

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

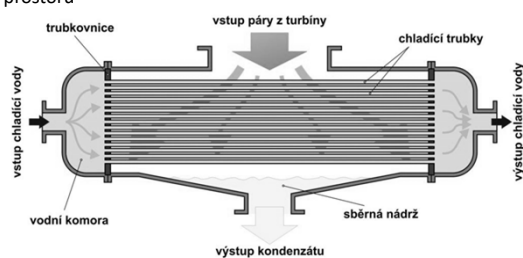
- Žárotrubné kotle na odpadní teplo

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

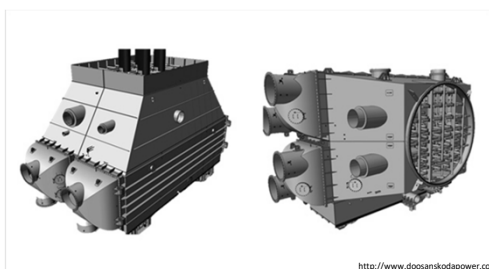


Kondenzátory parních turbín

- 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 přídatné vývěvy
- Stanovení nejvýhodnější velikosti kondenzátoru a průtoku chladicí vody je též závislé na dimenzování turbíny, čerpadel napájecí vody a způsobu chlazení

Kondenzátory parních turbín

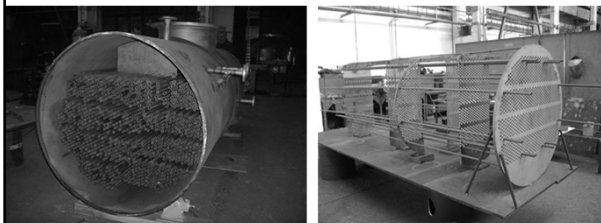
- Kondenzátor se skládá z trubkového svazku (který tvoří přímé trubky), pláště, vodních komor a nástavby



Rozdělení kondenzátorů parních turbín

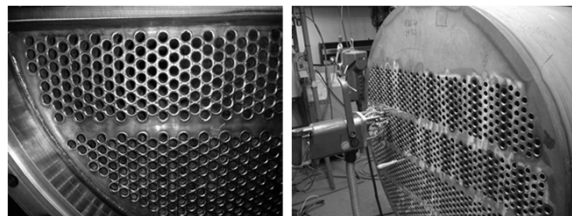
- **Umístění kondenzátoru z pohledu umístění výstupu páry z turbíny**
 - Radiální (příčně, podélně pod turbínou)
 - Axiální
 - Bokový
- **Typy kondenzátorů z pohledu uspořádání tahů chladicí vody**
 - Jednotahový, dvoutahový, čtyřtahový
 - Dělený, nedělený
- **Materiál teplosměnných trubek:**
 - Austenitická/Feritická/Duplexní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

Trubkové svazky kondenzátorů



<http://www.strojon.cz>

Trubkovnice kondenzátorů



<http://www.strojon.cz>

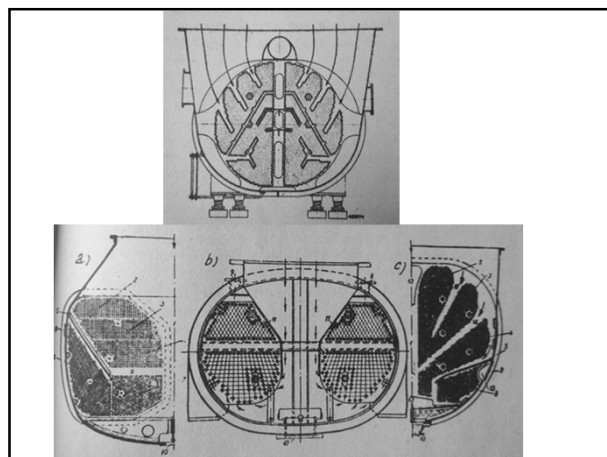
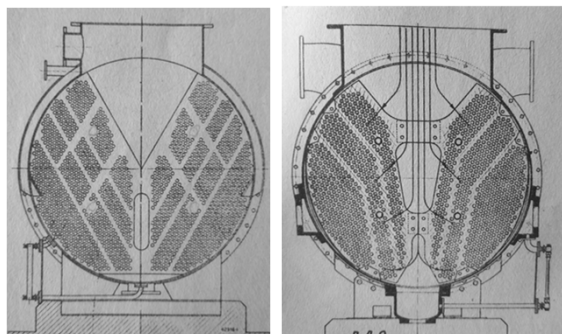
Trubkové svazky

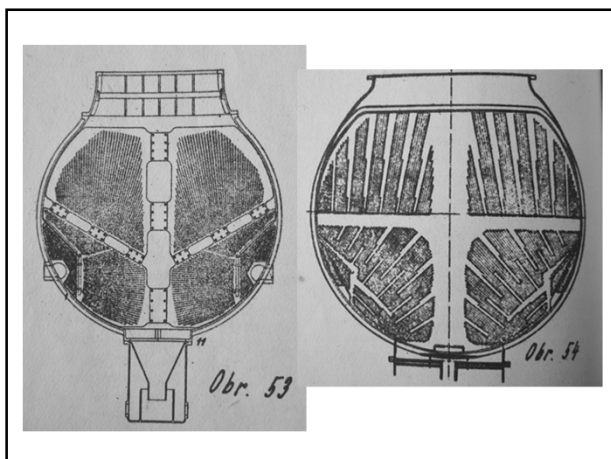
- Optimální je vyplnit prostor kondenzátoru co nejvíce trubkami
- Přeplnění kondenzátoru trubkami zvyšuje jeho tlakovou ztrátu, a tím i tlak za turbínou
- Po povrchu trubek stéká kondenzát
 - roustoucí vrstva podle počtu řad trubek
- Omezení zahlněných zón odváděním kondenzátu
- Rozložení rychlostí pro 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 ($T_{\text{sy}} = 32,5$ °C)
- Kondenzát bývá asi o 1,5 °C podchlazen
- Teplota chladicí vody obecně okolo 18 až 20 °C
 - dle způsobu chlazení (průtočné, chladicí věže), ročního období bývá v mezích 10 až 40 °C
- Ohřátí chladicí vody obvykle 10 až 18 °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

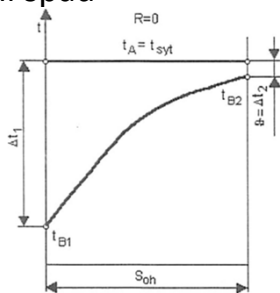
$$S = n \cdot \pi \cdot D \cdot l$$
 - n je počet trubek, D vnější průměr trubek, l délka trubek
- Obvykle trubky 20 x 1
 - silnější stěna v vrchních řad kvůli většímu mechanickému namáhání
- Délka trubek obvykle od 4 m do 10 m dle výkonu zařízení

Teplotní spád

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

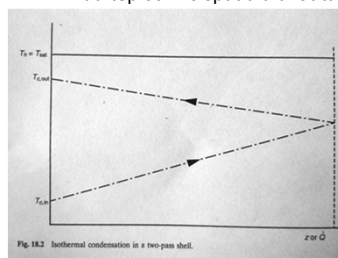
$$\Delta T_{\text{stř}} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}}$$
- Koncový teplotní spád

$$\Delta t_2 \approx 2,5 \div 5^\circ\text{C}$$



Teplotní spád

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



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

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 α_p
 - při změně skupenství přes 10000 W/m²K
- Součinitel přestupu tepla na straně chladící vody α_w
 - snaha o co nejvyšší hodnotu $\alpha_w \approx 5000$ až 7000 W/m²K
- Vedení skrz stěnu trubky
 - tepelná vodivost materiálu trubky λ (pro mosaz ≈ 100 W/mK)
 - tloušťka stěny trubky s (často 1 mm)

Součinitel prostupu tepla k

- Orientační hodnota pro první výpočet bývá zhruba 4000 W/m²K
- 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 nestejně teplotní poměry na trubkách

Součinitel přestupu tepla na straně vody

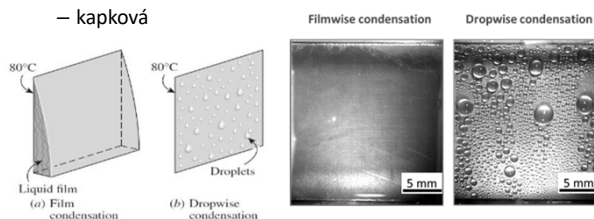
- Rychlost chladící vody by neměla být menší než 1,5 m/s z důvodu usazování nečistot v trubkách
- Obvykle rychlosti vody 1,5 až 2,5 m/s
- Turbulentní proudění s vysokou rychlostí a Re
- Vhodná rovnice pro nucenou konvekci
 - Např. Dittus-Boelter
$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,33}$$
- Největší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

Čištění vnitřních stěn trubek

- Zanášení vnitřní strany trubek snižuje přestup tepla
- Čištění mechanicky
 - při odstávce
- Čištění 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 rozdíly 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

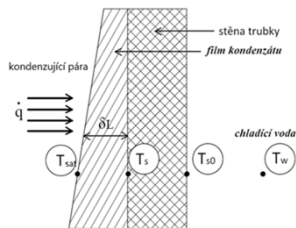
$$q'' = \alpha_p \cdot (T_{sat} - T_s)$$

- 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

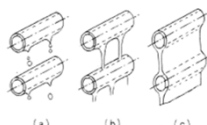
$$\alpha_1 = 0.725 \left[\frac{\lambda_L^3 h'_{FG} \rho_L^2 g}{D \mu_L (T_{sat} - T_w)} \right]^{1/4}$$

- **Charakteristický rozměr průměr trubek D**

- Hustota páry ρ_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 - α_1



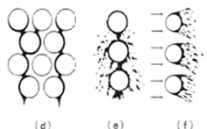
Střední hodnota součinitele přestupu pro n řad $\bar{\alpha}_n$

Korekce na počet řad trubek n:

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

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

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



Intenzifikace přestupu tepla

- Největší tepelný odpor na straně chladicí 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 média a velikosti povrchu resp. teplosměnné plochy trubek

Obsah vzduchu v páře

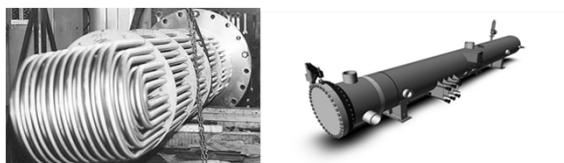
- Pro udržení podtlaku je nutné odsávat nekondenzující plyny z prostoru kondenzátoru
 - vnikají do kondenzátoru netěsnostmi (z důvodu podtlaku) nebo v páře z kotle
- Nad obsah 1 % začíná být vliv znatelný
 - Obsah vzduchu 1 % snižuje hodnotu α_p na zhruba 50 %
- Množství vzduchu v kondenzátoru bývá obecně 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 rozbořem nebo měřením elektrické vodivosti vody
 - Uvolnění trubek, porušení těsnění komor, poruchy trubek
 - pH chladicí vody
 - Mechanické poškození úlomky materiálu nebo chvěním

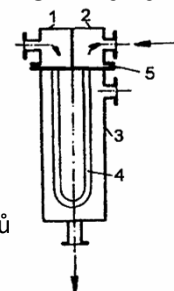
Regenerační ohříváky vody

- 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 (vláskovkové)



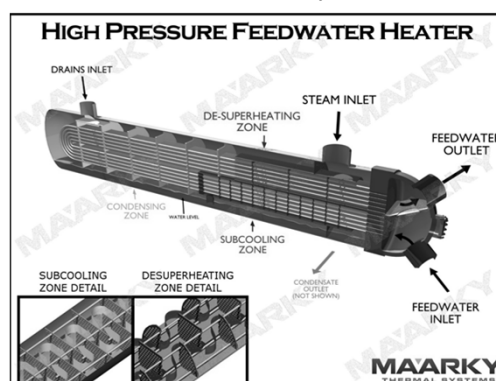
Vláskovkový výměník s U-trubkami
1-vstupní komora, 2-výstupní komora,
3-plášť, 4-výhřevná plocha z
vláskových trubek, 5-trubkovnice

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

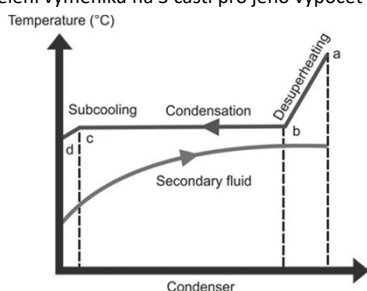
Kondenzace

- 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

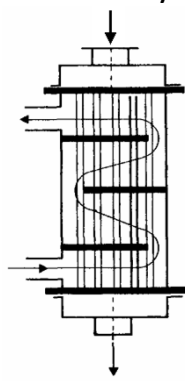
- RO má části: sražení přehřátí, kondenzace, podchlazení kondenzátu
- Rozdělení výměníku na 3 části pro jeho výpočet



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 (sytnosti)**
- Brýdová pára může vznikat např.
 - při sušení, lisování nebo dalších operacích v technologii, kde se materiál zahřívá

Brýdový kondenzátor



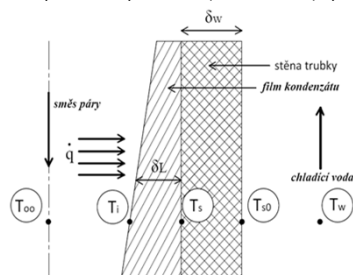
- **Speciální požadavky na kondenzátor**
- Pára kondenzuje uvnitř trubek
- Chladicí voda proudí vně
- **Přítomnost drobných částic v páře**
 - jsou kondenzátem samovolně odplavovány
- Atmosférické řešení
 - **zbylá nez kondenzovaná brýdová pára (s vysokým obsahem vzduch) je odvedena do okolí**

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 přisátého 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_{∞}
- 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 [kmol/m²s]

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

- δ_{GM} je tloušťka difúzní vrstvy, D_{12} je difúzní součinitel, β 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 β [m/s]

$$\beta = \frac{Sh D_{12}}{D}$$

- 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)

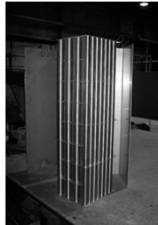
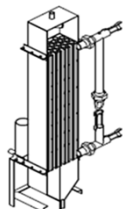
- Výrazně menší než k aplikacím, kdy je voda v trubkách – přestup tepla na parní straně je ale také nižší
- Intenzifikace přestupu tepla použitím příčných přepážek

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 zonálně**

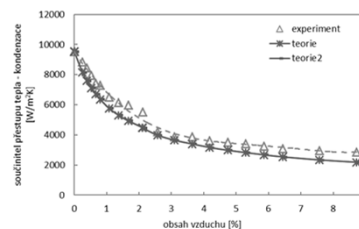
Příklad kondenzátoru brýdové páry

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



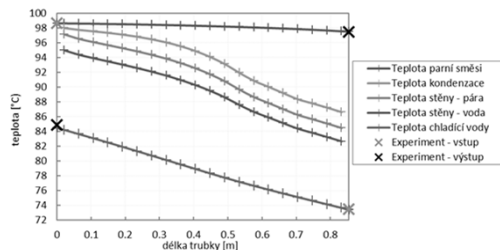
Vliv obsahu vzduchu v páře na součinitel přestupu tepla při kondenzaci

- 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 zvyšujícím se podílu zbývajícího nekondenzovatelného plynu

