

# VLIV PŘÍTOMNOSTI INERTNÍHO PLYNU NA PROCES BLÁNOVÉ KONDENZACE PÁRY

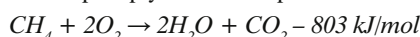
KUPKA D.

Výzkumné energetické centrum – Inovace pro efektivitu a životní prostředí, VŠB-TU Ostrava, david.kupka@vsb.cz

Blánová kondenzace je v technické praxi nejrozšířenější forma fázové přeměny páry v kapalným kondenzát. Intenzita tohoto procesu závisí především na odvodu skupenského tepla z fázového rozhraní vrstvou kondenzátu do ochlazeného povrchu. Z hlediska přestupu tepla je v tomto případě omezujícím faktorem tepelný odpor závislý pouze na tloušťce vrstvy kondenzátu. V řadě průmyslových aplikací však neprobíhá kondenzace jen čisté páry, ale také páry s obsahem nečistot, různých příměsí, případně paroplynových směsí. Návrh takového zařízení pak vyžaduje odlišný přístup při řešení uspořádání a dimenze teplosměnných ploch, jelikož je třeba zohlednit další faktory negativně působící zejména na molekulární transport páry k fázovému rozhraní.

## 1. Oblast zájmu

Tato problematika je v současnosti např. v oblasti energetiky velmi aktuální téma, které souvisí s vývojem nových spalovacích technologií umožňujících nasazení CCS metod (carbon capture and storage) pro zpracování  $\text{CO}_2$  [1]. Názorným příkladem takového technologického řetězce je bezemisní parní cyklus se spalovací jednotkou odvozenou od principu funkce raketových motorů [2]. Jedná se o zařízení spalující zemní plyn v kyslíkové atmosféře za vzniku paroplynové směsi podle rovnice

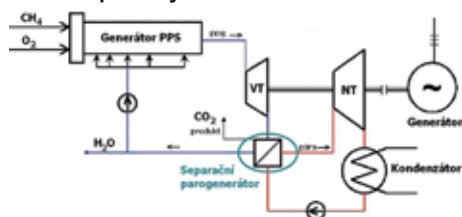


Zemní plyn je tvořen zejména metanem s nepatrným množstvím vyšších uhlovodíků a v závislosti na lokalitě těžby obsahuje až 7 % inertních látek (dusík, oxid uhličitý). Prakticky se však po spálení jedná pouze o směs vodní páry a oxidu uhličitého, do níž je z důvodu regulace teploty směsi dodatečně vstřikovávána voda. Výsledkem pak je tzv. paroplynová směs (PPS) s hmotnostním podílem  $\text{CO}_2$  nepřekračujícím hranici 15 %, která je využívána ke konání práce v rámci Rankin-Clausiova oběhu.

## 2. Problémy a jejich řešení

Aby bylo možné zmíněný oběh označit za bezemisní, je nutné zajistit separaci složek směsi po expanzi v turbíně. Bezkonkurenčně nejvýhodnější způsob separace je prostřednictvím kondenzace parní složky, což by umožnilo následné zpracování a využití  $\text{CO}_2$ . V současnosti jediné dostupné řešení v podobě klasického vodou chlazeného kondenzátoru není zcela optimální, protože vyžaduje značné nároky na kompresní práci pro evakuaci plynu z hlubokého vakua. Do popředí zájmu se tak dostala jiná koncepce – transformátor tepla zajišťující separaci při zvýšeném tlaku za současné produkce nízkotlaké páry (obr. 1). Tzv. separační parogenerátor (SPG) [3] je předmětem výzkumu grantového projektu MPO v programu IMPULS, na němž se podílejí VÍTKOVICE POWER ENGINEERING, a.s., ve spolupráci s odbornými pracovišti na VŠB-TU Ostrava a VUT v Brně.

Obr. 1 – Bezemisní parní cyklus



Klíčovou informací pro návrh uvedeného zařízení jsou přestupní součinitelé tepla a hmoty při kondenzaci páry za přítomnosti nekondenzující složky ( $\text{CO}_2$ ), jakožto výchozí parametry pro výpočet optimální velikosti a uspořádání teplosměnných ploch. Vyšetřování vlivu obsahu inertu v PPS na intenzitu sdílení tepla a hmoty bylo proto nedílnou součástí přípravy projekčních podkladů pro konstrukční práce na prototypu SPG.

## 3. Výpočtový model

Kondenzace páry v binární směsi s inertním plynem se od kondenzace čisté páry liší ve dvou směrech. Jednak je to způsobeno složením směsi, která s rozvojem kondenzace po délce výměníku mění poměr obou složek ve prospěch inertu. Důsledkem tohoto jevu pak je pokles saturační teploty páry plynoucí z aplikace Daltonova zákona, čímž je redukován i teplotní spád mezi směsí a chladicím médiem. Další odlišnost spočívá ve vytváření stacionární vrstvy plynu přiléhající k povrchu blány kondenzátu, jež představuje bariéru pro difundující páru a omezuje vliv přenosu hmoty na celkový tepelný tok stěnou kondenzátoru.

Výchozím vztahem pro určení potřebné plochy výměny tepla je diferenciální rovnice

$$dA = \frac{1}{U \cdot \Delta T} dQ, \quad (1)$$

kde  $U$  [ $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ ] je celkový součinitel prostupu tepla a  $\Delta T$  [K] je teplotní rozdíl mezi směsí a chladicím médiem,  $Q$  [W] je přenesený výkon.

Jelikož je obtížné matematicky vyjádřit  $U$  a  $\Delta T$  jako funkci  $Q$  vlivem mnoha dalších faktorů na hodnotu těchto dvou veličin, není reálné provést integraci vztahu (1) analytickou cestou. Obvyklý způsob při řešení tohoto problému je numerické integrování spočívající v rozdělení kondenzátoru na konečný počet sekcí, v nichž  $dQ=q$  je tepelný výkon na konečně malém intervalu. Přesnost výpočtu je pak přímo úměrně závislá na zvoleném počtu sekcí.

Měrný tepelný tok z proudu směsi do filmu kondenzátu je dán současným působením sdílení tepla a sdílení hmoty, přičemž hnací silou těchto dějů jsou gradient teploty a gradient koncentrací (v technické praxi také uváděný jako gradient parciálních tlaků).

$$\dot{q} = \alpha_m \cdot (t_m - t_i) + \frac{\beta \cdot C_m}{\Delta p_{gf}} \cdot (p_v - p_i) \cdot M_v \cdot l_v, \quad (2)$$

kde  $M_v$  [ $\text{kg}\cdot\text{kmol}^{-1}$ ] je molární hmotnost páry,  $l_v$  [ $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ] je latentní teplo páry,  $\Delta p_{gf}$  [Pa] je střední logaritmický spád parciálního tlaku inertu mezi proudem směsi a fázovým rozhraním,  $C_m$  [ $\text{kmol}\cdot\text{m}^{-3}$ ] je molární koncentrace směsi.

Konvektivní součinitel přestupu tepla ze směsi  $\alpha_m$  [ $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ ] lze vyjádřit pomocí Dittus-Boelterovy empirické rovnice popisující turbulentní proudění tekutin uvnitř hladkých trubek. (3)

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{1/3}$$

Součinitel přenosu hmoty  $\beta$  [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ] vychází z analogie s přestupem tepla a je možné jej určit z podobnostních kritérií na základě znalosti termofyzikálních parametrů směsi a hydrodynamických poměrů.

$$Sh = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Sc^{1/3} \quad (4)$$

$$\beta = \frac{D_{AB} \cdot Sh}{d_{ek}}, \quad (5)$$

kde  $d_{ek}$  [m] je charakteristický rozměr průtočného průřezu. Pro koeficient difúze binární směsi v oblasti nízkých tlaků platí Wilke-Lee empirická rovnice.

$$D_{AB} = \frac{4,28 \cdot 10^{-7} \cdot T^{3/2}}{P_m \cdot (v_A^{1/3} + v_B^{1/3})} \cdot \sqrt{\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B}}, \quad (6)$$

kde  $T$  [K] je absolutní teplota směsi,  $p$  [bar] je celkový tlak směsi,  $M$  [kg.kmol<sup>-1</sup>] a  $v$  [m<sup>3</sup>.kmol<sup>-1</sup>] jsou molární hmotnost a difúzní molekulový objem složek.

Měrný tepelný tok vstupující do fázového rozhraní daný vztahem (2) musí odpovídat tepelnému toku, který prostupuje filmem kondenzátu, stěnou kondenzátoru a dále do chladicího média. Za předpokladu zanedbatelného teplotního spádu ve stěně kondenzátoru platí

$$\dot{q} = \alpha_w \cdot (t_i - t_c), \quad (7)$$

kde  $t_c$  [K] je teplota v ose proudu chladicí vody a  $t_i$  [K] je teplota kondenzátu.

Součinitel přestupu tepla na straně chladicí vody  $\alpha_w$  [Wm<sup>-2</sup>K<sup>-1</sup>] při turbulentním proudění v hladké trubce se stabilizovaným rychlostním profilem se určí pomocí vztahu s platností v rozsahu  $10^4 < Re < 5 \cdot 10^6$  a  $0,5 < Pr < 200$ , který publikoval Petuchov.

$$Nu = \frac{(f/8) \cdot Re \cdot Pr}{1,07 + 12,7 \cdot \sqrt{f/8} \cdot Pr^{2/3} - 1}, \quad (8)$$

kde  $f = [1,82 \cdot \log(Re) - 1,64]^2$ .

V rovnicích (2) a (7) vyskytující se teplota kondenzátu představuje proměnnou, kterou je z hlediska experimentálního měření velmi nesnadné získat. V takovém případě se při výpočtu využívá Colburnova iterační metoda [4] založená na odhadu teploty kondenzátu, jejíž hodnota se prokazatelně nachází v intervalu  $< t_m; t_c >$ . Pro počáteční odhad teploty se stanoví odpovídající parciální tlak páry na fázovém rozhraní, s jehož pomocí se vypočítá hmotnostní tok páry ze směsi k povrchu blány kondenzátu. Výsledný tepelný tok pak musí odpovídat toku odvádějímu teplo z blány kondenzátu do chladicího média. Jsou-li si obě hodnoty rovny, získáváme správné řešení, z něhož určíme celkový součinitel přestupu tepla (9). V opačném případě je třeba korigovat odhad teploty a proceduru zopakovat

$$\dot{q} = U \cdot (t_m - t_c) \quad (9)$$

#### 4. Experimentální měření

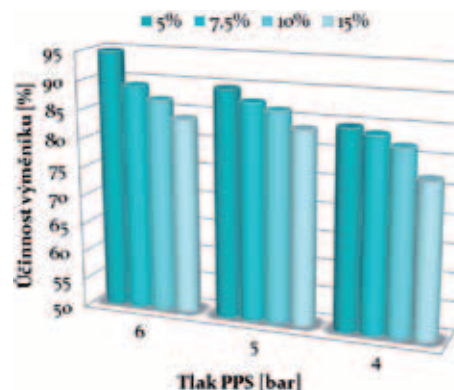
Vstupní data výpočtového modelu byla získána realizací série experimentálních měření, při nichž bylo vyšetřováno chování PPS v jednoduchém vertikálním trubkovém ( $\phi 42,3$  mm) kondenzátoru délky 3 m. Směs s obsahem CO<sub>2</sub> v rozsahu hmotnostního podílu 5 až 15 % proudila směrem dolů tak, aby setrvačné síly působily na formující se vrstvu kondenzátu souběžně s gravitačními, a tím se vytvořily podmínky pro rychlý odvod kondenzátu z teplosměnného povrchu. Zkušební režimy byly kromě vstupního složení PPS definovány i rychlostními poměry (průtok páry 62 kg/h) a teplotními spády mezi PPS a protiproudým chladicím médiem, které vycházely z volených tlakových úrovní PPS v rozmezí 4 až 6 bar. Vyhodnocování experimentálních zkoušek proběhlo dvěma metodami – bilanční analýzou ze zachyceného množství kondenzátu a z teplotního profilu PPS sestaveného z měřících bodů rozmístěných po celé délce výměníku. Z těchto veličin byla stanovena separační účinnost výměníku, výstupní čistota plynu a lokální součinitel přestupu tepla, které byly porovnány s teoretickými předpoklady.

#### 5. Závěr

Grafické vyjádření účinnosti separace (poměr výstupního hmotnostního toku páry ku vstupnímu, obr. 2) jasně dokumentuje skutečnost, že přítomnost inertního plynu má značný vliv na množství zkondenzované páry a tedy i výstupní čistotu plynu. Se vzrůstajícím

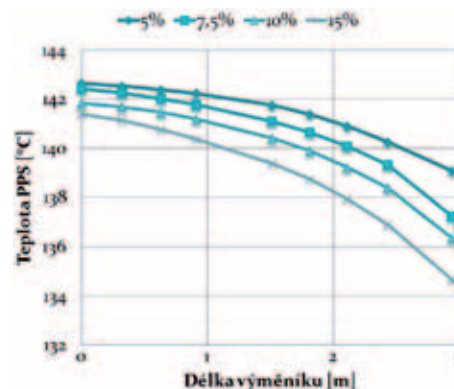
podílem CO<sub>2</sub> ve směsi dochází ke zhoršení podmínek sdílení tepla a utlumování kondenzačního procesu.

Obr. 2 – Účinnost separace

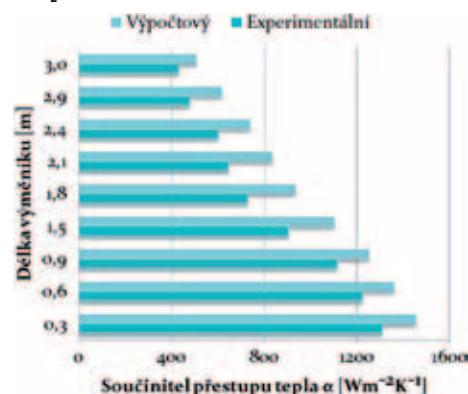


Přestože u nejpříznivějšího případu charakterizovaného tlakem 6 bar při 5% koncentraci CO<sub>2</sub> v PPS bylo dosaženo účinnosti separace 95 %, představuje tato hodnota ještě poměrně vysoký podíl zbytkové páry v PPS, což se projevuje na čistotě plynu definované obsahem vlhkosti. Z koncentračního profilu PPS v kondenzátoru (obr. 3) je patrná velmi pozvolná změna složení PPS v počátečních sekcích výměníku, kde naopak dochází k nejintenzivnějšímu sdílení tepla a srážení největšího objemu parní fáze.

Obr. 3 – Koncentrační profil po délce kondenzátoru



Obr. 4 – Srovnání experimentálních hodnot s výpočtovými (režim: 5 bar, 15% CO<sub>2</sub>, 62 kg/h)



Teplotní profil pak koresponduje s průběhem složení PPS po délce výměníku, jelikož změna parciálního tlaku páry vyvolaná růstem koncentrace inertu způsobuje pokles saturační teploty, a tím i teplotního spádu, jakožto řídicí veličiny konvektivního přestupu tepla. Tento jev představuje jeden ze základních faktorů majících negativní dopad na vývoj kondenzačního procesu ve srovnání s čistou párou, kde k takovému efektu nedochází.

Experimentálním měřením byly zjištěny limitní faktory kondenzace paroplynové směsi s následným zpracováním matematického

*Dokončení na další straně*

modelu řešení blánové kondenzace v jednoduchém elementu SPG a dále zpřesněna metodika získávání a vyhodnocování experimentálních dat pro další fázi výzkumného programu, kterou bude návrh, výstavba a provozní ověření komplexního separačního parogenerátoru, jakožto zásadní komponenty bezemisního parního cyklu.

## 5. Literatura

- [1] WHITE, V.; ALAM, R.; MILLER, E.: Purification of oxyfuel-derived CO<sub>2</sub> for sequestration or EOR. *Eighth international conference on greenhouse gas control technologies*, Trondheim, Norway; 2006
- [2] PRONSKE, K.: Climate neutral combustion technology. *Workshop on carbon dioxide management for EOR*, Kuwait, 2007
- [3] KOLONIČNÝ, J.; KUPKA, D.: Využití separačního parogenerátoru v čistých technologiích. *Kotle a energetická zařízení 2009*, Brno. 2009
- [4] COLBURN, A. P.; HOUGEN, A. O.: Design of cooler condensers for mixtures of vapors with noncondensing gas. *Industrial and engineering chemistry*, vol. 26, 1178-1182, 1934

## Abstract

**Summary:** The paper presents a new concept of separation of carbon dioxide from steam-gas mixture and describes factors which reduce condensation heat transfer in the presence of the noncondensable gas. The experimental study has been carried out in order to investigate local heat transfer coefficients in the vertical condenser. Database based on the experimental work will provide information for design of 30 kW decarbonizing steam generator.

**Keywords:** steam-gas mixture, separation, condensation experiments