

## 1. Návrh výměníků tepla

### 1.1. Druhy tepelných výpočtů

Základní druhy tepelných výpočtů výměníků jsou:

#### a) Návrhový (konstrukční) výpočet

Cílem tohoto výpočtu je stanovení hodnot, potřebných pro konstrukční návrh nebo výběr výměníku. Při provádění tohoto výpočtu musí být znám typ navrhovaného výměníku, druh pracovních látek a jejich základní parametry. K těmto 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. Současně je nutno znát povolené tlakové ztráty a případná technická omezení. Výsledkem výpočtu je určení velikosti teplosměnné plochy  $S$  a její geometrické uspořádání.

#### b) Kontrolní výpočet (přepočet)

Účelem tohoto výpočtu je zjistit skutečné výstupní teploty a tím i tepelný výkon u předem navrženého nebo typizovaného výměníku a to při libovolném provozním režimu. Zadanými veličinami jsou zde průtoky obou látek  $m_A$ ,  $m_B$  a dále vstupní teploty a tlaky  $t_{A1}$ ,  $t_{B1}$ ,  $p_{A1}$ ,  $p_{B1}$  látek.

Oba tyto druhy výpočtu se používají při návrhu i výběru výměníku.

Výběr výměníku je volba určitého výměníku z několika již existujících. Tato volba se provede na základě předběžného a často zjednodušeného návrhového výpočtu. U vybraného výměníku se pak obvykle provede kontrolní přepočet, jímž se zjistí jeho skutečný tepelný výkon a pomocí něhož se ověří i splnění dalších požadavků. Takový postup se obvykle používá u výměníků s menším tepelným výkonem, určených pro standardní účely.

Návrh výměníku je složitý postup vedoucí k určení co nejvhodnějších geometrických parametrů teplosměnného aparátu, splňujícího zadané podmínky. Při něm se používá kombinace návrhového a kontrolního výpočtu. Návrh výměníku je totiž jen zřídka možno provést přímo. Obvykle je nutno zpracovat předběžný návrh a ten upravit na základě výsledků tepelného a hydraulického přepočtu. Tento iterativní postup je často potřebné vícekrát opakovat. Významným pomocníkem může být výpočetní technika, dovolující výrazně zvětšit množství zpracovávaných variant. Postup je graficky znázorněn na obrázku.

Při ručním výpočtu určuje konstruktér velikost a provedení aparátu do jisté míry intuitivně. Porovnává nedostatky a výhody předešlého řešení s novým a uvažuje o důsledcích změn. Přitom je důležitá zkušenost konstruktéra a jeho přehled, aby návrh šel k rychlému a přijatelnému řešení.

Při strojním návrhu je úloha velmi složitá. Značné nároky jsou kladeny na logiku řešení. Není přitom důležitá ani tak rychlá konvergence, jako je nutnost zjistit, aby nebyly v logice výběru mezery, jež by návrh mohly zavést na scesti. I velmi umírně sestavený program může mít až  $40$  samostatných rozhodnutí, což by mechanicky vedlo k  $2^{20} = 1.10^{12}$  různých možných cest. Tyto cesty samozřejmě nelze všechny odhalit a vyzkoušet. Schůdnější cesta je kombinace programové logiky s počítačem. Metody nejracionalnějšího návrhu výměníků s podporou počítače se v současné době velmi intenzivně rozvíjí.

### 1.2. Základní výpočtové vztahy

Uvažme pro jednoduchost dvoulátkový výměník, v němž 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.

Poznamenejme, že ztrátový tepelný tok je vzhledem k tepelným tokům  $\dot{Q}_A$ ,  $\dot{Q}_B$  malý a navíc obvykle zmenšovaný provedením tepelné izolace, takže jej ve většině případů lze zanedbat.

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

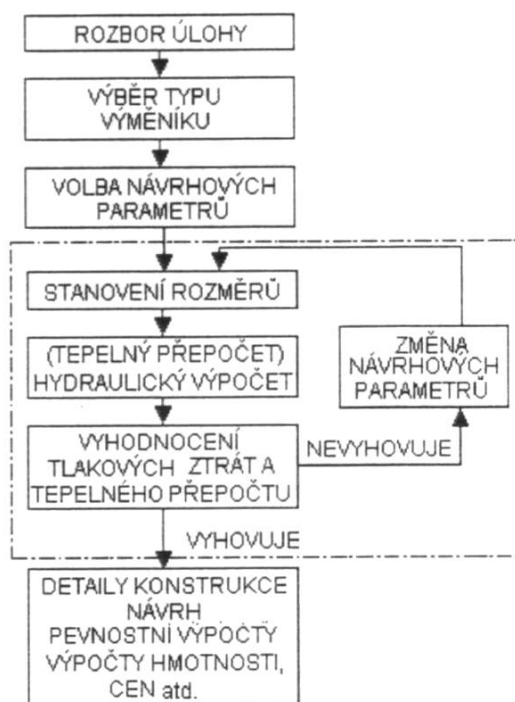
$$\dot{Q}_A = \dot{m}_A \cdot (i_{A1} - i_{A2}) \quad \dot{Q}_B = \dot{m}_B \cdot (i_{B2} - i_{B1})$$

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

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

Současně s touto rovnicí musí být splněna také rovnice vyjadřující tepelný tok mezi látkami A, B ve výměníku. Uvážíme-li 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

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

V předešlé rovnici značí  $k$  [W/m<sup>2</sup>K] součinitel prostupu tepla z látky A do látky B. Při práci s touto rovnicí je nutno si uvědomit, že jak teploty, tak součinitel prostupu tepla se ve výměníku podél teplosměnného povrchu mění. Výpočet integrálu na pravé straně rovnice může být v obecném případě značně složitý a mnohdy analyticky nemožný. Často však lze řešení tohoto integrálu usnadnit volbou vhodných zjednodušujících podmínek, o nichž bude pojednáno dále.

Výpočtové postupy lze podle způsobu řešení integrálu v rovnici rozdělit do dvou skupin:

a) **Metody výpočtu výměníku jako celku za zjednodušených podmínek**

Tyto metody používají pojem středního teplotního rozdílu ve výměníku, definovaného vztahem

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

Přijmeme-li dále předpoklad  $k = \text{konst.}$  přejde rovnice základní rovnice tepelného toku do tvaru

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

Dokážeme-li vyjádřit střední teplotní rozdíl ve výměníku, je možno tuto rovnici výhodně použít při návrhových výpočtech, neboť tato rovnice dovoluje přímý výpočet teplosměnné plochy

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

Aby výpočty uvedenými metodami dávaly přijatelné výsledky, musí být splněny alespoň tyto podmínky:

1. ve výměníku neexistují zkratové nebo obtokové proudy,
2. výměník je v časově ustáleném stavu,
3. měrné tepelné kapacity a součinitel prostupu tepla jsou přibližně konstantní v celém výměníku,
4. výměník má proudění látek uspořádáno tak, že odpovídá některému typovému uspořádání.

U některých typů výměníků jsou vypracovány metody, které systému korekčních součinitelů dovolí řešit i případy porušující zásadním způsobem podmínku uvedenou v bodě 1.

b) **Metody zónového výpočtu.**

Tyto 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 vhodnými myšlenými plochami tak, aby v rámci daného elementu bylo jednoznačně uspořádané proudění látek, a aby bylo možno považovat fyzikální vlastnosti pracovních látek a součinitel prostupu tepla za konstanty. Napíšeme-li pro každý element rovnice analogické výše uvedeným rovnicím platným pro celý výměník, obdržíme systém nelineárních algebraických rovnic, který po doplnění počátečními podmínkami je možno řešit numericky vhodnou iterační metodou.

### 1.3. Průběh teplot podél teplosměnné plochy

#### A) Jednofázové výměníky tepla (části výměníků) v případě čistého souproudu nebo protiproudu.

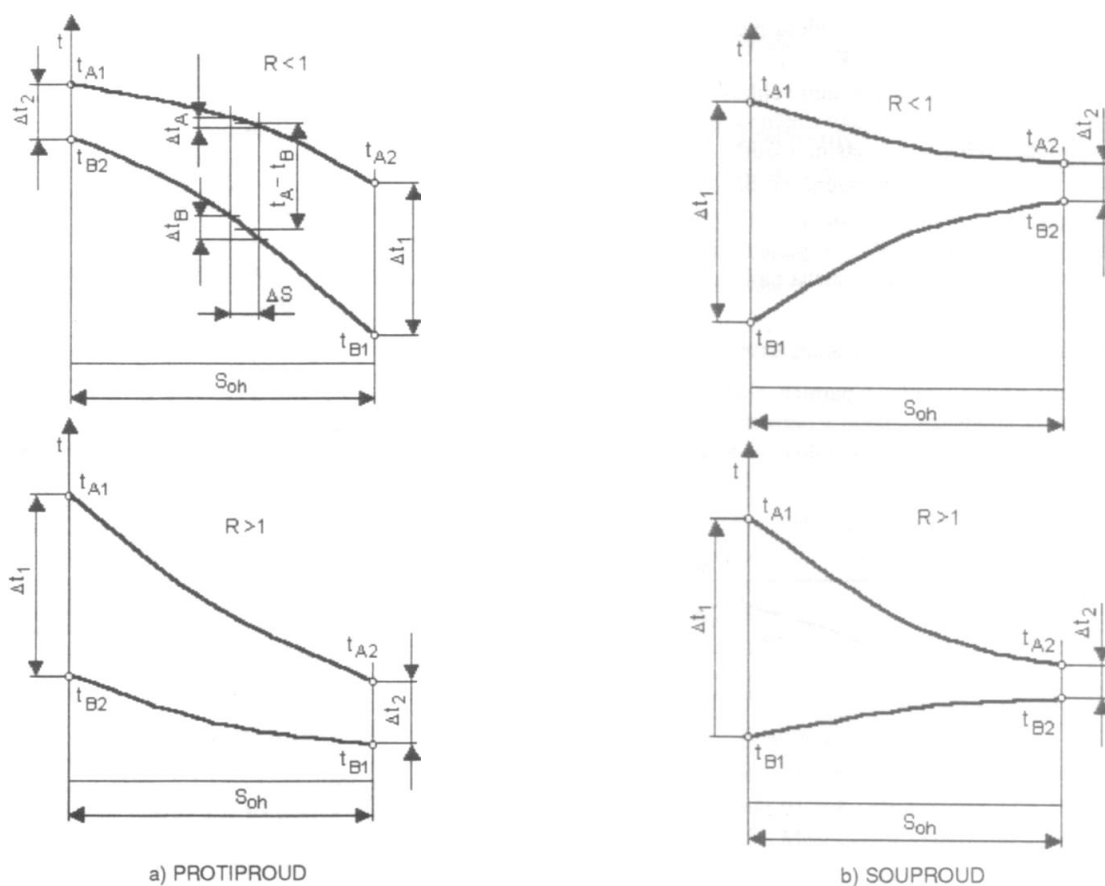
U žádného z obou médií nedochází ke změně skupenství. Průběh teplot závisí na poměru tepelných kapacit proudů obou médií.

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

Při zobrazení průběhu teplot ve výměníku je nutno si uvědomit, že současně platí dvě rovnice - rovnice tepelné bilance a rovnice přenosu tepla. Uvážíme-li malou část teplosměnné plochy  $\Delta S$  jsou to rovnice

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

Označení je patrné na obr.



Z předchozích rovnic plyne

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

a dále

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

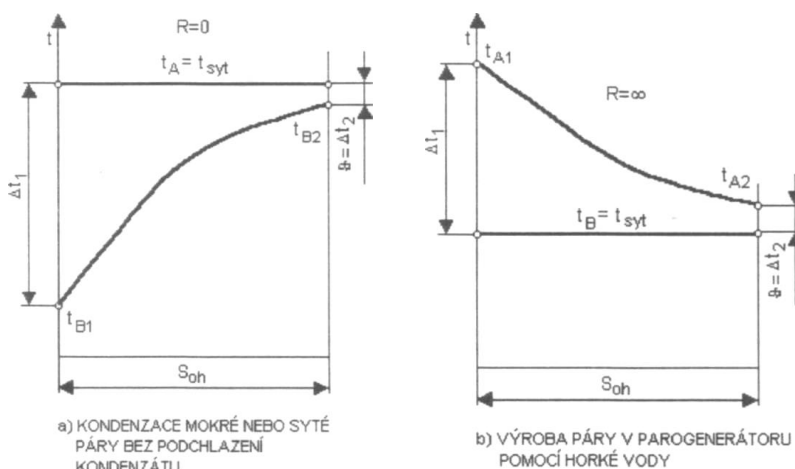
Z první rovnice vyplývá, že teplotu mění rychleji látka s menší velikostí  $W$ . Z dalších rovnic pak plyne, že při konstantní velikosti  $m$ ,  $c$  a  $k$  se na stejném úseku teplosměnné plochy mění teplota rychleji při větším rozdílu teplot  $t_A - t_B$ . Tím je dán jednoznačně průběh teplot při souproudu i protiproudu pro  $R > 1$  a  $R < 1$  (viz obr.). V případě, že  $R = 1$ , přejdou křivky v přímky, přičemž výsledná změna teploty obou látek je stejná.

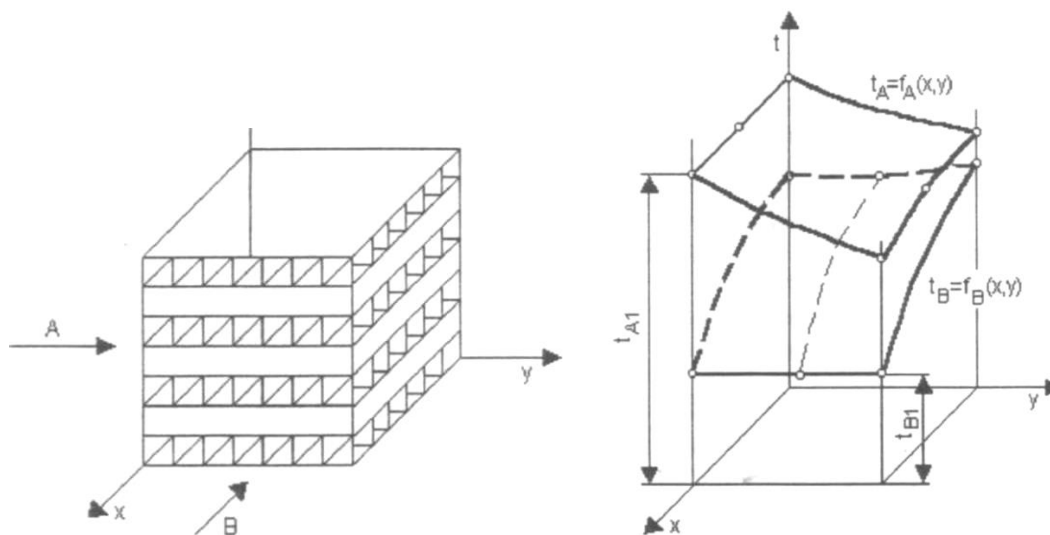
### B) Výměník s látkou měnící skupenství

Tento případ vzniká v parních ohřívácích, v nichž pára kondenzuje nebo v parních generátorech (obr. 1.3). Pára vstupující do ohříváku může být přehřátá nebo mokrá. Vytvořený kondenzát může z výměníku odcházet ve stavu syté kapaliny nebo mírně podchlazený.

### C) Jednofázový výměník s křížovým prouděním

U jednofázového výměníku s křížovým prouděním (obr.) jsou teploty obou médií závislé na dvou souřadnicích a průběh teplot v takovém výměníku je možno zobrazit plochami. Změna teplot závisí přitom také na tom, zda dochází nebo nedochází k směšování látek v jednotlivých proudech. U výměníku zobrazeném na obr. se žádná z látek v rámci proudu neproměšuje.





Průběh teplot ve výměníku s křížovým prouděním

#### 1.4. Střední teplotní rozdíl

Jak vyplývá z předchozích odstavců, důležitou roli při výpočtech výměníku má střední teplotní rozdíl mezi látkami A a B. V jednoduchých případech tj. při čistém protiproudu a souproudu nebo tehdy, mění-li některá z látek skupenství, je možné střední teplotní rozdíl určit analyticky při použití rovnic tepelné bilance a sdílení tepla. Odvození výsledného vztahu je nepříliš složitou matematickou úlohou a lze jej najít v učebnicích sdílení tepla. Pro případ čistého protiproudu resp. souproudu je

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

Vztahy lze zobecnit, označíme-li větší z koncových teplotních rozdílů  $\Delta t_1$  a menší koncový teplotní rozdíl  $\Delta t_2$ . Střední teplotní rozdíl je pak dán vztahem použitelným i pro případ, že některá z látek mění ve výměníku skupenství

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

Takto vypočtený teplotní rozdíl se nazývá logaritmický střední teplotní rozdíl.

Jestliže je  $\Delta t_1 / \Delta t_2 < 1,5$ , lze jen s malou nepřesností použít při výpočtech tzv. aritmetický střední teplotní rozdíl

$$\Delta t_{stř} = \frac{\Delta t_1 + \Delta t_2}{2}$$

Pro složitější případy uspořádání proudů ve výměníku, jako např. při křížovém proudění látek, je analytické určení středního teplotního rozdílu obtížné a často bývá nutno použít numerických metod. Pro běžného uživatele jsou pak sestaveny výsledky do grafické podoby. Nejčastěji se přitom používá korekční součinitel definovaný vztahem

$$\psi = \frac{\Delta t_{stř}}{\Delta t_{in}}$$

kde  $\Delta t_{in}$  je logaritmický střední teplotní rozdíl vypočtený pro čistý protiproud. Výpočtový postup je pak takový, že se vypočte logaritmický střední teplotní rozdíl, z příslušného grafu se odečte velikost korekčního součinitele a nakonec se vypočte skutečný střední teplotní rozdíl

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

Návrhový výpočet pomocí středního teplotního rozdílu

Tento způsob výpočtu je založen na rovnici

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

Aby tato rovnice mohla být použita pro výpočet teplosměnné plochy, je nutno nejprve stanovit součinitel prostupu tepla. V některých případech, jedná-li se o standardní výměníky, bývá možno použít pomocné grafy výrobce a odečíst z nich součinitele prostupu tepla na základě volby některé určující veličiny např. rychlosti pracovní látky v trubkách. Takovýto podklad bývá obvykle dostatečný pro výběr ohřívačku z typové řady

výrobce. V obecném případě je však nutno součinitel prostupu tepla vypočítat pomocí vhodných metod výpočtu sdílení tepla, přitom je předem nutno na základě zadaných veličin (průtoky látek, teploty) stanovit základní konstrukční parametry zvoleného typu výměníku (např. průtočné průřezy), což dává podklady pro výpočet přestupních součinitelů. V dalším postupu se pro zadané teploty látek vypočte střední teplotní rozdíl pomocí rovnice

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

Jedná-li se o výměník se složitějším uspořádáním proudů látky než čistý protiproud, souproud či křížový proud se změnou skupenství pracovní látky, je nutno skutečný střední teplotní rozdíl určit pomocí korekčního faktoru  $\psi$ . Tento faktor se určí buď pomocí analytických vztahů nebo grafu uvedených v literatuře. Ze vztahu

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

se vypočte střední teplotní rozdíl. Po výpočtu potřebné velikosti výhřevné plochy výměníku pro požadovaný výkon se upřesní geometrické rozměry výměníku. Je-li potřebné, např. z konstrukčních důvodů, provést změnu průtočných průřezů, je nutno celý výpočet opakovat.