

Softwarová aplikace pro výpočet tepelného toku vícevrstvou kulovitou stěnou

Software application for calculation of the heat flow through
multilayer spherical wall

Stanislav Plšek



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta aplikované informatiky

Ústav automatizace a řídicí techniky

akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Stanislav PLŠEK

Studijní program: B 3902 Inženýrská informatika

Studijní obor: Automatické řízení a informatika

**Téma práce: Softwarová aplikace pro výpočet tepelného toku
vícevrstvou kulovitou stěnou**

Zásady pro vypracování:

- 1. Vypracujte literární studii zaměřenou na výpočet tepelných ztrát vícevrstvou stěnou tvaru koule.**
- 2. Seznamte se s výpočtem součinitele přestupu tepla pro případ volné i nucené konvekce a popište fyzikální parametry ovlivňujících množství předaného tepla.**
- 3. Vypočítejte ztráty tepla vícevrstvou kulovitou stěnou.**
- 4. Vytvořte ve zvoleném systému počítačové algebry softwarovou aplikaci pro výpočet tepelného toku vícevrstvou kulovitou stěnou.**
- 5. Ověřte funkčnost vytvořené aplikace porovnáním se vzorovým výpočtem.**

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. MÍKA, Vladimír. Základy chemického inženýrství. Praha : SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1977. 870 s.
2. HEJZAR, Radko. Sdílení tepla. 4. vyd. Praha : Nakladatelství ČVUT, 2004. 186 s. ISBN 80-01-02974-3.
3. ŠESTÁK, Jiří, RIEGER, František. Přenos hybnosti, tepla a hmoty. 3. vyd. Praha : Nakladatelství ČVUT, 2005. 299 s. ISBN 80-01-02933-6.
4. KOLOMAZNÍK, Karel. Modelování zpracovatelských procesů. 1. vyd. Brno : Vysoké učení technické v Brně, 1990. 191 s. ISBN 80-214-01141.
5. PERRY, R., H.; GREEN, D., W. Perry's chemical engineers' handbook. (CD ROM). 7 th ed. New York: McGraw-Hill Book Co. 1999.
6. KARBAN, Pavel. Matlab a Simulink. Brno : Computer Press, a.s., 2006. 220 s. ISBN 978-80-251-1448-3.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Hana Charvátová, Ph.D.

Ústav automatizace a řídicí techniky

Datum zadání bakalářské práce:

27. února 2009

Termín odevzdání bakalářské práce:

20. května 2009

Ve Zlíně dne 27. února 2009

prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.

děkan



prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.

ředitel ústavu

ABSTRAKT

V bakalářské práci řeším problematiku výpočtu tepelného toku vícevrstvou kulovitou stěnou. V první části práce se zabývám mechanismem prostupu tepla přes vícevrstvou kulovitou stěnu a v praktické části jsem sestavil interaktivní program pro výpočet tepelného toku vícevrstvou kulovitou stěnou a ověřil funkčnost aplikace porovnáním se vzorovým výpočtem. Vytvořený program bude použit jako učební pomůcka pro výuku předmětu Procesní inženýrství i pro praktické výpočty.

Klíčová slova: Matlab, tepelný tok, vícevrstvá kulovitá stěna, volná konvekce, nucená konvekce, součinitel přestupu tepla, součinitel prostupu tepla

ABSTRACT

In bachelor's work I solve problem with calculation of the heat flow through multilayer spherical wall. In the first part of work I deal with heat penetration through multilayer spherical wall and in the second part I made interactive program for calculation of the heat flow through multilayer spherical wall and I verified function of this software application comparing with exemplary calculation. This application is intended for use that teaching materials in school subject Process engineering and for practical calculations too.

Keywords: Matlab, heat flow, multilayer spherical wall, free convection, forced convection, heat transfer coefficient, coefficient of heat penetration

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucí bakalářské práce Ing. Haně Charvátové, Ph.D. za její pomoc při vedení během tvorby a trpělivost při konzultacích ohledně této práce. Taktéž děkuji rodičům za jejich všeobecnou podporu, díky které tato práce vznikla.

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval.

V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.

Ve Zlíně dne

.....
podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD	8
I TEORETICKÁ ČÁST	9
1 PROSTUP TEPLA	10
1.1 PROSTUP TEPLA VÍCEVRSTVOU KULOVITOU STĚNOU.....	10
2 PARAMETRY OVLIVŇUJÍCÍ PROSTUP TEPLA	13
2.1 PŘESTUP TEPLA	13
2.1.1 Volná konvekce do neomezeného prostoru	14
2.1.2 Nucená konvekce	14
2.2 SOUČINITEL PŘESTUPU TEPLA	15
2.3 VEDENÍ TEPLA	19
3 POPIS ZVOLENÉHO SYSTÉMU POČÍTAČOVÉ ALGEBRY	22
II PRAKTICKÁ ČÁST	23
4 POPIS UŽIVATELSKÉHO PROSTŘEDÍ VYTVOŘENÉHO PROGRAMU	24
4.1 OVLÁDÁNÍ PROGRAMU	24
4.2 STRUKTURA PROGRAMU	26
5 OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI PROGRAMU SE VZOROVÝM VÝPOČTEM TEPELNÉHO TOKU VÍCEVRSTVOU KULOVITOU STĚNOU	28
5.1 TĚLESO OBKLOPENÉ VOLNĚ PROUDÍCÍ TEKUTINOU	28
5.2 NUCENÉ OBTÉKÁNÍ VNĚJŠÍHO POVRCHU TĚLESA TEKUTINOU.....	34
5.3 SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ ZE VZOROVÉHO PŘÍKLADU A APLIKACE	39
ZÁVĚR	40
ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ	41
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	42
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	43
SEZNAM OBRÁZKŮ	46
SEZNAM TABULEK	47
SEZNAM PŘÍLOH	48

ÚVOD

V technické praxi se často setkáváme s případem, kdy se předává teplo z jedné proudící tekutiny do druhé přes stěnu vyrobenou z tuhého materiálu. K tomuto jevu dochází například v trubkových výměnících a v zásobnících s plynem nebo kapalinou.

Tento děj může mít negativní důsledky, neboť díky němu může dojít ke značným tepelným ztrátám. Proto je často potřeba získat tyto informace. Výpočet tepelného toku je však časově poměrně náročný a závisí na mnoha faktorech jako jsou fyzikální vlastnosti tekutin na obou stranách stěny, materiál a v neposlední řadě i tvar tělesa, přes níž teplo prochází. Těleso může být ve tvaru rovinné desky, válce nebo kulovité stěny. Navíc se může skládat z několika vrstev, například z materiálu konstrukce, různých izolačních a ochranných nátěrů, nečistot či usazenin v místě, kde je tekutina.

Pro omezení tepelných ztrát se používají různé izolace, avšak pro jejich použití je potřeba znát tepelné ztráty takovou stěnou, aby mohla být izolační vrstva správně navržena.

K složitému výpočtu prostupu tepla stěnou je v této práci navržena softwarová aplikace, která má za úkol zjednodušit výpočet prostupu tepla vícevrstvou kulovitou plochou obklopenou z obou stran tekutinou. Aplikace má být použita v předmětu Procesní inženýrství a může být použita v prakticky, neboť v krátkém časovém okamžiku provede výpočet uvedeného tepelného toku a dalších parametrů, jako jsou součinitel prostupu tepla a jednotlivé veličiny, na kterých je jeho hodnota přímo závislá.

Výpočet může být využit pro kulové zásobníky plynu v provedení nadzemním nebo umístěných v podzemních prostorech a další aplikace.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 PROSTUP TEPLA

Prostupem tepla nazýváme proces sdílení tepla z jedné kapaliny (nebo plynu) do druhé přes jednu nebo více stěn, které je od sebe navzájem oddělují. Prostup tepla v sobě zahrnuje přestup tepla z teplejší na teplejší tekutiny stěnu, vedení tepla danou stěnou nebo více stěnami a přestup tepla ze stěny do chladnější tekutiny.

Tok tepla lze vyjádřit rovnicí

$$dQ = k_m \Delta t_m dA \quad (1)$$

kde k_m je lokální koeficient prostupu tepla, Δt_m celková lokální teplotní hybná síla a dA je element teplosměnné plochy. Koeficient prostupu tepla lze určit z jednotlivých koeficientů přestupu tepla na obou stranách stěny a její tepelné vodivosti, popř. tepelných vodivostí jednotlivých vrstev, ze kterých je stěna složena. Vztah pro jeho výpočet je závislý na geometrickém uspořádání tvaru stěny a volbě dA . Je-li t_1 teplota tekutiny A a t_2 teplota tekutiny B, lze psát

$$Q = k \cdot A \cdot (t_1 - t_2) \quad (2)$$

[1], [2]

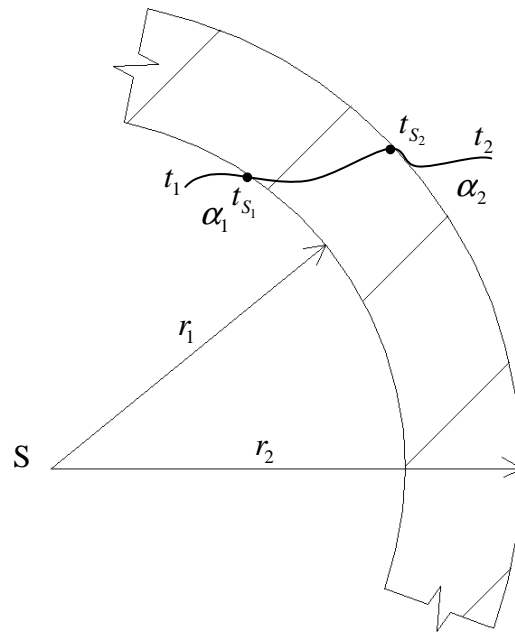
1.1 Prostup tepla vícevrstvou kulovitou stěnou

Při řešení prostupu tepla stěnou duté koule jsou známy kromě vnitřního poloměru koule r_1 také vnější poloměr koule r_2 , teploty prostředí t_1 , t_2 , a součinitel přestupu tepla α_1 , α_2 dle obrázku (Obr. 1). Předpokládejme, že veličiny α_1 , α_2 a t_1 , t_2 jsou stálé s časem a veličiny α_1 , α_2 také s povrchem. Jestliže je proces stacionární a tepelný tok bude stálý, potom lze pro všechny izotermické plochy jednovrstvé koule psát:

$$Q = \alpha_1 \cdot \pi \cdot r_1^2 \cdot (t_1 - t_{s_1}) \quad (3)$$

$$Q = \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda}{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}} \cdot (t_{s_1} - t_{s_2}) \quad (4)$$

$$Q = \alpha_2 \cdot \pi \cdot r_2^2 \cdot (t_{s_2} - t_2) \quad (5)$$



Obr. 1: Prostup tepla kulovou vrstvou

Kde rovnice (3) popisuje tepelný tok mezi vnitřní tekutinou a stěnou, rovnice (4) tok tepla stěnou koule a rovnice (5) je tok tepla mezi vnějším povrchem koule a vnější tekutinou. Teploty t_{s_1} , t_{s_2} jsou teploty povrchu vnitřní a vnější stěny.

Po sečtení těchto rovnic z nich vyplývá, že

$$Q = \frac{\pi \cdot (t_1 - t_2)}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1^2} + \frac{1}{2 \cdot \lambda} \cdot \left(\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2} \right) + \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_2^2}} = k_k \cdot (t_1 - t_2) \quad (6)$$

kde

$$k_k = \frac{\pi}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1^2} + \frac{1}{2 \cdot \lambda} \cdot \left(\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2} \right) + \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_2^2}} \quad (7)$$

se nazývá součinitelem prostupu tepla u koule.

$$\frac{\pi}{k_k} = \frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1^2} + \frac{1}{2 \cdot \lambda} \cdot \left(\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2} \right) + \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_2^2} \quad (8)$$

se nazývá tepelným odporem.

Prostup tepla pro kulovou stěnu složenou z n – vrstev lze popsat následujícím vztahem

$$Q = \frac{\pi \cdot (t_1 - t_{n+1})}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1^2} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2 \cdot \lambda_i} \cdot \left(\frac{1}{d_i} - \frac{1}{d_{i+1}} \right) + \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_{n+1}^2}} = k_k \cdot (t_1 - t_{n+1}) \quad (9)$$

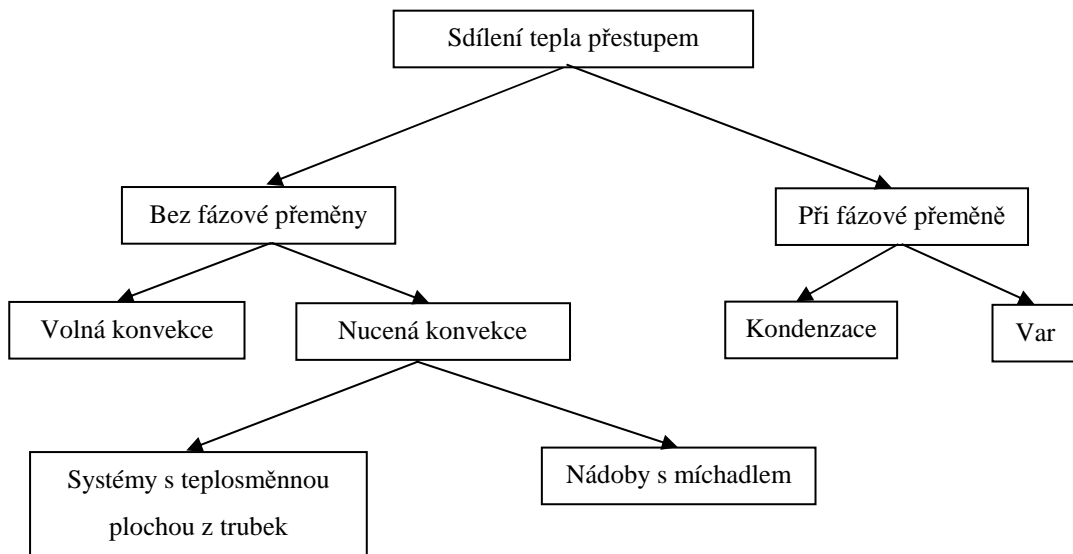
a součinitel prostupu tepla pro kulovou stěnu složenou z n-vrstev vztahem

$$k_k = \frac{\pi}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1^2} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2 \cdot \lambda_i} \cdot \left(\frac{1}{d_i} - \frac{1}{d_{i+1}} \right) + \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_{n+1}^2}} \quad (10)$$

[1], [2]

2 PARAMETRY OVLIVŇUJÍCÍ PROSTUP TEPLA

2.1 Přestup tepla



Obr. 2: Rozdělení sdílení tepla přestupem

O přestupu tepla lze hovořit tehdy, dochází – li k jeho sdílení mezi dvěma sousedícími fázemi, z nichž alespoň jedna je tekutá (obvykle se jedná o tekutinu a tuhou stěnu, což je nejběžnější způsob předávání tepla). Přestup tepla se řídí pomocí vztahu

$$dQ = \alpha \cdot \Delta t \cdot dA \quad (11)$$

kde α je součinitel přestupu tepla a Δt je rozdíl mezi teplotou stěny a vhodně definovanou teplotou tekuté fáze, oboje v místě, kde se nachází element teplosměnné plochy dA . Při praktických výpočtech se používá středních hodnot veličin α a Δt , zprůměrněné přes teplosměnnou plochu. Pak lze přepsat vztah (11) do tvaru

$$Q = \alpha \cdot \Delta t \cdot A \quad (12)$$

Na obrázku (Obr. 2) jsou pro rychlejší orientaci znázorněny možné případy sdílení tepla přestupem. Ovšem nejsou v něm zahrnuty všechny možnosti, např. geometrické uspořádání nebo rozlišení dle proudění tekutiny [2], [3].

2.1.1 Volná konvekce do neomezeného prostoru

Je-li pohyb tekutiny vyvolán pouze rozdílem teplot, hovoříme o volné konvekci. V tomto odstavci uvedené vztahy platí, pokud je prostor vyplněný tekutinou mnohem větší než rozměry teplosměnné plochy a pokud je tato plocha současně izotermická. Velmi často se pro výpočet koeficientu přestupu tepla používá jednoduchý vztah tvaru

$$Nu = C(GrPr)^c \quad (13)$$

kde C a c jsou empirické konstanty. Protože rovnice (13) nevystihuje tvar závislosti Nu na proměnné $GrPr$ v celém rozsahu, nevystačí se s jedinou dvojicí konstant C a c . V tabulce (Tab. 1) jsou doporučené konstanty C a c .

Tab. 1: Konstanty pro výpočet vztahu (13)

$GrPr$	C	c
$< 10^{-2}$	0,5	0
$10^{-2} \div 5 \cdot 10^2$	1,18	0,125
$5 \cdot 10^2 \div 2 \cdot 10^7$	0,54	0,25
$2 \cdot 10^7 \div 5 \cdot 10^{13}$	0,135	1/3

Za charakteristický rozměr systému dosadíme v rovnici (13) u koule její průměr [2].

2.1.2 Nucená konvekce

Je-li tekutina „donucena“ k toku kolem teplosměnné plochy jinak než pouze rozdílem teplot (nebo koncentrací), mluvíme o nucené konvekci. V průmyslu jsou při nucené konvekci nejčastější teplosměnné plochy vytvořené z trubek nebo nádoby s míchadly.

V případě obtékání kulovitého tělesa proudem tekutiny odlišné teploty lze pro výpočet Nusseltova kritéria použít vztah

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda} = 2 + \left(0,4 \cdot Re^{0,5} + 0,06 \cdot Re^{\frac{2}{3}} \right) Pr^{0,4} \left(\frac{\eta}{\eta_w} \right)^{0,25} \quad (14)$$

který platí pro $3,5 < Re < 80000$ a $0,7 < Pr < 380$. Viskozita tekutiny η_w se určuje při teplotě stěny.

Pro výpočet Reynoldsova kritéria popisujícího chování proudící tekutiny lze použít vztah

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} = \frac{v \cdot d \cdot \rho}{\eta} \quad (15)$$

[2], [4]

2.2 Součinitel přestupu tepla

Řešení rovnic sdílení tepla v proudící tekutině je obvykle náročné a pro mnoho praktických problémů není k dispozici. Obtíže analytického řešení diferenciálních rovnic se obcházejí zavedením zjednodušeného vztahu pro intenzitu toku tepla v tekutině na fázovém rozhraní. Předpokládá se, že je úměrná rozdílu mezi střední teplotou tekutiny $\langle t \rangle$ a teplotou tekutiny t_w na rozhraní. Koeficient úměrnosti se nazývá součinitel přestupu tepla a označíme jej symbolem α .

$$q_w = \alpha \cdot (\langle t \rangle - t_w) \quad (16)$$

a tok tepla elementem plochy fázového rozhraní bude

$$dQ = q_w \cdot dA = \alpha \cdot (\langle t \rangle - t_w) \cdot dA \quad (17)$$

kde

$$q_w = -\lambda \cdot \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_{n=0} \quad (18)$$

Z porovnání vztahu (16) a (18) plyne pro součinitel přestupu tepla výraz

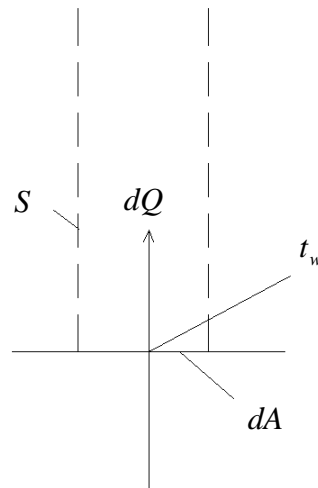
$$\alpha = - \frac{\lambda \cdot \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_{n=0}}{\langle t \rangle - t_w} \quad (19)$$

Veličinou α tedy nahrazujeme obtížně stanovitelný gradient teploty tekutiny na fázovém rozhraní.

Rovnice (16) se někdy nazývá Newtonův zákon ochlazování. Ovšem není to zákon, nýbrž definiční rovnice pro součinitel přestupu tepla a platí pro ochlazování i pro ohřívání.

Stanovení střední teploty tekutiny $\langle t \rangle$ závisí na tom, zda jde o sdílení tepla ve velkých objemech tekutiny nebo o sdílení tepla v tekutině proudící potrubím či kanálem. V případě velkých objemů tekutiny uvažujeme na fázovém rozhraní tenkou mezní vrstvu, v níž nastává změna teploty, a vně této vrstvy považujeme teplotu za konstantní. Protože je mezní vrstva tenká, je možno za střední hodnoty teploty považovat teplotu tekutiny vně mezní vrstvy a ta se dá obvykle snadno stanovit. Při konstantní hodnotě hustoty a měrného tepla tekutiny je střední teplota dle obrázku (Obr. 3) vyjádřena rovnicí:

$$\langle t \rangle = \frac{1}{V} \cdot \int_S t \cdot v dS \quad (20)$$



Obr. 3: Přestup tepla ze stěny do tekutiny

Tekutiny proudí většinou turbulentně a způsobují turbulentní fluktuace a dobré promíchávání tekutiny. Viděli jsme, že v důsledku toho je rychlostní profil plochý a totéž platí o profilu teplotním. Teploměr ponořený do proudící tekutiny pak udává teplotu, která je blízká střední teplotě tekutiny podle průtočného řezu.

Součinitel přestupu tepla je veličina, jejíž hodnota se stanovuje pokusně. Jak plyne z definiční rovnice (16), můžeme jeho hodnotu zjistit dělením pokusně zjištěné hodnoty intenzity toku tepla na fázovém rozhraní rozdílem teplot tekutiny $(\langle t \rangle - t_w)$ pro dané pokusné uspořádání. Protože aparát, ve kterých se pokusy provádějí, mají konečné rozměry, stanovuje se obvykle střední hodnota součinitele přestupu tepla podle plochy výměny tepla. Tak z rovnice (17) plyne

$$\int_Q \frac{dQ}{\langle t \rangle - t_w} = \int_A \alpha dA = \langle \alpha \rangle A \quad (21)$$

Integrál na levé straně rovnice řešíme a přejdeme tak na teplotu jako integrační proměnnou. Záleží na pokusných podmínkách, do jaké míry se hodnota α podle plochy výměny tepla mění (při konstantní hodnotě α je místní hodnota rovna střední hodnotě). Pokud je geometrické uspořádání podél celé plochy stejné, závisí hodnota α pouze na změně teploty podél plochy. Střední hodnota α pak odpovídá nějaké průměrné teplotě tekutiny.

Podobně jako při proudění tekutin využíváme i pro přestup tepla zobecnění pokusných měření pomocí teorie podobnosti. Pro jednoduchost předpokládejme, že se tepelná vodivost tekutiny nemění s místem a že tekutina neobsahuje zdroj energie. Uvažujeme sdílení tepla jedním směrem, a to ve směru normály k ploše výměny tepla, a proto máme

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + v_n \frac{\partial t}{\partial n} = a \frac{\partial^2 t}{\partial n^2} \quad (22)$$

přičemž na fázovém rozhraní platí rovnice (19). Jednotlivé veličiny v těchto rovnicích vyjádříme součinem charakteristické a bezrozměrové veličiny. Z rovnice (22) dostáváme

$$\frac{t_0}{\tau_0} \frac{\partial t^*}{\partial \tau^*} + \frac{v_0 t_0}{l_0} v_n^* \frac{\partial t^*}{\partial n^*} = \frac{a_0 t_0}{l_0^2} a^* \frac{\partial^2 t^*}{\partial n^{*2}} \quad (23)$$

a z rovnice (19)

$$\alpha_0 \alpha^* = - \frac{\lambda_0 t_0}{t_0 l_0} \frac{\lambda^*}{\langle t \rangle^* - t_w^*} \left(\frac{\partial t^*}{\partial n^*} \right)_{n^*=0} \quad (24)$$

Každou z rovnic dělíme výrazem složeným z charakteristických veličin na pravé straně rovnice, tj. první zlomkem $a_0 t_0 / l_0^2$ a druhou zlomkem, takže máme bezrozměrové vztahy

$$\frac{l_0^2}{a_0 \tau_0} \frac{\partial t^*}{\partial \tau^*} + \frac{v_0 l_0}{a_0} v_n^* \frac{\partial t^*}{\partial n^*} = a^* \frac{\partial^2 t^*}{\partial n^{*2}} \quad (25)$$

a

$$\frac{\alpha_0 l_0}{\lambda_0} \alpha^* = -\frac{\lambda^*}{\langle t \rangle^* - t_w^*} \left(\frac{\partial t^*}{\partial n^*} \right)_{n^*=0} \quad (26)$$

Tyto bezrozměrové rovnice jsou pro všechny podobné systémy stejné, a proto se sobě rovnají součinitele obsahující charakteristické veličiny (tyto veličiny jsou samozřejmě pro jednotlivé systémy různé). Takto byly odvozeny kritéria:

Nusseltovo

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} \quad (27)$$

Fourierovo

$$Fo = \frac{l^2}{a\tau} \quad (28)$$

a Péceletovo

$$Pe = RePr = \frac{v \cdot l}{a} \quad (29)$$

Nusseltovo kritérium je vlastně bezrozměrový součinitel přestupu tepla a jeho závislost na podmínkách sdílení tepla se vyjadřuje jako funkce dalších kritérií. Fourierovo kritérium se objevilo u členu pro lokální změnu teploty časem a vyjadřuje neustálenost přestupu tepla. Péceletovo kritérium se vyskytuje u konvekčního členu, a proto vyjadřuje vliv konvekce na přestup tepla. Zároveň ovšem musíme řešit bilanci hybnosti, a proto se v kritériální rovnici vyskytují kritéria odvozená při popisu proudění tekutiny, tj. Reynoldsovo kritérium, vyjadřující poměr sil setrvačných a sil vnitřního tření, a Froudovo kritérium, vyjadřující vliv hmotnostních sil na proudění tekutiny (Eulerovo kritérium není závislé a Strouhalovo kritérium vznikne kombinací kritéria Fourierova a Péceletova, proto se v kritériální rovnici pro Nusseltovo kritérium nevyskytují). Hmotnostní síly vyvolávají v tekutině při sdílení tepla volné proudění a převedením rovnice

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial \tau} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} = \beta(\langle\langle t \rangle\rangle - t) \mathbf{f} + \nu \nabla^2 \mathbf{v} \quad (30)$$

na bezrozměrový tvar bychom získali Froudovo kritérium násobené součinem $\beta \cdot \Delta t$, což pomocí Reynoldsova kritéria upravíme na Galileovo kritérium násobené tímto součinem na tzv. kritérium Grashofovo. Je-li hmotnostní silou tíže, má Grashofovo kritérium tvar

$$Gr = \frac{gl^3}{\nu^2} \beta \cdot \Delta t \quad (31)$$

Místo Péceletova kritéria se obvykle používá Prandtlova kritéria

$$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{c_p \eta}{\lambda} \quad (32)$$

kteřé vznikne dělením Péceletova kritéria Reynoldsovým kritériem.

Kriteriální rovnice se často zapisují ve tvaru součinu mocnin kritérií, používá se však i odlišných tvarů a funkcí. Při větších změnách teploty se významně mění vlastnosti tekutin. Do rovnic je třeba dosazovat hodnoty těchto vlastností při střední teplotě podle definice používané autorem kriteriálního vztahu. Při obtékání těles bývá teplota používaná ke stanovení vlastností tekutiny v kriteriálním vztahu aritmetickým středem teploty tekutiny $\langle t \rangle$ v místě vzdáleném od stěny (vně mezní vrstvy) a teploty stěny t_w :

$$\langle\langle t \rangle\rangle = \frac{\langle t \rangle + t_w}{2} \quad (33)$$

[2], [3]

2.3 Vedení tepla

Vedení (kondukce) tepla je jeden ze způsobů šíření tepla v tělesech, při kterém částice látky v oblasti s vyšší střední kinetickou energií předávají část své pohybové energie prostřednictvím vzájemných srážek částicím v oblasti s nižší střední kinetickou energií. Částice se přitom nepřemísťují, ale kmitají kolem svých rovnovážných poloh.

Ke sdílení tepla v nehybném prostředí dochází především v pevných látkách. V nehybném prostředí se bilance entalpie redukuje na Fourierovu rovnici

$$a \nabla^2 t = \frac{\partial t}{\partial \tau} \quad (34)$$

přičemž pro intenzitu toku tepla platí Fourierův zákon

$$\mathbf{q} = -\lambda \nabla t \quad (35)$$

Důležitou charakteristikou vedení tepla je fyzikální veličina tepelná vodivost, představující schopnost látky vést teplo. Tato veličina ukazuje rychlost, jakou se teplo šíří a přenáší z jedné zahřáté části materiálu do jiné části materiálu v našem případě dále prostoru zejména chladnějších částí.

Tepelnou vodivost daného materiálu charakterizuje součinitel tepelné vodivosti, který udává, jaké množství tepla musí za jednotku času projít tělesem, aby na jednotkovou délku byl jednotkový teplotní spád. Přitom se předpokládá, že teplo se šíří pouze v jednom směru.

Gradient teploty je vektor, jehož směr udává, ve kterém směru teplota nejrychleji roste a jeho absolutní velikost udává, jak rychle roste. Analytické řešení Fourierovy rovnice poskytuje rozložení teploty v materiálu (teplotní pole). Určitý problém je vymezen počátečními a okrajovými podmínkami. Počáteční podmínky určují v daném systému v určitém okamžiku, nejčastěji na počátku děje. Okrajové podmínky se dělí na tři nejčastější typy:

- a) na ohraničení systému se udržuje dané rozložení teploty
- b) na ohraničení systému se udržuje dané rozložení intenzity toku tepla
- c) systém je obklopen prostředím dané teploty a je určen součinitel přestupu tepla

Pro tok tepla libovolnou plochou A lze vyjádřit intenzitou toku tepla \mathbf{q} :

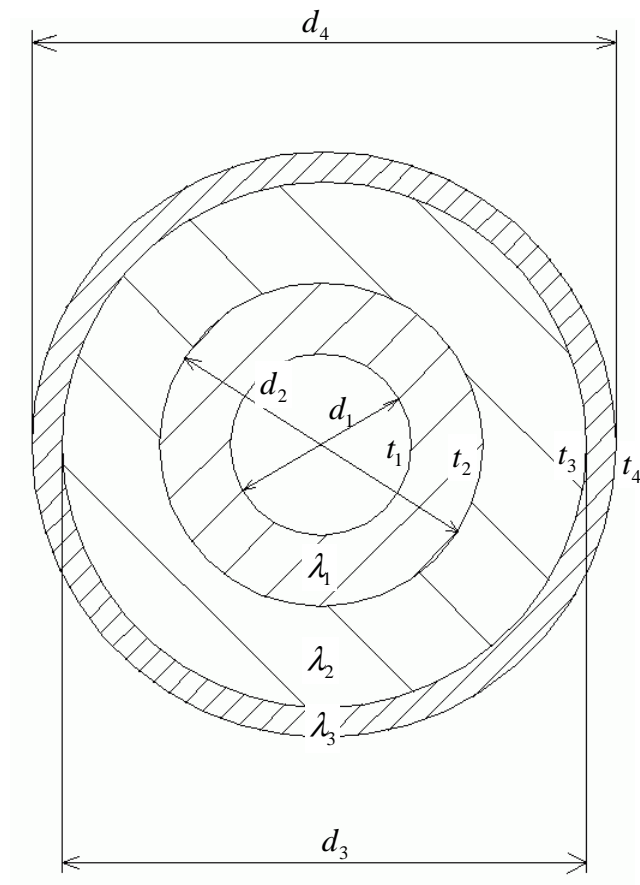
$$Q = \int_A \mathbf{q} \cdot d\mathbf{A} \quad (36)$$

Po omezení se na případy, kdy je možné popsat děj ve vhodné soustavě souřadnic jako jednosměrný a budeme považovat fyzikální vlastnosti materiálu za neměnné, lze pro stacionární vedení tepla dutou koulí psát

$$Q = \frac{2\pi\lambda(t_1 - t_2)}{\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2}} \quad (37)$$

Pro dutou kouli složenou z více vrstev lze použít vztah

$$Q = 2\pi \cdot \frac{t_1 - t_{n+1}}{\sum_{j=1}^{n+1} \frac{1}{\lambda} \left(\frac{1}{d_j} - \frac{1}{d_{j+1}} \right)} \quad (38)$$



Obr. 4: Řez třívrstvou kulovou stěnou

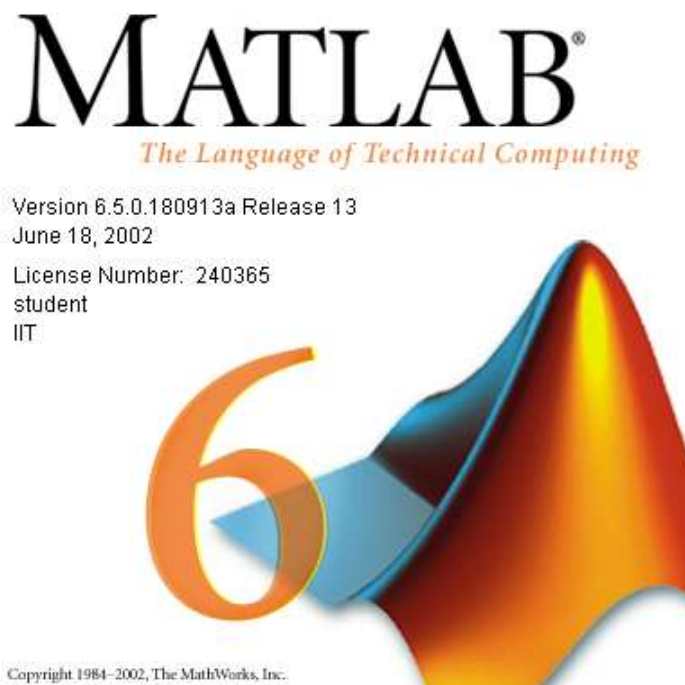
[2], [3], [5]

3 POPIS ZVOLENÉHO SYSTÉMU POČÍTAČOVÉ ALGEBRY

Pro vytvoření softwarové aplikace pro výpočet tepelného toku vícevrstvou kulovitou stěnou jsem zvolil program Matlab, verze 6.5.

Matlab je výkonné interaktivní prostředí pro vědecké výpočty, modelování, návrhy algoritmů, simulace, analýzu a prezentaci dat, měření a zpracování signálů. Spojuje tak technické výpočty, vizualizaci dat a programovací jazyk v jednom prostředí. Společně s velkým dostupným množstvím modulů a toolboxů vytváří výkonný prostředek. Nejznámější toolbox je např. Simulink, umožňující simulaci různých systému a obvodů.

Nejpodstatnější součástí numerického jádra Matlabu jsou algoritmy pro operace s maticemi reálných a komplexních čísel. Matlab umožňuje provádět všechny běžné operace a kromě jednodušších datových typů podporuje složitější, jako jsou např. vícerozměrná pole reálných nebo komplexních čísel. Dále je možné vytvářet pole buněk nebo datové struktury, kde jsou prvky rozlišovány jménem, nikoliv souřadnicemi [6], [7].



Obr. 5: Logo při spouštění Matlabu

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 POPIS UŽIVATELSKÉHO PROSTŘEDÍ VYTVOŘENÉHO PROGRAMU

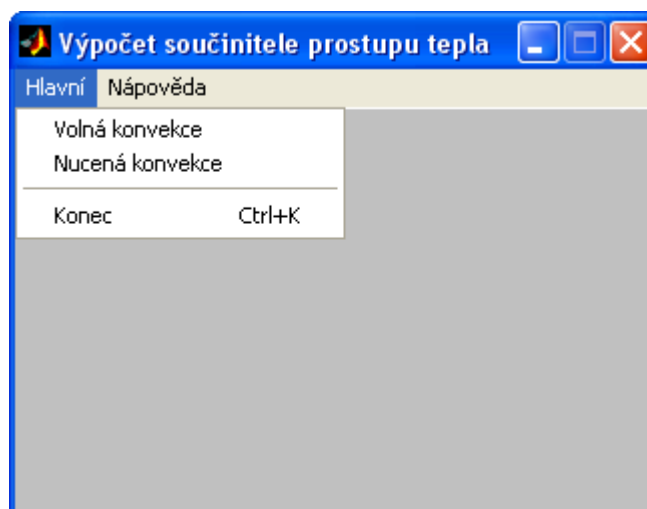
Jak jsem uvedl v předchozím odstavci, aplikaci pro výpočet tepelného toku vícevrstvou kulovitou stěnou jsem sestavil v prostředí matematického softwaru Matlab.

Dle zadání jsem vytvořil program, v němž je možno vypočítat součinitel prostupu tepla vícevrstvou kulovitou stěnou. Program umožňuje počítat se stěnou složenou až ze šesti vrstev, minimálně musí být stěna dvouvrstvá.

V programu je možno počítat s přirozeným nebo nuceným prouděním tekutiny okolo vnějšího povrchu kulovité stěny, uvnitř jsem uvažoval přirozené proudění tekutiny (volnou konvekci).

4.1 Ovládání programu

Po spuštění programu se zobrazí hlavní okno, kde si může uživatel v hlavním menu vybrat ze dvou položek, a to pro volnou nebo nucenou konvekci okolo vnějšího povrchu kulovité stěny. Taktéž zde lze ukončit program. Jiné ukončení (např. křížkem pro zavření okna) není umožněno. V menu nápovědy jsou hlavní informace o programu. Vše je viditelné na obrázku (Obr. 6).



Obr. 6: Hlavní okno programu

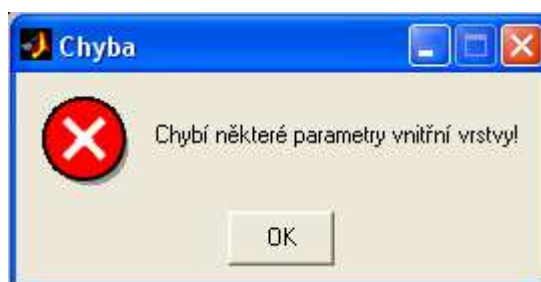
Po výběru některého výpočtu (volná nebo nucená konvekce) se zobrazí okno, ve kterém se zadávají parametry pro výpočet, což jsou teploty, parametry vrstev a tekutin. Po otevření okna již jsou vyplněny hodnoty shodné se vzorovým příkladem jako na obrázku (Obr. 7),

keré je možno přepsat. V případě, že je potřeba počítat tepelný tok přes stěnu složenou z méně než šesti vrstev, je nutno volit jako hodnoty průměrů nepoužitých mezivrstev 0. V tomto případě nebude s touto vrstvou počítáno. Po stisku tlačítka „Výpočet“ je proveden kompletní výpočet. Chybí-li některé parametry potřebné k výpočtu, zobrazí se varovné okno, jak je zobrazeno na obrázku (Obr. 8).

The screenshot shows the 'Nucená konvekce' window with the following parameters:

Vnitřní vrstva	Vnější vrstva	Mezivrstva 1	Mezivrstva 3
Vnitřní průměr: 1 m	Vnější průměr: 1.3 m	Vnější průměr: 1.2 m	Vnější průměr: 0 m
Součinitel tepelné vodivosti: 50 W.m-1.K-1	Součinitel tepelné vodivosti: 0.03 W.m-1.K-1	Součinitel tepelné vodivosti: 50 W.m-1.K-1	Součinitel tepelné vodivosti: W.m-1.K-1
Teplota vnitřního povrchu: 42 °C			
Vnitřní tekutina	Vnější tekutina	Mezivrstva 2	Mezivrstva 4
Teplota: 46 °C	Teplota: 30.5 °C	Vnější průměr: 0 m	Vnější průměr: 0 m
Měrné teplo: 1010 J.kg-1.K-1	Měrné teplo: 1010 J.kg-1.K-1	Součinitel tepelné vodivosti: W.m-1.K-1	Součinitel tepelné vodivosti: W.m-1.K-1
Hustota: 1.11 kg.m-3	Hustota: 1.1649 kg.m-3		
Součinitel tepelné vodivosti: 0.0277 W.m-1.K-1	Součinitel tepelné vodivosti: 0.0265 W.m-1.K-1		
Dynamická viskozita: 1.9356e Pa.s	Dynamická viskozita: 1.8658e Pa.s		
Součinitel objemové roztažnosti: 0.00315 K-1	Rychlost proudění tekutiny: 0.8 m.s-1		

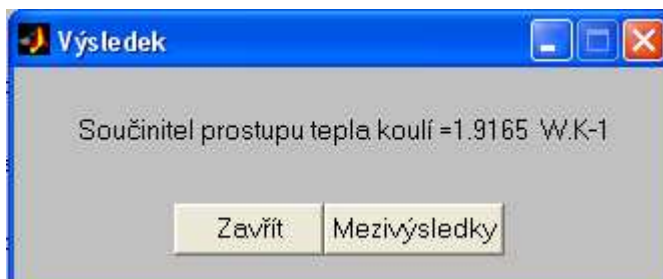
Obr. 7: Okno pro zadávání parametrů při výpočtu s nucenou konvekcí se vzorovými hodnotami z příkladu



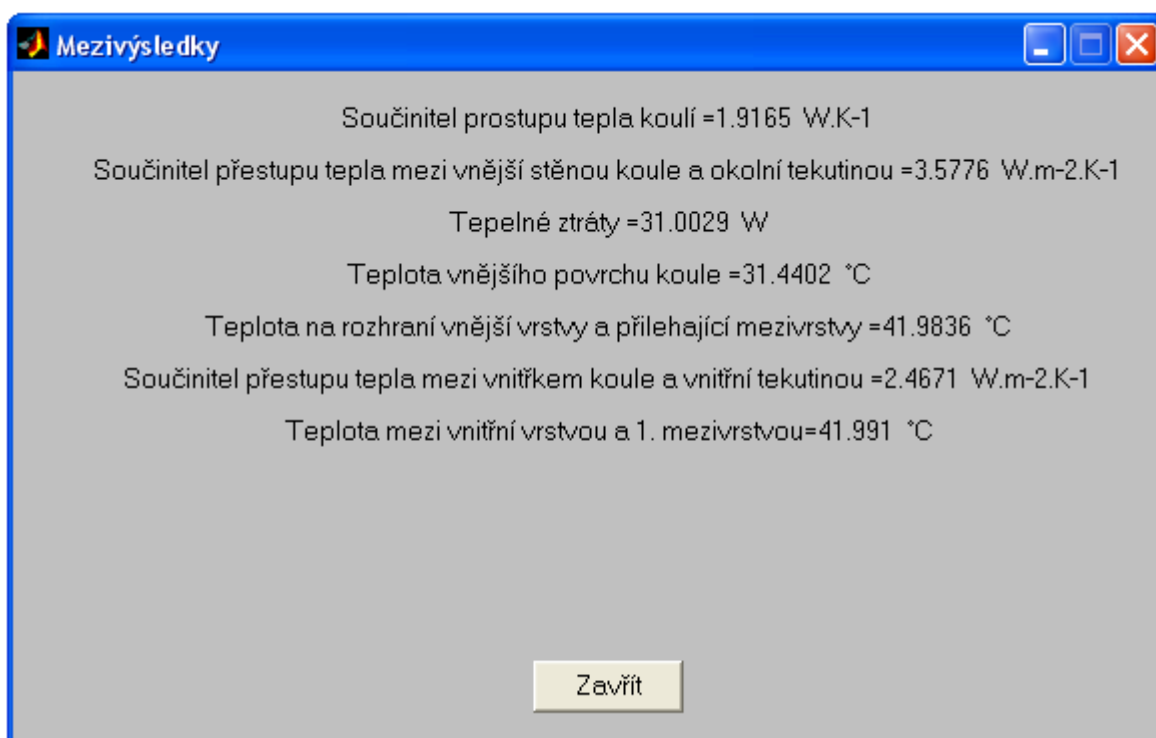
Obr. 8: Varovné okno informující o chybějícím parametru vnitřní vrstvy

Byl – li proveden výpočet, zobrazí se v novém okně podle obrázku (Obr. 9). Po provedení výpočtu je možno zobrazit mezivýsledky, mezi kterými je tepelný tok, součinitel přestupu tepla mezi stěnou tělesa a tekutinou uvnitř a vně tělesa, a také vypočtené teploty na

rozhraní vrstev, ze kterých se skládá stěna. Nebyl – li proveden výpočet, po stisku tlačítka „Mezivýsledky“ se okno nezobrazí.



Obr. 9: Okno s výsledkem



Obr. 10: Okno se zobrazenými mezivýsledky

4.2 Struktura programu

Program jsem pro jednodušší orientaci a práci rozdělil na jednotlivé části 13-ti souborů ve třech složkách. Spouští se klávesou „F5“ po otevření souboru „start.m“ v programu Matlab, nejlépe verze 6.5 (Release 13).

V jednotlivých složkách („napoveda“, „nucena“, „volna“) jsou soubory rozděleny na jednotlivé části, které mají za úkol provést danou část:

Ve složce „napoveda“ jsou soubory pro zobrazení nápovědy z hlavního menu, ve složce „nucena“ mají následující soubory tyto funkce:

- „mezi_n.m“: zobrazení mezivýsledků při výpočtu s nucenou konvekcí
- „napov_n.m“: zobrazení nápovědy pro nucenou konvekcí
- „nucena_k.m“: zobrazení okna pro zadávání parametru pro nucenou konvekcí
- „test_2.m“: testuje, zda – li jsou zadány všechny potřebné parametry pro výpočet, v případě chyby zobrazí varovné okno a přeruší výpočet
- „vypocet_n.m“: výpočet součinitele prostupu tepla a jeho zobrazení.

Ve složce „volna“ jsou tyto soubory s následujícími funkcemi:

- „mezi_v.m“: zobrazení mezivýsledků při výpočtu s volnou konvekcí
- „napov_v.m“: zobrazení nápovědy pro volnou konvekcí
- „test_1.m“: testuje, zda – li jsou zadány všechny potřebné parametry pro výpočet, v případě chyby zobrazí varovné okno a přeruší výpočet
- „volna_k.m“: zobrazení okna pro zadávání parametru pro volnou konvekcí
- „vypocet_v.m“: výpočet součinitele prostupu tepla a jeho zobrazení při volné konvekcí.

V souboru „start.m“ jsou vytvořeny všechny potřebné globální proměnné, s jejichž pomocí jsou předávány hodnoty mezi jednotlivými funkcemi. Pro vytvoření grafického uživatelského rozhraní bylo využito příkazů editoru z důvodu lepší přenositelnosti, což nástroj Guide v Matlabu neumožňuje v takové míře.

Program je plně funkční při rozlišení 1024 x 768 a vyšším, při nižším se nemusí korektně zobrazovat.

5 OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI PROGRAMU SE VZOROVÝM VÝPOČTEM TEPELNÉHO TOKU VÍCEVRSTVOU KULOVITOU STĚNOU

5.1 Těleso obklopené volně proudící tekutinou

Zadání

Vypočítejte součinitel prostupu tepla a ztráty tepla do okolí dvouvrstvou stěnou tělesa tvaru duté koule, je-li dáno:

- vnitřní vrstva: -vnitřní průměr $d_1 = 1$ m
- vnější průměr $d_2 = 1,1$ m
- součinitel tepelné vodivosti $\lambda_1 = 50 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
- vnější vrstva: -vnější průměr $d_3 = 1,25$ m
- součinitel tepelné vodivosti $\lambda_2 = 0,05 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
- teplota vnějšího povrchu $t_3 = 13$ °C

Uvnitř tělesa je metan o teplotě $t_m = 27$ °C a okolním prostředím je vzduch o teplotě $t_v = 10$ °C.

Uvažujte volnou konvekci jak uvnitř tělesa, tak i v okolním prostředí.

Řešení

Nejprve je potřeba vypočítat součinitel přestupu tepla mezi vnějším povrchem koule a okolním vzduchem, aby mohl být určen tepelný tok. Z něho se určí teplota na rozhraní vnitřní a vnější vrstvy, ze kterých je složena daná koule. Pomocí této teploty se určí teplota na vnitřní stěně uvnitř koule. Ze známé teploty metanu a teploty povrchu uvnitř koule se určí součinitel přestupu tepla mezi metanem a vnitřním povrchem. Následně z určených součinitelů přestupu tepla a dalších parametrů koule se určí součinitel prostupu tepla danou koulí.

1) Určení součinitele přestupu tepla mezi vnějším povrchem koule a okolním vzduchem

Pro určení součinitele přestupu tepla ze vztahu (27) jsem provedl výpočet Nusseltova kritéria pomocí vztahu (13). Pro výpočet Prandtlova kritéria jsem použil vztah (32) a pro určení Grashofova kritéria vztah (31).

Pro výpočet kritérií je potřeba znát parametry vzduchu:

- dynamická viskozita $\eta_v = 17,719 \cdot 10^{-6} \text{ Pa}\cdot\text{s}$

- měrné teplo $c_{p_v} = 1010 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

- hustota $\rho_v = 1,2472 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$

- tepelná vodivost $\lambda_v = 0,0249 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

Parametry jsem našel v literatuře [8] a [9].

$$\text{Pr} = \frac{c_{p_v} \cdot \eta_v}{\lambda_v} = \frac{1010 \cdot 17,719 \cdot 10^{-6}}{0,0249} \doteq 0,7187 \quad (39)$$

$$\text{Gr} = \beta \cdot (t_3 - t_v) \frac{g \cdot d_3^3}{\nu_v^2} = \frac{1}{\frac{t_3 + t_v}{2} + 237,15} \cdot (t_3 - t_v) \frac{g \cdot d_3^3}{\left(\frac{\eta_v}{\rho_v}\right)^2} \quad (40)$$

$$\text{Gr} = \frac{1}{\frac{13+10}{2} + 237,15} \cdot (13-10) \frac{9,81 \cdot 1,25^3}{\left(\frac{17,719 \cdot 10^{-6}}{1,2472}\right)^2} \doteq 1000467306 \quad (41)$$

$$\text{Nu} = C(\text{GrPr})^c = C(0,7187 \cdot 1000467306)^c = C(719035852,9)^c \quad (42)$$

Dle tabulky (Tab. 1) jsem zvolil konstanty $C = 0,135$ a $c = \frac{1}{3}$. Po dosazení do výpočtu

Nusseltova kritéria:

$$\text{Nu} = 0,135(719035852,9)^{\frac{1}{3}} \doteq 120,9439 \quad (43)$$

Výpočet součinitele přestupu tepla z vypočteného nusseltova kritéria:

$$\text{Nu} = \frac{\alpha_2 \cdot d_3}{\lambda_v} \Rightarrow \alpha_2 = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda_v}{d_3} = \frac{118,2655 \cdot 0,0249}{1,25} \doteq 2,4092 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1} \quad (44)$$

Výpočet součinitele přestupu tepla jsem v sestaveném programu řešil následujícím způsobem:

```

1 pr2=v.cp2*v.dyn2/v.tepvod8;
2 gr2=v.roz2*abs(v.t8-v.t9)*9.81*v.d7^3/(v.dyn2/v.ro2)^2;
3 grpr2=gr2*pr2;
4 if grpr2<0.01
5     c2=0.5;
6     n2=0;
7 elseif (grpr2>=0.01 && grpr2<500)
8     c2=1.18;
9     n2=1/8;
10 elseif (grpr2>=500 && grpr2<2e7)
11     c2=0.54;
12     n2=0.25;
13 else
14     c2=0.135;
15     n2=1/3;
16 end
17 nu2=c2*grpr2^n2;
18 v.souc2=nu2*v.tepvod8/v.d7;

```

2) Určení tepelného toku koulí

Pro určení tepelného toku koulí jsem použil vztah (12), kdy po dosazení lze psát:

$$Q = \alpha_2 \cdot (t_3 - t_v) \cdot A = 2,4092 \cdot (13 - 10) \cdot \pi \cdot 1,25^2 \doteq 35,4784 \text{ W} \quad (45)$$

Pro výpočet tepelného toku v programu jsem využil následujících příkazů:

```

1 povrch=pi*v.d7^2;
2 v.q=v.souc2*povrch*abs(v.t8-v.t9);

```

3) Výpočet teploty na rozhraní vnitřní a vnější vrstvy

Pro výpočet teploty na rozhraní vnitřní a vnější vrstvy jsem využil vztahu (37), pro jeho použití musíme znát tepelný tok, který jsem vypočítal v předchozím kroku.

$$Q = \frac{2\pi\lambda_2(t_2 - t_3)}{\frac{1}{d_2} - \frac{1}{d_3}} \Rightarrow t_2 = \frac{Q}{2\pi\lambda_2} \cdot \left(\frac{1}{d_2} - \frac{1}{d_3} \right) + t_3 \quad (46)$$

$$t_2 = \frac{35,4784}{2\pi \cdot 0,05} \cdot \left(\frac{1}{1,1} - \frac{1}{1,25} \right) + 13 \doteq 25,3198 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (47)$$

4) Určení teploty na vnitřním povrchu koule

Zde jsem opět využil vztahu (37) a teploty získané v minulém kroku.

$$Q = \frac{2\pi\lambda_1(t_1 - t_2)}{\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2}} \Rightarrow t_1 = \frac{Q}{2\pi\lambda_1} \cdot \left(\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2} \right) + t_2 \quad (48)$$

$$t_1 = \frac{35,4784}{2\pi \cdot 50} \cdot \left(\frac{1}{1} - \frac{1}{1,1} \right) + 25,3198 = 25,3301 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (49)$$

Vzhledem k tomu, že program je schopen vypočítat prostup tepla až šestivrstvou stěnou, pro výpočet teplot na rozhraní vrstev a vnitřním povrchu jsem použil následující kód:

```

1  if v.d3==0;
2      d3=v.d2;
3      tepvod3=1;
4  else
5      d3=v.d3;
6      tepvod3=v.tepvod3;
7  end;
8  if v.d4==0;
9      d4=d3;
10     tepvod4=1;
11  else
12     d4=v.d4;
13     tepvod4=v.tepvod4;
14  end;
15  if v.d5==0;
16     d5=d4;
17     tepvod5=1;
18  else
19     d5=v.d5;
20     tepvod5=v.tepvod5;
21  end;
22  if v.d6==0;
23     d6=d5;
```

```

24     tepvod6=1;
25 else
26     d6=v.d6;
27     tepvod6=v.tepvod6;
28 end;
29 v.t7=v.t8+v.q/(2*pi*v.tepvod7)*(1/d6-1/v.d7);
30 v.t6=v.t7+v.q/(2*pi*tepvod6)*(1/d5-1/d6);
31 v.t5=v.t6+v.q/(2*pi*tepvod5)*(1/d4-1/d5);
32 v.t4=v.t5+v.q/(2*pi*tepvod4)*(1/d3-1/d4);
33 v.t3=v.t4+v.q/(2*pi*tepvod3)*(1/v.d2-1/d3);
34 v.t2=v.t3+v.q/(2*pi*v.tepvod2)*(1/v.d1-1/v.d2);

```

5) Výpočet součinitele přestupu tepla mezi vnitřním povrchem koule a metanem

Pro určení součinitele přestupu tepla jsem použil shodného postupu jako v prvním kroku.

Pro výpočet kritérií je potřeba znát parametry metanu:

- dynamická viskozita $\eta_m = 1,025 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$
- měrné teplo $c_{p_m} = 2237 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
- hustota $\rho_m = 0,707 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$
- tepelná vodivost $\lambda_m = 0,0328 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

Parametry jsem opět našel v literatuře [8] a [9].

$$\text{Pr} = \frac{c_{p_m} \cdot \eta_m}{\lambda_m} = \frac{2237 \cdot 1,025 \cdot 10^{-5}}{0,0328} \doteq 0,6991 \quad (50)$$

$$\text{Gr} = \beta \cdot (t_m - t_1) \frac{g \cdot d_1^3}{\nu_m^2} = \frac{1}{\frac{t_1 + t_m}{2} + 237,15} \cdot (t_m - t_1) \frac{g \cdot d_1^3}{\left(\frac{\eta_m}{\rho_m}\right)^2} \quad (51)$$

$$\text{Gr} = \frac{1}{\frac{25,3301 + 27}{2} + 237,15} \cdot (27 - 25,3301) \frac{9,81 \cdot 1^3}{\left(\frac{1,025 \cdot 10^{-5}}{0,707}\right)^2} \doteq 295988533,3 \quad (52)$$

$$\text{Nu} = C(\text{Gr Pr})^c = C(0,6991 \cdot 295988533,3)^c = C(206925583,6)^c \quad (53)$$

Dle tabulky (Tab. 1) jsem zvolil konstanty $C = 0,135$ a $c = \frac{1}{3}$. Po dosazení do výpočtu

Nusseltova kritéria:

$$Nu = 0,135(206925583,6)^{\frac{1}{3}} \doteq 79,8494 \quad (54)$$

Výpočet součinitele přestupu tepla z vypočteného Nusseltova kritéria:

$$Nu = \frac{\alpha_1 \cdot d_1}{\lambda_m} \Rightarrow \alpha_1 = \frac{Nu \cdot \lambda_m}{d_1} = \frac{79,8494 \cdot 0,0328}{1} \doteq 2,6191 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1} \quad (55)$$

Určení součinitele přestupu tepla v programu jsem provedl shodně s prvním krokem:

```

1 pr1=v.cpl*v.dyn1/v.tepvod1;
2 gr1=v.roz1*abs(v.t1-v.t2)*9.81*v.d1^3/(v.dyn1/v.ro1)^2;
3 grpr1=gr1*pr1;
4 if grpr1<0.01
5     c1=0.5;
6     n1=0;
7 elseif (grpr1>=0.01 && grpr1<500)
8     c1=1.18;
9     n1=1/8;
10 elseif (grpr1>=500 && grpr1<2e7)
11     c1=0.54;
12     n1=0.25;
13 else
14     c1=0.135;
15     n1=1/3;
16 end
17 nul=c1*grpr1^n1;
18 v.soucl=nul*v.tepvod1/v.d1;

```

6) Určení součinitele prostupu tepla stěnou tělesa

Součinitel prostupu tepla jsem určil pomocí vztahu (9), do kterého jsem v minulých krocích dopočítal součinitele přestupu tepla.

$$k_k = \frac{\pi}{\frac{1}{\alpha_1 d_1^2} + \frac{1}{2\lambda_1} \cdot \left(\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2} \right) + \frac{1}{2\lambda_2} \cdot \left(\frac{1}{d_2} - \frac{1}{d_3} \right) + \frac{1}{\alpha_2 d_3^2}} \quad (56)$$

$$k_k = \frac{\pi}{\frac{1}{2,6191 \cdot 1^2} + \frac{1}{2 \cdot 50} \cdot \left(\frac{1}{1} - \frac{1}{1,1} \right) + \frac{1}{2 \cdot 0,05} \cdot \left(\frac{1}{1,1} - \frac{1}{1,25} \right) + \frac{1}{2,4092 \cdot 1,25^2}} \doteq 1,7393 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1} \quad (57)$$

Pro výpočet prostupu tepla koulí v programu jsem použil následující vztah, který zohledňuje možnost použití až šesti vrstev, ze kterých se koule skládá:

$$1 \quad v.kk = \pi / \left(\frac{1}{v.souc1 \cdot v.d1^2} + \frac{1}{2 \cdot v.tepvod2} \cdot \left(\frac{1}{v.d1} - \frac{1}{v.d2} \right) + \frac{1}{2 \cdot tepvod3} \cdot \left(\frac{1}{d3} - \frac{1}{v.d2} \right) + \frac{1}{2 \cdot tepvod4} \cdot \left(\frac{1}{d3} - \frac{1}{d4} \right) + \frac{1}{2 \cdot tepvod5} \cdot \left(\frac{1}{d4} - \frac{1}{d5} \right) + \frac{1}{2 \cdot tepvod6} \cdot \left(\frac{1}{d5} - \frac{1}{d6} \right) + \frac{1}{2 \cdot v.tepvod7} \cdot \left(\frac{1}{d6} - \frac{1}{v.d7} \right) + \frac{1}{v.souc2 \cdot v.d7^2} \right);$$

5.2 Nucené obtékání vnějšího povrchu tělesa tekutinou

Zadání

Vypočítejte součinitele prostupu tepla a ztráty tepla do okolí stěnou tělesa tvaru duté koule, složené ze tří vrstev, které je z vnější strany ofukováno vzduchem, je-li dáno:

- vnitřní vrstva:
 - vnitřní průměr $d_1 = 1 \text{ m}$
 - vnější průměr $d_2 = 1,1 \text{ m}$
 - součinitel tepelné vodivosti $\lambda_1 = 50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
 - teplota vnitřního povrchu $t_1 = 42 \text{ }^\circ\text{C}$
- prostřední vrstva:
 - vnější průměr $d_3 = 1,2 \text{ m}$
 - součinitel tepelné vodivosti $\lambda_2 = 50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
- vnější vrstva:
 - vnější průměr $d_4 = 1,3 \text{ m}$
 - součinitel tepelné vodivosti $\lambda_3 = 0,03 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Uvnitř tělesa je vzduch o teplotě $t_{v1} = 46 \text{ }^\circ\text{C}$, okolo vnějšího povrchu proudí vzduch rychlostí $v = 0,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ o teplotě $t_{v2} = 30,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Uvnitř koule uvažujte volnou konvekci.

Řešení

Nejprve je potřeba určit součinitel přestupu tepla mezi vzduchem uvnitř koule a vnitřní vrstvou. Následně pomocí získaného součinitele přestupu tepla vypočítat tepelný tok a s jeho pomocí postupně určit teploty na rozhraní mezi jednotlivými vrstvami koule a na jejím povrchu. Ze získané teploty povrchu koule lze určit součinitel přestupu tepla mezi

jejím povrchem a okolním, nuceně proudícím vzduchem. Ze získaných součinitelů přestupu tepla se určí součinitel prostupu tepla danou koulí.

1) Určení součinitele přestupu tepla mezi vzduchem uvnitř koule a vnitřní vrstvou

Pro určení součinitele přestupu tepla ze vztahu (27) je potřeba vypočítat Nusseltovo kritérium pomocí vztahu (13). Pro výpočet Prandtlova kritéria jsem použil vztah (32) a pro určení Grashofova kritéria vztah (31).

Pro výpočet kritérií je potřeba znát parametry vzduchu uvnitř koule, které jsem našel v literatuře [8] a [9]:

- dynamická viskozita $\eta_{v1} = 19,356 \cdot 10^{-6}$ Pa·s

- měrné teplo $c_{p,v1} = 1010$ J·kg⁻¹·K⁻¹

- hustota $\rho_{v1} = 1,11$ kg·m⁻³

- tepelná vodivost $\lambda_{v1} = 0,0277$ W·m⁻¹·K⁻¹

$$\text{Pr} = \frac{c_{p,v1} \cdot \eta_{v1}}{\lambda_{v1}} = \frac{1010 \cdot 19,356 \cdot 10^{-6}}{0,0277} \doteq 0,7058 \quad (58)$$

$$\text{Gr} = \beta \cdot (t_{v1} - t_1) \frac{g \cdot d_1^3}{\nu_{v1}^2} = \frac{1}{\frac{t_{v1} + t_1}{2} + 237,15} \cdot (t_{v1} - t_1) \frac{g \cdot d_1^3}{\left(\frac{\eta_{v1}}{\rho_{v1}}\right)^2} \quad (59)$$

$$\text{Gr} = \frac{1}{\frac{46 + 42}{2} + 237,15} \cdot (46 - 42) \frac{9,81 \cdot 1^3}{\left(\frac{19,356 \cdot 10^{-6}}{1,11}\right)^2} \doteq 406891871,2 \quad (60)$$

$$\text{Nu} = C(\text{Gr Pr})^c = C(0,7058 \cdot 406891871,2)^c = C(287184282,7)^c \quad (61)$$

Dle tabulky (Tab. 1) jsem vybral konstanty $C = 0,135$ a $c = \frac{1}{3}$. Po dosazení do výpočtu

Nusseltova kritéria:

$$\text{Nu} = 0,135(287184282,7)^{\frac{1}{3}} \doteq 89,0678 \quad (62)$$

Výpočet součinitele přestupu tepla z vypočteného Nusseltova kritéria:

$$Nu = \frac{\alpha_1 \cdot d_1}{\lambda_{v1}} \Rightarrow \alpha_1 = \frac{Nu \cdot \lambda_{v1}}{d_1} = \frac{89,0678 \cdot 0,0277}{1} \doteq 2,4672 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (63)$$

Výpočet součinitele přestupu tepla jsem v programu vyřešil následujícím způsobem:

```

1 pr1=n.cpl*n.dyn1/n.tepvod1;
2 gr1=n.roz1*abs(n.t1-n.t2)*9.81*n.d1^3/(n.dyn1/n.ro1)^2;
3 grpr1=gr1*pr1;
4 if grpr1<0.01
5     c1=0.5;
6     n1=0;
7 elseif (grpr1>=0.01 && grpr1<500)
8     c1=1.18;
9     n1=1/8;
10 elseif (grpr1>=500 && grpr1<2e7)
11     c1=0.54;
12     n1=0.25;
13 else
14     c1=0.135;
15     n1=1/3;
16 end
17 nul=c1*grpr1^n1;
18 n.souc1=nul*n.tepvod1/n.d1;

```

2) Určení tepelného toku stěnou koule o zadaných parametrech

Pro určení tepelného toku koulí jsem využil vztah (12), kdy po dosazení lze psát:

$$Q = \alpha_1 \cdot (t_{v1} - t_1) \cdot A = 2,4672 \cdot (46 - 42) \cdot \pi \cdot 1^2 \doteq 31,0037 \quad (64)$$

Výpočet tepelného toku v programu jsem vyřešil následujícím způsobem:

```

1 povrch=pi*n.d1^2;
2 n.q=n.souc1*povrch*abs(n.t1-n.t2);

```

3) Výpočet teplot na rozhraní vrstev a na povrchu koule

Pro výpočet teploty na rozhraní vnitřní a prostřední vrstvy jsem využil vztahu (37), k jehož použití musím využít vypočítaný tepelný tok:

$$Q = \frac{2\pi\lambda_1(t_1 - t_2)}{\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2}} \Rightarrow t_2 = t_1 - \frac{Q}{2\pi\lambda_2} \cdot \left(\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2} \right) \quad (65)$$

$$t_2 = 42 - \frac{31,0037}{2\pi \cdot 50} \cdot \left(\frac{1}{1} - \frac{1}{1,1} \right) \doteq 41,991 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (66)$$

Určení teploty na rozhraní vnějšího průměru a vnitřního průměru vnější vrstvy proběhne naprosto shodně:

$$Q = \frac{2\pi\lambda_2(t_2 - t_3)}{\frac{1}{d_2} - \frac{1}{d_3}} \Rightarrow t_3 = t_2 - \frac{Q}{2\pi\lambda_2} \cdot \left(\frac{1}{d_2} - \frac{1}{d_3} \right) \quad (67)$$

$$t_3 = 41,991 - \frac{31,0037}{2\pi \cdot 50} \cdot \left(\frac{1}{1,1} - \frac{1}{1,2} \right) \doteq 41,9835 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (68)$$

Pro výpočet teploty vnějšího povrchu koule jsem použil vztah (37):

$$Q = \frac{2\pi\lambda_3(t_4 - t_3)}{\frac{1}{d_3} - \frac{1}{d_4}} \Rightarrow t_4 = t_3 - \frac{Q}{2\pi\lambda_3} \cdot \left(\frac{1}{d_3} - \frac{1}{d_4} \right) \quad (69)$$

$$t_4 = 41,9835 - \frac{31,0037}{2\pi \cdot 0,03} \cdot \left(\frac{1}{1,2} - \frac{1}{1,3} \right) \doteq 31,4399 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (70)$$

S ohledem k možnosti použít až kouli složenou ze šesti vrstev jsem pro určení jejich teplot napsal v programu následující část:

```

1 n.t3=n.t2-n.q/(2*pi*n.tepvod2)*(1/n.d1-1/n.d2);
2 n.t4=n.t3-n.q/(2*pi*tepvod3)*(1/n.d2-1/d3);
3 n.t5=n.t4-n.q/(2*pi*tepvod4)*(1/d3-1/d4);
4 n.t6=n.t5-n.q/(2*pi*tepvod5)*(1/d4-1/d5);
5 n.t7=n.t6-n.q/(2*pi*tepvod6)*(1/d5-1/d6);
6 n.t8=n.t7-n.q/(2*pi*n.tepvod7)*(1/d6-1/n.d7);

```

4) Výpočet součinitele přestupu tepla mezi vnějším povrchem koule a okolním vzduchem

Pro výpočet přestupu tepla z vnějšího povrchu koule do okolního proudícího vzduchu jsem použil vztahu (14). Vzhledem k nízkému rozdílu teplot povrchu koule a okolního vzduchu lze ve vztahu zanedbat poměr viskozit vzduchu při teplotě stěny koule a při teplotě vzduchu, poměr tedy bude rovno 1 a lze psát:

$$Nu = \frac{\alpha_2 d_4}{\lambda_{v2}} = 2 + \left(0,4 \cdot \text{Re}^{0,5} + 0,06 \cdot \text{Re}^{\frac{2}{3}} \right) \text{Pr}^{0,4} \quad (71)$$

Pro určení Reynoldsova kritéria do vztahu (71) jsem použil vztah (15) a pro výpočet Prandtlova kritéria vztahu (32).

Pro výpočet je nutno znát vlastnosti vzduchu, které jsem zjistil v literatuře v [8] a [9]:

- dynamická viskozita $\eta_{v1} = 18,658 \cdot 10^{-6} \text{ Pa}\cdot\text{s}$

- měrné teplo $c_{pv1} = 1010 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

- hustota $\rho_{v1} = 1,1649 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$

- tepelná vodivost $\lambda_{v1} = 0,0265 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

$$\text{Re} = \frac{v \cdot d_4}{\nu_{v2}} = \frac{v \cdot d_4}{\frac{\eta_{v2}}{\rho_{v2}}} = \frac{0,8 \cdot 1,3}{\frac{18,658 \cdot 10^{-6}}{1,1649}} \doteq 64931,7183 \quad (72)$$

$$\text{Pr} = \frac{c_{pv2} \cdot \eta_{v2}}{\lambda_{v2}} = \frac{1010 \cdot 18,658 \cdot 10^{-6}}{0,0265} \doteq 0,7111 \quad (73)$$

Po dosazení Re a Pr do Nusseltova kritéria:

$$\text{Nu} = 2 + \left(0,4 \cdot 64931,7183^{0,5} + 0,06 \cdot 64931,7183^{\frac{2}{3}} \right) 0,7111^{0,4} \doteq 175,5048 \quad (74)$$

$$\text{Nu} = \frac{\alpha_2 d_4}{\lambda_{v2}} \Rightarrow \alpha_2 = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda_{v2}}{d_4} = \frac{175,5048 \cdot 0,0265}{1,3} \doteq 3,5776 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1} \quad (75)$$

Přestup tepla v programu jsem vypočítal následujícím postupem:

```
1 re2=n.v2*n.d7/(n.dyn2/n.ro2)
2 pr2=n.cp2*n.dyn2/n.tepvod8
3 nu2=(2+(0.4*(re2^0.5)+0.06*(re2^(2/3)))*(pr2^0.4))
4 n.souc2=nu2*n.tepvod8/n.d7;
```

5) Výpočet součinitele prostupu tepla stěnou tělesa

Pro určení součinitele prostupu tepla jsem použil vztah (10) a po jehož úpravě pro třívrstvou kouli lze psát:

$$k_k = \frac{\pi}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1^2} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_1} \cdot \left(\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2} \right) + \frac{1}{2 \cdot \lambda_2} \cdot \left(\frac{1}{d_2} - \frac{1}{d_3} \right) + \frac{1}{2 \cdot \lambda_3} \cdot \left(\frac{1}{d_3} - \frac{1}{d_4} \right) + \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_4^2}} \quad (76)$$

Po dosazení vypočítaných a zadaných hodnot:

$$k_k = \frac{\pi}{\frac{1}{2,4672 \cdot 1^2} + \frac{1}{2 \cdot 50} \cdot \left(\frac{1}{1} - \frac{1}{1,1}\right) + \frac{1}{2 \cdot 50} \cdot \left(\frac{1}{1,1} - \frac{1}{1,2}\right) + \frac{1}{2 \cdot 0,03} \cdot \left(\frac{1}{1,2} - \frac{1}{1,3}\right) + \frac{1}{3,5776 \cdot 1,3^2}} \doteq$$

$$\doteq 1,9147 \text{ W}\cdot\text{K}^{-1} \quad (77)$$

Pro určení součinitele prostupu tepla v programu jsem použil následující výpočet, který může počítat až se šestivrstvou koulí:

$$1 \text{ n.kk} = \pi / \left(\frac{1}{\text{n.souc1} \cdot \text{n.d1}^2} + \frac{1}{2 \cdot \text{n.tepvod2}} \cdot \left(\frac{1}{\text{n.d1}} - \frac{1}{\text{n.d2}} \right) + \frac{1}{2 \cdot \text{tepvod3}} \cdot \left(\frac{1}{\text{d3}} - \frac{1}{\text{n.d2}} \right) + \frac{1}{2 \cdot \text{tepvod4}} \cdot \left(\frac{1}{\text{d3}} - \frac{1}{\text{d4}} \right) + \frac{1}{2 \cdot \text{tepvod5}} \cdot \left(\frac{1}{\text{d4}} - \frac{1}{\text{d5}} \right) + \frac{1}{2 \cdot \text{tepvod6}} \cdot \left(\frac{1}{\text{d5}} - \frac{1}{\text{d6}} \right) + \frac{1}{2 \cdot \text{n.tepvod7}} \cdot \left(\frac{1}{\text{d6}} - \frac{1}{\text{n.d7}} \right) + \frac{1}{\text{n.souc2} \cdot \text{n.d7}^2} \right);$$

5.3 Srovnání výsledků ze vzorového příkladu a aplikace

Při porovnání výsledku, kdy je kulovité těleso obklopené volně proudící tekutinou jsem ve vzorovém příkladu vypočítal $k_k = 1,7393 \text{ W}\cdot\text{K}^{-1}$ a $Q = 35,4784 \text{ W}$, hodnoty zjištěné pomocí aplikace jsou $k_k = 1,7891 \text{ W}\cdot\text{K}^{-1}$ a $Q = 35,4788 \text{ W}$, rozdíly mezi hodnotami jsou tedy $k_k = 0,0498 \text{ W}\cdot\text{K}^{-1}$ a $Q = 0,0004 \text{ W}$. Velikost rozdílů značí, že jde pouze o chybu způsobenou zaokrouhlováním při ručním výpočtu.

Při porovnání, kdy kulovité těleso má nuceně obtékanou vnější stěnu jsem došel ke stejnému závěru, neboť výsledek ze vzorového příkladu má hodnotu $k_k = 1,9147 \text{ W}\cdot\text{K}^{-1}$ a $Q = 31,0037 \text{ W}$, hodnoty zjištěné aplikací jsou $k_k = 1,9165 \text{ W}\cdot\text{K}^{-1}$ a $Q = 31,0029 \text{ W}$, což mezi hodnotami vytváří rozdíl $k_k = 0,0018 \text{ W}\cdot\text{K}^{-1}$ a $Q = 0,0008 \text{ W}$.

ZÁVĚR

V bakalářské práci jsem řešil problematiku výpočtu tepelného toku vícevrstvou kulovitou stěnou s cílem vytvořit softwarovou aplikaci pro jeho výpočet.

V první části práce jsem se zabýval studiem mechanismu prostupu tepla přes vícevrstvou kulovitou stěnu a popisem fyzikálních parametrů ovlivňujících množství předaného tepla. Podrobně jsem popsal kritériální vztahy pro výpočet součinitele přestupu tepla v případě volné konvekce a při nuceném obtékání tělesa tekutinou.

V části praktické jsem vytvořil aplikaci pro výpočet tepelného toku vícevrstvou kulovitou stěnou a provedl popis programu, jeho ovládání a funkce. Dále jsem provedl výpočet vzorových případů pro ověření funkčnosti sestavené aplikace. Jeden z nich uvažuje volnou konvekci (přirozené proudění) tekutiny okolo vnější vrstvy kulovité stěny a v druhém případě jsem provedl výpočet pro nucené obtékání.

Aplikaci jsem vytvořil v systému Matlab, umožňující vytvořit grafické rozhraní programu jak pro zadávání parametrů výpočtu, tak i prezentaci výsledků. Uživatelská aplikace je po zadání potřebných parametrů schopna vypočítat v krátkém časovém okamžiku součinitel prostupu tepla kulovitou stěnou složenou ze dvou až šesti vrstev. Součástí aplikace je možnost zobrazení mezivýsledků jako jsou teploty na rozhraní vrstev, z nichž se skládá kulovitá stěna, součinitel přestupu tepla mezi tekutinou uvnitř i vně tělesa a tepelný tok stěnou uvažovaného tělesa.

V závěrečné části práce jsem porovnal výsledky, které jsem obdržel výpočtem vzorových příkladů a výsledky získané automatickým výpočtem za použití aplikace a došel jsem k závěru, že se téměř shodují. Vzniklé minimální odlišnosti jsou způsobeny zaokrouhlováním při ručním výpočtu.

Nezbytnou součástí této práce je příloha, ve které jsou uvedeny zdrojové kódy vytvořené softwarové aplikace, na niž se v práci odkazují.

ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ

In bachelor's work I solved problem with calculation of the heat flow through multilayer spherical wall with purpose make software application for this calculation.

In the first part of work I deal with study of mechanisms of heat penetration through multilayer spherical wall and description of physical parameters that have got effect for quantity of transferred heat. In detail I described criteria terms for calculation of heat transfer coefficient in case of free convection and forced circumfluence of body by liquid.

In the practical part I made interactive application for calculation of the heat flow through multilayer spherical wall and described this application, functions, and operating. Next I made calculation of exemplary cases for check functionality this application. One of them reason about free convection (natural circulation) liquid and in the second case I made calculation for forced convection liquid.

I made application in system Matlab, allowed create graphics interface of program for set parameters and for presentation of results. Custom application is over setting needed parameters able to calculate in a short time a heat penetration coefficient of wall made from two to six layers. Part of application is possibility display among – results like that temperatures on boundary layers of spherical wall, boundary conductance between liquid and inside and outside body plus heat flow in wall.

In final part I compared results which I got from calculate exemplary cases and results got automatically calculation behind using application and I find that obtained results are almost corresponds. Minimal divergences are caused by rounding at manually calculation.

Necessary part of the work is accompaniment, in that are mentioned source codes of created application which I refers on it in work.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] KOLOMAZNÍK, Karel, et al. *Teorie technologických procesů III*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1976. 139 s.
- [2] MÍKA, Vladimír, et al. *Příklady a úlohy z chemického inženýrství - I. a II. díl*. 1st ed. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 1997. 825 s. ISBN 80-700-305-3.
- [3] MÍKA, Vladimír. *Základy chemického inženýrství*. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1977. 870s.
- [4] JÍLEK, Miroslav, RANDA, Zdeněk. *Termomechanika: Sběrka příkladů*. Praha : Vydavatelství ČVUT, 2004. 168 s. ISBN 80-01-03107-1.
- [5] ŠNITA, Dalimil, et al. *Chemické inženýrství I*. 1. vyd. Praha : Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2005. 318 s. ISBN 80-7080-589-7.
- [6] KARBAN, Pavel. *Matlab a Simulink*. Brno : Computer Press, a.s., 2006. 220 s. ISBN 978-80-251-1448-3.
- [7] PERŮTKA, Karel. *Matlab - Základy pro studenty automatizace a informačních technologií*. Zlín : Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2005. 303 s. ISBN 80-7318-355-2.
- [8] ŠESTÁK, J.; BUKOVSKÝ, J.; HOUŠKA, M. *Tepelné pochody – transportní a termodynamická data*. 4 th ed. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1998. 245 p.
- [9] KOTLÍK, B., et al. *Matematické, fyzikální a chemické tabulky*. 1 st ed. Havlíčkův Brod: Fragment, 2003. 288 p. ISBN 80-7200-521-9.
- [10] JÍCHA, Miroslav. *Přenos tepla a látky*. Brno : CERM, 2001. 160 s. ISBN 8021420294.
- [11] VACEK, Václav. *Přenos tepla a hmoty*. Praha : ČVUT, 1990. 193 s. ISBN 8001002004.
- [12] PILAŘ, Antonín. *Chemické inženýrství. Díl 2 : Operace výměny tepla*. Praha : Státní nakladatelství technické literatury, 1964. 356 s.
- [13] HEJZLAR, Radko. *Sdílení tepla*. Praha : ČVUT, 1999. 186 s. ISBN 8001019829.
- [14] ZAPLATÍLEK, Karel, DOŇAR, Bohuslav. *Matlab - Tvorba uživatelských aplikací*. Praha : BEN - technická literatura, 2005. 216 s. ISBN 80-7300-133-0.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

A	plocha [m ²]
C	konstanta [1]
$ Fo $	Fourierovo kritérium [1]
$ Gr $	Grashofovo kritérium [1]
$ Nu $	Nusseltovo kritérium [1]
$ Pe $	Peclétovo kritérium [1]
$ Pr $	Prandtlovo kritérium [1]
$ Q $	tepelný tok [W]
$ S $	průřez [m ²]
$ \dot{V} $	průtok [m ³]
$ a $	součinitel teplotní vodivosti [m ² ·s ⁻¹]
$ a_0 $	charakteristický součinitel teplotní vodivosti [m ² ·s ⁻¹]
$ c $	konstanta [1]
$ c_p $	měrné teplo [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
$ d $	průměr [m]
$ \mathbf{f} $	měrná hmotnostní síla [m·s ⁻²]
$ k_k $	součinitel prostupu tepla u koule [W·K ⁻¹]
$ k_m $	místní koeficient prostupu tepla [W·K ⁻¹]
$ l $	charakteristický rozměr [m]
$ l_0 $	charakteristický rozměr [m]
$ n $	normála [m]
$ n^* $	bezrozměrná normála [1]
$ q_w $	intenzita toku tepla [W·m ⁻²]

r	poloměr [m]
t	teplota [°C]
t^*	bezrozměrná teplota [1]
$\langle t \rangle$	střední teplota tekutiny [°C]
$\langle t \rangle^*$	bezrozměrná střední teplota [1]
$\langle\langle t \rangle\rangle$	aritmetická střední teplota [°C]
Δt_m	celková lokální teplotní hybná síla [°C]
t_0	charakteristická teplota [°C]
t_s	teplota stěny [°C]
t_w	teplota tekutiny na rozhraní [°C]
t_w^*	bezrozměrná teplota tekutiny na rozhraní [1]
v_0	charakteristická rychlost [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
v_n	normálová rychlost [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
v_n^*	bezrozměrná normálová rychlost [1]
α	součinitel přestupu tepla [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]
$\langle \alpha \rangle$	střední hodnota součinitele přestupu tepla [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]
α^*	bezrozměrný součinitel přestupu tepla [1]
α_0	charakteristický součinitel přestupu tepla [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]
β	teplotní roztažnost [K^{-1}]
λ	součinitel tepelné vodivosti [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]
λ^*	bezrozměrný součinitel tepelné vodivosti [1]
λ_0	charakteristický součinitel tepelné vodivosti [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]
τ	čas [s]

τ^*	bezrozměrný čas [1]
τ_0	charakteristický čas [s]
η	dynamická viskozita [Pa·s]
η_w	dynamická viskozita na rozhraní [Pa·s]
ρ	hustota [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
ν	kinematická viskozita [$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Prostup tepla kulovou vrstvou.....	11
Obr. 2: Rozdělení sdílení tepla přestupem.....	13
Obr. 3: Přestup tepla ze stěny do tekutiny.....	16
Obr. 4: Řez třívrstvou kulovou stěnou.....	21
Obr. 5: Logo při spouštění Matlabu.....	22
Obr. 6: Hlavní okno programu.....	24
Obr. 7: Okno pro zadávání parametrů při výpočtu s nucenou konvekcí se vzorovými hodnotami z příkladu.....	25
Obr. 8: Varovné okno informující.....	25
Obr. 9: Okno s výsledkem.....	26
Obr. 10: Okno se zobrazenými mezivýsledky.....	26

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Konstanty pro výpočet vztahu (13).....	14
--	----

SEZNAM PŘÍLOH

- P I Zdrojové kódy vytvořené softwarové aplikace a elektronická podoba této práce na přiloženém CD disku.