

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

Návrh softvérovej podpory pri optimalizácii konštrukcie jednostranne tvarovaných teplovýmenných plôch chladičov zemného plynu

Tomáš BRESTOVIČ¹, Mária ČARNOGURSKÁ², Natália JASMINSKÁ³

¹ Ing. Tomáš Brestovič, PhD., TUKE, SjF, Vysokoškolská 4, Košice, tomas.brestovic@tuke.sk

² prof. Ing. Mária Čarnogurská, CSc., TUKE, SjF, maria.carnogurska@tuke.sk

³ Ing. Natália Jasminská, PhD., TUKE, SjF, natalia.jasminska@tuke.sk

Abstrakt: Článok pojednáva o matematickom popise cylindrických rebrovaných chladičov zemného plynu s následným návrhom softvérovej podpory výpočtu tepelno-energetických parametrov. Základnou časťou popisu je zosúladenie parametrov jednotlivých diferenciálnych a kritériálnych rovníc pomocou iteračného výpočtu. Výsledkom práce je nedeštruktívny odhad hrúbky nánosu na vnútornej strane teplovýmenných plôch s uceleným pohľadom na časovo nenáročný a výhodný výpočet v porovnaní s komerčnými nástrojmi pre riešenie prestupu tepla za pomoci MKP.

1. Úvod

Pri prevádzke chladičov dochádza aj napriek intenzívnej trojnásobnej filtrácii zemného plynu na vstupe do kompresorovej stanice k zanášaniam vnútorných teplovýmenných plôch polotekutou hmotou o neznámom zložení. Pri niekoľkoročnej prevádzke bez čistenia týchto plôch vzniká na nich nerovnomerný nános, pre ktorý sa vyžaduje stanoviť jeho hrúbku nedeštruktívnym spôsobom [1].

Na posúdenie hraničnej veľkosti nánosu, kedy je tepelný výkon chladiča na úrovni hodnoty minimálneho chladiaceho výkonu, bol navrhnutý postup založený na sledovaní zmeny teoretickej a skutočnej teploty zemného plynu na výstupe z chladiča. Táto zmena je spôsobená prídavným tepelným odporom v procese prechodu tepla zo zemného plynu do vzduchu.

Rúrky chladiča majú po vonkajšej strane špirálové hliníkové rebrovanie, ktoré zväčšuje teplovýmennú plochu pre lokálne zvýšenie odvodu tepla na strane vzduchu. Vzhľadom na malý pomer stúpania rebier k jeho vonkajšiemu priemeru, je pre zjednodušenie výpočtu (hlavne pri aplikácii MKP) nahradené špirálové rebrovanie za cylindrické (Obr. 1). Výpočet

výmenníka je orientovaný na zistenie priebehu teplôt v jednotlivých elementoch využitím numerických metód v autormi navrhnutom programe s názvom Natural Gas Cooler (NGC) v programovacom jazyku C++. Hlavným cieľom vývoja nového softvéru je počítačová podpora návrhu riešenia prenosu tepla u chladičov podobnej konštrukcie, ktorá by nebola založená na komerčných nástrojoch využívajúcich MKP.

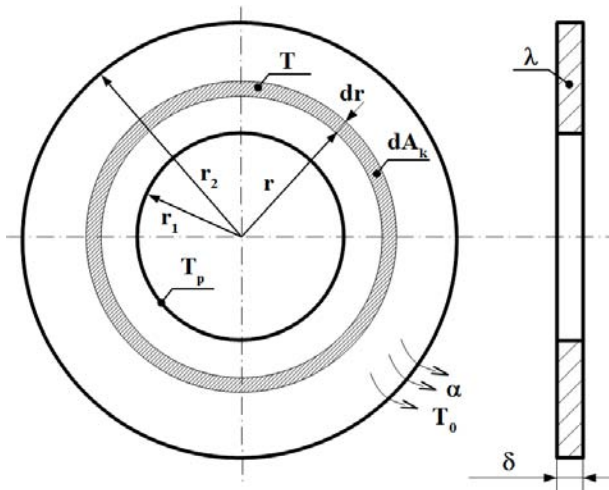
2. Prestup tepla jednostranne rebrovanými plochami

Prestup tepla z rúrky chladiča o teplote T_p na polomere r_1 prebieha kondukciou cez cylindrické rebro a odovzdáva sa nútenou konvekciou prúdiacemu vzduchu, pričom sa zväčša uvažuje s okrajovou podmienkou nulového tepelného toku na konci rebra. Tvar rebra je zobrazený na Obr. 1, na ktorom je zvýraznený element pre výpočet.

Diferenciálna rovnica popisujúca priebeh teplôt rebra v závislosti od polomeru má tvar [3]:

$$\frac{d^2(T - T_{ok})}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{d(T - T_{ok})}{dr} - \frac{\alpha}{\lambda} \cdot \frac{2}{\delta} \cdot (T - T_{ok}) = 0 \quad (1)$$

kde T je teplota cylindrického elementu rebra na polomere r (K), T_{ok} je teplota okolia (K), r je polomer elementu (m), α je súčiniteľ prestupu tepla ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$), λ je tepelná vodivosť materiálu rebra ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$), δ je hrúbka rebra (m).



Obr. 1 Popis vonkajšieho rebra chladiča

Riešením rovnice (1) získame závislosť teploty rebra od Bessell a BesselK funkcie

$$T - T_{ok} = C_1 \cdot \text{BesselI}\left(0, r \cdot \sqrt{\frac{\alpha}{\lambda} \cdot \frac{2}{\delta}}\right) + C_2 \cdot \text{BesselK}\left(0, r \cdot \sqrt{\frac{\alpha}{\lambda} \cdot \frac{2}{\delta}}\right) \quad (K) \quad (2)$$

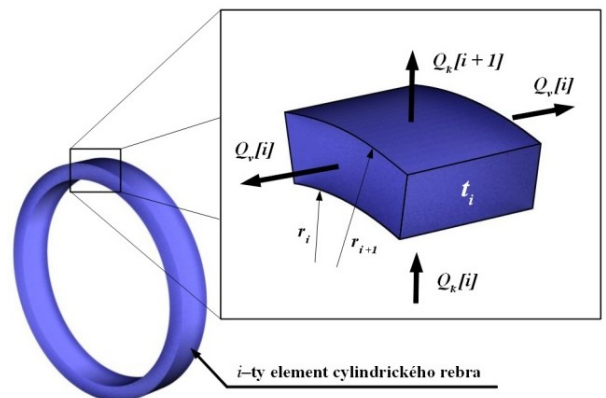
Postup podľa (2) predstavuje matematický postup riešenia nekonečných súčtov a nevlastných integrálov. Z tohto dôvodu sa uvedený postup pre riešenie a vývoj nového softvéru nepoužil.

Analytické riešenie je pre zostrojenie výpočtovo nenáročného a rýchleho programu veľmi komplikované, preto bola zvolená metóda výpočtu pomocou MKP. Pri nej sa cylindrické rebro rozdelí po výške na N súosových valcových elementov (Obr. 2). Takéto riešenie bolo použité na základe predpokladu cylindrického tvaru izotermických plôch, aj keď na reálnom chladiči sa v dôsledku postupného ohrevu vzduchu po výške rebra a nerovnomerným rozložením rýchlostného poľa chladiaceho vzduchu teplotné pole deformuje. Konduktívny prestup

tepla cez rebro popisuje v diferenciálnom tvare Fourierov zákon, ktorý možno pre veľmi malú zmenu polomeru prepísať do diferenčného tvaru:

$$P_k[i] = -2 \cdot \pi \cdot r_i \cdot \delta \cdot \lambda \cdot \frac{t_{i+1} - t_i}{r_{i+1} - r_i} \quad (W) \quad (3)$$

kde r_i je vnútorný polomer i -teho elementu (m), r_{i+1} je vonkajší polomer i -teho elementu (m), t_i je teplota i -teho elementu ($^{\circ}C$), t_{i+1} je teplota $i+1$ elementu ($^{\circ}C$).



Obr. 2 Tepelné toky v elemente rebra

Tepelný tok z povrchu rebra do vzduchu je možné popísať Newtonovým vzťahom

$$P_v[i] = \alpha \cdot (t_i - t_{vz}) \cdot \pi \cdot (r_{i+1}^2 - r_i^2) \quad (W) \quad (4)$$

kde t_{vz} je teplota chladiaceho vzduchu ($^{\circ}C$). Konduktívny tepelný tok P_k , ktorý vstupuje do ďalšieho $[i+1]$ elementu je daný vzťahom (5), pričom výpočet musí spĺňať základné okrajové podmienky

$$P_k[i+1] = P_k[i] - 2 \cdot P_v[i] \quad (W) \quad (5)$$

1. Okrajová podmienka:

$$r[0] = r_1 \Rightarrow t[0] = t_p$$

2. Okrajová podmienka:

$$P_k[N] = 0 \quad (\text{adiabatický koniec rebra})$$

Pre urýchlenie iteračného výpočtu je nutné čo najpresnejšie odhadnúť tepelný tok prvej iterácie pri päte rebra. To je dosiahnuté výpočtom rovinných rebier s konštantným prierezom, pričom prierez a obvod rebra je

uvažovaný pri strednom polomere cylindrického rebra:

$$P_k[0] = \sqrt{\alpha \cdot \lambda \cdot p_{str} \cdot A_{str}} \cdot (t_{ok} - t_{vz}) \cdot \tanh \left[\sqrt{\frac{\alpha}{\lambda} \cdot \frac{p_{str}}{A_{str}}} \cdot (r_2 - r_1) \right] \quad (W) \quad (6)$$

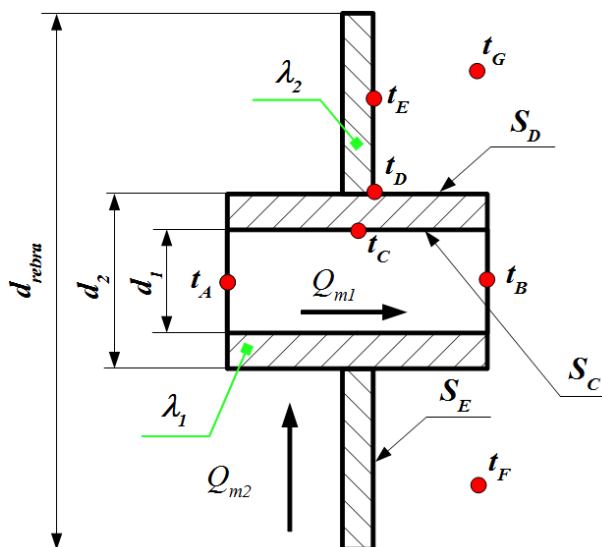
Výpočet prebieha iteratívne a pri každom ukončení jednej iterácie je potrebné zmeniť počiatočný konduktívny tepelný tok pri päte rebra $P_k[0]$ tak, aby sa dosiahlo splnenie okrajovej podmienky č. 2. Pre tento účel bola navrhnutá iteračná podmienka (7) pri ktorej bolo skúmaním zistené, že stále konverguje k požadovanej reálnej hodnote.

$${}_{j+1}P_k[0] = {}_jP_k[0] - \frac{{}_jP_k[N]}{10} \quad (W) \quad (7)$$

kde ${}_jP_k[0]$ je tepelný konduktívny tok na vstupe do rebra pri j -tej iterácii (W), ${}_{j+1}P_k[0]$ je konduktívny tepelný tok na vstupe do rebra pri $j+1$ iterácii, ${}_jP_k[N]$ je tepelný tok na vonkajšom polomere rebra pri j -tej iterácii (W).

3. Iteračný výpočet prestupu tepla jedného elementu

Software NGC vypočíta kľúčové teploty z pohľadu prestupu tepla, ktoré sú zobrazené na Obr. 1.



Obr. 3 Rez jedným elementom cylindricky rebrovanej rúrky

Tak ako je prestup tepla v jednom rebre riešený iteratívne, rovnakým spôsobom je nutné počítať aj zosúladienie všetkých relevantných rovníc iteračne a docieľiť tak platnosť všetkých závislostí, ktoré vyhovujú len jednej kombinácii teplôt t_A až t_G .

Analýzou i -teho elementu z pohľadu prenosu tepla je potrebné vyriešiť množstvo vzťahov, od kalorimetrických rovníc ochladzovania a ohrevu fluidných médií, riešenia prestupu tepla cez rozšírené plochy pomocou MKP, Newtonových vzťahov až po riešenie kritériálnych rovníc pre nútenú konvekciu [3] [4]:

$$P = Q_{m1} \cdot c_1 \cdot (t_A - t_B) \quad (W) \quad (8)$$

$$P = \alpha_1 \cdot S_C \cdot (t_A - t_C) \quad (W) \quad (9)$$

$$\alpha_1 = f(Pr, Re, d, L, \dots) \quad (W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}) \quad (10)$$

$$P = \frac{\pi \cdot L \cdot (t_C - t_D)}{\frac{1}{2 \cdot \lambda_1} \ln \left(\frac{d_2}{d_1} \right)} \quad (W) \quad (11)$$

$$t_E = f(t_D, t_F, t_G, \lambda_2, \delta, P, \dots) \quad (^\circ C) \quad (12)$$

$$P = \alpha_2 \cdot S_E \cdot \left(t_E - \frac{t_F + t_G}{2} \right) + \alpha_2 \cdot S_D \cdot \left(t_D - \frac{t_F + t_G}{2} \right) \quad (W) \quad (13)$$

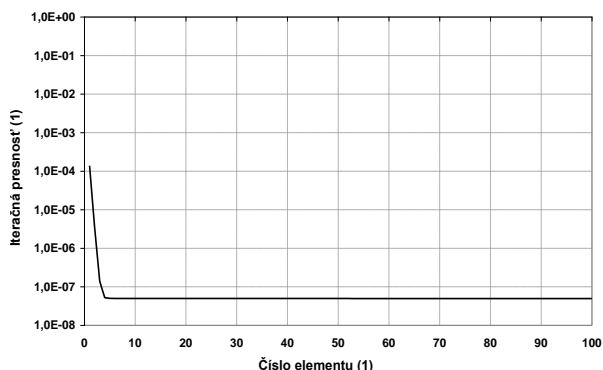
$$\alpha_2 = f(Pr, Re, r_1, r_2, \delta, \dots) \quad (W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}) \quad (14)$$

$$P = Q_{m2} \cdot c_2 \cdot (t_F - t_G) \quad (W) \quad (15)$$

Vzhľadom na približne rovnaké teploty v dvoch susediacich rebrách sa ako vstupné počiatočné hodnoty pre výpočet nasledujúceho elementu preberajú údaje z predchádzajúceho výpočtu, čo zrýchľuje konvergenciu a presnosť výpočtu (Obr. 4).

Pre porovnanie výsledkov programu NGC bol uskutočnený výpočet ochladenia zemného plynu v ANSYS CFX pre potrubie so 100 rebrami a vopred zadefinovanými rovnakými vstupnými podmienkami. Odchýlka teplotného rozdielu ochladenia zemného plynu predstavovala 3,65 %. Na základe toho možno

konštatovať vhodnosť použitých vzťahov a predpokladov pre nový program.



Obr. 4 Graf iteráčnej presnosti výpočtu potrubia so 100 rebrami

Aby bolo možné jednoducho zakomponovať do výpočtu aj hrúbku nánosu na vnútornej teplovýmennnej ploche a jej vplyv na zníženie tepelného výkonu, nahradil sa súčiniteľ prestupu tepla na vnútornej strane α_1 súčiniteľom prechodu tepla k_1 , ktorý v sebe zahŕňa aj prídavný tepelný odpor usadenín

$$k_1 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{d_1 - 2 \cdot h}{2 \cdot \lambda_n} \ln \frac{d_1}{d_1 - 2 \cdot h}} \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}) \quad (16)$$

kde d_1 je vnútorný priemer ocelového potrubia (m), h je hrúbka nánosu (m), λ_n je tepelná vodivosť nánosu ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$).

Vyvinutý softvér umožňuje okrem výpočtu chladiaceho výkonu pri zanesenej rúrke, na základe známeho ochladenia plynu, vypočítať hrúbku nánosu pri predpoklade rovnomerného rozloženia nečistôt po obvodě rúrky. Pre výpočet musí byť známa hodnota tepelnej vodivosti nánosu, ktorá bola experimentálne určená a jej hodnota je $0,746 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ [1].

Hrúbka nánosu mala vplyv aj na výpočet súčiniteľa prestupu tepla aj pri výpočte podľa kritériálnych rovníc, v ktorých znížila hydraulický priemer potrubia a pri dodržaní konštantného prietoku mala za následok zvýšenie rýchlosti prúdiaceho média.

4. Záver

Zoskupením použitých vzťahov a následným iteračným výpočtom bol vytvorený plnohodnotný softvérový nástroj pre výpočet a optimalizáciu cylindrických rebrovaných povrchov rúrok používaných u chladičov zemného plynu. Výhodou vlastného softvéru, ktorého rýchlosť výpočtu je neporovnateľne vyššia oproti komerčným simulačným nástrojom, je jeho voľná šíriteľnosť. Ďalšou výhodou je to, že výpočet je úzko a veľmi presne zameraný na riešenie požadovaných parametrov pri vysokej iteračnej presnosti.

Výstupom zo softvéru je databáza dát ľahko spracovateľná v tabuľkových kalkulátoroch, kde je možné vizualizovať priebehy teplôt, výkonu a presnosti výpočtu v závislosti od čísla elementu. Významným výstupom z výpočtu je určenie konkrétnej hrúbky nánosu na vnútornej teplovýmennnej ploche na základe známej teploty plynu na výstupe z chladiča, ktorá je v bežnej prevádzke sledovaná online.

5. Literatúra

- [1] ČARNOGURSKÁ, M., PŘÍHODA, M.: Metodika stanovenia aktuálnej hrúbky nánosu na vnútorných teplovýmenných plochách chladiča plynu. SlovGas I/2009, s. 28-32, ISSN 1335-3853
- [2] PALUSKA, R., BOJKO, M., HORÁK, J.: Matematický model vyhořívání uhelných částic. All For Power, 2009, č. 2, s. 30-32, ISSN 1802-8535
- [3] VDI Wärmeatlas, GVC, Berlin, 2006, 10. vydanie, ISBN-10 3-540-25504-4,
- [4] ROHSENOW, WARREN M.; HARTNETT, JAMES P.; CHO, YOUNG I.: Handbook of Heat Transfer, © 1998 McGraw-Hill, 3. vydanie, 2007, ISBN 978-0-07-053555-8
- [5] JANDAČKA, J., MALCHO, M., KAPJOR, A., PAPUČÍK, Š.: Pohlcovanie odorantu zemného plynu zeminou, Košice: Acta Metallurgica Slovaca, 1/2009, s. 82, ISSN 1335-1532
- [6] LENHARD, R., JANDAČKA, J., KAPJOR, A.: Numerical modeling of passive roof cooling convectors, International Conference Experimental Fluid Mechanics, Liberec, 2008, s. 114; ISBN 978-80-7372-417-7
- [7] LENHARD, R., JANDAČKA, J., NEMEC, P.: Influence of distance and height ribs on boundary layer in to the passive roof cooling convector, Conference Proceedings, 2009, s. 174, ISBN 978-80-7372-538-9

Táto práca vznikla za finančnej podpory grantovej agentúry VEGA MŠ SR v rámci projektu č.1/0006/11.