

30. Setkání kateder mechaniky tekutin a termomechaniky



22.-24.6. 2011

Špindlerův Mlýn

Jednotlivý příspěvek ze sborníku



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI



evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Kogenerace nové generace

František JIROUŠ¹, Kamil STÁREK², Vladimír KUPSA³

¹ Prof. Ing. František Jirouš, DrSc.: ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Technická 4, 166 07 Praha 6, frantisek.jirous@fs.cvut.cz

² Ing. Kamil Stárek, Ph.D.: VÍTKOVICE POWER ENGINEERING, a.s. Ruská 1142/30, 706 00 Ostrava-Vítkovice, kamil.starek@vitkovice.cz,

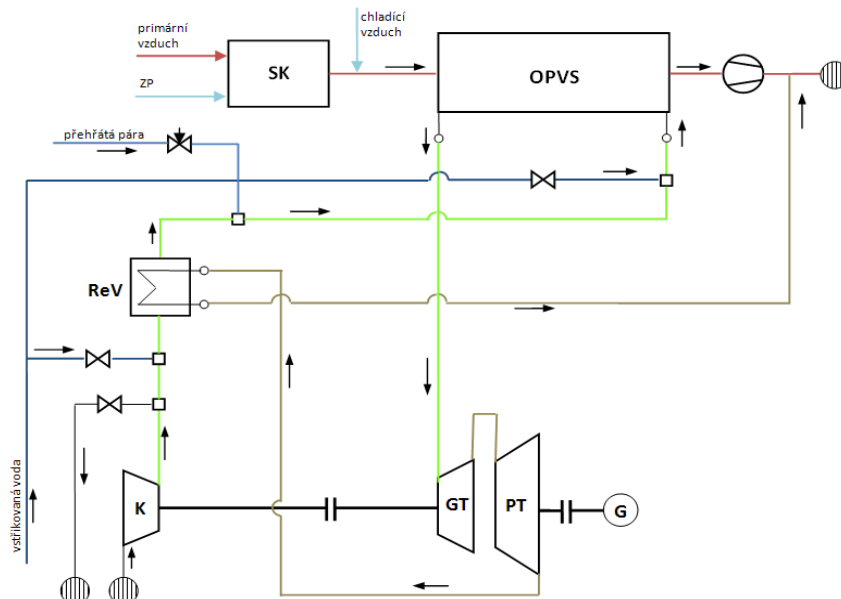
³ Ing. Vladimír Kupsa: VÍTKOVICE POWER ENGINEERING a.s., Ruská 1142/30, 706 00 Ostrava-Vítkovice, vladimir.kupsa@vitkovice.cz

Abstrakt: Ve spalinovém kotli (ohřívák parovzduchové směsi) demonstrační jednotky se ohřívá parovzduchová směs na teplotu 835 °C a následně se vede do vysokotlaké plynové turbíny, která je na společném hřídeli s kompresorem. Před spalínovým kotlem se vzduch z kompresoru sytí pomocí vodních a parních vstříků. Parovzduchová směs se z vysokotlaké plynové turbíny vede do tělesa nízkotlaké plynové turbíny, která má na hřídeli generátor. Demonstrační jednotka slouží pro ověření transformace primární energie tuhých, kapalných a plyných paliv na elektrickou energii. U komerčního zařízení bude rovněž využíváno odpadní teplo, např. pro ohřev TUV. Velká pozornost musela být věnována proudění ve spalínovém kotli – výměníku tepla, aby byla dodržena přípustná teplota stěn trubek.

1. Flexibilní energetický systém

Na obr. 1 je procesní schéma demonstrační jednotky „Flexibilního energetického systému“, která slouží k ověření vyvíjených komponent a celého systému. Energetická jednotka EJ-500FES (kompresor + turbína) dodává do systému stlačený vzduch, který se nejdříve ochladí na požadovanou teplotu prostřednictvím prvního vodního vstříku

a následně se ohřívá v rekuperačním výměníku (ReV). Za rekuperačním výměníkem následuje parní a vodní vstřík pro dodržení požadované koncentrace vodní páry a teploty v parovzduchové směsi, která se ohřívá spaliny v ohříváku parovzduchové směsi (OPVS) na teplotu 835 °C.

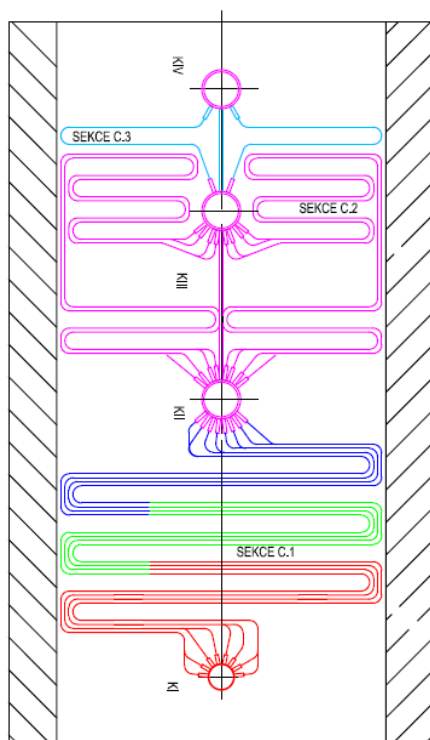


Obrázek 1: Schéma demonstrační jednotky „Flexibilního energetického systému“

Takto ohřívá parovzduchová směs je zavedena do vysokotlaké turbíny, která je na společném hřídeli s kompresorem, následně směs expanduje v nízkotlaké turbíně, která pohání elektrický generátor. V případě komerční jednotky vyšších výkonů se uvažuje využití odpadního tepla zapojením Rankin-Clausiova cyklu prostřednictvím HRSG kotle a parní turbíny. Systém lze rovněž využít pro společnou výrobu elektrické energie a tepla a to zejména u jednotek menšího výkonu.

2. Ohřívák parovzduchové směsi

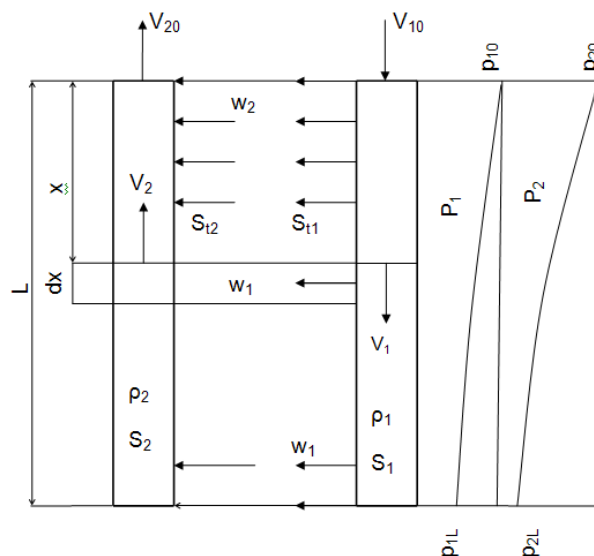
Mezi nejdůležitější zařízení Flexibilního energetického systému patří ohřívák parovzduchové směsi. Jedná se o vysokoteplotní radiačně-konvekční trubkový výměník tepla, který slouží k ohřevu parovzduchové směsi spaliny o vstupní teplotě cca 1100 °C. Trubkový svazek je rozdělen do tří sekcí, které jsou zavěšeny na speciálních závěsech ve spalínovém kanálu obdélníkového průřezu. Komory jsou provedeny jako topené.



Obrázek 2: Ohřívák parovzduchové směsi

Vzhledem k vysoké vstupní teplotě spalin bylo nutné zajistit vysokou míru hydraulické rovnoměrnosti proudění parovzduchové směsi v trubkovém systému výměníku. Pro zajištění hydraulické rovnoměrnosti je nutné nalézt optimální průřez rozváděcí a sběrné komory výměníku.

3. Stanovení optimálního průtočného průřezu komor



Obrázek 3: Trubkový systém typu „U“

U trubkových systémů s extrémně vysokým tepelným zatížením je s ohledem na teplotu stěny trubek důležité rovnoměrné rozdělení media do paralelně řazených trubek. Je hledán optimální průřez rozváděcí a sběrné komory. Pro proudění v komorách podle obr. 3 lze psát Bernoulliho rovnici pro vertikální rozváděcí komoru [1] :

$$\frac{dp_1}{dx} = -E \cdot \rho_1 \cdot V_1 \cdot \frac{dV_1}{dx} + g \cdot \rho_1 \quad (1)$$

pro vertikální sběrnou komoru

$$\frac{dp_2}{dx} = -A \cdot \rho_2 \cdot V_2 \cdot \frac{dV_2}{dx} + g \cdot \rho_2 \quad (2)$$

a rozdíl tlaku v trubkách vyjádřit

$$p_1 - p_2 = \zeta_v \cdot \frac{\rho_1}{2} \cdot w_1^2 \quad (3)$$

Požadavkem při hledání optimálního průtočného průřezu komor je:

1. Tlak v komoře je konstantní.
2. Rychlost proudění z komory do trubek a z trubek do komory je konstantní, rovna střední rychlosti proudění v trubkách

$$\bar{w} = \frac{m}{S_t \cdot \rho} \quad (4)$$

3. Průtočný průřez trubek S_t je nahrazen spárou o činné délce komory L a šířce

$$b = \frac{S_t}{L} \quad (5)$$

Pro element rozdělovací komory lze psát hmotnostní bilanci

$$S_1 \cdot V_1 \cdot \rho_1 - b_1 \cdot dx \cdot \bar{w}_1 \cdot \rho_1 = [S_1 \cdot V_1 + d(S_1 \cdot V_1)] \rho_1 \quad (6)$$

odkud rychlost proudění v trubkách

$$\bar{w}_1 = -\frac{L_1}{S_{t1}} \cdot \frac{d(S_1 \cdot V_1)}{dx} \quad (7)$$

takže

$$d(S_1 \cdot V_1) = -\frac{m}{L_1 \cdot \rho_1} dx \quad (8)$$

Po integraci

$$S_1 \cdot V_1 = \frac{m}{\rho_1} \left(1 - \frac{x}{L_1} \right) \quad (9)$$

když pro $x = 0$

$$S_1 \cdot V_1 = S_{10} \cdot V_{10} \quad (10)$$

Pro konstantní průběh tlaku v komorách je

$$\frac{dp_1}{dx} = \frac{dp_2}{dx} = 0 \quad (11)$$

Z rov. (1) plyne

$$V_1 \cdot dV_1 = \frac{g}{E} dx \quad (12)$$

a po integraci, když pro $x = 0$ $V_1 = V_{10}$

$$V_1 = \sqrt{\frac{2g}{E} \cdot x + V_{10}^2} \quad (13)$$

S přihlédnutím k rov. (9) plyne pro optimální průtočný průřez rozdělovací komory funkce

$$S_{1OPT} = \frac{m}{\rho_1} \left(1 - \frac{x}{L_1} \right) \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{2g}{E} \cdot x + V_{10}^2}} \quad (14)$$

Pro sběrnou komoru platí hmotnostní bilance v elementu komory

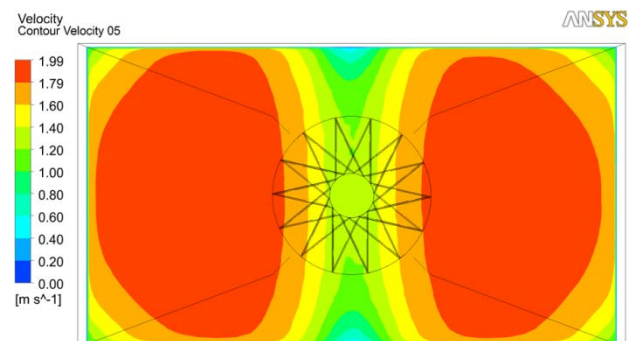
$$S_2 \cdot V_2 \cdot \rho_2 = S_2 \cdot V_2 \cdot \rho_2 + d(S_2 \cdot V_2) \rho_2 + \frac{S_{t2}}{L_2} \cdot \rho_2 \cdot \bar{w}_2 dx \quad (15)$$

Obdobným postupem jako u rozdělovací komory plyne pro optimální průtočný průřez vertikální sběrné komory funkce

$$S_{2OPT} = \frac{m}{\rho_2} \frac{1 - \frac{x}{L_2}}{\sqrt{\frac{2g}{A} \cdot x + V_{20}^2}} \quad (16)$$

4. Závěr

Uvedeným matematickým modelem byla dosažena vysoká míra proudění parovzduchové směsi v trubkovém systému typu „U“ ohříváku parovzduchové směsi. Dalším důležitým požadavkem pro bezpečný provoz výměníku z hlediska dodržení přípustných povrchových teplot trubek bylo rovněž dosažení rovnoměrného rychlostního a teplotního pole spalín.



Obrázek 4: Rychlostní pole spalín před sběrnou komorou KIV

Z obr. 4 plyne, že byla dosažena vysoká míra rovnoměrnosti po výšce výměníku, což vzhledem k uspořádání trubek zajišťuje rovnoměrné tepelné zatížení jednotlivých trubek.

5. Literatura

- [1] JIROUŠ F.: APLIKOVANÝ PŘENOS TEPLA A HMOTY, PRAHA, ČESKÁ TECHNIKA – NAKLADATELSTVÍ ČVUT V PRAZE, 2010
- [2] KUPSA V., STÁREK K.: ROČNÍ ZPRÁVA K 31. 12. 2010, „VÝZKUM A VÝVOJ FLEXIBILNÍHO ENERGETICKÉHO SYSTÉMU TRANSFORMUJÍCÍHO PRIMÁRNÍ ENERGII BIOMASY I ALTERNATIVNÍCH PALIV PŘI JEJICH SPALOVÁNÍ, POPŘÍPADĚ ODPADNÍ TEPLA Z RŮZNÝCH TEPELNÝCH AGREGÁTŮ NA ELEKTRICKOU ENERGII S MOŽNOSTÍ KOGENERACE S VYŠŠÍ ÚČINNOSTÍ“, OSTRAVA, VÍTKOVICE POWER ENGINEERING A.S., 2010

Poděkování

Projekt „Výzkum a vývoj flexibilního energetického systému transformujícího primární energii biomasy i alternativních paliv při jejich spalování, popřípadě odpadní teplo z různých tepelných agregátů na elektrickou energii s možností kogenerace s vyšší účinností“ (FR-TI1/073) je realizován za finanční podpory z prostředků státního rozpočtu prostřednictvím Ministerstva průmyslu a obchodu.