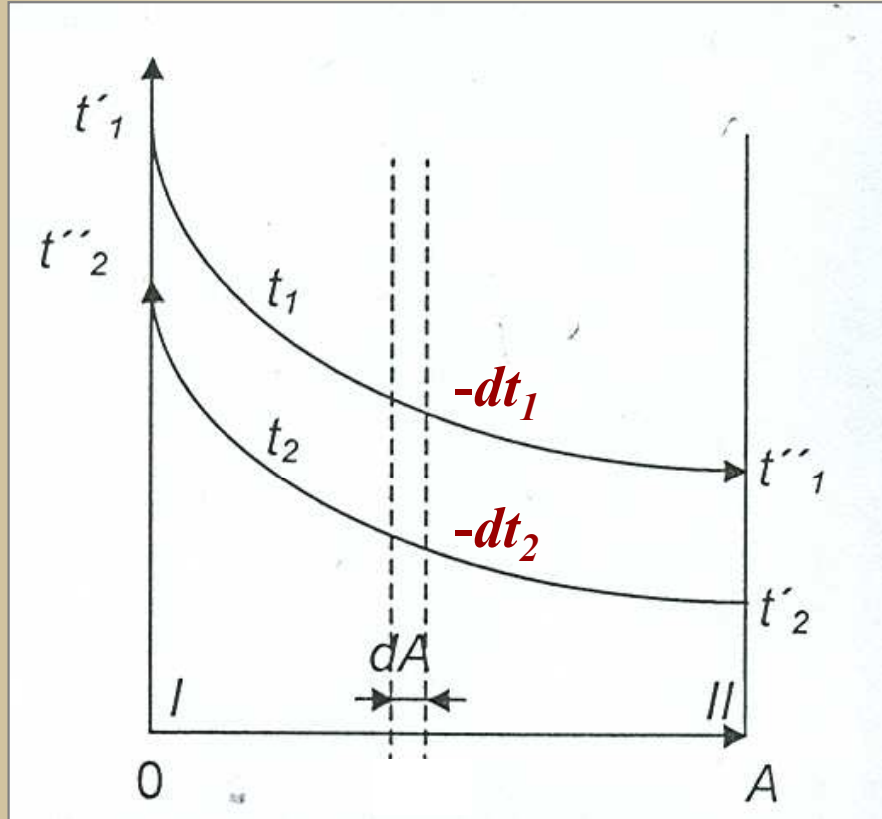
$$\dot{Q} = kA \frac{\Delta t' - \Delta t''}{\ln \frac{\Delta t'}{\Delta t''}}$$

$$\dot{Q} = kA \Delta t_{ls}$$

$$A = \frac{\dot{Q}}{k \Delta t_{ls}}$$

Logaritmický stred hnacej sily

A. Výpočet plochy povrchu výmenníka tepla pri $k=\text{konšt.}$, protiprúdové usporiadanie



Entalpická bilancia pre diferenciálny úsek výmenníka dA a rýchlostná rovnica prechodu tepla

$$d\dot{Q} = -\dot{C}_1 dt_1 = -\dot{C}_2 dt_2 \quad d\dot{Q} = k\Delta t dA$$

$$-(dt_1 + dt_2) = \frac{k dA \Delta t}{\dot{C}_1} + \frac{k dA \Delta t}{\dot{C}_2}$$

$$d\Delta t$$

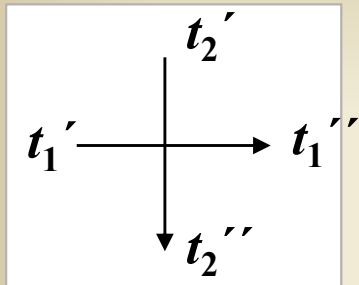
$$\dot{Q} = kA \frac{(t'_1 - t''_2) - (t''_1 - t'_2)}{\ln \frac{(t'_1 - t''_2)}{(t''_1 - t'_2)}}$$

$$\dot{Q} = kA \frac{\Delta t' - \Delta t''}{\ln \frac{\Delta t'}{\Delta t''}}$$

$$\dot{Q} = kA \Delta t_{ls}$$

$$A = \frac{\dot{Q}}{k \Delta t_{ls}}$$

A. Výpočet plochy povrchu výmenníka tepla pri $k=\text{konšt.}$, krížové a zmiešané usporiadanie prúdov



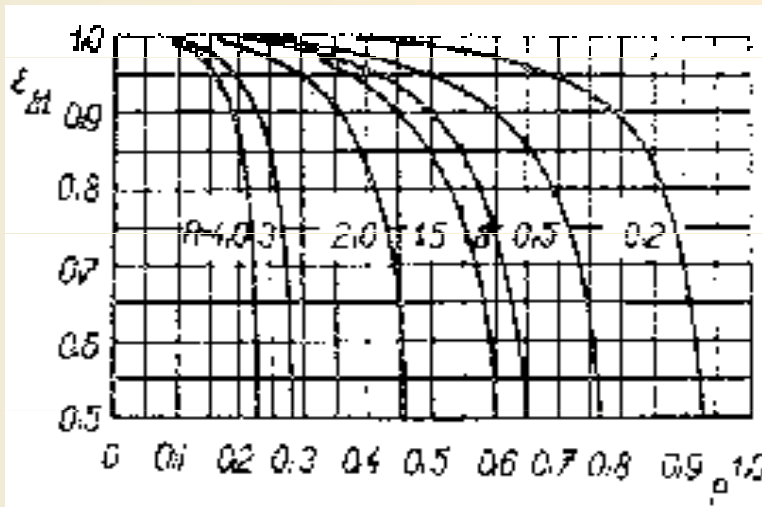
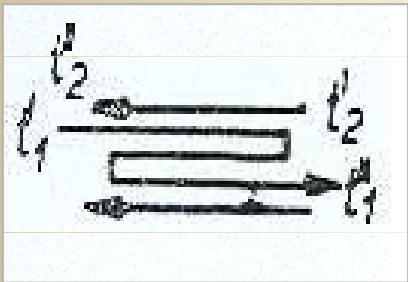
$$\dot{Q} = kA\Delta t_s$$

$$\Delta t_s = \varepsilon_{\Delta t} (\Delta t_{ls})$$

Korekcia
pre Δt_{ls}

Δt_{ls} pre protiprúdové
usporiadanie

$$\varepsilon_{\Delta t} = f(P, R)$$



Zmiešané usporiadanie prúdov

$$P = \frac{\Delta t_2}{\Delta t_{\max}}$$

$$R = \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}$$

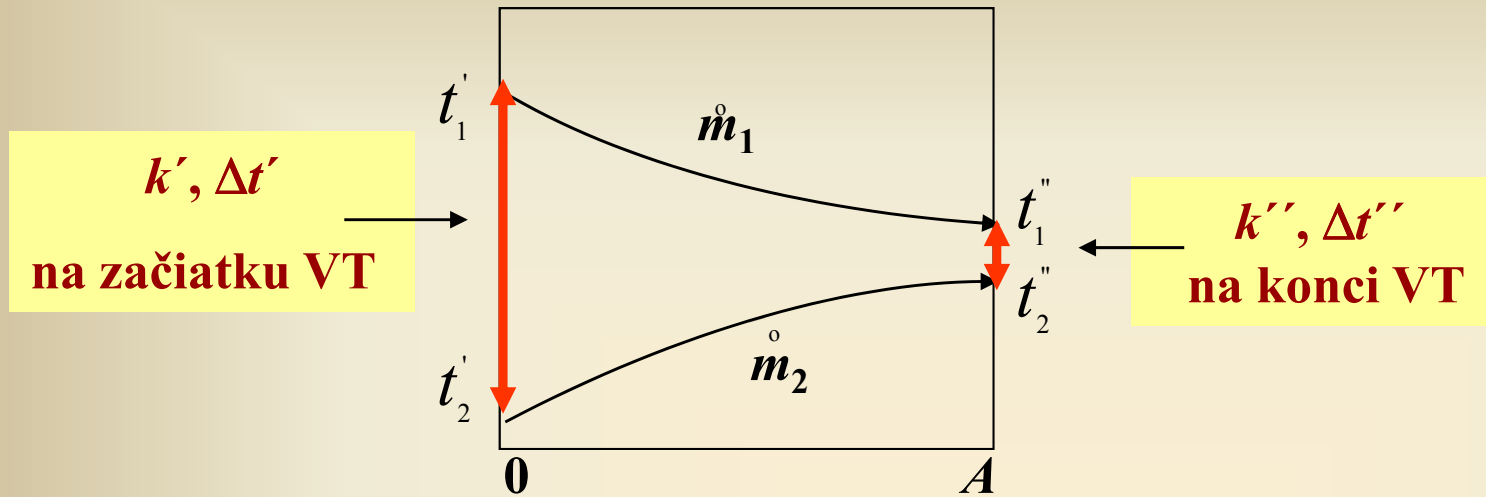
Účinnosť
oteplenia
chladiva

Pomer tepelných
kapacít prúdov

$$(t_1' - t_2')$$

Pre tie isté okrajové podmienky je Δt_{ls} : **najväčšie** v protiprúdovom výmenníku, **najmenšie** v súprúdovom výmenníku, ostatné usporiadania sú **medzi** týmito hodnotami $0 < \Delta t_{ls} < 1 \Rightarrow$ požiadavka na plochu výmenníka tepla

B. Výpočet plochy povrchu výmenníka tepla ak k sa s teplotou mení **lineárne**



$$\dot{Q} = A \frac{k' \Delta t'' - k'' \Delta t'}{\ln \frac{k' \Delta t''}{k'' \Delta t'}}$$

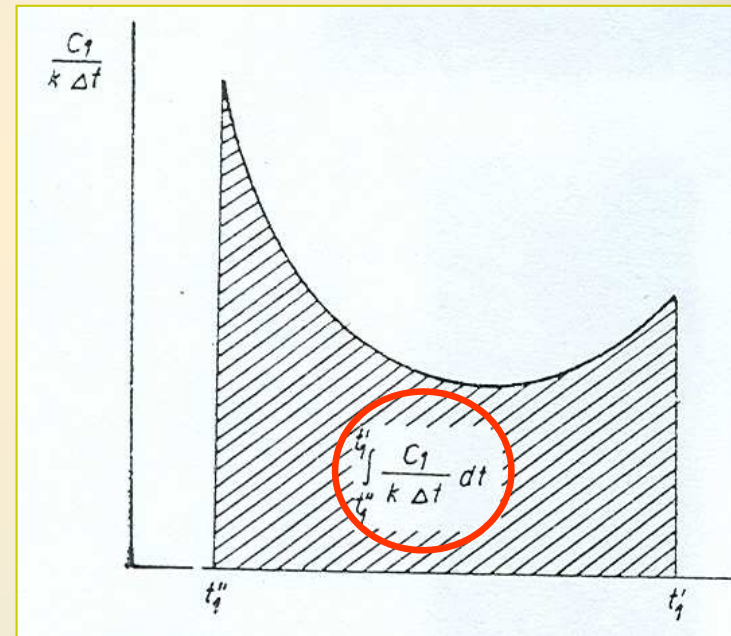
Vzťah možno uplatniť i v prípade, ak závislosť $k=f(t)$ možno rozdeliť na niekoľko lineárnych úsekov

C. Výpočet plochy povrchu výmenníka tepla ak

k sa s teplotou mení **nelineárne**

$$A = \int_{t_1''}^{t_1'} \frac{\overset{\circ}{C}_1 dt_1}{k \Delta t} = \int_{t_2'}^{t_2''} \frac{\overset{\circ}{C}_2 dt_2}{k \Delta t}$$

Integrál sa rieši numericky,
alebo graficky



Faktor znečistenia

Tvorba usadenín na teplovýmenných povrchoch výmenníkov tepla v priebehu prevádzky \Rightarrow **zväčšenie tepelného odporu**

Hrúbka vrstvy usadenín závisí od: doba prevádzky, rýchlosti prúdenia médií a ich teplôt, drsnosti povrchu teplovýmenných plôch, zloženia médií (tvrdosť vody...)

Úhrnný koeficient prechodu tepla pre znečistené plochy

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + r_{f1} + \frac{\delta}{\lambda} + r_{f2} + \frac{1}{\alpha_2}}$$

Faktor znečistenia
($10^{-4} \text{ m}^2\text{KW}^{-1}$)

Druh vody	Teplota <50°C w <1 ms ⁻¹	Teplota >50 °C w <1 ms ⁻¹
Studničná	0.0002	0.0004
Tvrdá	0.0006	0.001
Deionizovaná	0.0001	0.0001
Mäkčená kot.	0.0002	0.0002

Priemyselné tepelné zariadenia

DELENIE výmenníkov tepla z rôznych pohľadov:

- **Rekuperačné** (prestup tepla medzi médiami cez stenu VT – súprúdové,...)

a regeneračné (ohrievaná a chladená tekutina je striedavo v kontakte s jednou a tou istou plochou (periodická výmena tepla))

Jednofázové alebo dvojfázové prúdenie médií

- **Podľa prevedenia (geometrie)** – trúbkové, doskové...

- **Podľa účelu** – ohrievače, chladiče, kondenzátory, varáky a odparovače

ZÁSADY pri výbere výmenníkov tepla

1. **Vplyv znečistenia tekutín** - zabezpečiť ľahké čistenie stien

(prúdenie v rúrkach $d > 20$ mm; ak v medzirúrkovom priestore – VT ľahko rozoberateľný;
! zakrivené plochy)

ZÁSADY pri výbere výmenníkov tepla - pokračovanie

2. Vplyv cudzích plynov - vypúšťanie a odsávanie nekondenzovateľných plynov odvzdušňovacími ventilmi

V kondenzátoroch – obsah nekondenzovateľných plynov v parách zhoršuje prestup tepla. Napr. prítomnosť 1% vzduchu vo vodnej pare spôsobí pokles hodnoty α o 60 %.

V kvapalinových výmenníkoch – tvorba vzduchových vankúšov, ! zabránenie vzniku mŕtvych priestorov...

3. Pri dvojfázových tekutinách – média potrebujú väčší priestor

Pri kondenzácii (odparení) sa výrazne mení objem tekutiny (objem pary : objem kvapaliny = 1000 : 1) \Rightarrow usporiadanie prúdov pri kondenzácii pár (kotlové výmenníky tepla)..

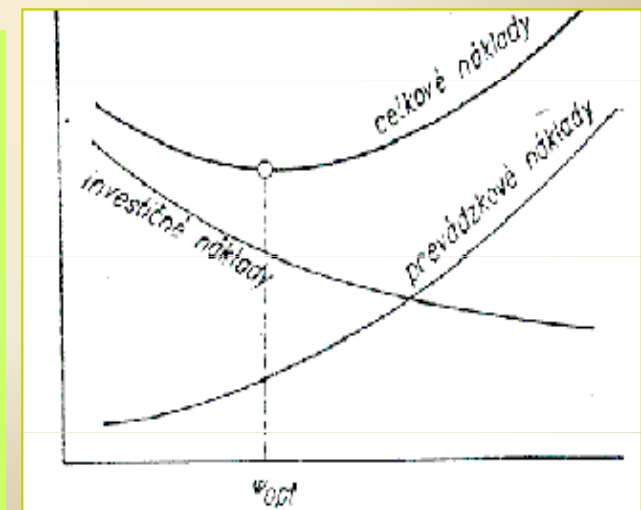
4. Korozívnosť – výber vhodného materiálu (nehrdzavejúca oceľ)

5. Voľba optimálnej rýchlosti tekutín – ekonomická bilancia

znížením rýchlosti tekutín sa znižuje aj $k \Rightarrow$ potrebná väčšia teplovýmenná plocha

zväčšením rýchlosti oboch tekutín $\Rightarrow \alpha_1, \alpha_2$ sa zväčšia, zároveň aj k , ale rastú prevádzkové náklady (čerpadlo, energie..)

Rýchlosti plynov: $w=8-30 \text{ ms}^{-1}$; kvapalín $w=0.2-1.5 \text{ ms}^{-1}$



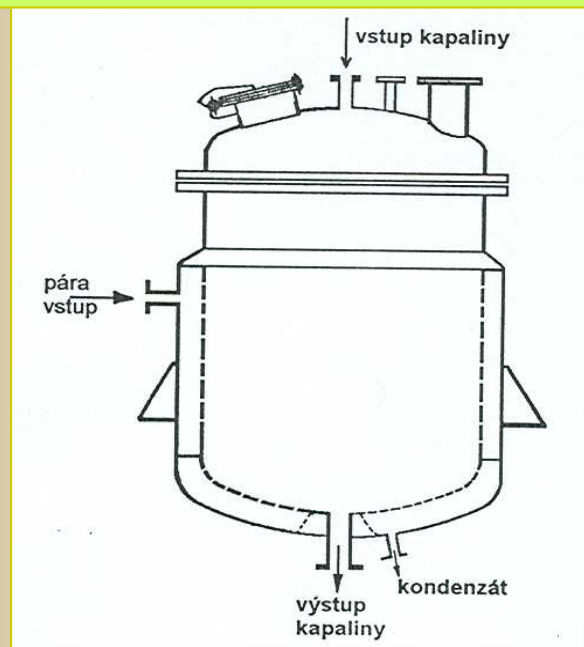
ZÁSADY pri výbere výmenníkov tepla

6. Vplyv tlaku – nároky na konštrukciu

Hrúbka stien súvisí okrem tlaku aj s priemerom rúrok \Rightarrow tekutina s vyšším tlakom bude prúdiť rúrkami, s nižším tlakom v medzirúrkovom priestore

Kotlové výmenníky (ohrev kvapalín v zásobníkoch)

Plášťový kotlový výmenník

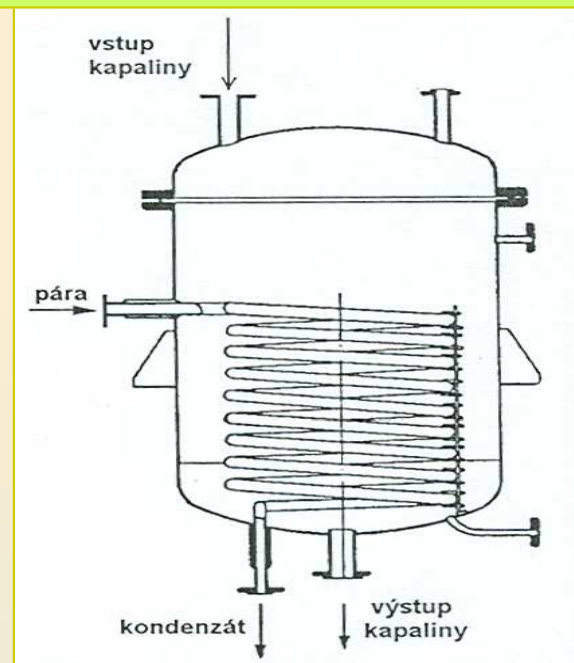


Max. $P=7$ at ($D=2$ m, $\delta=11$ mm)

Výhody:

Lahké čistenie, miešanie tekutiny

Kotlový výmenník s ponorným hadom



Výhody:

Vysokotlaké teplonosné média, ľahká údržba, vhodné aj pre gresívne kvapaliny..

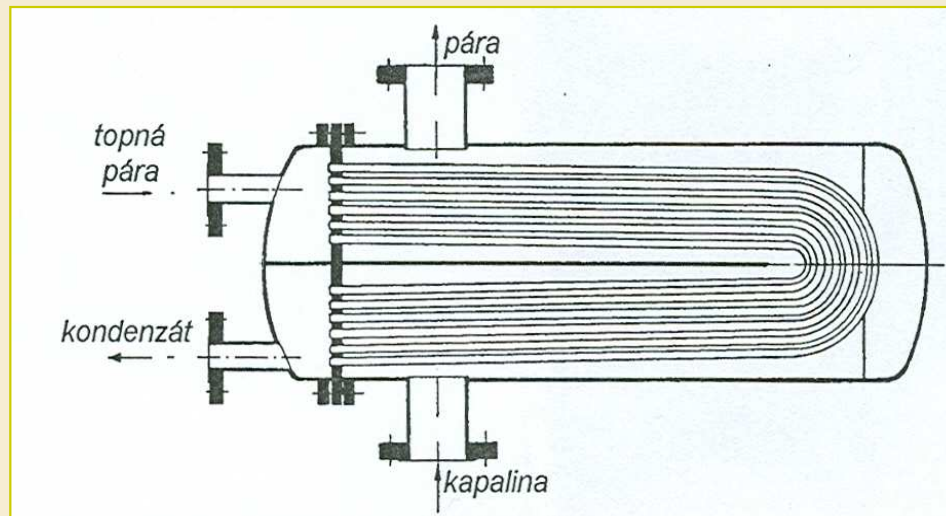
Nevýhody:

Ťažké čistenie; v prípade kondenzujúcich médií kratšie hady

ZÁSADY pri výbere výmenníkov tepla

7. Vplyv teploty – dilatácie rôznych častí výmenníka tepla, pnutie a možné deformácie

Správna voľba konštrukčného materiálu (ocel' do 350 °C); Konštrukčné riešenia – U rúrky (obr.), výmenníky s plávajúcou hlavou ...



Ležatý dvojchodový výmenník tepla so sústavou U rúrok

8. Vplyv rôznych hodnôt α : - najmenšie α obmedzuje celý proces

snaha vyrovnať hodnoty – zmenou rýchlosti, umiestnením prepážok,.. alebo zväčšením povrchu na strane menšej hodnoty α - rebrovaním

Teplonosné látky

Spaliny- Pre ohrev tekutín nad 300 °C

Nevýhody: Možnosť miestneho prehriatia, rozklad látok, tvorba usadenín; nízke α ; ťažká regulácia teploty; vyššie nároky na bezpečnosť práce; používajú sa len na krátke vzdialenosti.

Nasýtená vodná para

Výhody: Vysoké α , vysoká výkonnosť 90 % ($\Delta_{vyp}H$) a malá spotreba média. Nevýhody: Vysoký prevádzkový tlak: 2 at – 120 °C, 5 at – 150 °C, 16 at – 200 °C, 226.5 at – kritická teplota 374 °C.

Voda – ohrev do 100 °C . Výhody: vysoké c_p ; nevýhody: pre vyššie teploty vyšší tlak.

Eutektické zmesi – dobré teplonosné vlastnosti (c_p , $\Delta_{vyp}H$). Pr. „dowtherm“ - zmes difenylu a difenyl oxidu, pre teploty 150 – 370 °C . Nevýhoda: tuhne pri 13 °C, ľahko presakuje cez zvary.

Minerálne oleje - do 250 °C . Nevýhody: vysoká μ , nachylnosť na tvorbu usadenín.

Roztavené zmesi solí – pr. zmes NaNO_2 , NaNO_3 a KNO_3 pre 200 °C až 540 °C .
Nevýhody: oxidačná zmes, ! kontakt s organickými látkami.

Roztavené kovy – pr. Na (v atómových reaktoroch), Hg, zliatiny olova a bizmutu... Výhody: veľmi vysoká α ($35\,000\text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$) Nevýhody: malá bezpečnosť pri práci, prudko jedovaté pary, vysoko reaktívne...