

Konstrukční návrh výměníku tepla

Druhy tepelných výpočtů

Základní druhy tepelných výpočtů výměníků jsou:

a) Návrhový (konstrukční) výpočet

- cílem je stanovení hodnot, potřebných pro konstrukční návrh nebo výběr výměníku
- musí být znám
 - typ navrhovaného výměníku,
 - druh pracovních látek
 - jejich základní parametry.
- k základním parametrům patří
 - hmotnostní průtoky m_A, m_B ,
 - teploty obou látek na vstupu a na výstupu $t_{A1}, t_{A2}, t_{B1}, t_{B2}$,
 - tlaky látek na vstupu nebo výstupu.
- je nutno znát povolené tlakové ztráty a případná technická omezení
- výsledkem výpočtu je určení velikosti teplosměnné plochy S , její geometrické uspořádání a vnější rozměry výměníku

Druhy tepelných výpočtů

b) Kontrolní výpočet (přepočet)

- účelem je zjistit u předem navrženého nebo typizovaného výměníku
 - skutečné výstupní teploty a tlaky $t_{A2}, t_{B2}, p_{A2}, p_{B2}$
 - tepelný výkon
 a to při libovolném provozním režimu.
- typickou úlohou je výpočet parametrů hotového výměníku při dílčích výkonech
- zadanými veličinami jsou
 - průtoky obou látek m_A, m_B
 - vstupní teploty a tlaky látek $t_{A1}, t_{B1}, p_{A1}, p_{B1}$

Postup při návrhu výměníku

- rozbor úlohy
 - výběr typu výměníku
 - tepelná bilance výměníku
 - volba geometrie výměníku
 - výpočet teplotního spádu
 - výpočet sdílení tepla
 - určení potřebné velikosti výhřevné plochy
 - hydraulický výpočet a určení tlakových ztrát
- ↓ vyhovuje x nevyhovuje
- úprava
návrhových
parametrů
- detailní konstrukční návrh, pevnostní výpočet, výpočet hmotnosti a ceny

Tepelná bilance výměníku

- Uvažme dvoulátkový výměník - látka A předává tepelnou energii látce B
- První zákon termodynamiky je zde vyjádřen rovnicí

$$\Delta \dot{Q} = \dot{m}_A \cdot c_A \cdot \Delta t_A = \dot{m}_B \cdot c_B \cdot \Delta t_B + Q_z \quad [\text{W}]$$

kde $\dot{m}_A \cdot c_A \cdot \Delta t_A$ je tepelný tok předávaný látkou A ,
 $\dot{m}_B \cdot c_B \cdot \Delta t_B$ je tepelný tok přebíraný látkou B ,
 Q_z je ztrátový tepelný tok tj. tepelný tok sdílený z výměníku do okolí.

Q_z lze většinou zanedbat

Tepelná bilance výměníku

Tepelné toky \dot{Q}_A, \dot{Q}_B vyjádříme vztahy

$$\dot{Q}_A = \dot{m}_A \cdot (i_{A1} - i_{A2}) \quad \dot{Q}_B = \dot{m}_B \cdot (i_{B2} - i_{B1})$$

kde i_{A1}, i_{A2} jsou vstupní a výstupní entalpie látky A ,
 i_{B1}, i_{B2} jsou vstupní a výstupní entalpie látky B .

Pokud látky nemění ve výměníku skupenství, lze tyto rovnice napsat ve tvaru

$$\dot{Q}_A = \dot{m}_A \cdot c_A \cdot (t_{A1} - t_{A2}) = W_A \cdot (t_{A1} - t_{A2}) \quad \dot{Q}_B = \dot{m}_B \cdot c_B \cdot (t_{B2} - t_{B1}) = W_B \cdot (t_{B2} - t_{B1})$$

kde c_A, c_B [J/kgK] jsou měrné tepelné kapacity při stálém tlaku,
 W [W/K] je tepelná kapacita proudu látky.

Při zanedbání tepelných ztrát do okolí platí rovnice

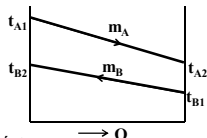
$$\dot{m}_A \cdot c_A \cdot (t_{A1} - t_{A2}) = \dot{m}_B \cdot c_B \cdot (t_{B2} - t_{B1})$$

Tepelná bilance výměníku

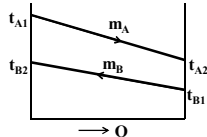
Typy úloh:

■ zadán požadovaný výkon

- dáno
 - výkon výměníku
 - teploty látek A a B na vstupu
 - průtok látky A a B
- dopočítává se teplota látek A a B na výstupu



- dáno
 - výkon výměníku
 - teploty látek A a B na vstupu a výstupu
- dopočítává se průtok látek A a B

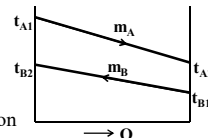


Tepelná bilance výměníku

Typy úloh:

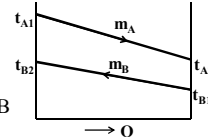
■ dopočet neznámé teploty

- dáno
 - průtoky látek A a B
 - 3 ze 4 teplot látek A a B
- dopočítává se neznámá teplota a výkon



■ dopočet neznámého průtoku

- dáno
 - průtok látky A nebo B
 - všechny teploty látek A a B
- dopočítává se neznámý průtok látky B nebo A a výkon



Volba geometrie výměníku

- před zahájením tepelného výpočtu je třeba provést návrh geometrického uspořádání výhřevné plochy výměníku
- u trubkových výměníků se např. volí
 - průměr trubek
 - způsob jejich uspořádání ve svazku
 - zapojení výměníku
- u některých úloh je výhodné též zvolit rychlosti pracovních látek dle doporučení pro jejich druh a daný typ výměníku a volbě rychlostí podřídit geometrický návrh

Volba geometrie výměníku

Volba průměru trubek se promítá

- do požadované tloušťky stěny dané pevnostním dimenzováním
- jmenovitá tloušťka stěny trubky s namáhané vnitřním přetlakem nesmí být menší než stanoví vzorec (platí pro $D/d \leq 1,6$)

$$s = s_0 \cdot v_1 + c \quad [\text{mm}]$$

$$s_0 = \frac{D \cdot p}{2 \cdot \sigma_D \cdot v + p} \quad [\text{mm}]$$

p [MPa] výpočtový přetlak,
 D [mm] vnější průměr trubky,
 σ_D [MPa] dovolené napětí při výpočtové teplotě stěny trubky,
 v [-] výpočtový součinitel pevnosti respektující zeslabení stěny otvory a podélnými svary

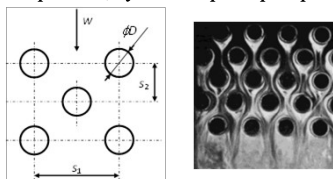
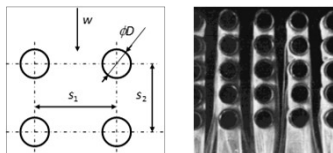
v_1 [-] součinitel zeslabení stěny ohybem, $v_1 = 1 + \frac{D}{4R}$ R je poloměr ohybu,
 pro $R \geq 4D$ je $v_1=1$

c [-] celkový přídavek k výpočtové tloušťce stěny, který se skládá z přídavku na výrobní nepřesnosti, technologické zpracování a korozi.

Volba geometrie výměníku

Volba uspořádání trubek ve svazku a jejich rozteče

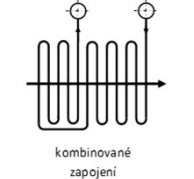
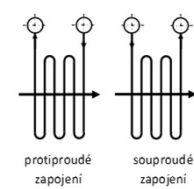
- v zákrytu (za sebou)
 - s_1 – příčná rozteč
 - s_2 – podélná rozteč
- vystřídané – lepší využití prostoru, vyšší souč. přestupu tepla



Volba geometrie výměníku

Volba zapojení výměníku

- protiproud
 - ← →
- souproud
 - →
- kombinované
 - ↓
- křížové zapojení
 - ↓



Volba geometrie výměníku

Volba rychlosti pracovních látek

- vyšší rychlost pracovní látky znamená
 - vyšší hodnotu souč. přestupu tepla a tím menší velikost výhřevné plochy
 - větší tlakovou ztrátu
- doporučené rychlosti

■ voda v trubkách	0,3 – 1,0 m/s
■ parovodní směs ve vodorovných trubkách	1,0 – 3 m/s
■ pára v trubkách	do 30 m/s
■ plyny v trubkách	10 – 15 m/s
■ vzduch, čisté spaliny napříč trubek	8,0 – 15 m/s
■ zaprášené spaliny napříč trubek	5,0 – 10 m/s
■ voda napříč trubek	0,2 – 0,8 m/s

Volba geometrie výměníku

je třeba si uvědomit

- volbou průměru trubek a rychlosti látky v trubkách je dán počet paralelních trubek dle rovnice kontinuity

$$n_{tr} = \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot d^2 \cdot w \cdot \rho}$$

- počet paralelních trubek a jejich rozteč určuje vnější rozměry výměníku

Výpočet teplotního spádu

- ve výměníku musí být splněna bilanční rovnice vyjadřující tepelný tok mezi látkami A a B

$$\dot{Q}_A = \dot{Q}_B$$

- pro malý element teplosměnného povrchu je tepelný tok tímto elementem

$$d\dot{Q} = k \cdot dS \cdot (t_A - t_B)$$

a tepelný tok v celém výměníku

$$\dot{Q} = \int_S k \cdot (t_A - t_B) dS$$

příčemž současně platí

$$\dot{Q} = \dot{Q}_A = \dot{Q}_B$$

Výpočet teplotního spádu

Metoda výpočtu výměníku jako celku za zjednodušených podmínek:

- výměník je v časově ustáleném stavu,
- měrné tepelné kapacity a součinitel prostupu tepla k jsou přibližně konstantní v celém výměníku,
- výměník má proudění látek uspořádáno tak, že odpovídá některému typovému (soproud, protiproud, křížové)
- ve výměníku neexistují zkratové nebo obtokové proudy,

U některých typů výměníků jsou vypracovány metody, které pomocí systému korekčních součinitelů dovolí řešit i případy porušující zásadním způsobem tyto podmínky.

Výpočet teplotního spádu

zjednodušená metoda používá pojem středního teplotního spádu ve výměníku definovaného vztahem

$$\Delta t_{stř} = \frac{\int (t_A - t_B) dS}{S}$$

pokud platí předpoklad $k = \text{konst.}$, přejde rovnice do tvaru

$$\dot{Q} = k \cdot S \cdot \Delta t_{stř}$$

Výpočet teplotního spádu

Průběh teplot podél výhřevné plochy

- Jednofázové výměníky tepla (části výměníků) v případě čistého souproudu nebo protiproudu
 - u pracovních látek nedochází ke změně skupenství
 - průběh teplot závisí na poměru tepelných kapacit proudů obou médií

$$R = \frac{W_B}{W_A} = \frac{\dot{m}_B \cdot c_B}{\dot{m}_A \cdot c_A} = \frac{\Delta t_A}{\Delta t_B}$$

- pro malou část teplosměnné plochy ΔS současně platí dvě rovnice rovnice tepelné bilance rovnice přestupu tepla

$$\Delta \dot{Q} = \dot{m}_A \cdot c_A \cdot \Delta t_A = \dot{m}_B \cdot c_B \cdot \Delta t_B \quad \Delta \dot{Q} = k \cdot \Delta S \cdot (t_A - t_B)$$

Výpočet teplotního spádu

z předchozí rovnice plyne

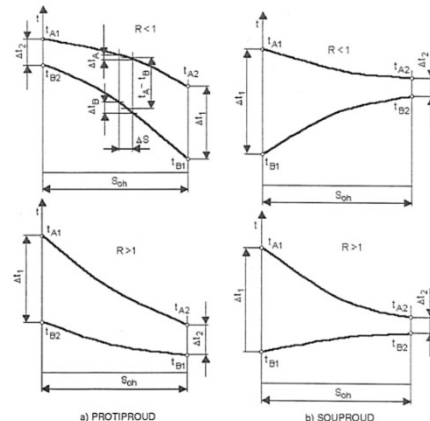
$$\Delta t_A = \frac{\dot{m}_B \cdot c_B}{\dot{m}_A \cdot c_A} \cdot \Delta t_B = R \cdot \Delta t_B \quad R = \frac{W_B}{W_A}$$

a dále

$$\Delta t_A = \frac{k \cdot \Delta S}{\dot{m}_A \cdot c_A} \cdot (t_A - t_B) \quad \Delta t_B = \frac{k \cdot \Delta S}{\dot{m}_B \cdot c_B} \cdot (t_A - t_B)$$

Závěr

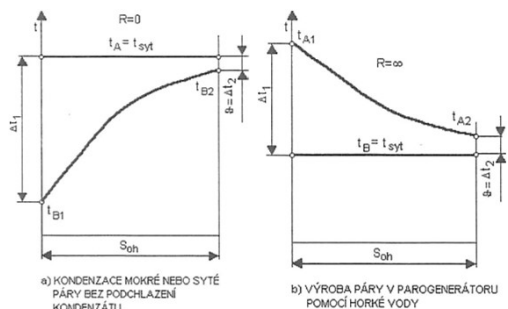
- teplotu mění rychleji látka s menší velikostí W
- při konstantní velikosti m , c a k se na stejném úseku teplosměnné plochy mění teplota rychleji při větším rozdílu teplot $t_A - t_B$



Výpočet teplotního spádu

Průběh teplot podél výhřevné plochy

- Výměník s látkou měnící skupenství



Výpočet teplotního spádu

Pro případ čistého protiproudu resp. souproudu je

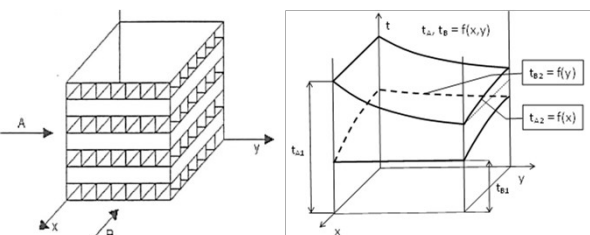
$$\Delta t_{in} = \frac{(t_{A1} - t_{B2}) - (t_{A2} - t_{B1})}{\ln \frac{t_{A1} - t_{B2}}{t_{A2} - t_{B1}}} \quad \text{resp.} \quad \Delta t_{in} = \frac{(t_{A1} - t_{B1}) - (t_{A2} - t_{B2})}{\ln \frac{t_{A1} - t_{B1}}{t_{A2} - t_{B2}}}$$

$$\Delta t_{in} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}}$$

kde Δt_1 je větší z koncových teplotních rozdílů
 Δt_2 menší koncový teplotní rozdíl.

Výpočet teplotního spádu

- Průběh teplot podél výhřevné plochy jednofázového výměníku s křížovým prouděním



Výpočet teplotního spádu

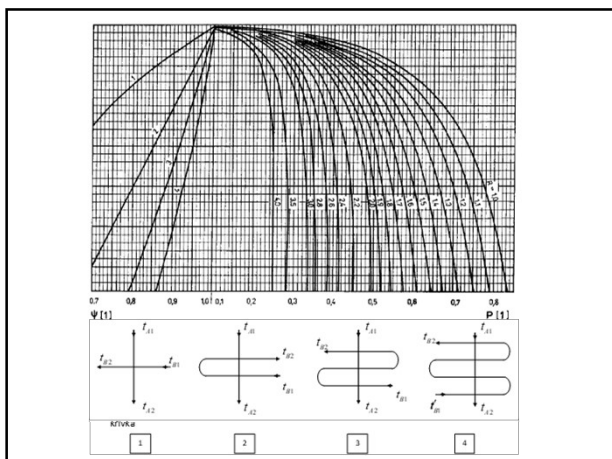
- při křížovém proudění látek, je analytické určení středního teplotního rozdílu obtížné
- používá se postup korekce teplotního spádu čistě protiproudého zapojení

$$\Delta t_{sr} = \psi \cdot \Delta t_{in}$$

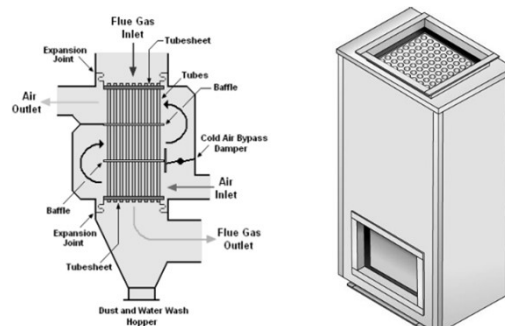
- korekční součinitel ψ se určí z nomogramu s využitím koeficientů

$$P = \frac{\Delta t_{menší}}{t_{A1} - t_{B1}}$$

$$R = \frac{\Delta t_{větší}}{\Delta t_{menší}}$$



Výměník s křížovým proudem trubkový ohřívák vzduchu



Výpočet teplotního spádu

Pokud nelze aplikovat zjednodušený postup výpočtu:

Metody zónového výpočtu

- metody jsou založeny na rozdělení výměníku na zóny - elementy, v nichž jsou samostatně počítány tepelné bilance a sdílení tepla
- rozdělení výměníku na elementy se provede tak
 - aby v rámci daného elementu bylo jednoznačně uspořádané proudění látek
 - aby bylo možno považovat fyzikální vlastnosti pracovních látek a součinitel prostupu tepla za konstanty