

VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA

FAKULTA STROJNÍ

KATEDRA ENERGETIKY



STUDENTSKÁ SOUTĚŽNÍ PRÁCE

Návrh řešení chlazení plynu z teploty 1000 °C na teplotu 600 °C

Autor:

Bc. Zdeněk Schee

OSTRAVA 2011

Návrh řešení chlazení plynu z teploty 1000 °C na teplotu 600 °C

ANOTACE STUDENTSKÉ SOUTĚŽNÍ PRÁCE

SCHEE, Z. *Návrh řešení chlazení plynu z teploty 1000°C na teplotu 600°C: studentská soutěžní práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2011, 11 s.

Tato práce se zabývá návrhem vhodného chladicího zařízení k ochlazení plynu o zadaných parametrech. Tento plyn je produktem pyrolýzní jednotky a hledá se pro něj další energetické využití, pro které musí být chlazen. První část práce seznamuje s použitelnými tepelnými výměníky pro tento projekt. V druhé části je vytipován vhodný chladič a je proveden jeho tepelný výpočet. Závěrem práce je zhodnocení navrhovaného výměníku.

Obsah

| | |
|--|-----------|
| 1. TEPELNÉ VÝMĚNÍKY | 3 |
| 1.1. TRUBKOVÉ VÝMĚNÍKY | 3 |
| 2. POŽADAVKY NA VÝMĚNÍK | 5 |
| 3. NÁVRH CHLADÍČÍHO ZAŘÍZENÍ. | 5 |
| 4. VÝPOČET OČEKÁVANÝCH TEPELNÝCH TOKŮ A RYCHLOSTÍ PRO CHLAZENÍ PLYNU NA ŽÁDANOU TEPLOTU | 7 |
| 4.1. ZADANÉ A ZVOLENÉ VELIČINY..... | 7 |
| 4.2. VÝPOČET POTŘEBNÝCH VELIČIN..... | 8 |
| 4.3. URČENÍ TERMODYNAMICKÝCH VELIČIN | 8 |
| 4.4. VÝPOČET CHLADÍČÍHO VÝKONU, HMOTNOSTNÍCH TOKŮ A RYCHLOSTÍ PROUDĚNÍ | 8 |
| 5. VÝPOČET ROZMĚRŮ, TEPELNÝ A HYDRAULICKÝ VÝPOČET | 9 |
| 5.1. VÝPOČET SOUČinitele PŘESTUPU TEPLA PRO VODU | 9 |
| 5.2. VÝPOČET SOUČinitele PŘESTUPU TEPLA PRO PLYN..... | 9 |
| 5.3. VÝPOČET TEPELNÉHO TOKU PROSTUPEM TEPLA A TEPLŮ STĚN TRUBEK CHLADÍČE | 11 |
| 5.4. VÝPOČET DÉLKY CHLADÍČE | 12 |
| 6. ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ VÝPOČTŮ | 12 |
| POUŽITÁ LITERATURA | 13 |

1. Tepelné výměníky

Výměník tepla je zařízení, které umožňuje výměnu tepla mezi dvěma tekutinami o nestejně teplotě. Výměníky mohou být směšovací, jako například chladicí věž. Dalším typem jsou výměníky povrchové. Povrchové výměníky se dále dělí na regenerativní, ve kterých teplejší a chladnější tekutina střídavě omývají teplosměnný povrch, jsou to například ohříváky vzduchu v elektrárnách. Dalším typem povrchových výměníků jsou výměníky rekuperativní, ve kterých jsou obě proudící tekutiny odděleny pevnou stěnou a tepelné trubice, kde přenos tepla je uskutečňován při fázových změnách. Nejvhodnějším typem výměníku pro zadání této práce je rekuperativní trubkový výměník s a proto se dále budeme zabývat jen tímto typem. [4]

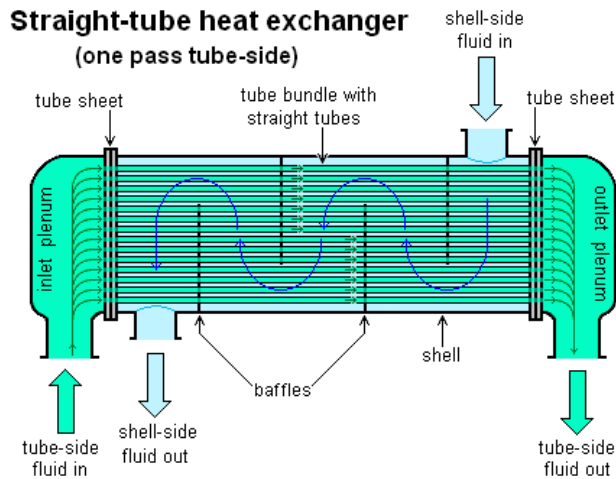
1.1. Trubkové výměníky

Trubkový výměník tepla se skládá z pláště výměníku a trubkového svazku. V plášti jsou otvory pro vstup a výstup ohřívané i ohřívající látky. Jedna z látek protéká svazkem trubek a druhá protéká mezitrubkovým prostorem. Trubkový svazek je tvořen vlastními trubkami, trubkovicí a soustavou vestaveb, které usměrňují tok teplotnosné látky v mezitrubkovém prostoru. Trubky jsou z různých materiálů, jako jsou měď, mosaz nebo nerezová ocel. Průměr trubek u starších typů výměníků bývá 16 až 22mm. U novějších typů bývá průměr trubek zpravidla menší. Podle polohy pláště rozeznáváme výměníky svislé a vodorovné. Dále je můžeme dělit na rozebíratelné a nerozebíratelné. U rozebíratelných výměníků je umožněn přístup k trubkovému svazku a dovoluje jeho čištění, ale i přesto bývá čištění problematické. Nerozebíratelné jsou lehčí a levnější.

Výměník s rovnými trubkami:

U výměníku s rovnými trubkami a pevnými trubkovicemi jsou trubky zaválcovány do dvou trubkovic přivařených k plášti výměníku. Trubkovice zároveň slouží jako příruba k upevnění hlav výměníku. Přes hlavy do trubek výměníku vstupuje a vystupuje teplotnosná látka. Druhá teplotnosná látka vstupuje a vystupuje otvory v plášti do mezitrubkového prostoru výměníku. Jedná se o jednoduchý výměník a jednotlivé chody je možné spojovat do sekcí a vytvářet tak vícenásobné výměníky.

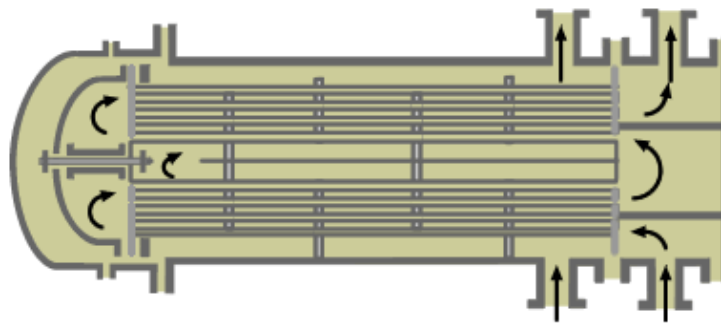
Návrh řešení chlazení plynu z teploty 1000 °C na teplotu 600 °C



Obr.1 – trubkový výměník s rovnými trubkami

Výměník s rovnými trubkami a plovoucí hlavou:

Dalším typem výměníku s rovnými trubkami je výměník s plovoucí hlavou. Rovné trubky jsou rovněž zaválcovány do trubkovnic. K jedné z trubkovnic je připevněna plovoucí hlava, která slouží k otočení proudu teplotnosné látky o 180°. K druhé trubkovnici je připevněna hlava sloužící ke vstupu a výstupu teplotnosné látky. V hlavě je jedna nebo i více oddělovacích příček, které umožňují řešit výměník jako dvouchodý nebo i vícechodý. U dvouchodého výměníku příčka v hlavě zajistí, vsup teplotnosné látky do jedné poloviny trubek k plovoucí hlavě, která otočí proud teplotnosné látky o 180° a pošle ji přes druhou polovinu trubek k výstupu z výměníku. Druhá teplotnosná látka vstupuje a vystupuje z mezitrubkového prostoru otvory v plášti výměníku.



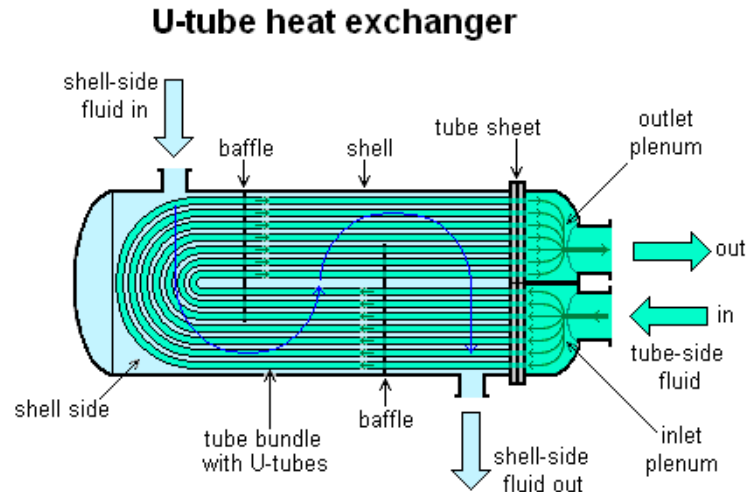
Obr.2 – trubkový výměník s rovnými trubkami a plovoucí hlavou

Výměník s vlásenkovými trubkami:

Trubky ve tvaru písmene U (vlásenky) jsou zaválcovány do jedné trubkovnice. Trubky s trubkovnicí jsou zasunuty do pláště výměníku. Hlava je připevněna pomocí příruby k plášti výměníku a slouží ke vstupu a výstupu teplotnosné látky. Hlava je rozdělena

Návrh řešení chlazení plynu z teploty 1000 °C na teplotu 600 °C

oddělovací příčkou jedná se tedy o výměníky dvouchodé. Teplonosná látka vstupuje do hlavy výměníku, kde příčka zajistí vchod do jednoho konce trubek, látka se po projití trubkami vrací na druhou stranu příčky v hlavě a opouští výměník. Druhá teplonosná látka vstupuje a vystupuje otvory v plášti výměníku do mezitrubkového prostoru.



Obr.3 – trubkový výměník s U-trubkami

2. Požadavky na výměník

Jsou to:

- co nejmenší rozměry, hmotnost a cena výměníku,
- co nejmenší tlakové ztráty (čerpací práce),
- co nejvyšší spolehlivost v provozu.

První dva požadavky se týkají návrhu, případně výběru vhodného výměníku tepla. Vzhledem k tomu, že tyto požadavky jsou protichůdné, je konečné řešení vždy kompromis mezi body 1 a 2. Výběr z více řešení posuzovaných z tohoto pohledu pak představuje optimální návrhovou variantu. Maximální provozní spolehlivost je již podchycena v konstrukčním řešení a výrobě výměníku. Velký podíl na ni má však kvalita a správná četnost prováděné údržby. Spolehlivost výměníků tepla je dána především minimální poruchovostí a dobrou opravitelností výměníku. [1]

3. Návrh chladícího zařízení.

První navrhnutou variantou chladiče byl žárotrubný protiproudý trubkový výměník. Tuto variantu jsem však brzy vyloučil, jelikož výměník by byl příliš velký a rovněž by neřešil problémy vzniklé tepelnou dilatací trubek.

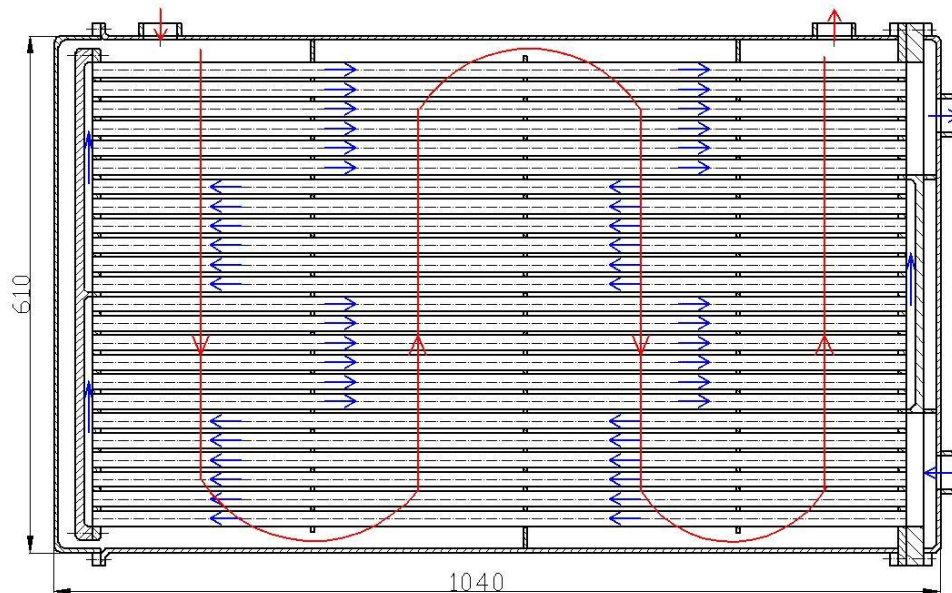
Návrh řešení chlazení plynu z teploty 1000 °C na teplotu 600 °C

Druhá varianta chladiče je čtyřchodý trubkový výměník s plovoucí hlavou, kdy plyn proudí kolmo na svazek trubek. Princip funkce tohoto výměníku je vysvětlen v první kapitole. Chladič se bude skládat ze dvou shodných sériově zapojených modulů.

Do prvního modulu bude proudit plyn o teplotě 1000 °C a ochladí se na teplotu 781,5°C. Pro dosažení lepších tepelných toků bude proudění plynu mezi trubkami usměrňováno sadou přepážek. Tyto přepážky mají rozteč 250 mm a jsou ze žáruvzdorné nerezové oceli stejně jako plášť výměníku. Trubky výměníku jsou uspořádány střídavě viz. obr. 5. Trubkami proudí voda jako chladicí médium. Tato voda se ve hlavách výměníku celkem čtyřikrát otočí a tím se zmenší délka výměníku. Trubky jsou z nerezové oceli, kdy už není zapotřebí tak velké odolnosti proti žáru, jelikož jsou dostatečně ochlazovány vodou.

V druhém modulu se plyn ochladí s teploty 781,5°C na požadovaných 600°C. Jediný rozdíl mezi těmito moduly je v množství chladicí vody, která proudí výměníkem.

Prívod plynu do výměníku není stálý a pohybuje se v rozmezí $10 \text{ m}^3_{\text{N}} \cdot \text{s}^{-1}$ až $30 \text{ m}^3_{\text{N}} \cdot \text{s}^{-1}$. Rozhodl jsem se tedy umožnit odpojení jednoho modulu výměníku ze systému, při malém průtoku plynu. Jeden modul výměníku toto množství bez problémů zvládne uchladiť a druhý modul bude možno například vyčistit.



Obr. 4 – návrh modulu pro variantu č. 2

Čištění modulu je řešeno rozebíratelnou boční deskou pláště. To umožní vyčištění zanesených trubek tlakovou vodou či párou. Voda po čištění bude odvedena kanálem ve dně výměníku, který slouží také jako kanál pro odvod případného kondenzátu.

4. Výpočet očekávaných tepelných toků a rychlostí pro chlazení plynu na žádanou teplotu

Veškeré výpočty budou provedeny jen pro modul 1000, výsledky jsou srovnány v tab. 6. Výpočty jsou provedeny pomocí programu Microsoft Excel.

4.1. Zadané a zvolené veličiny

Potřebné hodnoty pro výpočet jsou uvedeny v tab. 3.

| | značka | modul 1000 | modul 800 | jednotka |
|-------------------------------------|-------------|------------|-----------|------------------------------------|
| vstupní teplota plynu | $t_{g,in}$ | 1000 | 781,5 | [°C] |
| výstupní teplota plynu | $t_{g,out}$ | 781,5 | 600 | [°C] |
| střední teplota plynu | $t_{g,stř}$ | 890,8 | 690,8 | [°C] |
| vstupní teplota vody | $t_{w,in}$ | 55 | 55 | [°C] |
| výstupní teplota vody | $t_{w,out}$ | 85 | 85 | [°C] |
| množství plynu | $V_{G,N}$ | 30 | 30 | [m ³ .h ⁻¹] |
| množství plynu za reálných podmínek | V_G | 129,1 | 106,9 | [m ³ .h ⁻¹] |
| vnější průměr trubky chladiče | $d_{v,out}$ | 18 | 18 | [mm] |
| tloušťka stěny trubky chladiče | t_v | 3 | 3 | [mm] |
| vnitřní průměr trubky chladiče | $d_{v,in}$ | 12 | 12 | [mm] |
| počet trubek v jednom chodu | n | 15 | 15 | [-] |
| počet řad trubek | z | 24 | 24 | [-] |
| rozteč přepážek chladiče | r | 250 | 250 | [mm] |
| mezera mezi trubkami | x_2 | 7 | 7 | [mm] |
| přímá rozteč | s_1 | 25 | 25 | [mm] |
| podélná rozteč | s_2 | 23 | 23 | [mm] |
| úhlopříčná rozteč | s | 27 | 27 | [mm] |

tab. 3 – zadané a volené hodnoty pro výpočet

4.2. Výpočet potřebných veličin

- průtočná plocha pro plyn

$$S_G = 2 \cdot r \cdot x_1 + 2 \cdot r \cdot x_2 \quad S_G = 0,06 [m^2]$$

- průtočná plocha pro vodu

$$S_W = \frac{\pi \cdot d_{v,in}^2}{4} \cdot n \quad S_W = 0,0011 [m^2]$$

- tlak plynu

$$p_G = p_a - \Delta p_{CHL} \quad p_G = 98000 [Pa]$$

4.3. Určení termodynamických veličin

Termodynamické veličiny jsou odečteny z programu ESS a [3].

| | měrná tepelná kapacita | hustota | dynamická viskozita | kinematická viskozita | součinitel tepelné vodivosti |
|------------|---|-----------------------|-----------------------|------------------------------------|---------------------------------------|
| značka | C_{pG} | ρ_G | η_G | ν_G | λ_G |
| jednotka | [kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹] | [kg.m ⁻³] | [Pa.s] | [m ² .s ⁻¹] | [W.m ⁻¹ .K ⁻¹] |
| modul 1000 | 9,17 | 0,509 | 2,6.10 ⁻⁵ | 5,1.10 ⁻⁵ | 0,23 |
| modul 800 | 8,43 | 0,6 | 2,2.10 ⁻⁵ | 3,7.10 ⁻⁵ | 0,18 |
| voda | 4094 | 977,8 | 4,06.10 ⁻⁴ | 4,15.10 ⁻⁷ | 0,65 |
| trubky | - | - | - | - | 22,26 |

tab. 4 - hodnoty termodynamických veličin.

4.4. Výpočet chladicího výkonu, hmotnostních toků a rychlostí proudění

- chladicí výkon chladiče

$$\dot{Q}_{ch} = \dot{V}_G \cdot c_{pG,900^\circ C} \cdot (t_{G,IN} - t_{G,OUT}) \cdot \varphi \quad \dot{Q}_{ch} = 71,82 [kW]$$

- hmotnostní tok vody

$$\dot{M}_W = \frac{\dot{Q}_{ch}}{c_{w,70^\circ C} \cdot (t_{W,out} - t_{W,in})} \quad \dot{M}_{ch} = 0,57 [kg \cdot s^{-1}]$$

- objemový tok vody

$$\dot{V}_W = \frac{\dot{M}_W}{\rho_{W,70^\circ C}} \quad \dot{V}_W = 6 \cdot 10^{-4} [m^3 \cdot s^{-1}]$$

Návrh řešení chlazení plynu z teploty 1000 °C na teplotu 600 °C

- rychlost proudění plynu

$$w_G = \frac{\dot{V}_G}{S_G} \quad w_G = 5,98 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}\text{]}$$

- rychlost proudění vody

$$w_W = \frac{\dot{V}_W}{S_W} \quad w_G = 0,5 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}\text{]}$$

5. Výpočet rozměrů a tepelný výpočet

5.1. Výpočet součinitele přestupu tepla pro vodu

- Reynoldsovo kritérium:

$$\text{Re}_W = \frac{w_W \cdot d_{v,in}}{\nu_{W,70^\circ\text{C}}} \quad \text{Re}_W = 14603$$

- Prandtlovo kritérium:

$$\text{Pr}_W = 2,6$$

Předpoklad: Součinitel přestupu tepla vody bude násobně větší než součinitel přestupu tepla plynu. Z toho vyplývá, že stěna trubky bude dostatečně ochlazována a její teplota se bude blížit teplotě vody. Volím tedy teplotu stěny trubky na straně vody 80°C.

$$\text{Pr}_{W,80^\circ\text{C}} = 1,78$$

- Nuseltovo kritérium:

$$\text{Nu}_W = 0,021 \cdot \text{Re}_W^{0,8} \cdot \text{Pr}_W^{0,43} \cdot \left(\frac{\text{Pr}_W}{\text{Pr}_{W,80^\circ\text{C}}} \right)^{0,25} \quad \text{Nu}_W = 74,71$$

- Součinitel přestupu tepla:

$$\alpha_W = \frac{\text{Nu}_W \cdot \lambda_{W,70^\circ\text{C}}}{d_{v,in}} \quad \alpha_W = 4043 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}\text{]}$$

5.2. Výpočet součinitele přestupu tepla pro plyn

- Reynoldsovo kritérium:

$$\text{Re}_G = \frac{w_G \cdot d_{v,out}}{\nu_{G,900^\circ\text{C}}} \quad \text{Re}_G = 2098$$

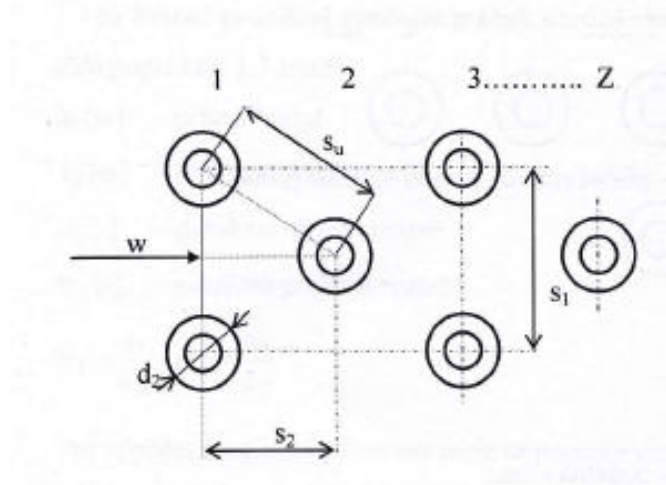
- Prandtlovo kritérium:

$$\text{Pr}_G = \frac{\eta_{G,900^\circ\text{C}} \cdot c_{p,G,900^\circ\text{C}}}{\lambda_{G,900^\circ\text{C}}} \quad \text{Pr}_G = 5 \cdot 10^{-4}$$

Návrh řešení chlazení plynu z teploty 1000 °C na teplotu 600 °C

- Volba uspořádání trubek:

Z důvodu zvýšení součinitele přestupu tepla plynu volím střídavé uspořádání trubek.



Obr. 5 střídavé uspořádání trubek [2]

- Poměrná přímá rozteč:

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{d_{v,out}} \quad \sigma_1 = 1,389$$

- Poměrná podélná rozteč:

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{d_{v,out}} \quad \sigma_2 = 1,278$$

- Poměrná úhlopříčná rozteč:

$$\sigma_u = \frac{s_u}{d_{v,out}} \quad \sigma_u = 1,5$$

- Součinitel přestupu tepla:

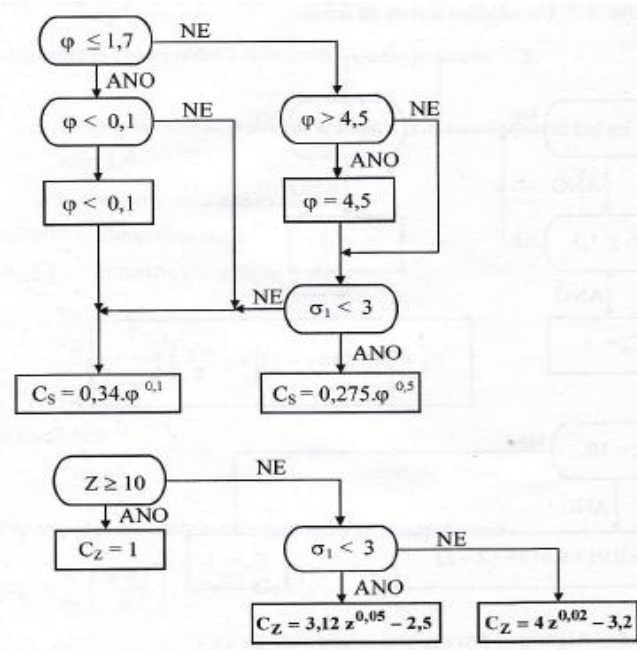
$$\alpha_G = \frac{\lambda_{G,900^\circ C}}{d_{v,out}} \cdot \text{Re}_G^{0,6} \cdot \text{Pr}^{0,3} \cdot C_s \cdot C_z \quad \alpha_G = 42,4 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}\text{]}$$

- Výpočet koeficientů C_s a C_z

Výpočet je proveden pomocí algoritmů na obr. 6 a dále je za potřebí, určit koeficient φ

$$\varphi = \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma_2 - 1} \quad \varphi = 0,78$$

Návrh řešení chlazení plynu z teploty 1000 °C na teplotu 600 °C



Obr. 6 - algoritmy pro určení koeficientů C_S a C_Z [2]

Z algoritmů vyplívá:

$$C_S = 0,34 \cdot \varphi^{0,1}$$

$$C_S = 0,3316$$

$$C_Z = 1$$

5.3. Výpočet tepelného toku prostupem tepla a teplot stěn trubek chladiče

- součinitel prostupu tepla

$$k_l = \frac{\pi}{\left(\frac{1}{d_{v,in} \cdot \alpha_W} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_{TR}} \cdot \ln \frac{d_{v,out}}{d_{v,in}} + \frac{1}{d_{v,out} \cdot \alpha_G} \right)} \quad k_l = 2,35 [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$$

- tepelný tok pro 1m stěny trubky

$$q = k_l \cdot \Delta t_{STR} \quad q = 1918 [W \cdot m^{-1}]$$

- vnitřní teplota stěny trubky

$$t_{S,in} = t_{W,stř} + \frac{q}{\pi} \cdot \frac{1}{\alpha_W \cdot d_{v,in}} \quad t_{S,in} = 82,58 [^{\circ}C]$$

- vnější teplota stěny trubky

$$t_{S,out} = t_{G,stř} - \frac{q}{\pi} \cdot \frac{1}{\alpha_G \cdot d_{v,out}} \quad t_{S,out} = 91,53 [^{\circ}C]$$

- střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t_{STR} = \frac{(t_{G,IN} - t_{W,OUT}) - (t_{G,OUT} - t_{W,IN})}{\ln \frac{(t_{G,IN} - t_{W,OUT})}{(t_{G,OUT} - t_{W,IN})}} \quad \Delta t_{STR} = 817,1 [^{\circ}C]$$

5.4. Výpočet délky chladiče

- délka všech trubek chladiče

$$l = \frac{Q_{CH}}{q} \quad l = 37,44 \text{ [m]}$$

- délka svazku trubek

$$l_{sv} = \frac{l}{4 \cdot n} \quad l = 0,936 \text{ [m]}$$

6. Zhodnocení výsledků výpočtů

Pro lepší přehlednost ve výsledcích je uvádím v tab. 5.

| | Varianta č. 1 | Varianta č. 2 | | jednotky |
|-------------------------------------|---------------|---------------|------------|---------------------------------------|
| typ | žárotrubný | modul 1000 | modul 800 | - |
| chladičící výkon | 116,59 | 71,82 | 45,45 | [kW] |
| množství chladící vody | 0,93 | 0,572 | 0,362 | [kg.s ⁻¹] |
| Reynoldsovo kritérium voda/plyn | 436/160 | 14603/2098 | 10023/2405 | [-] |
| součinitel přestupu tepla voda/plyn | 615/4,8 | 4043/42,5 | 2804/35,63 | [W.m ⁻² .K ⁻¹] |
| součinitel prostupu tepla voda/plyn | 0,37 | 2,348 | 1,967 | [W.m ⁻¹ .K ⁻¹] |
| teplo sdělené 1m trubky | 267,3 | 1927 | 1221 | [W.m ⁻¹] |
| potřebná délka trubek | 436 | 37,4 | 37,4 | [m] |
| | | 74,8 | | |
| délka svazku trubek | 2,18 | 0,936 | 0,936 | [m] |

Tab. 5 – porovnání výsledků dvou variant

Z výsledků vyplývá, že pro tento případ chlazení bude vhodnější použít variantu č. 2. Obě média v tomto uspořádání dosahují lepších termodynamických vlastností a z toho plyne podstatná úspora materiálu trubek. Dalším problémem varianty č. 1 bylo pevné uchycení trubkovnic, což by mohlo zapříčinit vznik napětí vlivem tepelné dilatace materiálu. Toto je vyřešeno v druhé variantě jednou plovoucí hlavou. Varianta č. 1 byla z výše uvedených důvodů zavrhnuta. Projektem se hodlám dále zabývat a to tak, že provedu potřebné hydraulické a pevnostní výpočty. Dále tento chladič vymodeluji ve 3D.

Použitá literatura

- [1] BAŠTA, J., et al. Topenářská příručka: 120 let topenářství v Čechách. Praha: GAS, 2001. 2500 s. ISBN 80–86176–82–7.
- [2] JIROUŠ, František. Aplikovaný přenos tepla a hmoty. Vydání 1. Praha: ČVUT, 2010. 207 s. ISBN 978-80-01-04514-5.
- [3] RAŽNJEVIĆ, K. Termodynamické tabulky. Vydání 1. Bratislava: Alfa, 1984. 336 s. MDT 536. /083. 5/.
- [4] KADLEC, Zdeněk. Průvodce sílením tepla pro požární specialisty. 1.vydání. Ostrava : Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2009. 100 s. ISBN 978-80-7385-061-6.
- [5] SAZIMA, Miroslav; KMOLÍČEK, Vladimír; SCHNELLER, Jiří. Teplo. Vyd. 1. Praha : Nakladatelství technické literatury, 1989. 588 s. ISBN 80-03-0043-2.