

# Návrh plášťových trubkových výměníků tepla (aplikace pro energetiku)

Ing. Jan Havlík, Ph.D.

## Plášťové trubkové výměníky v energetice – typické aplikace

### **spaliny/voda (pára)**

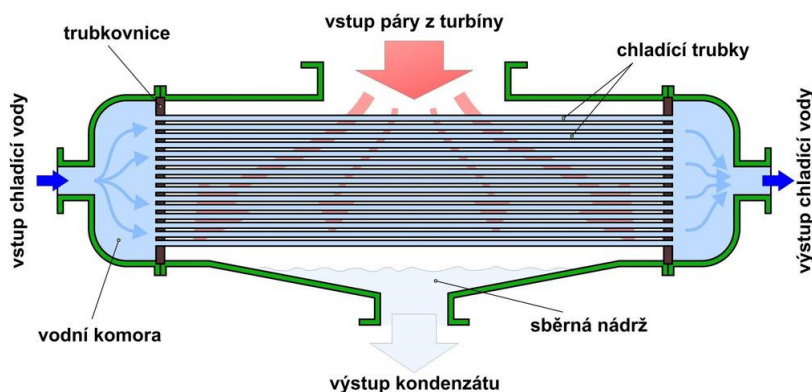
- výpočet spalinové strany
- hlavní tepelný odpor na straně spalin
- žárotrubné kotle na odpadní teplo

### **pára/voda**

- výpočet obou stran výměníku
- tepelné odpory srovnatelné
- kondenzátory parních turbín
- regenerační ohříváky napájecí vody
- kondenzátory odpadní (brýdové) páry

## Kondenzátory parních turbín

- Plášťový trubkový výměník tepla s přímými trubkami
- Typicky horizontální svazky trubek
- Chladicí voda v trubkách, pára kondenzuje v mezitrubkovém prostoru

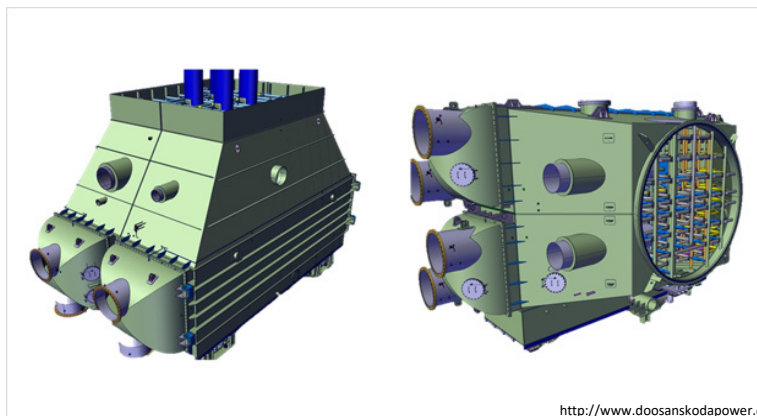


## Kondenzátory parních turbín

- Páře vystupující z turbíny se chladicí vodou odnímá kondenzační teplo
- **Kondenzát má značně menší měrný objem**
  - V hermetickém prostoru kondenzátoru **vzniká vakuum**
- **Vakuum v kondenzátoru se udržuje pomocí vývěvy**
  - Odvod nezkondenzovaných plynů
- Tlak je závislý na:
  - Teplotě chladicí vody a jejím průtoku
  - Na velikosti chladicí plochy kondenzátoru
  - Na činnosti přidavné vývěvy
- Stanovení nejvýhodnější velikosti kondenzátoru a průtoku chladicí vody je též závislé na dimenzování turbíny, čerpadel napájecí vody a způsobu chlazení

## Kondenzátory parních turbín

- Kondenzátor se skládá z trubkového svazku (který tvoří přímé trubky), pláště, vodních komor a nástavby



## Rozdělení kondenzátorů parních turbín

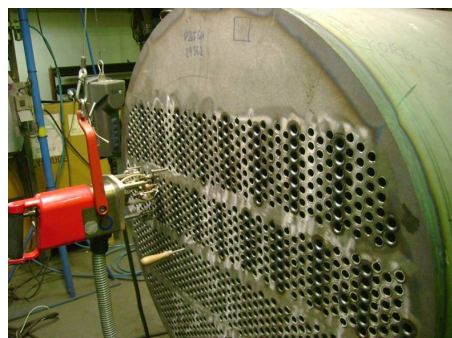
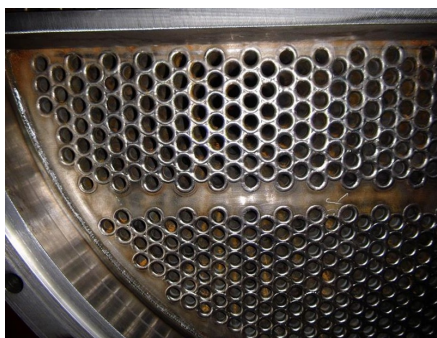
- **Umístění kondenzátoru z pohledu umístění výstupu páry z turbíny**
  - Radiální (příčně, podélně pod turbínou)
  - Axiální
  - Bokový
- **Typy kondenzátorů z pohledu uspořádání tahů chladící vody**
  - Jednotahový, dvoutahový, čtyřtahový
  - Dělený, nedělený
- **Materiál teplosměnných trubek:**
  - Austenitická/Feritická/Duplexní nerezová ocel
  - Titan
  - Mosaz

## Trubkové svazky kondenzátorů



<http://www.strojon.cz>

## Trubkovnice kondenzátorů



<http://www.strojon.cz>

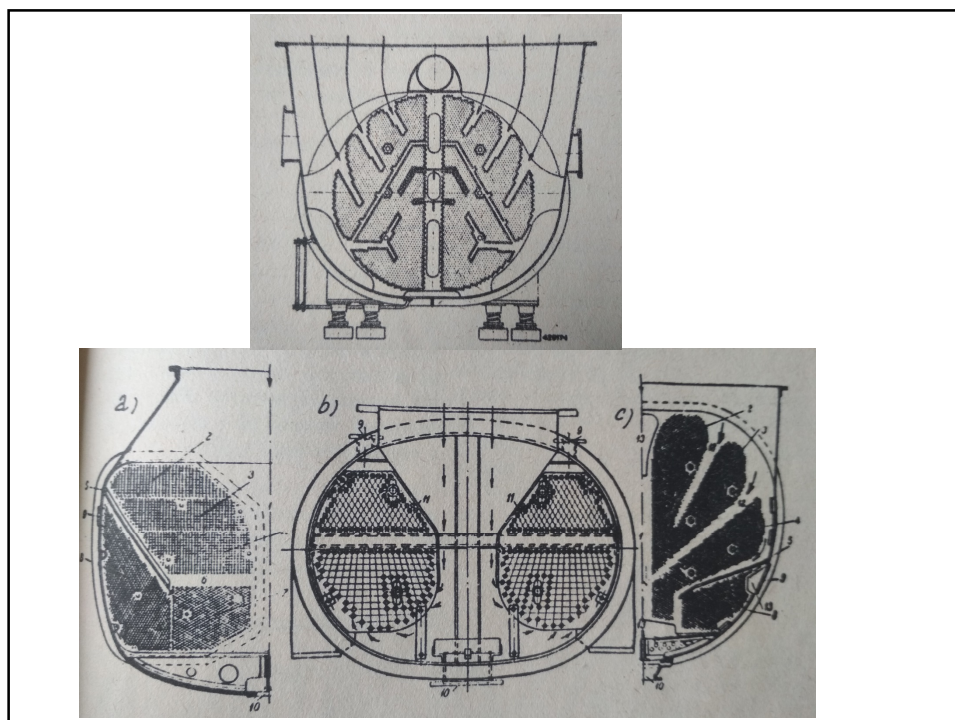
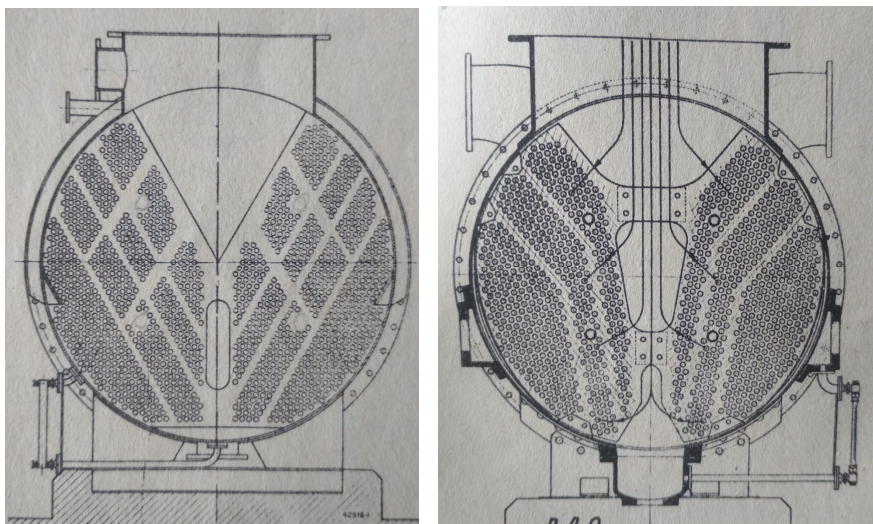
## Trubkové svazky

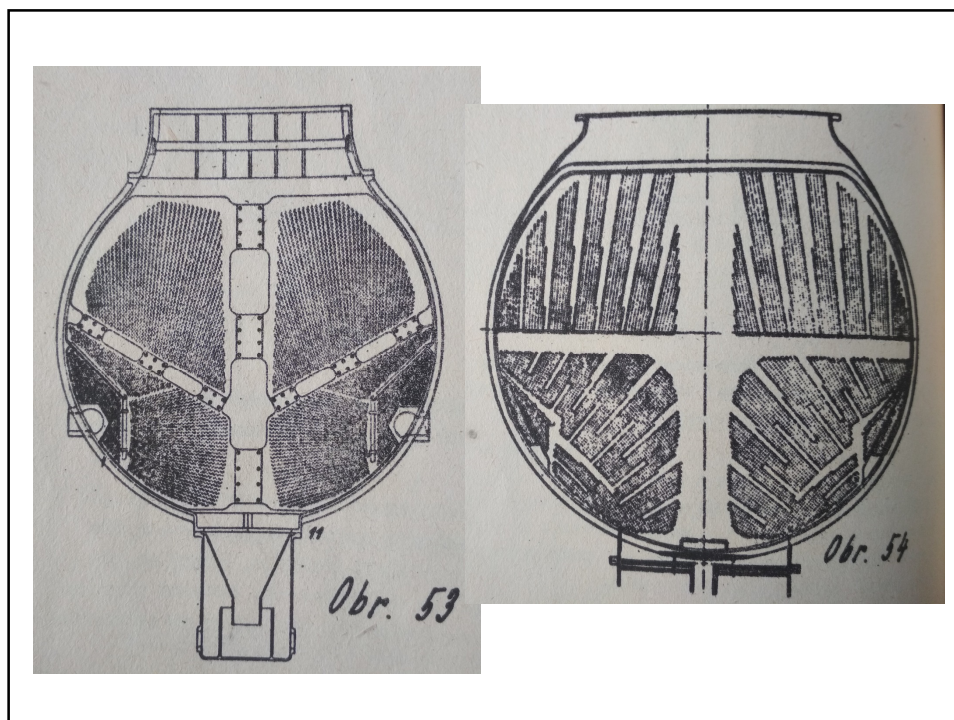
- Optimální je vyplnit prostor kondenzátoru co nejvíce trubkami
- Přeplnění kondenzátoru trubkami zvyšuje jeho tlakovou ztrátu, a tím i tlak za turbínou
- Po povrchu trubek stéká kondenzát
  - roustoucí vrstva podle počtu řad trubek
- Omezení zahlcených zón odváděním kondenzátu
- Rozložení rychlostí pro rovnoměrnost procesu
  - rychlosti páry mezi trubkami obvykle 40 až 60 m/s
- Požadavek na vhodnou konfiguraci trubek

## Rozložení trubek v kondenzátoru

- Trubky bývají rozloženy v jednotlivé svazky
  - zmenšení hydraulických ztrát
  - dobrý odvod skékajícího kondenzátu
- Omezení použití usměrňovacích a sběrných plechů kondenzátu
  - zvyšují hydraulické ztráty
- Průběhem kondenzace se má průřez parního průchodu zmenšovat
  - sklon náběžného štítu (první řada trubek)
  - zmenšení rozteče trubek ve směru proudění

## Příklady rozložení trubek





## Tepelná bilance kondenzátoru

- Do kondenzátoru vstupuje pára z turbíny o průtoku  $M_p$  [kg/s], teplotě  $t_p$  [°C] a entalpii  $i_p$  [kJ/kg]
- V kondenzátoru vzniká z páry kondenzát o průtoku  $M_k$  [kg/s], teplotě  $t_k$  [°C] a entalpii  $i_k$  [kJ/kg]
- Množství tepla odvedeného v kondenzátoru
 
$$Q = M_p \cdot (i_p - i_k)$$
- Toto teplo je odváděno chladicí vodou o průtoku  $M_w$  [kg/s], teplotami na vstupu  $t_1$  [°C] a na výstupu  $t_2$  [°C].
 
$$Q = M_w \cdot c_{pw} \cdot (t_2 - t_1)$$
- Teplo odvedené vývěvou a tepelné ztráty do okolí se při této bilanci zanedbávají

## Obvyklé parametry kondenzátorů

- Využitelné pro první návrh
- Tlak v kondenzátoru bývá mezi 0,02 až 0,1 bar, nejběžněji 0,05 bar ( $T_{\text{sy}} = 32,5 \text{ °C}$ )
- Kondenzát bývá asi o  $1,5 \text{ °C}$  podchlazen
- Teplota chladicí vody obecně okolo  $18$  až  $20 \text{ °C}$ 
  - dle způsobu chlazení (průtočné, chladicí věže), ročního období bývá v mezích  $10$  až  $40 \text{ °C}$
- Ohřátí chladicí vody obvykle  $10$  až  $18 \text{ °C}$
- Poměr hmotnostních průtoků páry a chladicí vody obvykle  $1 : 30-60$
- Při použití dvou kondenzátorů do dva NT díly parní turbíny se jako výhodnější jeví zapojení chladicího okruhu do série než paralelně
- Konečné hodnoty jsou výsledkem ekonomické optimalizace

## Určení velikosti chladicí plochy kondenzátoru

- Z chladicího výkonu
 
$$Q = S \cdot k \cdot \Delta T_{\text{stř}}$$
- $S$  je teplosměnná plocha kondenzátoru
 
$$S = n \cdot \pi \cdot D \cdot l$$
  - $n$  je počet trubek,  $D$  vnější průměr trubek,  $l$  délka trubek
- Obvykle trubky  $20 \times 1$ 
  - silnější stěna u vrchních řad kvůli většímu mechanickému namáhání
- Délka trubek obvykle od  $4 \text{ m}$  do  $10 \text{ m}$  dle výkonu zařízení

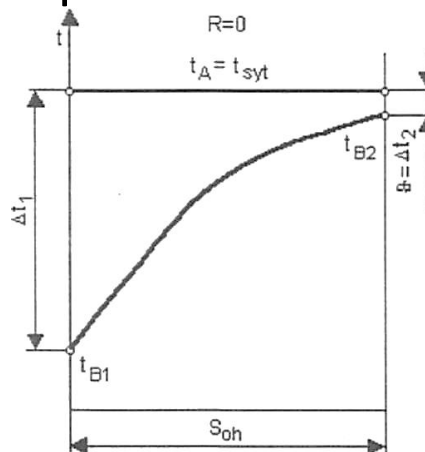


## Teplotní spád

- Pára kondenzuje při teplotě sytosti dané tlakem v kondenzátoru
- Střední logaritmický spád

$$\Delta T_{stř} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}}$$

- Koncový teplotní spád  $\Delta t_2 \approx 2,5 \div 5^\circ\text{C}$



a) KONDENZACE MOKRÉ NEBO SYTÉ PÁRY BEZ PODCHLAZENÍ KONDENZÁTU

## Teplotní spád

- Nezávisí na uspořádání chladícího tahu
- Parní strana má teplotu kondenzace
- Příklad teplotního spádu u dvoutahového kondenzátoru

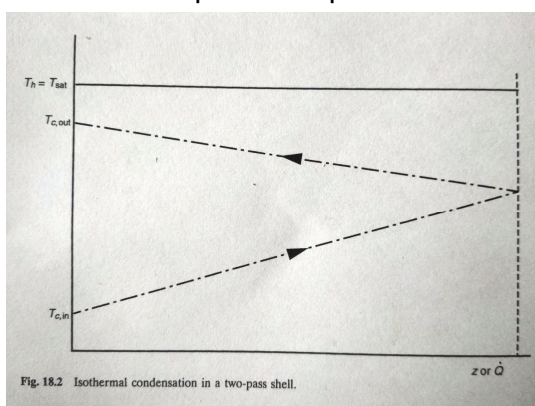


Fig. 18.2 Isothermal condensation in a two-pass shell.

$$\Delta T_{stř} = \frac{T_{w2} - T_{w1}}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}}$$

## Součinitel prostupu tepla k

$$k = \frac{1/D}{\frac{1}{\alpha_p \cdot D} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{D}{d} + \frac{1}{\alpha_w \cdot d}}$$

- Součinitel přestupu tepla na straně páry  $\alpha_p$ 
  - při změně skupenství přes 10000 W/m<sup>2</sup>K
- Součinitel přestupu tepla na straně chladící vody  $\alpha_w$ 
  - snaha o co nejvyšší hodnotu  $\alpha_w \approx 5000$  až 7000 W/m<sup>2</sup>K
- Vedení skrz stěnu trubky
  - tepelná vodivost materiálu trubky  $\lambda$  (pro mosaz  $\approx 100$  W/mK)
  - tloušťka stěny trubky  $s$  (často 1 mm)

## Součinitel prostupu tepla k

- Orientační hodnota pro první výpočet bývá zhruba 4000 W/m<sup>2</sup>K
- Hodnota klesá se **zanášením** vnitřního povrchu trubek až o 25 %
- Přesná hodnota závisí nejvíce na **rychlosti chladící vody v trubkách**, na uspořádání trubek
- Vliv má i obsah vzduchu v páře a nesterilní teplotní poměry na trubkách

## Součinitel přestupu tepla na straně vody

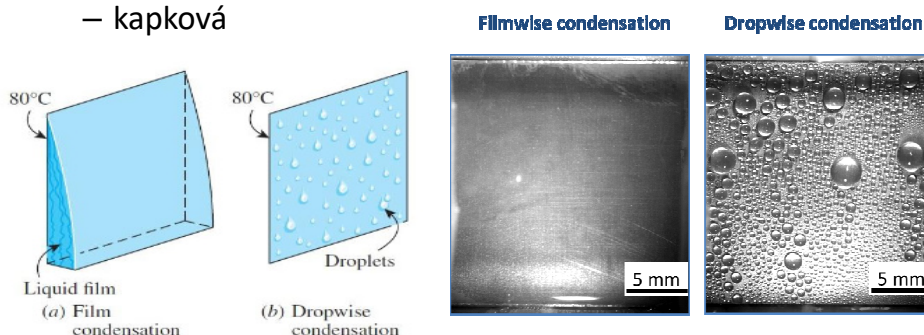
- Rychlost chladící vody by neměla být menší než 1,5 m/s z důvodu usazování nečistot v trubkách
- Obvykle rychlosti vody 1,5 až 2,5 m/s
- Turbulentní proudění s vysokou rychlostí a Re
- Vhodná rovnice pro nucenou konvekci
  - Např. Dittus-Boelter
$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,33}$$
- Největší tepelný odpor při sdílení tepla
- Omezení rychlosti vody tlakovou ztrátou

## Čistění vnitřních stěn trubek

- Zanášení vnitřní strany trubek snižuje přestup tepla
- Čistění mechanicky
  - při odstávce
- Čistění průběžně
  - pomocí kuliček z pěnové gumy stejné měrné hmotnosti jako voda
    - kuličky jsou unášeny vodou a zachytávány na výstupu
  - krátkodobé zvýšením rychlosti proudění vody v trubkách uzavřením vstupu do části trubek

## Součinitel přestupu tepla na parní straně

- Povrchová kondenzace
  - Filmová
  - kapková



## Povrchová kondenzace

- Kapková kondenzace
  - výrazně vyšší součinitel přestupu tepla než filmová
  - nesmáčivý povrch
  - povlaky ze silikonu, teflonu, směsi vosků a mastných kyselin
- Ačkoliv je v průmyslových aplikacích žádoucí dosáhnout kapkové kondenzace, je často obtížné ji trvale udržet.
- Filmová kondenzace
  - smáčivý povrch
  - při návrhu kondenzátoru se vychází z výpočtu filmové kondenzace
  - nižší hodnoty součinitele přestupu tepla jsou na straně bezpečnosti

## Nusseltův model kondenzace čisté páry na vertikální stěně

- Střední součinitel přestupu tepla po délce trubky L

$$\bar{\alpha}_L = 0.943 \left[ \frac{\lambda_L^3 h'_{FG} \rho_L (\rho_L - \rho_p) g}{L \mu_L (T_{sat} - T_s)} \right]^{1/4}$$

- $\bar{\alpha}_L$  je dána hlavně  $T_L$ ,  $h'_{FG,L}$ ,  $(T_{sat} - T_s)$
- iterační výpočet teplotního spádu  $(T_{sat} - T_s)$

- Vlastnosti kondenzátu

$$T_L = \frac{(T_{sat} - T_s)}{2}$$

- Zohlednění tepla z ochlazování vrstvy kondenzátu

- modifikované skupenské teplo

$$h'_{FG} = h_{FG} + 0,68 \cdot c_{pL} \cdot (T_{sat} - T_s)$$

## Aplikace Nusseltova modelu kondenzace – předpoklady použití

- Film kondenzátu nemusí být laminární
  - Zvýšení přestupu
- Pára nemusí být klidová - proudění páry
  - Zvýšení přestupu
- **Výskyt nekondenzujících plynů**
  - **Výrazně snižuje přestup tepla!**
  - Použití vývěvy
- Trubka x rovinná stěna
  - Při předpokladu malé tloušťky vrstvy stékajícího filmu kondenzátu lze rozdíl mezi výpočtem pro trubku a rovinnou stěnou zanedbat – výrazné zjednodušení (1D výpočet)
- Kromě omezení vlivu nekondenzujících plynů se další odlišnosti nemusí ve výpočtu zohledňovat
  - Nusseltův model dává výsledky na straně bezpečnosti (tedy nižší hodnoty přestupu tepla)

## Rozložení teplot při kondenzaci

- Pro výpočet je nutné určit teplotní spád ( $T_{sat} - T_s$ )

Bilance teplených toků

- tepelný tok skrz kondenzační film

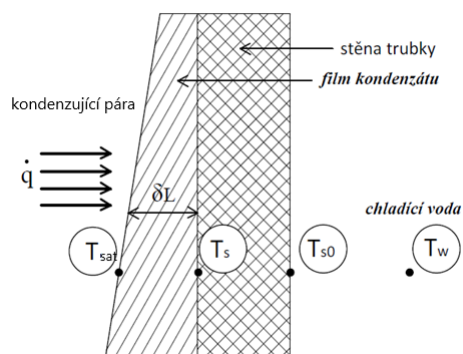
$$q'' = \alpha_p \cdot (T_{sat} - T_s)$$

- tepelný tok skrz stěnu trubky

$$q'' = \frac{\lambda_s}{\delta_s} \cdot (T_s - T_{s0})$$

- tepelný tok do chladicí vody

$$q'' = \alpha_w \cdot (T_{s0} - T_w)$$



## Kondenzace na horizontální trubce

- Nejčastější případ u kondenzátoru parních turbín
- Odvozeno z Nusseltova modelu pro vertikální stěnu

– Úprava konstanty

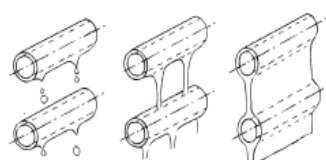
$$\alpha_1 = 0.725 \left[ \frac{\lambda_L^3 h'_{FG} \rho_L^2 g}{D \mu_L (T_{sat} - T_w)} \right]^{1/4}$$

– **Charakteristický rozměr průměr trubek  $D$**

– Hustota páry  $\rho_p$  je  $\ll \rho_L$ , proto se ve výpočtu nemusí uvažovat

## Kondenzace na svazku trubek

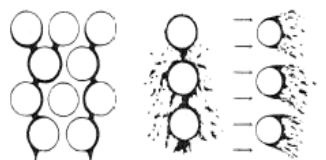
- Kondenzát stéká gravitačně z první řady směrem na spodní řady
- Výpočet se provede pro první řadu -  $\alpha_1$



(a) (b) (c)

Střední hodnota  
součinitele přestupu pro n  
řad  $\bar{\alpha}_n$

Korekce na počet řad trubek n:



(d) (e) (f)

$$c) \frac{\bar{\alpha}_n}{\alpha_1} = n^{-1/4}$$

$$d) \frac{\bar{\alpha}_n}{\alpha_1} = 0.6 + 0.42n^{-1/4}$$

$$e) \frac{\bar{\alpha}_n}{\alpha_1} = n^{-1/6}$$

## Intenzifikace přestupu tepla

- Největší tepelný odpor na straně chladící vody
- Vyšší rychlosti vody než u klasických výměníků
- Materiál trubek
  - Dobrá vodivost, korozivzdornost
  - V těchto aplikacích má vliv i odpor vedením skrz stěnu trubky
  - Často mosazné trubky s obsahem Cu okolo 70%
- Pravidelné čištění trubek (od případného zanášení)
- Menší průměry trubek dávají lepší poměr průtoku media a velikosti povrchu resp. teplosměnné plochy trubek

## Obsah vzduchu v páře

- Pro udržení podtlaku je nutné odsávat nekondenzující plyny z prostoru kondenzátoru
  - vnikají do kondenzátoru netěsnostmi (z důvodu podtlaku) nebo v páře z kotle
- Nad obsah 1 % začíná být vliv znatelný
  - Obsah vzduchu 1 % snižuje hodnotu  $\alpha_p$  na zhruba 50 %
- Množství vzduchu v kondenzátoru bývá obecně kolem 0,01%

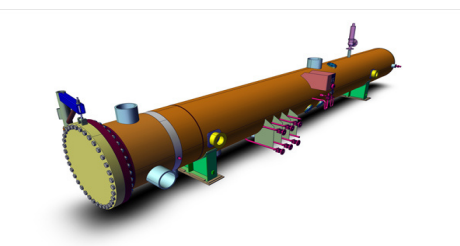
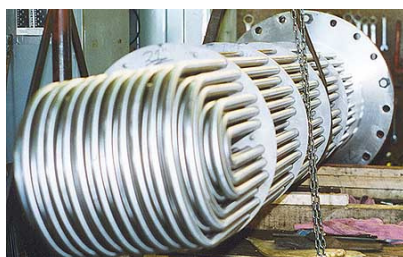
## Poruchy kondenzace

- Pokles vakua
  - Ucpání trubek
  - Nánosy na vnitřní straně trubek
  - Netěsnosti vakuového systému vývěvy
  - Nedostatečná činnost vývěvy
- Přisávání surové vody
  - Zjišťuje se chemickým rozborem nebo měřením elektrické vodivosti vody
  - Uvolnění trubek, porušení těsnění komor, poruchy trubek
  - pH chladicí vody
  - Mechanické poškození úlomky materiálu nebo chvěním



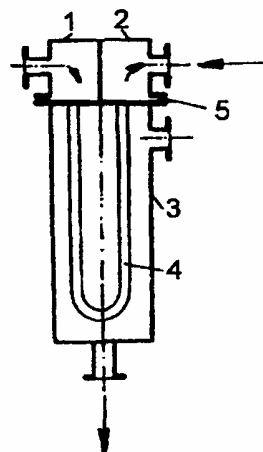
## Regenerační ohříváky vody

- Regenerační výměníky slouží k ohřevu hlavního kondenzátu / napájecí vody, čímž přispívají ke zvýšení tepelné účinnosti cyklu elektrárny
- Mají pouze jednu trubkovnici rozdělenou přepážkami na vstupní, výstupní, případně obratovou komoru



## Rozdělení regeneračních ohříváků

- Orientace výměníků
  - Horizontální
  - Vertikální
  - S vodní komorou nahoře
  - S vodní komorou dole
- Standardní provedení výměníků
  - Výměníky U-trubkové (vlásenkové)



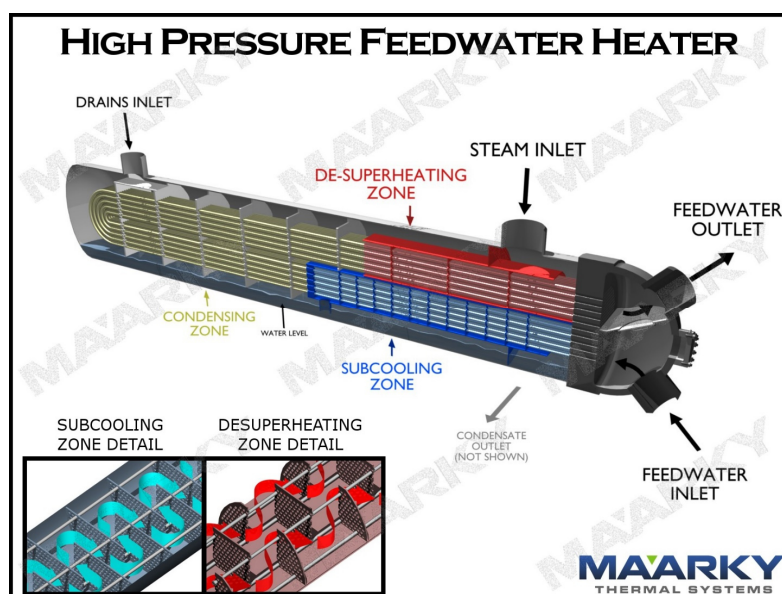
Vlásenkový výměník s U-trubkami  
1-vstupní komora, 2-výstupní komora,  
3-plášť, 4-výhřevná plocha z  
vlásenkových trubek, 5-trubkovnice

- **NT výměníky**
  - materiál teplosměnných trubek – nerezová ocel (podélně svařované)
- **VT výměníky**
  - materiál teplosměnných trubek – nízkolegovaná ocel (bezešvé)
  - spoj trubka trubkovnice – zavalcování + zavaření



<http://www.strojon.cz>

## Ukázka rozdělení ploch RO



## Sdílení tepla v regeneračním ohříváku

- RO má 3 části:
  - 1) sražení přehřátí
  - 2) kondenzace
  - 3) podchlazení kondenzátu

### **Srážec přehřátí**

- Počítá se sdílení tepla pára / voda

### **Podchlazení kondenzátu**

- Počítá se sdílení tepla voda / voda

### **Využití příčných přepážek - intenzifikace přestupu tepla:**

- zvýšením rychlosti proudění
- příčným prouděním média

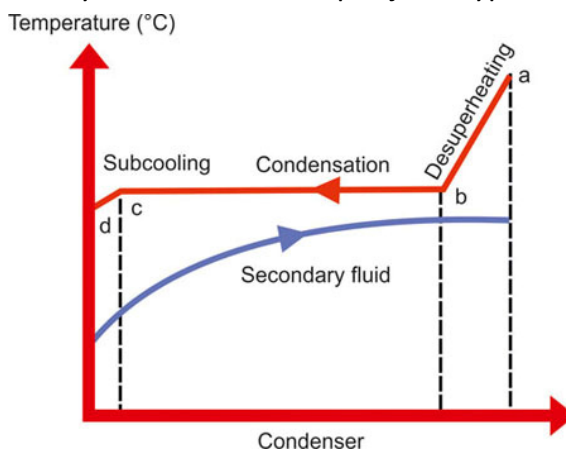
### **Kondenzace**

- Částečné podchlazení nastává kvůli teplotnímu profilu mezi stěnou a fázovým rozhraním

- **Postup podobný jako u kondenzátorů**
- **Součinitel přestupu tepla na straně páry**
  - Horizontální nebo vertikální konfigurace
  - Kondenzace na povrchu trubek
  - Pro kondenzaci na vertikálních trubkách se využívá Nusseltova modelu kondenzace na vertikální stěně
    - Rozdíl při aplikaci na trubky je zanedbatelný
- **Součinitel přestupu tepla na straně vody**
  - Proudění uvnitř trubek
  - Vyšší rychlosti vody kvůli intenzifikaci přestupu
- **Určení teplotního spádu nezávisí na konfiguraci tahu ohřívání vody**

## Teplotní spád

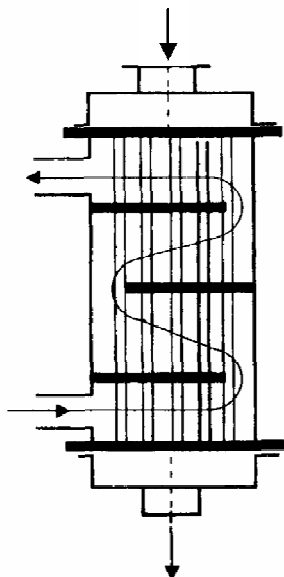
- RO má části: sražení přehřátí, kondenzace, podchlazení kondenzátu
- Rozdělení výměníku na 3 části pro jeho výpočet



## Kondenzátory pro využití odpadní brýdové páry

- Odpadní brýdová pára obsahuje značné množství tepla (skupenské teplo páry)
- Možnost využít teplo pro ohřev vody
- V energetických aplikacích je **často vysoký podíl přisátého vzduchu v páře (10 až 20 %)**, případně výskyt mechanických nečistot a dalších složek v páře
  - **Tlak je blízký atmosférickému (okolí)**
  - **Rozdíl oproti procesní brýdové páře o vyšších parametrech!**
- To komplikuje její další využití, proto není často využívána a je vypouštěna do okolí
  - **Obsah vzduchu snižuje teplotu kondenzace (sytosti)**
- Brýdová pára může vznikat např.
  - při sušení, lisování nebo dalších operacích v technologii, kde se materiál zahřívá

## Brýdový kondenzátor



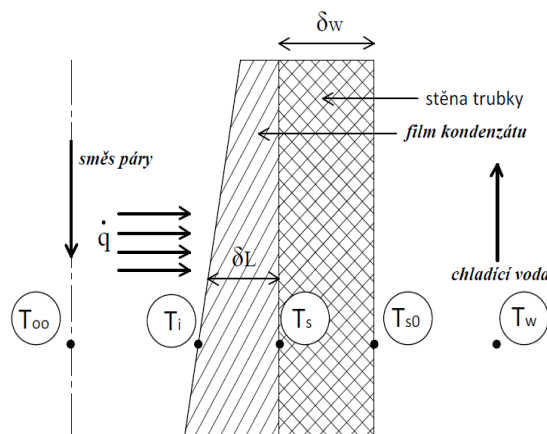
- **Speciální požadavky na kondenzátor**
- Pára kondenzuje uvnitř trubek
- Chladicí voda proudí vně
- **Přítomnost drobných částic v páře**
  - jsou kondenzátem samovolně odplavovány
- Atmosférické řešení
  - **zbylá nezkondenzovaná brýdová pára (s vysokým obsahem vzduch) je odvedena do okolí**

## Součinitel přestupu tepla na straně kondenzujících brýdových par

- Nusseltův model kondenzace
    - kondenzace klidové čisté páry na vertikální stěně
- Kondenzace brýdové páry se ale několika jevy odlišuje od kondenzace čisté páry:
- Největší vliv má **obsah přísátého vzduchu** v brýdové páře
    - **teplota kondenzace se mění po délce trubek se změnou koncentrace páry ve směsi se vzduchem**
    - **vodní pára difunduje skrz vzduch** směrem ke stěně trubky, kde probíhá kondenzace
      - **výrazné snížení přestupu tepla!**
  - Rychlost proudící páry při kondenzaci
    - pro tyto aplikace je nutné ji zohlednit
    - pomáhá difúzi páry (zvyšuje přestup tepla)

## Schéma kondenzace

- Rychlost klesá s klesajícím množstvím kondenzující páry
- Koncentrace a tím i kondenzační teplota páry se mění
  - po směru proudění (kondenzace) i po průřezu trubkou (**difúze**)



Rozdíl v teplotách

- v proudu směsi  $T_\infty$
- na mezifázovém rozhraní  $T_i$

$$T_i = T_{sat}(p_{p,i})$$

## Zohlednění přestupu hmoty

- Hnací silou je rozdíl koncentrací páry v proudu plynu  $\bar{y}_{p,\infty}$  a na fázovém rozhraní  $\bar{y}_{p,i}$
- Molární tok páry  $\dot{N}_p$  skrz vrstvu v binární směsi [ $\text{kmol}/\text{m}^2\text{s}$ ]

$$\dot{N}_p = \frac{D_{12}}{\delta_{GM}} C_{celk} \ln \left[ \frac{1 - \bar{y}_{p,\infty}}{1 - \bar{y}_{p,i}} \right] = \beta C_{celk} \ln \left[ \frac{1 - \bar{y}_{p,\infty}}{1 - \bar{y}_{p,i}} \right]$$

–  $\delta_{GM}$  je tloušťka difúzní vrstvy,  $D_{12}$  je difúzní součinitel,  $\beta$  je součinitel přestupu hmoty

– Celková molární koncentrace  $C_{celk}$  se vypočítá z celkového tlaku  $p_{celk}$

$$C_{celk} = \frac{p_{celk}}{R \cdot T_\infty}$$

– Hustota molárního toku páry  $\dot{N}_p$  se vypočítá z množství kondenzující páry  $\dot{m}''_p$

$$\dot{N}_p = \frac{\dot{m}''_p}{M_p}$$

## Součinitel přestupu hmoty

- Součinitel přestupu hmoty  $\beta$  [m/s]

$$\beta = \frac{ShD_{12}}{D}$$

–  $D_{12}$  je difúzní součinitel pára/vzduch, D je charakteristický rozměr trubky

- Analogie přestupu tepla a přestupu hmoty

– příklad

$$Nu = f(Re, Pr) \sim Sh = f(Re, Sc)$$

## Vliv rychlosti proudění páry

- Rychlost páry pozitivně ovlivňuje přestup hmoty (podobně jako u přestupu tepla)
- Rychlosti i tlaky brýdové páry na vstupu do výměníku jsou typicky nízké
- Rychlost dále klesá s úbytkem objemu kondenzující páry
- Při vykondenzování velkého podílu páry je na výstupu objem zastoupen hlavně zbylým vzduchem, rychlost je tedy nízká

## Součinitel přestupu tepla na straně vody (vně trubek)

- Výrazně menší než k aplikacím, kdy je voda v trubkách
  - přestup tepla na parní straně je ale také nižší
- Intenzifikace přestupu tepla použitím příčných přepážek

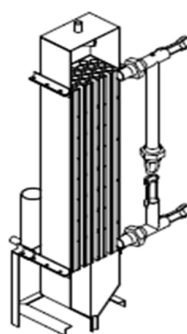
## Teplotní spád

- Součinitel přestupu tepla na parní straně se mění v průběhu kondenzace
  - Se zvyšující se koncentrací nekondenzujících plynů po délce výměníku výrazně klesá
- Součinitel přestupu tepla se nedá uvažovat po délce výměníku jako konstantní
- **Výměník je nutné rozdělit na určitý počet elementů a bilancovat ho zónálně**



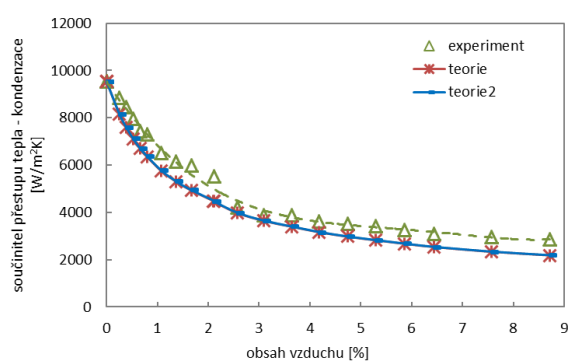
## Příklad kondenzátoru brýdové páry

- Pára kondenzuje uvnitř trubek
  - vzniklý kondenzát mechanicky vyplavuje případné mechanické nečistoty
- Ohříváná voda v mezitrubkovém prostoru



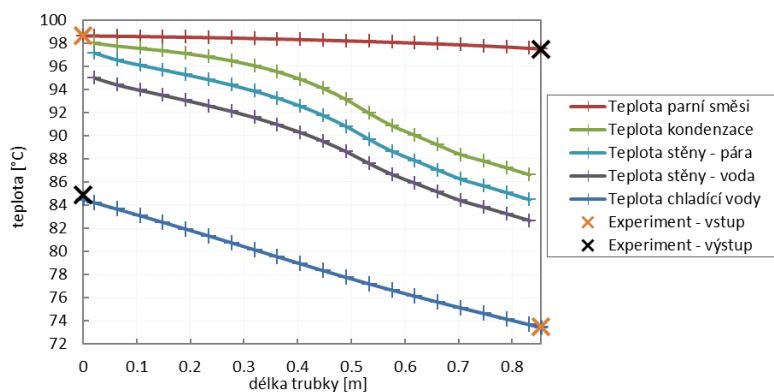
## Vliv obsahu vzduchu v páře na součinitel přestupu tepla při kondenzaci

- Teoretická a experimentální analýza
- Porovnání měření a postupu výpočtu uvedeného výše s použitím 2 různých kritériálních rovnic



## Ukázka průběhů teplot po délce výměníku

- Teplota kondenzace (sytosti) klesá v průběhu kondenzace se snižujícím se parciálním tlakem páry ve směsi



## Ukázka průběhu přestupu tepla po délce výměníku

- Součinitel přestupu tepla klesá
  - se zvyšující se tloušťkou kondenzátu
  - se zvyšujícího se podílu zbývajících nekondenzovatelného plynu

