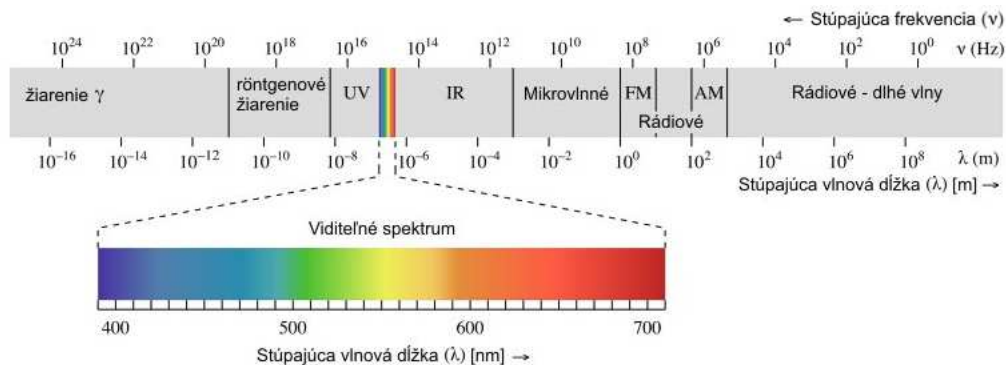


D 17 Prenos tepla radiáciou

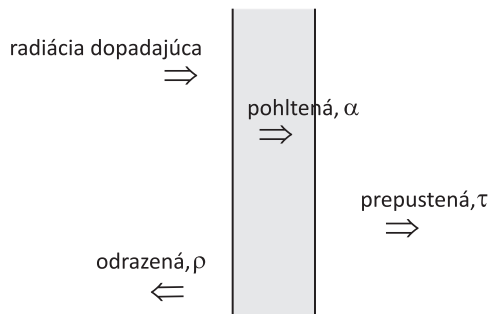
Základné pojmy

Radiáciou (žiarením) nazývame šírenie akéhokoľvek druhu elektromagnetických vln v priestore. Jej zdrojom je permanentná zmena elektromagnetických polí oscilujúcich elektricky nabitých častíc atómov. Elektromagnetické vlny sa šíria rýchlosťou svetla c a navzájom sa odlišujú vlnovou dĺžkou λ a frekvenciou f , pričom platí vzťah $f = c / \lambda$. Ich frekvenčné spektrum je široké (obr. 1), pričom tepelné žiarenie (sálanie) spôsobujú najmä infračervené lúče s vlnovou dĺžkou $\lambda = 0,8 \cdot 10^{-6}$ až $0,1 \cdot 10^{-3}$ m (0,8 až 100 μm). Každé teleso, ktoré má teplotu vyššiu ako 0 °K emituje tepelné žiarenie. Keď sa jeho teplota zvýši nad teplotu tela (cca 300 °K), v určitej vzdialenosti začíname vnímať tepelné vyžarovanie ako sálanie tepla a pri vysokých teplotách (napr. vlákno žiarovky) prechádza tepelné žiarenie aj do oblasti viditeľného spektra.



Obr. 1

Keď tepelné žiarenie zasiahne povrch telesa, časť energie teleso absorbuje (pohlťí), časť sa odrazí a časť prepustí (obr. 2).



Obr. 2 Účinok tepelnej radiácie dopadajúcej na teleso

Vlastnosti povrchu telesa, na ktorý dopadá tepelné žiarenie, charakterizujú tieto bezrozmerné koeficienty:

α = absorptivita (pohlivosť) - pomer absorbovanej tepelnej energie k celkovej dopadajúcej na teleso

ρ = reflektancia (odrážavosť) - pomer odrazenej tepelnej energie k celkovej dopadajúcej na teleso

τ = transmitancia (priepustnosť) - pomer prepustenej tepelnej energie k celkovej dopadajúcej na teleso

Z energetickej bilancie vyplýva, že súčet týchto koeficientov sa musí rovnať jednej

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (1)$$

Energia, ktorá sa odrazí, môže mať zrkadlový charakter (uhol dopadu sa rovná uhlu odrazu) alebo difúzný (rozptýlený, šírený do všetkých smerov). Väčšina tuhých telies a kvapalín je pre tepelný tok prakticky nepriepustná ($\tau = 0$).

Uvedenú charakteristiku vlastností telesa a jeho povrchu, na ktorý dopadá tepelné žiarenie, možno zjednodušiť zavedením pojmu ideálneho tepelného žiariča - termálne *absolútne čierneho telesa*, s týmito základnými vlastnosťami:

1. Absolútne čierne teleso pohltí všetku dopadajúcu tepelnú energiu ($\alpha = 1, \rho = 0, \tau = 0$)
2. Hustota vyžarovanej tepelnej energie (tepelný výkon na jednotku plochy) podľa Stefan-Boltzmannovho zákona je

$$q_0 = \sigma T^4 \quad [\text{W/m}^2] \quad (2)$$

kde $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ je Stefan-Boltzmannova konštanta a T absolútna teplota povrchu telesa.

Absolútne čierne teleso v tepelnej rovnováhe so svojím okolím absorbuje z okolia všetko dopadajúce žiarenie (tepelné žiarenie všetkých vlnových dĺžok) a rovnaké množstvo energie do priestoru emituje. Absolútne čierne teleso si možno predstaviť (aj fyzikálne realizovať) ako duté teleso s dokonale odrážajúcimi stenami s malým otvorom. Ak do dutiny vniká usmernené žiarenie len cez tento otvor, toto po mnohonásobných odrazoch od jej stien odovzdá telesu celú svoju energiu. Ak steny majú teplotu T , žiarenie, ktoré zo zohriatych stien vychádza do priestoru nazývame žiarením absolútne čierneho telesa.

Najjednoduchší prenos radiačnej tepelnej energie si potom možno predstaviť medzi stenami dvoch dokonale čiernych telies s teplotami $T_1 > T_2$. Nech rovnako veľké vyžarujúce steny sú rovnobežné, extrémne veľké a s malou medzerou medzi nimi (aby sa žiadna časť difúzneho žiarenia nevyžarovala mimo plôch). Potom čistá hodnota energie vyžarovaná z telesa 1 do telesa 2 je

$$q_{12}^0 = \sigma(T_1^4 - T_2^4) \quad [\text{W/m}^2] \quad (3)$$

Reálne telesá vyžarujú tepelnú energiu menej efektívne ako absolútne čierne teleso. V stave termodynamickej rovnováhy sa teplota, a teda ani vnútorná energia telesa nemení. Koľko energie pohltí, toľko musí aj vyžiariť. Preto absolútne čierne teleso, v porovnaní s reálnymi telesami, ktoré majú rovnakú teplotu, vyžaruje, ale aj pohlcuje, najviac energie. Pomer intenzít vyžarovania reálneho telesa (na všetkých vlnových dĺžkach tepelnej radiácie) a absolútne čierneho pri rovnakej teplote sa nazýva *emisivita*

$$\varepsilon = \frac{q}{q_0} \quad [-] \quad (4)$$

Pre reálne telesá je emisivita väčšia ako nula a menšia ako 1. Jej hodnotu určujú vyžarovacie vlastnosti povrchu a je závislá od teploty. V tab. 1 sme uviedli orientačné hodnoty emisivity niektorých materiálov. Väčšina kovov sa vyznačuje pomerne malou tepelnou emisivitou, pokiaľ nie sú zoxidované. Nekovové materiály majú spravidla vysokú emisivitu.

Tab. 1 *Orientačné hodnoty emisivity niektorých materiálov*

Materiál	Emisivita
betón - drsný	0,94
drevo	0,85
hliník – leštený	0,05
hliník – zoxidovaný	0,25
liatina	0,20
ľad	0,96 – 0,98
liatina – zoxidovaná	0,60 – 0,90
ocel – leštená	0,08
ocel listová zoxidovaná	0,80
plast – polypropylén	0,97
pokožka – ľudská koža	0,98
sklo	0,92
sneh	0,85
voda	0,98

V komerčných programoch MKP sa výpočty tepelnej radiácie často obmedzujú na tzv. *šedé difúzne povrchy*. Pri takýchto povrchoch je emisivita i absorptivita nezávislá od vlnovej dĺžky žiarenia a povrchy majú difúzny charakter s polguľovým vyžarovaním rovinatej plochy s kosínusovou intenzitou. V stave termodynamickej

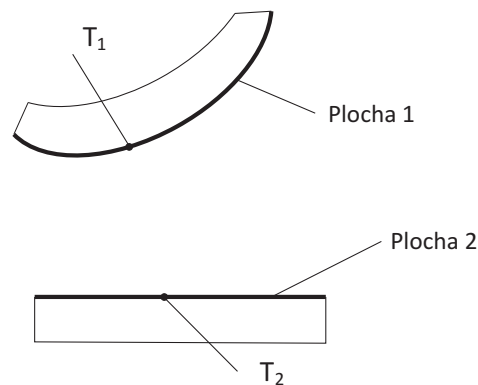
rovnováhy na základe Kirchhoffovho zákona sa *absorptivita šedých telies rovná jeho emisivite* ($\alpha = \varepsilon$), a teda materiály, ktoré dobre vyžarujú teplo, zároveň ho aj dobre pohlcujú. Potom pre dve šedé veľké rovnobežné steny rovnicu (3) možno upraviť na

$$\begin{aligned} q_{12} &= \varepsilon_1 \sigma T_1^4 - \alpha_1(T_1, T_2) \sigma T_2^4 \\ &\cong \varepsilon_1 \sigma T_1^4 - \varepsilon_1 \sigma T_2^4 \\ &= \varepsilon_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4) \end{aligned} \quad (5)$$

Ak vyžarovacia plocha telesa 1 je S_1 potom jeho čistý vyžarovací výkon je

$$Q_{12} = S_1 q_{12} = S_1 \varepsilon_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (6)$$

Z praktického hľadiska nás predovšetkým zaujíma sálanie tepelnej energie medzi dvomi, príp. viacerými telesami. Uvažujme výmenu radiačnej tepelnej energie medzi dvomi šedými plochami schematicky znázornenými na obr. 3 a určíme veľkosť tepelného toku prenášaného radiáciou do plochy 2. Plocha 1 vyžaruje



Obr. 3

tepelný výkon do všetkých smerov a len časť dopadne na plochu 2

$$Q_{12} = F_{12} S_1 \varepsilon_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (7)$$

kde koeficient $F_{1 \rightarrow 2}$, tzv. *konfiguračný faktor* (ktorý musíme poznať alebo vypočítať z údajov o veľkosti, tvare a polohe oboch plôch) udáva, aká časť z celkového radiačného výkonu plochy 1 dopadne na plochu 2.

Pokiaľ povrchy telies odrážajú teplo s reflektanciami ρ_1 a ρ_2 , riešenie je komplikovanejšie (pozri napr. [Lit1] alebo teoretický manuál programu ANSYS). Podľa (1) s $\tau = 0$ platí $\rho_1 = 1 - \varepsilon_1$, $\rho_2 = 1 - \varepsilon_2$ a dostávame

$$Q_{12} = \frac{\sigma (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 S_1} + \frac{1}{S_1 F_{12}} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 S_2}} \quad (8)$$

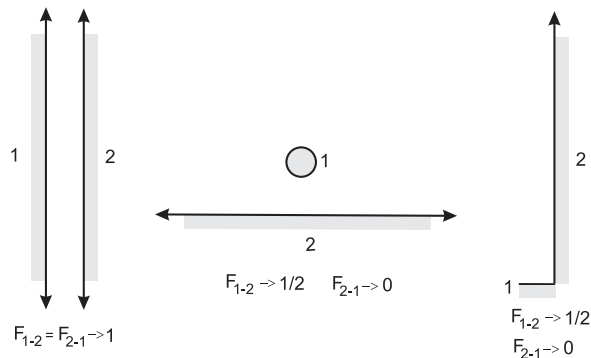
Tieto postupy a vzťahy možno zovšeobecniť pre výmenu sálavého tepla medzi plochami viacerých telies a numericky riešiť takéto silne nelineárne úlohy tepelnej radiácie spojené prípadne s ďalšími spôsobmi prenosu tepelnej energie. Zostáva ešte stručne ozrejmiť problematiku určovania faktorov F_{ij} .

Konfiguračné faktory plôch

Prenos tepla radiáciou závisí nielen od teploty telies a ich radiačných vlastností ale aj od ich vzájomnej relatívnej orientácie. Tento vplyv sa vyjadruje bezrozmerným koeficientom s názvom *konfiguračný faktor* (faktor sklonu, faktor výhľadu), ktorý možno definovať takto

$$F_{ij} = \frac{\text{energia žiarenia priamo dopadajúca na plochu } j}{\text{celková energia vyžiarená plochou } i}$$

Predpokladá sa pri tom, že plochy sú izotermálne, žiarenie je difúzne a priestor medzi vyžarujúcimi plochami je vákuum alebo plyn, ktorý neovplyvňuje výmenu radiačnej energie. Konfiguračný faktor je v takomto prípade čisto geometrická veličina a možno ho definovať aj ako koeficient vyjadrujúci akú časť výhľadu plochy i zatieňuje plocha j . Niektoré hodnoty tohto faktora potom možno určiť priamo z takejto definície (obr.4). Vyplýva z toho tiež, že ak plocha 1 je vo vnútri plne uzavretej plochy 2, potom $F_{12} = 1$.



Obr. 4 Hodnoty konfiguračných faktorov zrejme priamo z definície (dve veľké rovnobežné roviny blízko seba, guľová plocha blízko veľkej rovinatej plochy, malá plocha kolmá na veľkú)

Výpočet konfiguračných faktorov uľahčujú aj ďalšie pravidlá. Jedným z nich je *pravidlo recipricity*, ktoré vyplýva z energetickej rovnováhy oboch navzájom vyžarujúcich telies

$$S_i F_{ij} = S_j F_{ji} \quad (9)$$

Ďalej je to *sumačné pravidlo* platiace pre energeticky uzavretý systém. Ak totiž plocha i v energeticky uzavretom systéme vyžaruje tepelný tok Q_i na n plôch, potom sa súčet tepelných tokov dopadajúcich na jednotlivé plochy systému musí rovnať tomuto toku

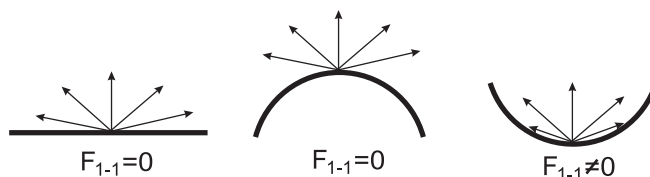
$$Q_{i1} + Q_{i2} + \dots + Q_{in} = Q_i$$

$$\frac{Q_{i1}}{Q_i} + \frac{Q_{i2}}{Q_i} + \dots + \frac{Q_{in}}{Q_i} = 1$$

a dostávame sumačné pravidlo

$$F_{i1} + F_{i2} + \dots + F_{in} = 1 \quad (10)$$

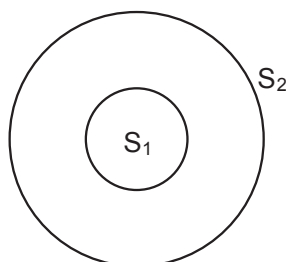
V sumačnom pravidle nenulová hodnota F_{ii} sa uplatní len v špeciálnom prípade konkávnosti plochy, ako je to znázornené na obr. 5



Obr. 5 V špeciálnom prípade môže plocha vyžarovať aj sama na seba

Príklad 1

Určte konfiguračné faktory pre dva koncentrické guľové povrchy S_1 a S_2 :



Podľa sumačného pravidla platí $F_{11} + F_{12} = 1$. Plocha 1 je vypuklá a tak dostávame

$$F_{11} = 0$$

$$F_{12} = 1$$

Pre plochu 2 sumačné pravidlo dáva $F_{21} + F_{22} = 1$ a platí pravidlo reciprocity $S_1 F_{12} = S_2 F_{21}$, takže dostávame

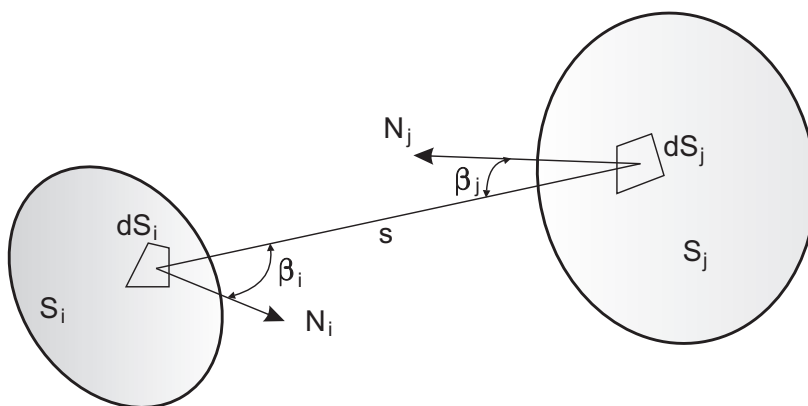
$$F_{21} = S_1 / S_2$$

$$F_{22} = 1 - S_1 / S_2$$

Výpočet konfiguračných faktorov pre dve všeobecné plochy je komplikovanejší a pri využití definície a Lambertovho kosínusového zákona možno odvodiť všeobecný vzťah (pozri napr.[Lit 1])

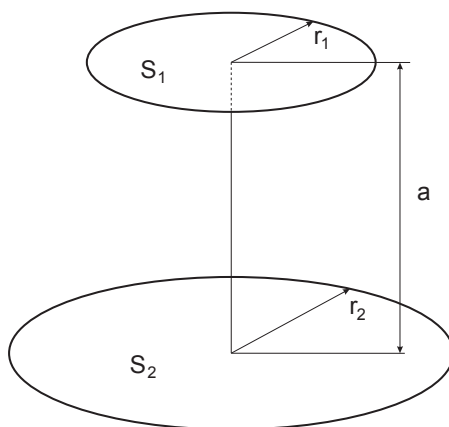
$$F_{ij} = \frac{1}{S_i} \int_{S_i} \int_{S_j} \frac{\cos \beta_i \cos \beta_j}{\pi s^2} dS_i dS_j \quad [-] \quad (11)$$

kde β_i a β_j sú uhly, ktoré zvierajú normály diferenciálnych elementov plôch s ich spojnicou (obr. 6). Aj v prípade všeobecných plôch platí pravidlo reciprocity (9).



Obr. 6 Obrázok k výpočtu konfiguračného faktoru všeobecných plôch podľa (11)

Výpočet konfiguračného faktoru podľa (11) vedie aj pri pomerne jednoduchých plochách na zložité plošné integrály, čo si vynútilo vznik rôznych vzorcových alebo grafických katalógov pre jednoduchšie určenie konfiguračných faktorov pri často sa vyskytujúcich kombináciách plôch. Ak v takomto katalógu potrebnú kombináciu nájdeme, potom sa konfiguračný faktor dá ľahko určiť z jednoduchého algebraického vzorca. Napr. pre dve rovnobežné koncentrické kruhové plochy vzdialené od seba o a (obr. 7), výpočtový vzorec je



Obr. 7

$$F_{12} = \frac{1}{2} \left\{ X - \left[X^2 - 4(R_2 / R_1)^2 \right]^{1/2} \right\}$$

kde $R = r / a$ a $X = 1 + (1 + R_2^2) / R_1^2$.

Výpočet prenosu tepla radiáciou v programe ANSYS

V programe ANSYS možno pomocou MKP približne riešiť prenos tepla viacerými metódami, ktoré sú podrobne opísané v užívateľskom a teoretickom manuáli programu. V príkladoch základných výpočtových postupov budeme využívať metódu, ktorá je v programe ANSYS nazvaná RSM (Radiosity Solver Method), resp. S2SM (Surface-to-Surface Method) v programe ANSYS FLUENT.

Pri tejto metóde sa zavádzajú všetky zjednodušujúce predpoklady, ktoré sme uvažovali v predchádzajúcich častiach tohto dodatku. Je to predovšetkým predpoklad šedých a difúzných vlastností vyžarovacích plôch a neovplyvňovanie radiácie priestorom medzi sálajúcimi plochami. (Niektoré tieto obmedzenia možno obísť v programe ANSYS FLUENT.)

Pri metóde RSM sa uzlové hodnoty hustoty radiačného toku q [W/m^2] zavádzajú do systému rovníc vedenia tepla [D16] vo forme vektora zaťaženia. Pre stacionárnu úlohu to vedie na sústavu globálnych nelineárnych rovníc, ktorú možno napísať v tvare

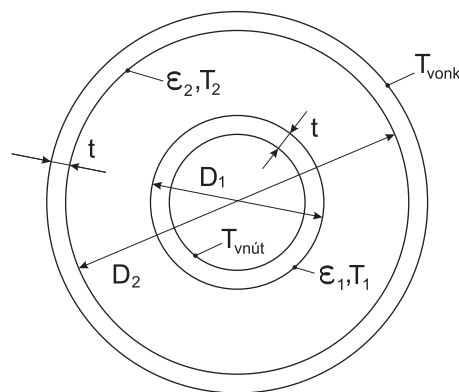
$$KT = \mathbf{f} + [\mathbf{f}(\mathbf{T})]_{rad} \quad (12)$$

Sústava sa rieši iteračne, pričom sa v každom iteračnom kroku upravuje vektor \mathbf{f}_{rad} , pretože na plochách, ktoré sa zúčastňujú na výmene tepla radiáciou sa mení teplota. Iteračný proces sa ukončí, keď sa medzi telesami dosiahne energetická rovnováha v rámci určitej predpísanej tolerancie.

Pri riešení stacionárnych úloh si treba uvedomiť, že pri nich hľadáme tzv. ustálený (časovo už nemenný) teplotný a energetický stav. Predstavme si dve telesá s rozdielnymi teplotami, pri ktorých dochádza k prenosu tepla len radiáciou. Ak do teplejšieho telesa nebudeme dodávať energiu a z chladnejšieho odoberať, tak sa teploty telies vyrovnajú a tepelný tok v ustálenom stave medzi oboma telesami bude nulový. To znamená, že pri týchto úlohách sa na telesách objavujú konduktívne a konvektívne okrajové podmienky, ktoré vedú k nenulovej výmene tepla aj v ustálenom stave.

Príklad 1

Pre dve dlhé koncentrické rúry treba pomocou programu ANSYS určiť ustálený stav prenosu tepla radiáciou, keď sú dané tieto hodnoty: $D_1 = 10$ cm, $D_2 = 20$ cm, $t = 1$ cm. Na vnútornej ploche vnútornej rúry sa udržuje konštantná teplota $T_{vnút} = 1000$ °K a na vonkajšej ploche vonkajšej rúry $T_{vonk} = 600$ °K. Emisivity sálajúcich povrchov rúr sú $\epsilon_1 = 0,7$ a $\epsilon_2 = 0,6$. Zaujímajú nás teploty sálajúcich povrchov rúr T_1 , T_2 a veľkosť hustoty tepelného toku q_{12} sálaného z teplejšieho telesa na studenšie.



Riešenie

Pretože sú rúry dlhé, zanedbáme malé množstvo tepla, ktoré vyžarujú koncové prierezy a úlohu budeme riešiť ako rovinnú. Vypočítaný tepelný tok potom platí len pre jednotku dĺžky rúr (1 m), ale vynásobením s reálnou dĺžkou ľahko dostaneme jeho celkovú hodnotu.

Úlohu sme vyriešili touto postupnosťou interaktívnych príkazov:

1. Zobrazovať len príkazy pre termálnu úlohu
Preferences > Thermal, OK;

2. Typ prvku

Preprocessor >Element Type >Add/Edit/Delete >Add >Solid >Triangl 6node 35, OK, Close;

3. Materiál (Vyžaduje sa formálne zadať ľubovoľnú hodnotu, ktorá sa však pri čistej radiácii nevyužije)

Material Props >Material Models >Thermal >Conductivity >Isotropic, KXX=1, OK;

4. Vytvorenie priereзов rúr

Modeling >Create >Areas >Circle >Annulus, Rad1=0.04, Rad2=0.05, Apply, Rad1=0.1, Rad2=0.11, OK;

5. Sieť prvkov

Meshing >Size Controls >Smart Size >Basic, LVL=1, OK;

Mesh >Areas >Free, Pick All;

6. Okrajové podmienky pre teplotu

Solution >Define Loads >Apply >Thermal >Temperature >On Lines, Kliknite postupne všetky 4 vnútorné čiaru vnútorného prstenca, OK, VALUE=1000, Apply, Kliknite postupne všetky 4 vonkajšie čiaru vonkajšieho prstenca, OK, VALUE=600, OK;

7. Okrajové podmienky pre emisivitu

Solution >Define Loads >Apply >Thermal >Radiation >On Lines, Kliknite postupne všetky 4 vonkajšie čiaru vnútorného prstenca, OK, VALUE=0.7, VALUE2=1, Apply, Kliknite postupne všetky 4 vnútorné čiaru vonkajšieho prstenca, OK, VALUE=0.6, VALUE2=1, OK;

8. Riadiace príkazy pre výpočet radiácie (hodnota teploty okolia VALUE sa pri našej úlohe neuplatní)

Solution >Radiation Opts >Solution Opts, STEF=5.67E-8, TOFFST=0, VALUE=1, OK;

9. Riadiace príkazy pre výpočet F_{12} (potvrdíme implicitne nastavené hodnoty)

Solution >Radiation Opts >View Factor, OK;

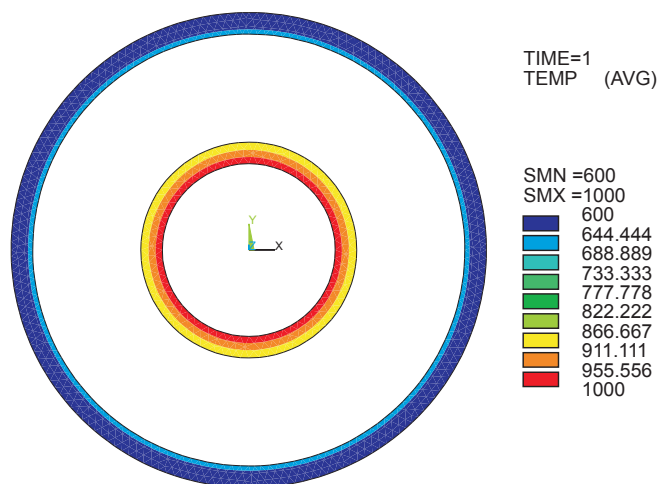
10. Riadiace príkazy pre iteráciu a výpočet

Solution >Load Step Opts >Time/Frequenc >Time-TimeStep, TIME=1, DELTIM=0.5, Minimum time step size= 0.1, Maximum time step size= 1, OK;

Solution >Solve >Current LS, OK;

11. Ilustrácia rozdelenia teplôt v ustálenom stave

General Postproc >Plot Results >Contour Plot >Nodal Solu >DOF Solution, Nodal Temperature, OK;



12. Určenie teplôt na plochách s prenosom tepla

General Postproc >Query Results >Subgrid Solu >DOF Solution, TEMP, OK, Kliknite uzly na sálajúcich povrchoch:

$$T_1 = 865,5 \text{ °K}, T_2 = 657,2 \text{ °K}, \text{ Cancel};$$

13. Určenie hustoty tepelného toku na plochách s prenosom tepla

General Postproc >Query Results >Subgrid Solu >Flux&Gradient, TFSUM, OK, Kliknite uzly na sálajúcich povrchoch: $q_{12} = 12052 \text{ W/m}^2$, $q_2 = 6000 \text{ W/m}^2$, Cancel;

14. Ukončenie výpočtu

Utility Menu >File >Exit, Save Geom+Loads, OK;

Pomocou vypočítaných hodnôt teplôt môžeme už aj analyticky vypočítať hustotu tepelného toku podľa (8). Pretože vonkajšia rúra kompletne zachytáva tepelnú energiu vnútornej rúry, je zrejmé, že $F_{12} = 1$.

$$q_{12} = \frac{Q_{12}}{S_1} = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{F_{12}} + \frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2 S_2 / S_1}} = \frac{5,67 \cdot 10^{-8} (865,5^4 - 657,2^4)}{\frac{1-0,7}{0,7} + \frac{1}{1} + \frac{1-0,6}{0,6 \cdot 2}} = 12053 \text{ W/m}^2$$

Kontrola energetickej bilancie

$$q_1 S_1 = q_2 S_2$$

$$q_1 = q_2 S_2 / S_1 \quad \rightarrow \quad 12052 \approx 6000 \cdot 2$$

V prípade *nestacionárneho* prenosu tepla radiáciou pribudnú do rovníc (12) časovo závislé členy [1]

$$\mathbf{C}\dot{\mathbf{T}} + \mathbf{K}\mathbf{T} = \mathbf{f} + [\mathbf{f}(\mathbf{T})]_{rad} \quad (13)$$

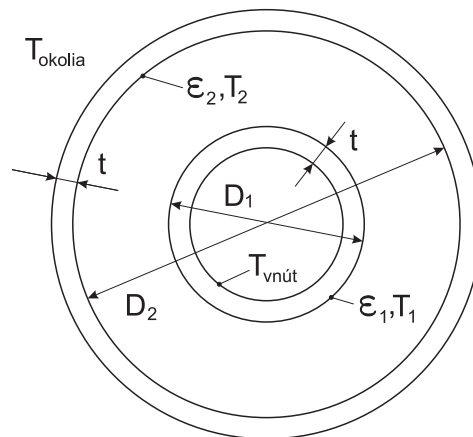
kde matica tepelnej kapacity (merného tepla, tepelného tlmenia) \mathbf{C} sa vytvára usporiadanou sumáciou prvkových matic

$$\mathbf{C}_e = \int_{V_e} \rho_e C_e \mathbf{N}_e^T \mathbf{N}_e dV \quad (14)$$

takže pri tvorbe prvkov v programoch MKP je potrebné zadávať okrem tepelnej vodivosti aj hustotu ρ a merné teplo C materiálu.

Príklad 2

Dané sú dve dlhé koncentrické rúry s rozmermi pričných rezov: $D_1 = 10 \text{ cm}$, $D_2 = 20 \text{ cm}$, $t = 1 \text{ cm}$. Začiatočná teplota oboch rúr je 300 °K . Vnútrošná plocha vnútornej rúry sa v čase $t = 0$ náhle ohreje na teplotu $T_{vnút} = 1000 \text{ °K}$ a udržuje sa trvale na tejto hodnote. Ohriata vnútrošná rúra začne tepelnou radiáciou ohrievať vonkajšiu rúru. Určte časový priebeh teploty T_2 na vnútrošnom povrchu vonkajšej rúry a hodnotu tejto teploty v čase $t = 1 \text{ hod}$. Materiálové vlastnosti oboch rúr nie sú závislé od teploty. Koeficient tepelnej vodivosti $\lambda = 50 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, hustota $\rho = 7850 \text{ kgm}^{-3}$, merné teplo $C = 440 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$. Emisivity sálajúcich povrchov rúr sú $\varepsilon_1 = 0,7$ a $\varepsilon_2 = 0,6$. Teplota okolia vonkajšej rúry $T_{okolia} = 300 \text{ °K}$.



Riešenie

Pretože sú rúry dlhé, zanedbáme malé množstvo tepla, ktoré vyžarujú koncové prierezy a úlohu budeme riešiť ako rovinnú. Úlohu sme vyriešili touto postupnosťou interaktívnych príkazov:

1. Zobrazovať len príkazy pre termálnu úlohu

Preferences > Thermal, OK;

2. Typ prvku

Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete > Add > Solid > Triangl 6node 35, OK, Close;

3. Materiál

Material Props > Material Models > Thermal > Conductivity > Isotropic, KXX=50, OK, Specific Heat, C=440, OK, Density, DENS=7850, OK, Material, Exit; ;

4. Vytvorenie priereзов rúr

Modeling >Create >Areas >Circle >Annulus, Rad1=0.04, Rad2=0.05, Apply, Rad1=0.1, Rad2=0.11, OK;

5. Sieť prvkov

Meshing >Size Controls >Smart Size >Basic, LVL=1, OK;

Mesh >Areas >Free, Pick All;

6. Časovo závislá úloha

Solution >Analysis Type >New Analysis, Transient, OK, OK;

7. Začiatkové teploty rúr

Solution >Define Loads >Apply >Thermal >Temperature >Uniform Temp, TUNIF=300, OK;

8. Okrajové podmienky pre teplotu

Solution >Define Loads >Apply >Thermal >Temperature >On Lines, Kliknite postupne všetky 4 vnútorné čiary vnútorného prstenca, OK, VALUE=1000, OK;

9. Okrajové podmienky pre emisivitu

Solution >Define Loads >Apply >Thermal >Radiation >On Lines, Kliknite postupne všetky 4 vonkajšie čiary vnútorného prstenca, OK, VALUE=0.7, VALUE2=1, Apply, Kliknite postupne všetky 4 vnútorné čiary vonkajšieho prstenca, OK, VALUE=0.6, VALUE2=1, Apply, Kliknite postupne všetky 4 vonkajšie čiary vonkajšieho prstenca, VALUE=0.6, VALUE2=1, OK;

10. Riadiace príkazy pre výpočet radiácie

Solution >Radiation Opts >Solution Opts, STEF=5.67E-8, TOFFST=0, VALUE=300, OK;

11. Riadiace príkazy pre výpočet F_{12} (potvrdíme implicitne nastavené hodnoty)

Solution >Radiation Opts >View Factor, OK;

12. Riadiace príkazy pre iteráciu a výpočet

Solution >Load Step Opts >Time/Frequenc >Time-TimeStep, TIME=3600, DELTIM=10, KBC=Stepped, Minimum time step size= 5, Maximum time step size= 100, OK;

13. Riadiace príkazy pre zápis výsledkov

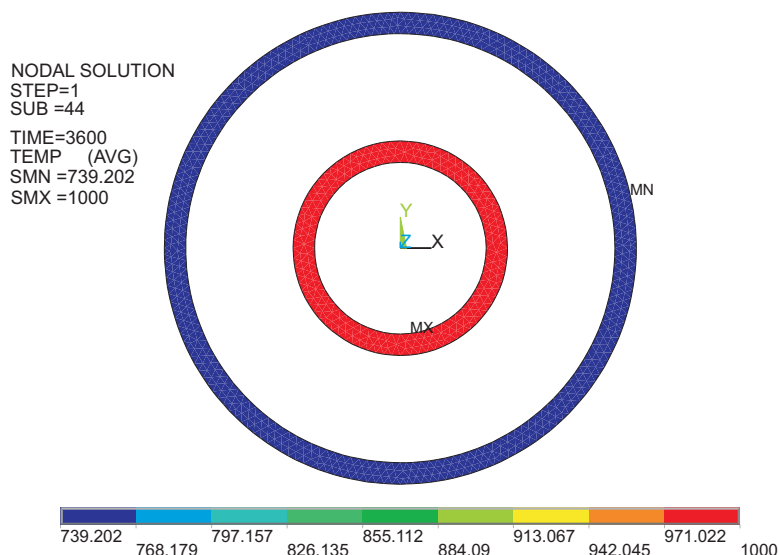
Solution >Load Step Opts >Output Ctrls >DB/Results File, Every substep, OK;

14. Výpočet

Solution >Solve >Current LS, OK;

15. Ilustrácia rozdelenia teplôt v čase 1 hodina

General Postproc >Plot Results >Contour Plot >Nodal Solu >DOF Solution, Nodal Temperature, OK;



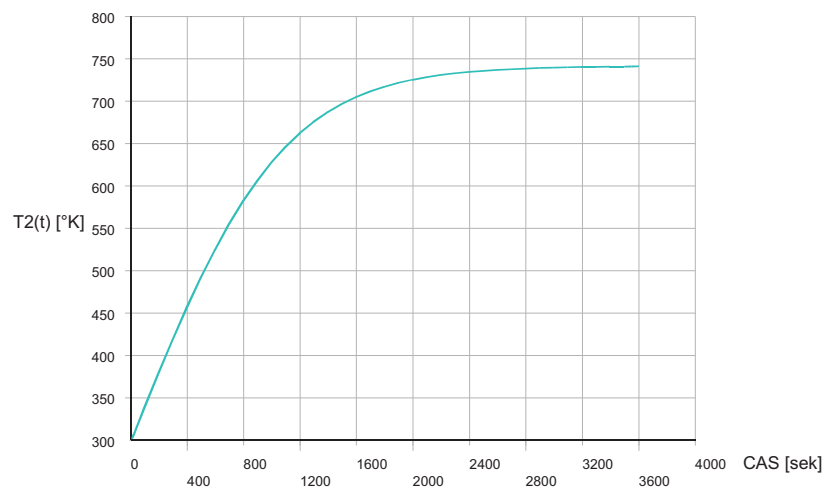
16. Určenie teplôt na plochách s prenosom tepla

General Postproc >Query Results >Subgrid Solu >DOF Solution, TEMP, OK, Kliknite uzly na sálajúcich povrchoch:

$$T_1 = 995,1 \text{ } ^\circ\text{K}, T_2 = 741,3 \text{ } ^\circ\text{K}, T_{2\text{vonk}} = 739,2 \text{ } ^\circ\text{K}, \text{Cancel};$$

17. Časový priebeh teploty T_2

TimeHist PostPro, Kliknite ikonku *Add Data >Nodal Solution > DOF Solution*, Nodal Temperature, OK, Kliknite ľubovoľný uzol na vnútornej ploche vonkajšej rúry, OK, Kliknite ikonku *Graph Data*;



18. Ukončenie výpočtu

Utility Menu >File >Exit, Save Geom+Loads, OK;

Literatúra

[Lit 1] J.H. Lienhard IV, J.H. Lienhard V: *A Heat Transfer Textbook*, 4th Edition, Phlogiston Press, Cambridge, Massachusetts, 2011

[1] Benča, Š.: *Výpočtové postupy MKP pri riešení lineárnych úloh mechaniky*, Vydavateľstvo STU Bratislava, 2004, 2006