

Úspora energie s ohledem na stanovení optimální tloušťky izolace potrubí

Energy saving regarding the optimal pipe isolation thickness

Marek Mikel

Bakalářská práce
2012



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Marek MIKEL**
Osobní číslo: **A08617**
Studijní program: **B 3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor: **Informační a řídicí technologie**

Téma práce: **Úspora energie s ohledem na stanovení optimální tloušťky izolace potrubí**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární studii, týkající se stacionárního prostupu tepla izolovaným potrubím.
2. Navrhněte způsob stanovení kritické tloušťky izolace pro dosažení optimálních tepelných ztrát válcovou stěnou do okolí.
3. Vytvořte interaktivní softwarovou aplikaci pro výpočet tepelného toku stěnou izolovaného potrubí a kritické tloušťky izolace.
4. Ve vytvořené aplikaci proveďte posouzení termoizolačních vlastností vybraných materiálů a proveďte výpočet jejich tloušťky pro dosažení optimálních tepelných ztrát a s tím souvisejících ekonomických nákladů.

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. KOLOMAZNÍK, K., J. SEDLÁŘ a A. MACHÁČKOVÁ. Teorie technologických procesů III. Brno: VUT v Brně, 1978.
2. MÍKA, V. a J. VLČEK. Příklady a úlohy z chemického inženýrství. Díl 2. Praha: VŠCHT, 1997. ISBN 80-7080-305-3.
3. HASAL, P. a D. ŠNITA A KOLEKTIV. Chemické inženýrství I. Praha: VŠCHT, 2007. ISBN 978-80-7080-002-7.
4. ŠNITA, D. A KOLEKTIV. Příklady a úlohy z chemického inženýrství. III. Praha: VŠCHT, 2002. ISBN 80-7080-493-9.
5. PŘÍHODA, M. a M. RÉDR. Sdílení tepla a proudění. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1748-4.
6. HEJZLAR, R. Sdílení tepla. Praha: ČVUT, Jaderná a fyzikálně inženýrská fakulta, 1999. ISBN 80-01-01982-9.
7. VOMOČIL, Z. a Z. HAJKR. Cvičení do sdílení tepla a proudění. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství, 2000. ISBN 80-7078-793-7.
8. Stavba – TZB-info [online]. 2001–2012 [cit. 2012-01-17]. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/>

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Hana Charvátová, Ph.D.

Ústav automatizace a řídicí techniky

Datum zadání bakalářské práce:

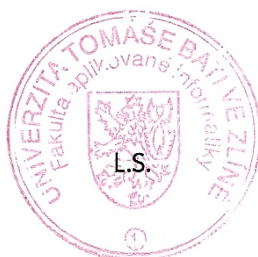
24. února 2012

Termín odevzdání bakalářské práce:

8. června 2012

Ve Zlíně dne 24. února 2012

prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
děkan



prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

Ve své bakalářské práci řeším problematiku stacionárního prostupu tepla vícevrstvou válcovou stěnou s cílem navrhnout výpočet optimální tloušťky izolace pro snížení tepelných ztrát v izolovaném potrubí. Za tímto účelem jsem vytvořil v prostředí Java softwarovou aplikaci pro výpočet tepelných ztrát vzniklých prostupem tepla složenou válcovou stěnou. Na základě vypočtených ztrát tepla aplikace automaticky vypočte optimální tloušťku izolace. Vytvořený program bude sloužit jako softwarová pomůcka pro výuku předmětů Procesní inženýrství a Procesy v technice budov, ale může být využit i pro reálné technické výpočty.

Klíčová slova: Java, prostup tepla, složená válcová stěna, nucená konvekce, volná konvekce, tepelné ztráty, kritická tloušťka izolace.

ABSTRACT

This thesis solves the problem of stationary heat transfer at multilayer cylindrical wall in order to propose the calculation of the optimal thickness of insulation to reduce heat loss in insulated pipe. For this purpose I created a Java software application to calculate the heat loss arisen from heat transfer at composite cylindrical wall. Based on the calculated heat losses application automatically calculates the optimum insulation thickness. The created program will serve as a software tool for teaching courses in Process Engineering and Processes in building technology, but can also be used for real technical computing.

Keywords: Java, heat transfer, composite cylindrical wall, forced convection, free convection, heat loss, the critical thickness of insulation.

Poděkování, motto

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucí bakalářské práce Ing. Haně Charvátové, Ph.D. za její nesmírnou pomoc a trpělivost při řešení problémů okolo aplikace a při konzultacích ohledně této práce.

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.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně

.....
podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 SDÍLENÍ TEPLA	11
1.1 VEDENÍ TEPLA (KONDUKCE).....	11
1.1.1 Vedení tepla jednoduchou válcovou stěnou.....	12
1.1.2 Vedení složenou válcovou stěnou.....	15
1.2 PŘESTUP TEPLA	15
1.2.1 Součinitel přestupu tepla α	17
1.2.2 Přirozené proudění (volná konvekce)	18
1.2.3 Turbulentní proudění (nucená konvekce)	19
1.3 PROSTUP TEPLA VÁLCOVOU STĚNOU	20
2 TEPELNÉ IZOLACE	23
2.1 VÝPOČET KRITICKÉHO PRŮMĚRU IZOLACE	24
3 IZOLACE A ZAŘÍZENÍ S KRUHOVÝM PRŮŘEZEM	27
3.1 IZOLACE POTRUBÍ.....	27
3.2 PROTIPOŽÁRNÍ IZOLACE	27
3.3 IZOLACE TECHNOLOGICKÝCH ZAŘÍZENÍ	28
3.4 DRUHY IZOLACÍ A JEJÍ POUŽITÍ	28
3.4.1 Minerální izolace.....	28
3.4.1.1 Skelná minerální vlna	28
3.4.1.2 Kamenná minerální vlna.....	28
3.4.1.3 Výhody minerálních izolací.....	29
3.4.2 Polyuretanové izolace (požívá se zkrácený název PUR)	29
3.4.3 Pěnový polyethylen (označovaný též jako mirelon).....	30
3.4.4 Izolace ze syntetického kaučuku.....	31
3.5 VYHLÁŠKA PRO IZOLACE POTRUBÍ	31
II PRAKTICKÁ ČÁST	32
4 POPIS PROGRAMU	33
4.1 OVLÁDÁNÍ PROGRAMU	33
4.2 STRUKTURA PROGRAMU.....	41
4.2.1 Popis jednotlivých tříd	41
4.2.2 Výpočet požadované tloušťky izolace dle vyhlášky číslo 193 Sb.	42
5 OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI PROGRAMU SE VZOROVÝMI VÝPOČTY ZTRÁTY TEPLA PROSTUPUM DVOUVRSTVOU VÁLCOVOU STĚNOU	44
5.1 DVOUVRSTVÁ VÁLCOVÁ STĚNA A KRITICKÝ PRŮMĚR IZOLACE	44
5.1.1 Určení kritického průměru izolace.....	44
5.1.2 Výpočet ztrát tepla prostupem	45
5.1.3 Výpočet délkového součinitele prostupu tepla	45

5.1.4	Porovnání vypočítaných hodnot.....	45
5.2	VÝPOČET SOUČINITELE PŘESTUPU TEPLA NA VNĚJŠÍ STRANĚ IZOLACE PŘI VOLNÉ KONVEKCI.....	47
5.2.1	Výpočet Prandtlova kritéria	48
5.2.2	Výpočet Grashofova kritéria	48
5.2.3	Určení koeficientů C a n	48
5.2.4	Výpočet Nusseltova kritéria.....	49
5.2.5	Výpočet součinitele přestupu tepla	49
5.2.6	Porovnání vypočítaných hodnot.....	49
5.3	VÝPOČET SOUČINITELE PŘESTUPU TEPLA NA VNĚJŠÍ STRANĚ IZOLACE PŘI NUCENÉ KONVEKCI.....	50
5.3.1	Výpočet Reynoldsova kritéria.....	51
5.3.2	Výpočet Nusseltova kritéria a součinitele přestupu tepla	51
5.3.3	Porovnání vypočítaných hodnot.....	52
5.4	URČENÍ OPTIMÁLNÍ TLOUŠŤKY IZOLACE POTRUBÍ	52
5.4.1	Ověření optimální tloušťky izolace.....	52
5.4.2	Porovnání vypočítaných hodnot.....	53
	ZÁVĚR.....	56
	ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ.....	57
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	58
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	60
	SEZNAM OBRÁZKŮ	62
	SEZNAM TABULEK.....	63
	SEZNAM PŘÍLOH.....	64

ÚVOD

Prostup tepla je složitý fyzikální jev, probíhající všude kolem nás. Představuje kombinaci základních mechanismů sdílení tepla, ke kterým patří vedení, proudění a sálení. Množství tepla, které se prostupem tepla předává závisí na řadě parametrů. Patří k nim především teplota médií obtékající povrch stěny, přes kterou se teplo předává. Součinitel tepelné vodivosti stěny, který nám říká, jak moc je daný materiál schopen odvádět teplo atd. Dále je průběh prostupu tepla závislý na fyzikálních vlastnostech tekutiny, která obtéká povrch válcové stěny. K těmto vlastnostem řadíme schopnost okolní tekutiny vést teplo, rychlost proudění, hustota, teplotní objemová roztažnost, měrná tepelná kapacita a viskozita. Dalším nezbytnou vlastností je charakter obtékání tělesa. Všechny tyto uvedené skutečnosti se podílejí na tepelných ztrátách.

Proto se ekonomicky smýšlející lidé snaží ztráty tepla vzniklé prostupem minimalizovat, protože ekonomické náklady se v dnešní době hospodářské krize neustále zvyšují. K tomuto účelu je na trhu nespočet druhů tepelných izolací, které mají nejrůznější uplatnění. Najdeme je všude, od podlahy až po střechy domů. Já se ve své práci budu zabývat izolacemi pro zařízení kruhového průřezu. Ty v domácnostech najdeme u bojlerů, výměníků tepla, u rozvodů teplé vody, ústředního vytápění a u komínových těles. V průmyslu to mohou být pece, chladírenské tanky na mléko atd. Zvolením vhodné tepelné izolace pro dané zařízení můžeme tedy ušetřit nemalé finanční prostředky.

Ve své bakalářské práci se zaměřím na problematiku tepelných ztrát vzniklých prostupem tepla válcovou stěnou. Na základě těchto ztrát stanovím kritický průměr izolace a její optimální tloušťku. Pro usnadnění výpočtu vytvořím v programovacím jazyku Java softwarovou aplikaci provádějící potřebné výpočty. Kromě určení kritického průměru a tloušťky izolace by měl vytvořený program také nabídnout možnost nahlédnout, jak se budou měnit tepelné ztráty při zvětšujícím se průměru izolace.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 SDÍLENÍ TEPLA

Sdílení tepla je proces, při němž dochází k přenosu tepelné energie. Teplo totiž vnímáme jako formu energie, která je mikroskopického původu. Příčinou šíření tepla je neustálý pohyb mikroskopických částic složených z molekul a atomů. Tyto částice se vzájemně ovlivňují, čímž dochází ke srážkám a k předávání kinetické energie do té doby, než dojde k vyrovnání teplot. Hybnou silou sdílení tepla je nepochybně rozdíl energií (teplot).

Sdílení tepla lze rozdělit na tři okruhy:

- a) Sdílení tepla vedením (kondukcí) – vedení tepla probíhá v nepohyblivé hmotě od částice k částici jejich přímým stykem.
- b) Sdílení tepla prouděním (konvekcí) – teplo se šíří vedením a mechanickým přemísťováním jednotlivých částic.
- c) Sdílení tepla zářením (sálání) – jedná se o zvláštní případ přenosu tepelné energie, která nevyžaduje přítomnost látky. Teplo se zde přenáší prostřednictvím elektromagnetických vln.

Kombinací těchto mechanismů sdílení tepla nazýváme prostup tepla.

[1], [3], [6]

1.1 Vedení tepla (kondukcce)

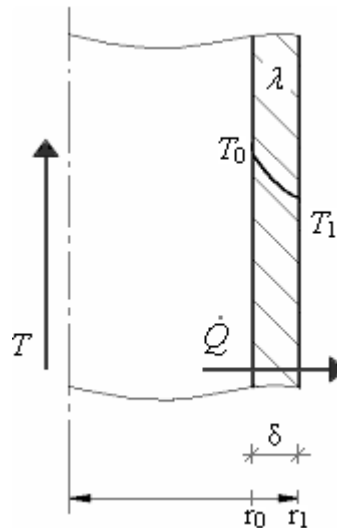
Přenos tepelné energie vedením je způsob šíření tepla především v pevných tělesech, jejichž jednotlivé části mají různé teploty. Vedení můžeme popsat jako děj, při němž energie samovolně přechází z míst o vyšší teplotě t_1 na místa o teplotě nižší t_2 . Molekuly totiž mají při tomto procesu v místech o vyšší teplotě větší kinetickou energii a částečně ji vzájemnými srážkami předávají sousedním molekulám, a tím dochází k přenosu energie.

U vedení tepla je důležitá i jeho rychlost, s níž se teplo přenáší. Označujeme ji jako tepelnou vodivost. Je to schopnost dané látky vést teplo z jedné zahřáté strany na druhou stranu, která je chladnější. Charakterizuje ji součinitel tepelné vodivosti λ .

[1], [12]

1.1.1 Vedení tepla jednoduchou válcovou stěnou

Uvažujme trubku o vnitřním poloměru r_0 a vnějším poloměru r_1 se stěnou o síle δ ($\delta = r_1 - r_0$).



Obr. 1 Řez jednoduchou válcovou stěnou [3], [11]

Při ustáleném vedení tepla je teplotní rozdíl $\Delta t = t_0 - t_1$ stálý a teplota rovnoměrně klesá od teplejší strany válce k chladnější. To vyjadřuje podíl nazvaný jako teplotní spád (gradient):

$$\frac{t_0 - t_1}{\delta} = \frac{T_0 - T_1}{\delta}, \quad (1)$$

kde t_0 je teplota na vnitřní straně válce, t_1 je teplota na vnější straně válce a δ je tloušťka dutého válce.

Množství tepla Q , které za těchto podmínek projde plochou S ve směru kolmém na podélnou osu válce za dobu τ , je pak rovno:

$$Q = \lambda \cdot S \cdot \frac{T_1 - T_0}{\delta} \cdot \tau \text{ [J]}, \quad (2)$$

kde S je obsah vnějšího pláště válce

$$S = 2\pi r_1 l, \quad (3)$$

a λ je součinitel tepelné vodivosti [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$].

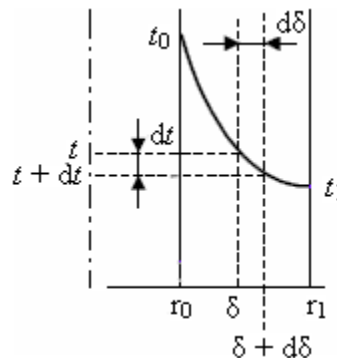
Množství tepla Q , které projde plochou S za čas τ je plošná hustota tepelného toku q a je dána vztahem:

$$q = \frac{Q}{\tau \cdot S} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]. \quad (4)$$

Po dosazení za Q z rovnice (2) do rovnice (4) a následné úpravě dostaneme:

$$q = \lambda \cdot \frac{T_0 - T_1}{\delta}. \quad (5)$$

[11]



Obr. 2 Odvození teplotního gradientu [11]

[1], [2], [12]

Pokud tloušťku válce δ zmenšujeme na $d\delta$, změní se na této tenké vrstvě teplota o $-dt$.

Vztah pro hustotu tepelného toku můžeme přepsat:

$$q = -\lambda \cdot \frac{dT}{d\delta}, \quad (6)$$

kde $\frac{dT}{d\delta}$ je teplotní gradient, který se může měnit nejen ve směru osy x , ale také v ostatních směrech, protože se jedná o vektorovou veličinu a lze ho přepsat do tvaru, který je označen jako Fourierův zákon:

$$q = -\lambda \cdot \text{grad}T. \quad (7)$$

[11]

Nyní můžeme vyjádřit tepelný tok \dot{Q} válcovou stěnou o poloměru r a délce L :

$$\dot{Q} = S \cdot q = -2 \cdot \pi \cdot r \cdot L \cdot \lambda \cdot \frac{dT}{dr}. \quad (8)$$

Dostaneme diferenciální rovnici se separovanými proměnnými:

$$\frac{\dot{Q}}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot \lambda} \cdot \frac{dr}{r} = -dT. \quad (9)$$

Řešením této diferenciální rovnice pro okrajové podmínky $T(r_0) = T_0$ a $T(r_1) = T_1$ za předpokladu konstantní tepelné vodivosti λ dostaneme:

$$\frac{\dot{Q}}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot \lambda} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} = T_1 - T_2 \quad (10)$$

a po úpravě:

$$\dot{Q} = 2 \cdot \pi \cdot L \cdot \lambda \cdot \frac{T_1 - T_2}{\ln \frac{r_2}{r_1}}. \quad (11)$$

[3]

Celkový tok tepla můžeme vyjádřit také ve tvaru:

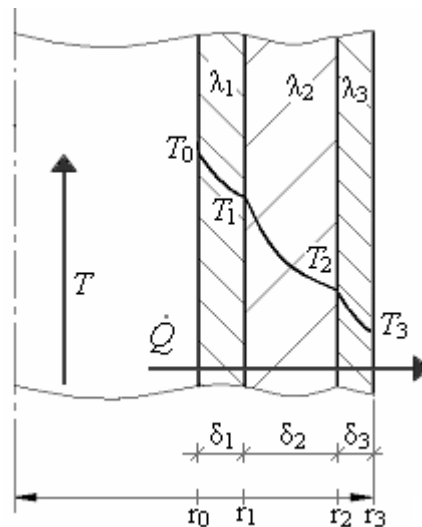
$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R}, \quad (12)$$

kde $\Delta T = T_0 - T_1$ a R je tepelný odpor vyjádřený z rovnice (12) jako:

$$R = \frac{\Delta T}{\dot{Q}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot \lambda} \cdot \ln \frac{r_1}{r_0}. \quad (13)$$

[3], [6], [12]

1.1.2 Vedení složenou válcovou stěnou



Obr. 3 Řez složenou válcovou stěnou [3], [11]

Složenou válcovou stěnou si můžeme představit např. jako potrubí o dané tloušťce obalené vrstvami izolačního materiálu apod. Postup stanovení celkového tepelného toku je obdobný jako u jednoduché válcové stěny s využitím skutečnosti, že tepelné odpory jednotlivých vrstev se sčítají:

$$R = \sum R_j = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot L} \cdot \sum_j \frac{1}{\lambda_j} \cdot \ln \frac{r_{j+1}}{r_j} \quad (14)$$

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R} = 2 \cdot \pi \cdot L \cdot \frac{T_0 - T_n}{\sum_j \frac{1}{\lambda_j} \cdot \ln \frac{r_{j+1}}{r_j}} \quad (15)$$

[4], [6]

1.2 Přestup tepla

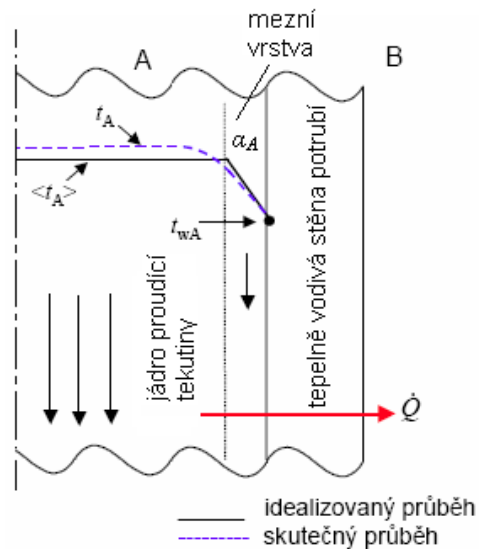
Přestup tepla je fyzikální jev, při kterém dochází na rozhraní dvou látek s různou teplotou k přenesení tepla z jedné látky do druhé. Jedná se o zvláštní případ vedení tepla.

Jestliže dochází ke sdílení tepla mezi proudící tekutinou a tepelně vodivou stěnou potrubí, pak v ustáleném stavu je tepelný tok na hranici potrubí roven tepelnému toku mezi stěnou a kapalinou.

U přestupu tepla se využívá Newtonova ochlazovacího zákona, který popisuje, kolik tepla se vyměňuje mezi proudící tekutinou a pevnou stěnou, kolem níž se tekutina pohybuje.

$$\dot{Q} = \alpha_A \cdot A \cdot (\langle t_A \rangle - t_{wA}), \quad (16)$$

[1], [4]



Obr. 4 Znáornění přestupu tepla [4], [11]

kde A je teplosměnná plocha [m^2], $\langle t_A \rangle$ je střední teplota tekutiny uvnitř potrubí [$^{\circ}\text{C}$], t_{wA} je teplota povrchu stěny potrubí u tekutiny [$^{\circ}\text{C}$] a α_A je součinitel přestupu tepla [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$].

Celkový tepelný tok \dot{Q} můžeme zapsat i následovně:

$$\dot{Q} = \frac{\langle t_A \rangle - t_{wA}}{R} = \frac{\Delta T}{R}, \quad (17)$$

kde R je tepelný odpor (odpor proti vedení tepla):

$$R = \frac{1}{\alpha_A \cdot A} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}]. \quad (18)$$

Intenzitu tepelného toku q můžeme vyjádřit jako množství celkového tepelného toku \dot{Q} , který projde teplosměnnou plochou A .

$$q = \frac{\dot{Q}}{A} = A \cdot (\langle t_A \rangle - t_{wA}) \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]. \quad (19)$$

[1], [4], [11]

1.2.1 Součinitel přestupu tepla α

Nachází se vždy na rozhraní tekutiny a stěny pevného tělesa. Charakterizuje, jak rychle dochází k přenosu tepelné energie z povrchu tělesa do okolního prostředí. Čím vyšší je tento součinitel, tím více a rychleji odchází teplo z povrchu tělesa do okolní tekutiny a tepelné ztráty narůstají. Součinitel přestupu tepla je přímo úměrný rozdílu teplot mezi povrchem tělesa a okolní tekutinou.

Součinitel přestupu tepla lze určit pomocí kritériálních rovnic pro daný případ přestupu tepla. Všechny tyto rovnice vycházejí z Fourierova zákona vedení tepla.

Kritériální rovnice jsou následující:

Nusseltovo kritérium Nu

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} \Rightarrow \alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{l}, \quad (20)$$

kde α je součinitel přestupu tepla [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$], l je charakteristická délka [m] a λ je součinitel tepelné vodivosti tekutiny [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$].

Pécletovo kritérium Pe

$$Pe = \frac{v \cdot l}{a}, \quad (21)$$

kde v je charakteristická rychlost proudění kapaliny, a je teplotní vodivost.

Reynoldsovo kritérium Re

$$Re = \frac{v \cdot l}{\nu} = \frac{v \cdot l \cdot \rho}{\eta}, \quad (22)$$

kde ν je kinematická viskozita:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}], \quad (23)$$

kde η je dynamická viskozita [$\text{N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}$] = [Pa.s] a ρ je hustota látky [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$].

Prandtlovo kritérium Pr

$$Pr = c_p \frac{\eta}{\lambda}, \quad (24)$$

kde c_p je měrná tepelná kapacita při konstantním tlaku [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$].

Grashofovo kritérium Gr

$$Gr = \frac{gl^3}{\nu^2} \beta \Delta t, \quad (25)$$

kde g je tíhové zrychlení [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$], β je koeficient teplotní objemové roztažnosti, který lze pro obtékání povrchu plynem, za předpokladu jeho chování jako ideálního plynu určit

$$\beta = \frac{1}{t_{STŘ}} [\text{K}^{-1}], \quad t_{STŘ} \text{ je aritmetický průměr teplot stěny potrubí a proudící tekutiny } [^{\circ}\text{C}] \text{ a } \Delta t$$

je rozdíl teplot [$^{\circ}\text{C}$].

V těchto kritériích dosazujeme látkové vlastnosti proudící tekutiny (ρ , η , ν , λ , a a c_p) při její střední teplotě. Pouze však v jediném kritériu, a to Nusseltově, je obsažen součinitel přestupu tepla α . [1], [3], [11]

1.2.2 Přirozené proudění (volná konvekce)

Volná konvekce je nejčastěji vyvolaná rozdílem teplot spolu s působením gravitačního pole. Volnou konvekci tak vyvolává tíhová síla (nebo hmotnostní síly).

Součinitel přestupu tepla určíme z Nusseltova kritéria z rovnice (20).

Nusseltovo kritérium vyjádříme jako součin Prandtlova a Grashofova kritéria:

$$Nu = C \cdot (Gr \cdot Pr)^n, \quad (26)$$

přičemž musí platit: $Pr \geq 0,7$;

kde C a n jsou konstanty, jejichž hodnoty uvádí následující tabulka:

$GrPr$	C	n
$<10^{-3}$	0,5	0
$<1 \cdot 10^{-3}, 5 \cdot 10^2 >$	1,18	1/8
$<5 \cdot 10^2, 2 \cdot 10^7 >$	0,54	1/4
$<2 \cdot 10^7, 1 \cdot 10^{13} >$	0,135	1/3

Tab. 1 Konstanty pro výpočet rovnice (26)

Prandtlovo a Grashofovo kritérium určíme z kritériálních rovnic (24) a (25).

U Grashofova kritéria (24) volíme charakteristický rozměr l podle následujícího výběru:

- vodorovný válec: za l dosadíme *průměr* válce,
- svislý válec: za l dosadíme *výšku (délku svislého úseku potrubí)*.

[3], [11], [14]

1.2.3 Turbulentní proudění (nucená konvekce)

Nucená konvekce je nejčastěji vyvolaná externím zásahem do tekutiny – tekutina je ke svému pohybu nucena (například tepelným čerpadlem); nebo stojí-li tekutině v cestě nějaká překážka (například pootevřený kulový ventil).

Rozlišujeme tři základní oblasti uvnitř potrubí s odlišným charakterem toku:

Laminární proudění ($Re \leq 2.3 \cdot 10^3$)



Obr. 5 Laminární proudění [13]

$$Nu = 0,17 \cdot Re^{0,33} \cdot Pr^{0,43} \cdot Gr^{0,10} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_w} \right)^{0,25}, \quad (27)$$

kde Pr_w je Prandtlovo kritérium při teplotě stěny.

Přechodná oblast ($2,3 \cdot 10^3 \leq Re \leq 10^4$)

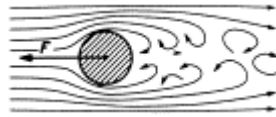
Tuto oblast popisuje tzv. Hansenova rovnice:

$$Nu = 0,116 \cdot (Re^{2/3} - 125) \cdot Pr^{1/3} \cdot \left[1 + \left(\frac{d}{L} \right)^{2/3} \right] \cdot \left(\frac{\eta}{\eta_w} \right)^{0,14}, \quad (28)$$

kde L je délka potrubí a η_w dynamická viskozita tekutiny při teplotě stěny.

Jestliže se dynamické viskozity η a η_w od sebe příliš neliší, lze výraz $(\eta/\eta_w)^{0,14}$ z předchozí rovnice vypustit.

Turbulentní proudění ($Re \geq 10^4$)



Obr. 6 Turbulentní proudění [13]

V této oblasti platí Dittusova – Boelterova korelace ve zjednodušeném tvaru:

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} . \quad (29)$$

Jestliže je rozdíl teplot tekutiny a stěny vysoký a hodnoty viskozit η a η_w se také výrazně liší, lze použít přesnější tvar Dittusovy – Boelterovy korelace:

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot \left(\frac{\eta}{\eta_w} \right)^{0,14} . \quad (30)$$

U Grashofova kritéria volíme charakteristický rozměr l podle následujícího výběru:

- tok uvnitř trubek: za l dosadíme *průměr* trubky,
- tok vně trubek (podélné obtékání): za l dosadíme *ekvivalentní průměr* d_{ek} .

Ekvivalentní průměr získáme ze vztahu:

$$d_{ek} = \frac{4 \cdot S}{o} \text{ [m]}, \quad (31)$$

kde S značí průřez naplněný tekutinou a o je obvod průtočného průřezu.

[3], [11], [13]

Pro obtékání válcové stěny využíváme vztah:

$$Nu = \frac{\alpha D}{\lambda} = 0,3 + \frac{0,62 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr^{1/3}}{\left[1 + \left(\frac{0,4}{Pr} \right)^{2/3} \right]^{0,25}} \left[1 + \left(\frac{Re}{282000} \right)^{5/8} \right]^{0,8} , \quad (32)$$

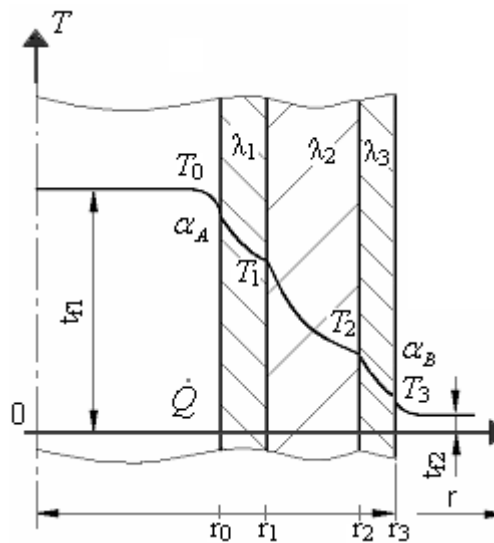
přičemž musí platit $Re \cdot Pr > 0,2$.

[9]

1.3 Prostup tepla válcovou stěnou

Má-li tekutina uvnitř válcového tělesa vyšší teplotu než je teplota okolního prostředí, pak se prostup tepla skládá z přestupu tepla teplejší tekutiny proudící uvnitř válce do

povrchu stěny válce, vedení tepla stěnami válce a přestupem tepla z povrchu stěny válce do okolního prostředí, které je chladnější než médium uvnitř potrubí.



Obr. 7 Prostup tepla složenou válcovou stěnou[1], [6]

Celkový tok \dot{Q} při prostupu tepla získáme z rovnice (12) analogicky použitím rovnic pro tepelný odpor při vedení tepla válcovou stěnou a pro tepelný odpor při přestupu tepla, kde ΔT značí rozdíl středních teplot proudících uvnitř trubky t_{f1} (teplejší) a vně trubky t_{f2} (chladnější) a R je součet všech tepelných odporů při přestupu a při vedení tepla válcovou stěnou:

$$R = \sum R_j = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot L} \cdot \left(\frac{1}{\alpha_A \cdot r_A} + \sum_j \frac{1}{\lambda_j} \cdot \ln \frac{r_{j+1}}{r_j} + \frac{1}{\alpha_B \cdot r_B} \right). \quad (33)$$

[1], [3]

Délkový součinitel prostupu tepla K_L :

Zavádí se z důvodu, že při prostupu tepla válcovou stěnou v kolmém směru na osu válce se plocha, kterou prochází tepelný tok z teplejší tekutiny uvnitř válce do okolí válce, mění se vzdáleností povrchu válce od osy válce.

$$K_L = \frac{1}{L \cdot R} = \frac{2 \cdot \pi}{\frac{1}{\alpha_A \cdot r_A} + \sum_j \frac{1}{\lambda_j} \cdot \ln \frac{r_{j+1}}{r_j} + \frac{1}{\alpha_B \cdot r_B}} \quad (34)$$

[3], [8]

Celkový tepelný tok \dot{Q} můžeme následně vyjádřit jako součin délkového součinitele přestupu tepla K_L , teplosměnné délky L a celkového rozdílu teplot ΔT .

$$\dot{Q} = K_L \cdot L \cdot \Delta T \quad (35)$$

[3]

2 TEPELNÉ IZOLACE

Výpočet tepelných izolací má největší význam z hlediska hospodárnosti a šetření tepelnou energií, jejíž náklady v dnešní době neustále rostou. Dalším příkladem použití izolace je ve výrobních závodech pro zajištění optimálních pracovních podmínek pro obsluhu a pro technologické vybavení. Z tohoto výčtu je tedy patrné, že našim cílem je snížení tepelných ztrát z daného potrubí do okolí na minimum. Tohoto cíle dosáhneme, když obalíme příslušné potrubí vhodným tepelným izolantem.

Pojem tepelný izolant v podstatě značí látku, která špatně vede teplo, tj. má nízkou tepelnou vodivost, která je zpravidla menší než $0,2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. To je hlavní a pro nás nejdůležitější podstata. Opakem tepelného izolantu je tepelný vodič, který nejčastěji tvoří stěnu našeho potrubí. Vhodným zvolením tloušťky izolační vrstvy můžeme dosáhnout snížení úniku tepla do okolí na požadovanou hodnotu.

Pro volbu správného druhu izolačního materiálu je nejdůležitějším parametrem teplota potrubí, dále následuje hustota (čím menší hustota, tím menší tepelná vodivost). V neposlední řadě rozhoduje také cena, mechanické vlastnosti a dostupnost.

Vhodné materiály pro tepelnou izolaci:

Materiál	λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]
polyuretan	0,032
korek	0,036
lehčená pryž	0,037
pěnový polyethylen	0,04
minerální vlna	0,04
skelná vata	0,04
syntetický kaučuk	0,04
plst ^č	0,04 - 0,09
pěnové sklo	0,06

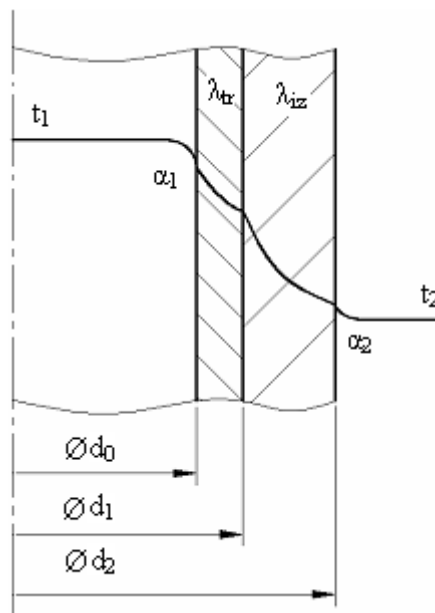
Tab. 2 Nejpoužívanější materiály na izolace [8]

Nejlepším izolátorem jsou však vzduchové nebo vakuové mezery, ale udržení stálého vakua je náročné a také pořizovací cena je značně vyšší než u běžných konvekčních materiálů.

Pro správnou funkci izolace je nutné, abychom zamezili kontaktu izolace s vodou nebo vodní parou, protože vlhkost značně zvyšuje tepelnou vodivost a izolace tak ztrácí své izolační vlastnosti. V dnešní době je ovšem většina izolačních materiálů hydrofobizována, tzn. odpuzují vodu. Ale i tak je vhodné izolaci chránit obalem nebo nátěrem.

[1], [8]

2.1 Výpočet kritického průměru izolace



Obr. 8 Prostup tepla vřlcovou stěnou složenou z trubky a izolace [6]

Předpokládejme, že chceme snížit tepelné ztráty u potrubí, která má vnitřní průměr d_0 a vnější průměr d_1 a součinitel tepelné vodivosti λ_{tr} . Únik tepla snížíme tím, že obalíme potrubí izolační vrstvou o vnějším průměru d_2 se součinitel tepelné vodivosti λ_{iz} .

Teplo se z média uvnitř trubky nejprve bude šířit přestupem tepla z kapaliny do stěny trubky, poté vedením v trubce, dále vedením v izolaci a nakonec přestupem z povrchu izolace do okolí. Jelikož se jedná o prostup tepla potrubím, které je složeno ze dvou vrstev, je výhodné pro odvození kritického průměru izolace využít rovnici (35).

Uvažujme, že délka potrubí je jednotková a že jedná o ustálený stav; pak můžeme psát:

$$\dot{Q} = \frac{2 \cdot \pi \cdot (t_1 - t_2)}{\frac{1}{\alpha_A \cdot d_0} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_{tr}} \cdot \ln \frac{d_1}{d_0} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_{iz}} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_B \cdot d_2}}. \quad (36)$$

[3], [6]

Při malých průměrech potrubí, nebo při nepříliš vhodně zvoleném materiálu izolační vrstvy se může stát, že tepelné ztráty potrubí namísto aby klesaly, což se samozřejmě očekává, začnou narůstat až dosáhnou maxima. Toto maximum nám označuje kritickou tloušťku izolace. Jestliže budeme tloušťku izolace nadále zvyšovat, začnou tepelné ztráty prudce klesat. Ovšem s dalším nárůstem průměru izolace nebude pokles až tak velký a tepelné ztráty se pro nekonečnou tloušťku izolace budou asymptoticky blížit k nule.

Z tohoto popisu situace je zřejmé, že hledáme extrém funkce. Jestliže má mít funkce extrém v bodě x_0 , tak musí platit, že první derivace v tomto bodě je nulová. To, jestli se jedná o maximum, zjistíme z druhé derivace, která musí být v tomto bodu x_0 menší než 0.

Nejprve derivujeme rovnici podle vnějšího průměru izolace d_2 :

$$\frac{d\dot{Q}}{d(d_2)} = 0. \quad (37)$$

Po derivaci a následné úpravě dostaneme:

$$2 \cdot \pi \cdot (t_1 - t_2) \cdot \frac{\frac{1}{2\lambda_{iz}} - \frac{1}{\alpha_B \cdot d_2}}{\left(\frac{1}{\alpha_A \cdot d_0} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_{tr}} \cdot \ln \frac{d_1}{d_0} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_{iz}} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_B \cdot d_2} \right)^2} = 0. \quad (38)$$

[1], [6]

Zlomek je roven nule, když jmenovatel je nulový, tudíž dostaneme:

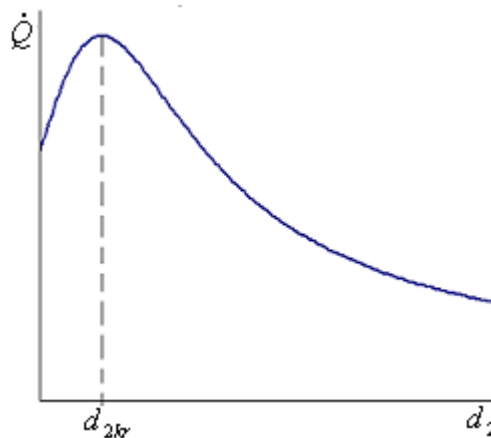
$$\frac{1}{2\lambda_{iz}} - \frac{1}{\alpha_B \cdot d_2} = 0. \quad (39)$$

Řešením této rovnice dostaneme kritický průměr izolace:

$$d_{2kr} = \frac{2\lambda_{iz}}{\alpha_B}. \quad (40)$$

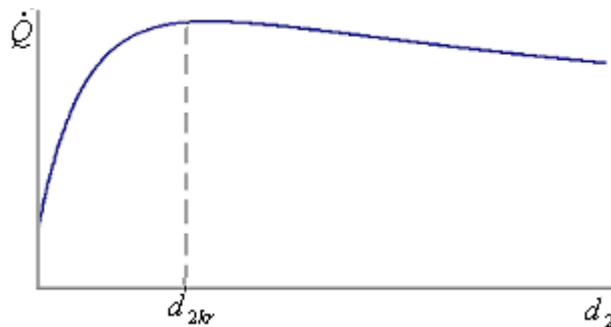
[1], [6], [8]

Jestliže nastane situace, kdy je vypočtený kritický průměr izolace menší než vnější průměr trubky d_2 , začnou tepelné ztráty prudce klesat hned na počátku s rostoucí tloušťkou izolační vrstvy. To může být způsobeno větším průměrem potrubí, nebo při nízkých hodnotách součinitele tepelné vodivosti izolace. Na obrázku lze také vidět, že zvyšovat tloušťku izolace má smysl jen do určité hodnoty, kdy je ještě pokles tepelných ztrát se zvyšující se tloušťkou izolace značný.



Obr. 9 Vhodně zvolená izolace

Opačným příkladem je zvolení nevhodné izolace. Tady může nastat případ, kdy tepelné ztráty budou jen velice pozvolna klesat se zvyšující se tloušťkou izolační vrstvy.



Obr. 10 Nevhodně zvolená izolace

Z těchto poznatků dojdeme k závěru, že optimální tloušťku izolace stanovíme pomocí porovnání ceny ztracené tepelné energie a pořizovací ceny izolace.

[1], [6]

3 IZOLACE A ZAŘÍZENÍ S KRUHOVÝM PRŮŘEZEM

Kruhový průřez můžou mít následující zařízení:

- potrubí
- vzduchotechnika a požáru odolná potrubí
- izolace technologických zařízení
- izolace kotlů a pecí
- izolace komínů

[15]

3.1 Izolace potrubí

Potrubí, které izolujeme, slouží především pro rozvody tepla a teplé vody. U ústředního vytápění izolujeme pouze ty části potrubí, které se nacházejí v prostorách, které nepotřebujeme vytápět. U rozvodů teplé vody nám zase jde o co nejmenší únik tepla do okolního prostředí. Nejčastějším příkladem okolního prostředí jsou zdi, ve kterých je potrubí pro teplou vodu vedeno. Zdi jsou totiž dobrým vodičem tepla, protože jejich součinitelé tepelné vodivosti dosahují hodnot v rozmezí od $0,5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ pro pálenou cihlu až po $1,7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ pro beton. Do potrubních systémů zahrnujeme i parovod, který je do jednotlivých objektů veden v podzemí (průměrná hodnota tepelné vodivosti půdy je $1,13 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$). [14], [15]

3.2 Protipožární izolace

Izolace nemusí sloužit pouze pro snižování tepelných ztrát, ale může také sloužit jako ochrana proti vzniku požáru. Mezi zařízení, jejichž okolí je nutno chránit před vznícením, patří kotle, pece a komíny. Izolace určené pro kotle a pece musí splňovat ty nejnáročnější kritéria, protože teplota na stěnách kotlů může dosáhnout hodnoty 600°C . Z tohoto důvodu se pro tyto účely používají izolace s vyšší objemovou hmotností.

U vzduchotechniky plní izolace funkci tepelnou, protipožární a akustickou. Vzduchotechnika je v dnešní době součástí mnoha veřejných objektů, a proto musí izolace splňovat i protipožární funkci a musí zabránit šíření požáru ve vzduchotechnickém systému.

U komínů se od okolního prostředí izolují komínové vložky. Tloušťka izolace se volí v závislosti na průměru kouřovodu. [14], [15]

3.3 Izolace technologických zařízení

K technologickým zařízením, které je nutné izolovat, patří bojler, výměníky tepla apod. U těchto zařízení se izolace volí podle průměru, tepelného namáhání a způsobu připevnění izolace ke konstrukci zařízení. [14], [15]

3.4 Druhy izolací a její použití

Druh izolace volíme podle prostředí, ve kterém se daný systém nachází, podle teploty povrchu, kde se izolace bude umísťovat, na schopnosti izolace se přizpůsobit povrchu, na způsobu montáže a na tepelné vodivosti izolace. [14], [15]

3.4.1 Minerální izolace

Minerální izolace se vyrábí z kamenných nebo skelných vláken. Odlišují se od sebe vstupní surovinou, ze které jsou vytvářeny, dále průměrem a délkou vlákna.

3.4.1.1 Skelná minerální vlna

Základ vlny tvoří směs skelných střepů a křemičitého písku, které se taví při teplotě 1450°C. Při této teplotě vzniká tavenina, která putuje do rozvlákňovacího stroje, kde vznikne vlákno, které se mísí s pojivem. Vlákna smísená s pojivem dopadají na dopravní pás a vytvářejí jednotlivé vrstvy. Poté putují do vytvrzovací pece. Nakonec je hotový produkt nařezán na požadovanou velikost. Skelná vata je ekologická, protože využívá ke své výrobě skelné střepy a CRT obrazovky. Používá se tam, kde nebude mechanicky namáhána, tedy na provětrávané fasády, do podhledů k izolaci stropů, mezi krovy šikmých střech a k izolaci potrubí.

[14], [15]

3.4.1.2 Kamenná minerální vlna

Základ pro výrobu tvoří směs kamenů, kde převažuje čedič (proto se někdy nazývá jako čedičová). Proces výroby je obdobný jako u skelné vlny ovšem s tím rozdílem, že se horniny taví při teplotě 1600°C. Protože má vyšší bod tavení než skelná vlna, tak se

používá u konstrukcí a zařízení, kde jsou kladeny vysoké požadavky na požární ochranu. Kamenné vlákno je hrubší a kratší než skelné, tudíž má vyšší hodnoty součinitele tepelné vodivosti. Využití je obdobné jako u skelné vlny, ovšem díky lepšímu udržení tvaru se hodí do kontaktních fasád. Díky svým protipožárním schopnostem se používá u vzduchotechniky, k izolaci pecí, kotlů a komínových vložek. Minerální vata může být opatřena hliníkovou krycí vrstvou, nebo bývá vyztužena pletivem. [14], [17]



Obr. 11 Izolace potrubí kamennou minerální vlnou [17]

3.4.1.3 Výhody minerálních izolací

Minerální izolace mají nízký součinitel tepelné vodivosti (většinou se pohybuje okolo $0,04 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), nízký difúzní odpor (dobře větrají), jsou tvarovatelné, dobře se s nimi pracuje a utěšňuje izolované prostory. Jsou nehořlavé a jsou zahrnuty do třídy hořlavosti A1. Nepodporují vznik plísní a ani nereagují s okolními materiály.

Minerální vlna se vyrábí s podélnou nebo s kolmou orientací vláken. U podélné orientace vláken je difúzní odpor o něco vyšší než u vláken kolmě orientovaných.

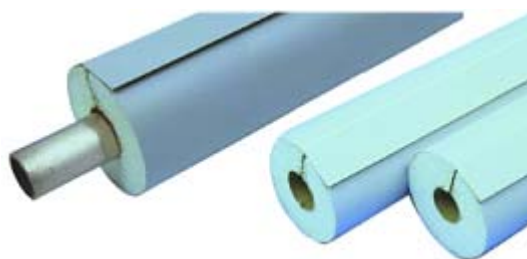
[14], [15]

3.4.2 Polyuretanové izolace (požívá se zkrácený název PUR)

Polyuretanová pěna je makromolekulární plast na převážně organické bázi. Vzniká vzájemnou chemickou reakcí dvou složek. Po jejich smísení v přesně definovaném poměru vzniká oxid uhličitý CO_2 , který polyuretanovou hmotu napění do formy tvrdé pěny s uzavřenou mikroskopickou buněčnou strukturou. Díky této struktuře má pěna výborné tepelně izolační vlastnosti a je zcela nenasákavá. Z technologického hlediska se jedná o materiál samozhášecí, tudíž nešíří požár. K výhodám této izolace patří vysoká pevnost v tlaku, nenasákavost a objemová stálost. Nevýhodou je vysoký difúzní odpor a reakce polyuretanu na UV záření, při kterém dochází k rozpadu pěny. Proto je třeba PUR izolace

chránit před přímým slunečním zářením. K tomu se využívají akrylátové nebo silikonové nátěry. Tato izolace má ze všech nejběžněji používaných izolací nejnižší hodnotu součinitele tepelné vodivosti, která dosahuje $0,032 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Výborně vyplňuje dutiny. Používá se u tepelných nebo chladových izolací potrubí, dvouplášťových nádrží nebo tanků a u jiných technologických zařízeních. Principem je vstřikování směsi do prostoru mezi nádrží a vnější opláštění tak, že chemicky načasovaná směs obou složek nejprve nateče ke dnu izolované nádoby a potom tlakem při vypěňování stoupá nahoru až vyplní celou dutinu. PUR vrstva zamezuje tvorbě plísní a mikrobů, je samokotvící a bezespará.

[16]



Obr. 12 Izolace potrubí PUR pěnou [17]

3.4.3 Pěnový polyethylen (označovaný též jako mirelon)

Jedná se o napěněný polyethylen, který má stejně jako PUR uzavřenou buněčnou strukturu. Používá se jako tepelná a ochranná izolace před mechanickým poškozením. Používá se také pod podlahové krytiny. K výhodám patří pěkný vzhled, plná recyklovatelnost, nízká tepelná vodivost, zdravotní a ekologická nezávadnost, snadná tvarovatelnost a trvalá pružnost, nenasákavost a chemická odolnost. Nevýhodou této izolace je nemožnost použití u zařízení, kde je teplota vyšší než 90°C , protože je velmi hořlavá. Stejně jako PUR izolaci je nutno i ji chránit před ultrafialovým zářením.

[19]



Obr. 13 Izolace potrubí pěnovým polyethylenem [17]

3.4.4 Izolace ze syntetického kaučuku

Tato izolace má stejně jako předchozí dvě izolace uzavřenou buněčnou strukturu a tím umožňuje použití menší tloušťky, což vede k větším ekonomickým úsporám než u ostatních běžně používaných izolací. Na rozdíl od mirelonu se může použít až do teplot o hodnotě 105°C. K výhodám patří parotěsnost a jednoduchá instalace.

[18]



Obr. 14 Izolace syntetickým kaučukem[17]

3.5 Vyhláška pro izolace potrubí

Vyhlášku najdeme pod označením čísla 193 Sbírky z roku 2007. Vyhláška stanovuje požadavky na úsporu energie v nově budovaných objektech. Následující tabulka udává součinitele prostupu tepla, které jsou vztaženy na jednotku délky pro vnitřní rozvody. DN v tabulce představuje vnitřní průměr potrubí. Podle těchto součinitelů pro daný průměr potrubí volíme tloušťku izolace.

[20]

DN [mm]	10 – 15	20 – 32	40 – 65	80 – 125	150 – 200
K_L [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	0,15	0,18	0,27	0,34	0,40

Tab. 3 Délkové součinitele tepla pro vnitřní rozvody [20]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 POPIS PROGRAMU

Aplikaci pro určení optimální tloušťky izolace jsem vytvořil v programovacím jazyku Java ve vývojovém prostředí NetBeans IDE 7.0.1.

Podle zadání program umožňuje vypočítat tepelný tok při prostupu tepla složenou stěnou válcového potrubí, stanovit kritický průměr a optimální tloušťku izolace. Program se skládá ze dvou základních výpočetních částí. Jedna nám spočítá tepelný tok při prostupu tepla pro dvou až pěti vrstvou složenou válcovou stěnou. Druhá část pracuje pouze se stěnou potrubí a s tloušťkou izolace.

V druhé části program určí kritický průměr izolace, kdy se při průměru větším než je vypočtená hodnota, tepelné ztráty stěnou pro daný izolační materiál snižují. Ke kritickému průměru se z vypočtených dat automaticky sestrojí graf, který znázorňuje závislost tepelného toku na vnějším průměru izolace. Výsledky závislosti jsou uloženy do textového souboru. Dále program spočítá optimální tloušťku izolace a spočítá úsporu energie vzhledem k neizolovanému potrubí.

Aplikace dále umí vypočítat součinitele přestupu tepla na vnější straně potrubí. Zde si může uživatel zvolit mezi svislým nebo vodorovným potrubím, volnou nebo nucenou konvekcí.

První základní části programu umožňuje spočítat tepelný tok při prostupu tepla válcovou stěnou, složenou ze dvou až pěti vrstev. Pokud chce uživatel zobrazit geometrický náčrt potrubí, je zde okno sloužící pro náhled na složení válcové stěny potrubí, kde jsou uvedeny všechny jeho důležité parametry.

4.1 Ovládání programu

Při startu programu je spuštěno hlavní okno aplikace, které lze vidět na Obr. 15. V hlavním okně nahoře jsou dvě „přepínací“ tlačítka („radio buttons“), které slouží pro přepínání mezi režimem výpočtu tepelného toku při prostupu tepla válcovou stěnou složené ze dvou až pěti vrstev, a režimem pro výpočet kritického průměru a optimální tloušťky izolace. Když zvolíme první možnost, tak se napravo od „přepínacího“ tlačítka pro volbu výpočtu tepelného toku zobrazí tlačítko „Náhled“, které slouží pro zobrazení složení potrubí. Navíc se ještě pod oběma tlačítky objeví „rozbalovací“ pole („combo

box“), kde si je možné vybrat požadovaný počet vrstev, ze kterých je stěna potrubí složena. Po výběru počtu vrstev se zpřístupní požadovaný počet vstupních textových polí.

Na pravé straně u „přepínacího“ tlačítka pro volbu výpočtu kritického průměru izolace se zobrazí tlačítko „Graf“ pro zobrazení závislosti prostupu tepla na vnějším průměru izolace. Pro výpočet kritického průměru a optimální tloušťky izolace je nutné zadat vnitřní a vnější průměr potrubí, součinitele tepelné vodivosti stěny potrubí a izolace, délku potrubí, teplotu média uvnitř a vně potrubí, teplotu povrchu izolace, součinitel přestupu tepla z tekutiny uvnitř trubky do jeho stěny a součinitele přestupu tepla z povrchu izolace do okolního prostředí. U posledně uvedeného parametru je umístěno tlačítko „Urči α :“ pro jeho výpočet. Po zadání všech vstupních parametrů už stačí jen stisknout tlačítko „Spočítej“ a výsledky se objeví pod tímto tlačítkem. Ve výsledcích je zobrazena střední teplota, průstup tepla a délkový součinitel prostupu tepla při kritickém průměru izolace, dále kritický průměr izolace, doporučená tloušťka izolace, průstup tepla při této tloušťce izolace a energetická úspora s touto vypočítanou tloušťkou izolace vzhledem k neizolovanému potrubí, která je uvedena v procentech.

U výpočtu tepelných ztrát při prostupu tepla složenou válcovou stěnou, kde si volíme počet vrstev, jsou zobrazeny pouze výsledky střední teploty a tepelný tok s délkovým součinitelem prostupu tepla.

Při změně režimu výpočtu z tepelného toku z prostupu tepla na výpočet kritické tloušťky izolace se zpřístupní pouze textová pole pro vnitřní a vnější průměr trubky. Obsah ostatních polí, která v tomto režimu nejsou k výpočtu potřebná, je smazán a pole jsou nastavena tak, aby se nedaly editovat.

Prostup tepla a kritický průměr

Tepelné ztráty prostupem \dot{Q} **Náhled**

Kritický průměr d_{2kr}

Počet vrstev $n(d)$: ▼

Vnitřní průměr d
 d_0 m

Vnější průměry $d_1..d_5$
 d_1 m d_2 m
 d_3 m d_4 m
 d_5 m

Součinitelé tepelné vodivosti $\lambda_1.. \lambda_5$
 λ_1 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ λ_2 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
 λ_3 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ λ_4 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
 λ_5 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$

Délka potrubí
 L m

Teplota média uvnitř potrubí
 t_A °C

Teplota okolí
 t_B °C

Teplota povrchu izolace
 t_3 °C

Součinitel přestupu tepla na vnitřní straně
 α_A $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$

Součinitel přestupu tepla na vnější straně
 α_B $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ **Urči α :**

SPOČÍTEJ

Střední teplota $t_{stř}$ °C

Tepelné ztráty \dot{Q} W

Délkový součinitel prostupu tepla
 K_L $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$

Kritický průměr izolace d_{2kr} m

Doporučená tloušťka izolace s m

Tepelné ztráty při doporučené tloušťce izolace
 \dot{Q}_s W

Úspora energie při doporučené tloušťce izolace
 u %

Obr. 15 Hlavní okno aplikace

Pokud chceme spočítat součinitele přestupu tepla z povrchu izolace do okolní tekutiny, tak klikneme na tlačítko „Urči α :“. Po kliknutí na tlačítko se spustí okno, které je

zobrazeno na Obr. 16. Nahoře v tomto okně jsou dvě skupiny „přepínacích“ tlačítek. Jedna skupina slouží pro volbu mezi volnou a nucenou konvekcí, druhá zase pro volbu mezi vodorovným a svislým potrubím, přičemž tato volba má význam pouze pro určení charakteristického rozměru tělesa při volné konvekci. U volné konvekce u vodorovného potrubí zadáváme průměr poslední vrstvy složené válcové stěny a u svislého potrubí zase zadáme jeho výšku. Při nucené konvekci jako charakteristický rozměr je automaticky dosazen vnější průměr potrubí.

Dále je nutné zadat vlastnosti okolní tekutiny. K těmto vlastnostem patří součinitel tepelné vodivosti, hustota, měrná tepelná kapacita, kinematická viskozita a teplotní objemová roztažnost. U nucené konvekce se dosazuje vnější průměr poslední vrstvy potrubí. Zde nevyplňujeme pole pro objemovou roztažnost, ale pole pro rychlost proudění okolní tekutiny. Nad tímto ale nemusíme přemýšlet, protože program automaticky zpřístupní požadovaná textová pole a ostatní pole, která nejsou k zapotřebí, tak vymaže jejich obsah a zakáže zapisování textu. To významně ulehčuje práci s aplikací.

Po zadání všech parametrů opět stačí stisknout pouze tlačítko „Spočítej“ a pod tímto tlačítkem se zobrazí výsledky. Pro volnou konvekci jsou zobrazeny výsledky pro Grashofovo, Prandtlovo a Nusseltovo kritérium a nakonec výsledný součinitel přestupu tepla. U nucené konvekce je Grashofovo kritérium nahrazeno Reynoldsovým kritériem. Po úspěšném výpočtu a zobrazení výsledků stačí jen kliknout na hlavní okno aplikace a hodnota součinitele přestupu tepla je zkopírována do příslušného textového pole v hlavním okně. Pokud tuto hodnotu nechceme, aby se zkopírovala, tak stačí zavřít okno pro výpočet součinitele přestupu tepla, ovšem za předpokladu, že jsme se před tím nepřepnuli do hlavního pracovního okna.

Součinitel přestupu tepla α

Konvekce: Volná Nucená

Potrubí: Vodorovné Svislé

Vlastnosti okolní tekutiny:

Součinitel tepelné vodivosti
 λ_B $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$

Hustota okolní látky
 ρ_B kg.m^{-3}

Měrná tepelná kapacita
 c_{pB} $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$

Kinematická viskozita
 ν_B $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$

Teplotní objemová roztažnost
 β_B K^{-1}

Rychlost proudění tekutiny
 v_B m.s^{-1}

SPOČÍTEJ

Grashofovo kritérium
 Gr:

Prandtlovo kritérium
 Pr:

Nusseltovo kritérium
 Nu:

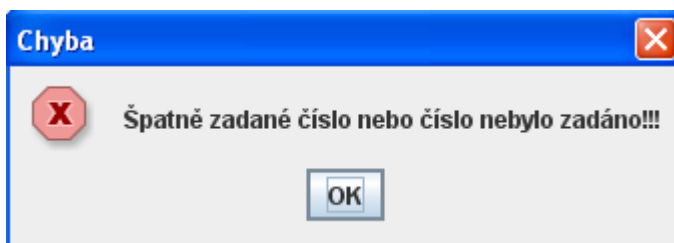
α_B : $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$

Obr. 16 Okno pro výpočet součinitele prostupu tepla na vnější straně izolace

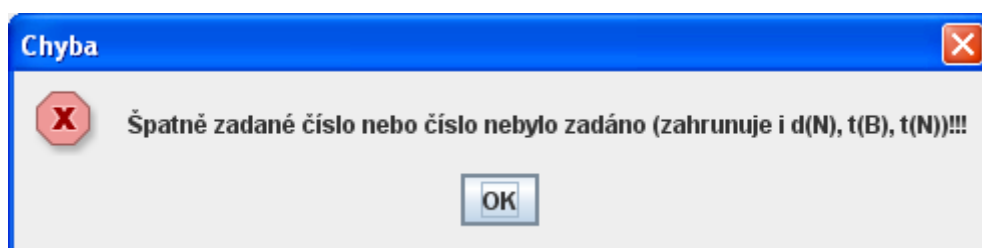
V hlavním okně a okně pro výpočet součinitele přestupu tepla jsou pomocné třídy, které zajišťují okamžitou kontrolu vstupního textu. V hlavním okně jsou podporovány znaky 0 až 9 a desetinná čárka nebo tečka. V okně pro přestup tepla jsou navíc podporovány znaky pro mínus a znak velké nebo malé „e“, což je dekadický základ mocniny. Desetinná čárka nebo tečka, znaménko mínus a dekadický základ mocniny může být samozřejmě v jednom textovém poli použito maximálně jedenkrát. Pokud některou z těchto zásad zadávání vstupu z klávesnice porušíme, tak se pozadí textového pole změní na červenou barvu.

Po kliknutí na tlačítko „Spočítej“ v hlavním okně a okně pro výpočet součinitele přestupu tepla je spuštěna ještě druhá kontrola vstupních hodnot. Jestliže jsme nezadali nebo špatně vyplnili textová pole, aplikace to odhalí a zobrazí chybovou hlášku, která je na

Obr. 17. U okna pro výpočet součinitele přestupu tepla je tato hláška pozměněna, protože k výpočtu ještě potřebuje parametry z hlavního okna, a to konkrétně poslední vnější vrstvu válcové stěny nebo délku potrubí, dále teplotu povrchu poslední vrstvy a teplotu okolního prostředí (viz Obr. 18).



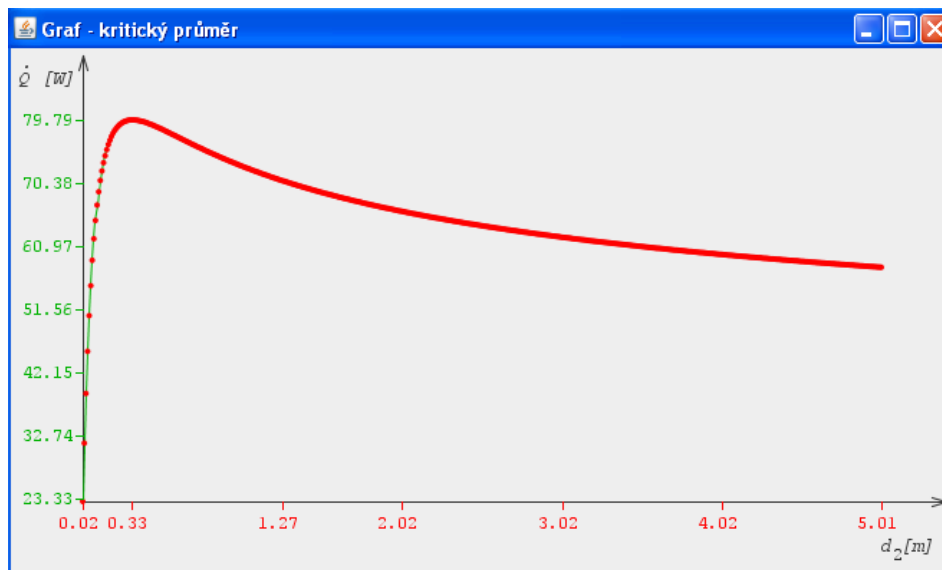
Obr. 17 Chybová hláška u hlavního okna aplikace



Obr. 18 Chybová hláška u okna pro výpočet přestupu tepla

Práci v hlavním okně a okně pro výpočet součinitele přestupu tepla ulehčuje pomocná třída pro práci s myší. Ta zajišťuje u funkčních prvků aplikace (tlačítka, radio buttons a combo box) změnu klasického kursoru myši na kursor s rukou a uživatel tak ví, že na ně může kliknout.

Pokud chceme u výpočtu kritického průměru izolace zobrazit graf (Obr. 19), klikneme na tlačítko „Graf“, ovšem za předpokladu, že jsme již dříve provedli výpočet. Pokud ne, tak stačí kliknout na „Spočítej“ v hlavním okně a do textového souboru „data.txt“ jsou uložena potřebná data k sestrojení grafu. Výpočet začíná na hodnotě vnějšího průměru, ke kterému je přičtena iterační hodnota, která se spočítá v závislosti na volbě vstupních parametrů.

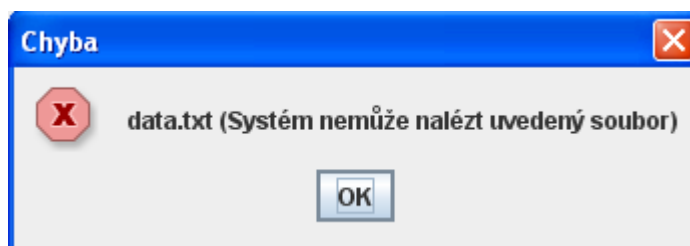


Obr. 19 Graf znázorňující závislost prostupu tepla na vnějším průměru izolace

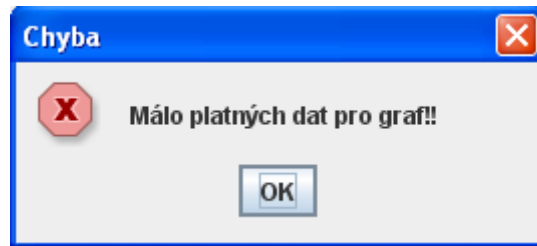
V souboru jsou dva sloupce oddělené tabulátorem. V prvním sloupci je uveden vnější průměr izolace a ve druhém tepelné ztráty. Desetinná čísla jsou v souboru uložena s desetinou čárkou.

Na grafu je znázorněna závislost tepelných ztrát stěnou potrubí na vnějším průměru izolace. Vnější průměr izolace je uveden v metrech a tepelný tok ve wattech. Zde velmi záleží na tom, jaké vstupní parametry jsou zadány. Okno s grafem se dá maximalizovat, nebo různě zvětšovat a zmenšovat, protože zobrazení grafu se vždy přizpůsobí.

Pokud soubor „data.txt“ neexistuje a stiskneme tlačítko graf, tak se zobrazí chybová hláška (Obr. 20). Pokud tato situace nastane, tak se při stisku tlačítka „Spočítej“ v hlavním okně aplikace soubor vytvoří, pokud tedy neexistuje. Jestliže v souboru je méně než 8 řádků s daty nebo je soubor prázdný, tak se zobrazí chybová hláška (Obr. 21). Tento případ nenastane, pokud někdo data úmyslně nesmaže, protože soubor vždy obsahuje 500 řádků s daty. Pokud někdo do datového souboru zapíše nečíselný údaj, tak je řádek s tímto nečíselným údajem ignorován a přeskočen.

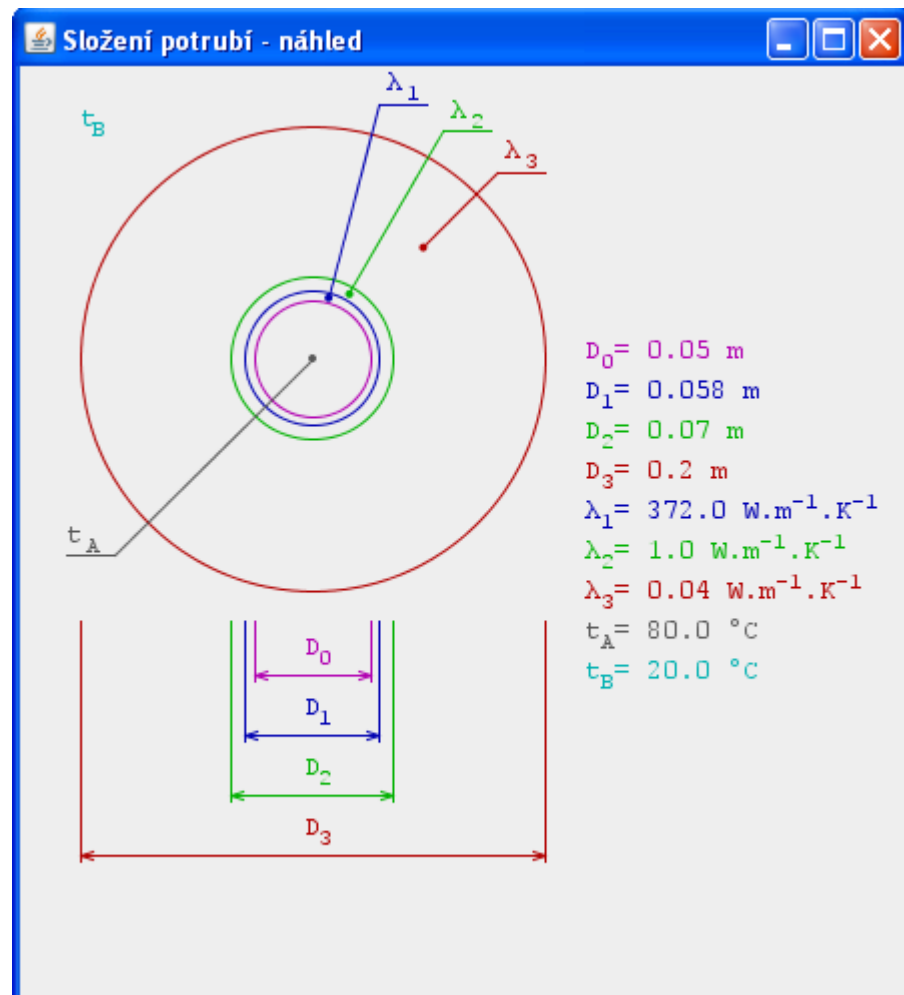


Obr. 20 Chybová hláška pro neexistující soubor u grafu



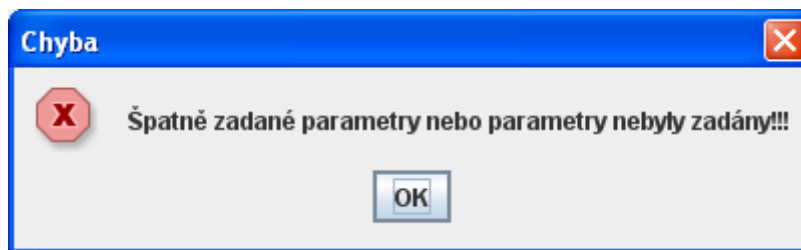
Obr. 21 Chybová hláška u grafu pro málo platných dat

U výpočtu tepelných ztrát při prostupu tepla složenou válcovou stěnou si můžeme nechat vykreslit geometrický náhled stěn potrubí (Obr. 22), kde jsou zobrazeny všechny důležité parametry. K tomu slouží tlačítko „Náhled“. Po stisku tlačítka se zobrazí potrubí v upraveném měřítku. Okno se dá stejně jako okno s grafem různě zvětšovat a zmenšovat.



Obr. 22 Náhled na geometrické složení třívrstvého potrubí

Pokud nejsou zadány potřebná data pro vykreslení, zobrazí se chybová hláška (Obr. 23).



Obr. 23 Chybová hláška pro špatně zadané nebo neuvedené parametry pro náhled

4.2 Struktura programu

Celý program je rozdělen na 8 zdrojových souborů (tříd) z důvodu přehlednosti a lepší orientace v jednotlivých částech kódu. Každá třída se věnuje určitému problému řešení dané úlohy. Všechny tyto zdrojové soubory jsou zkomprimovány do jednoho spustitelného souboru „Bp_opt_tl_izolace.jar.jar“.

4.2.1 Popis jednotlivých tříd

„Bakalarka_krit_prumer.java“ – tato třída má za úkol spustit hlavní okno aplikace s předdefinovanou velikostí a umístěním.

„FileClass.java“ – třída, která obstarává zápis a čtení dat ze souboru „data.txt“. Tyto data jsou pak vstupem pro graf.

„FontHlavniClass.java“ – tato třída se stará o zobrazení textový údajů v hlavním okně aplikace.

„FontPrestupClass.java“ – podobná funkce jako předchozí třída s tím rozdílem, že tento zdrojový soubor se stará o zobrazení textových údajů v okně pro výpočet součinitele přestupu tepla.

„GraphClass.java“ – třída zobrazující graf. Při změna velikosti okna okamžitě daný graf překreslí.

„HlavniClass.java“ – třída, která obstarává vstupní textová pole a funkční prvky v hlavním okně programu.

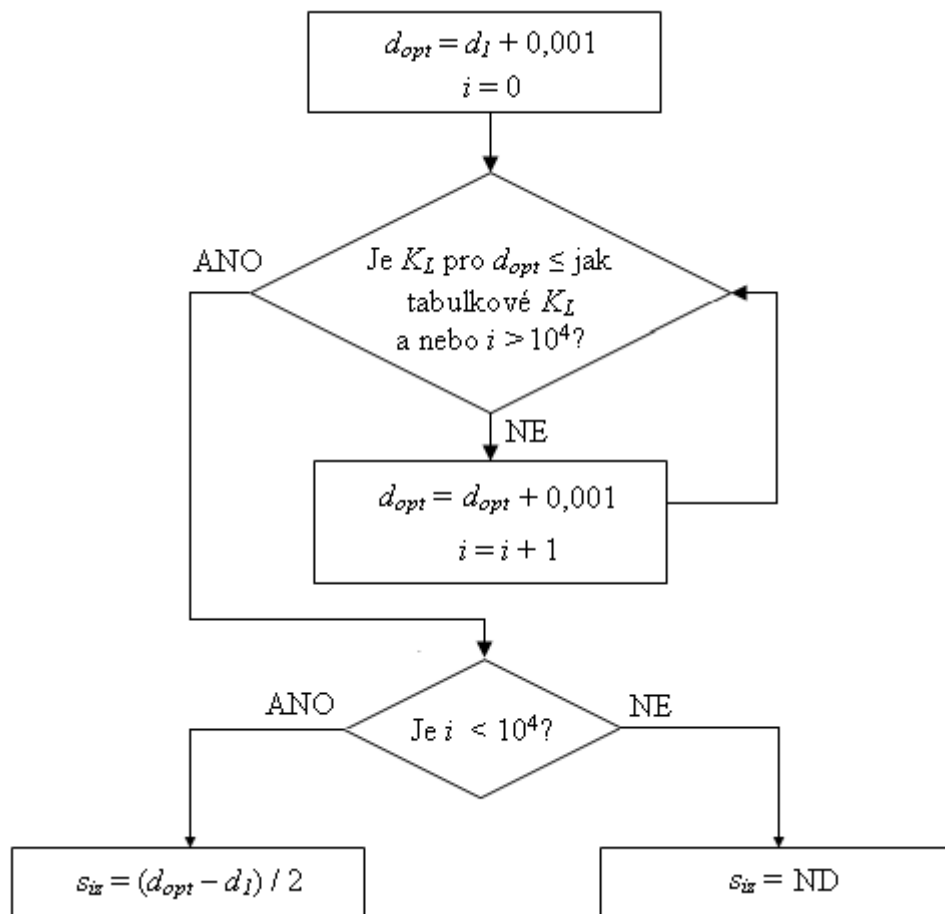
„NahledClass.java“ – slouží pro zobrazení náhledu na potrubí. Pracuje na podobném principu jako třída pro zobrazení grafu.

„PrestupClass.java“ – plní stejnou funkci jako „HlavniClass.java“, akorát hlavní okno nahradilo okno pro výpočet přestupu tepla.

4.2.2 Výpočet požadované tloušťky izolace dle vyhlášky číslo 193 Sb.

Program podle vnitřního průměru trubky d_0 , (v tabulce označeno jako DN), přiřadí k danému potrubí příslušné K_L (Tab. 3). Jelikož nelze analyticky vyjádřit průměr izolace d_B z rovnice (34), ale výpočet je potřeba provést numericky, využil jsem cyklu, jehož vstupní hodnotou je vnější průměr potrubí d_I a k němu je přičtena jedna desetina milimetru. V každém cyklu je vstupní hodnota zvětšena o další desetinu milimetru a následně je spočítán délkový součinitel prostupu tepla K_L . Pokud vypočítaný K_L odpovídá tabulkové hodnotě (Tab. 3) nebo je menší než tabulková hodnota pro daný vnitřní průměr trubky, tak cyklus skončí a dostaneme výslednou tloušťku izolace. Pokud ne, tak se cyklus opakuje.

Cyklus má 10^4 otoček, a pokud ani při poslední otočce se podmínka nesplní, tak do příslušných textových polí pro zobrazení výsledků se uloží „ND“ (není definováno). To znamená, že případná tloušťka izolace je větší než pět metrů a daný materiál se jako izolace určitě nehodí.



Obr. 24 Vývojový diagram pro výpočet optimální tloušťky izolace

5 OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI PROGRAMU SE VZOROVÝMI VÝPOČTY ZTRÁTY TEPLA PROSTUPUM DVOUVRSTVOU VÁLCOVOU STĚNOU

5.1 Dvouvrstvá válcová stěna a kritický průměr izolace

Zadání:

Vypočítejte kritický průměr izolace, prostup tepla a délkový součinitel prostupu tepla při vypočítaném kritickém průměru izolace válcovou stěnou složenou ze stěny trubky a izolace, je-li dáno:

vnitřní průměr trubky $d_0 = 0,1$ m

vnější průměr trubky $d_1 = 0,11$ m

součinitel tepelné vodivosti trubky $\lambda_l = 30 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

součinitel tepelné vodivosti izolace $\lambda_{iz} = 0,5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

délka potrubí $L = 3$ m

teplota média uvnitř trubky $t_A = 80$ °C

teplota okolní tekutiny $t_B = 20$ °C

teplota povrchu izolace $t_{iz} = 21$ °C

součinitel přestupu tepla na vnitřní straně trubky $\alpha_A = 500 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$

součinitel přestupu tepla na vnější straně izolace $\alpha_B = 6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$.

Řešení:

Nejprve jsem vypočítal kritický průměr izolace, který jsem dosadil do rovnice pro tepelný tok stěnou trubky. Nakonec jsem pro vypočtenou hodnotu tepelného toku vypočítal délkový součinitel prostupu tepla.

5.1.1 Určení kritického průměru izolace

K určení kritického průměru izolace jsem využil vztah (40):

$$d_{2kr} = \frac{2 \cdot \lambda_{iz}}{\alpha_B} = \frac{2 \cdot 0,5}{6} = 0,1\bar{6} \text{ m} \quad (41)$$

5.1.2 Výpočet ztrát tepla prostupem

Pro výpočet prostupu tepla válcovou stěnou složenou ze dvou vrstev (stěna trubky a vrstva izolace) jsem využil vztah (36):

$$\dot{Q} = \frac{\pi \cdot L \cdot (t_A - t_B)}{\frac{1}{\alpha_A \cdot d_0} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_1} \ln\left(\frac{d_1}{d_0}\right) + \frac{1}{2 \cdot \lambda_{iz}} \ln\left(\frac{d_{2kr}}{d_1}\right) + \frac{1}{\alpha_B \cdot (d_{2kr})}} \quad (42)$$

$$\dot{Q} = \frac{\pi \cdot 3 \cdot (80 - 20)}{\frac{1}{500 \cdot 0,1} + \frac{1}{2 \cdot 30} \ln\left(\frac{0,11}{0,1}\right) + \frac{1}{2 \cdot 0,5} \ln\left(\frac{0,1\bar{6}}{0,11}\right) + \frac{1}{6 \cdot (0,1\bar{6})}} = 393,48W \quad (43)$$

5.1.3 Výpočet délkového součinitele prostupu tepla

Výpočet délkového součinitele prostupu tepla jsem odvodil z rovnice (25) a poté spočítal:

$$\dot{Q} = K_L \cdot L \cdot \Delta T \Rightarrow K_L = \frac{\dot{Q}}{L \cdot (t_A - t_B)} = \frac{393,48}{3 \cdot (80 - 20)} = 2,18W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1} \quad (44)$$

5.1.4 Porovnání vypočítaných hodnot

Při ručním výpočtu za pomoci kalkulačky vyšel kritický průměr izolace $d_{2kr} = 0,1\bar{6}m$, dále tepelný tok $\dot{Q} = 393,48W$ a délkový součinitel prostupu tepla $K_L = 2,18W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$.

Vypočítané hodnoty pomocí aplikace jsou $d_{2kr} = 0,1666m$, $\dot{Q} = 393,48W$ a $K_L = 2,18W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$, jak je vidět na Obr. 25. U porovnání výsledků se dvěma desetinnými místy se ruční výpočty shodovaly s výpočty s využitím aplikace.

Prostup tepla a kritický průměr

Tepelné ztráty prostupem \dot{Q}

Kritický průměr d_{2kr} **Graf**

Počet vrstev $n(d)$:

Vnitřní průměr d
 d_0 m

Vnější průměry $d_1 \dots d_5$
 d_1 m d_2 m
 d_3 m d_4 m
 d_5 m

Součinitelé tepelné vodivosti $\lambda_1 \dots \lambda_5$
 λ_1 W.m⁻¹.K⁻¹ λ_{iz} W.m⁻¹.K⁻¹
 λ_3 W.m⁻¹.K⁻¹ λ_4 W.m⁻¹.K⁻¹
 λ_5 W.m⁻¹.K⁻¹

Délka potrubí
 L m

Teplota média uvnitř potrubí
 t_A °C

Teplota okolí
 t_B °C

Teplota povrchu izolace
 t_{iz} °C

Součinitel přestupu tepla na vnitřní straně
 α_A W.m⁻².K⁻¹

Součinitel přestupu tepla na vnější straně
 α_B W.m⁻².K⁻¹ **Urči α :**

SPOČÍTEJ

Střední teplota $t_{stř}$ °C

Tepelné ztráty při d_{2kr} \dot{Q} W

Délkový součinitel prostupu tepla
 při d_{2kr} K_L W.m⁻¹.K⁻¹

Kritický průměr izolace d_{2kr} m

Doporučená tloušťka izolace s m

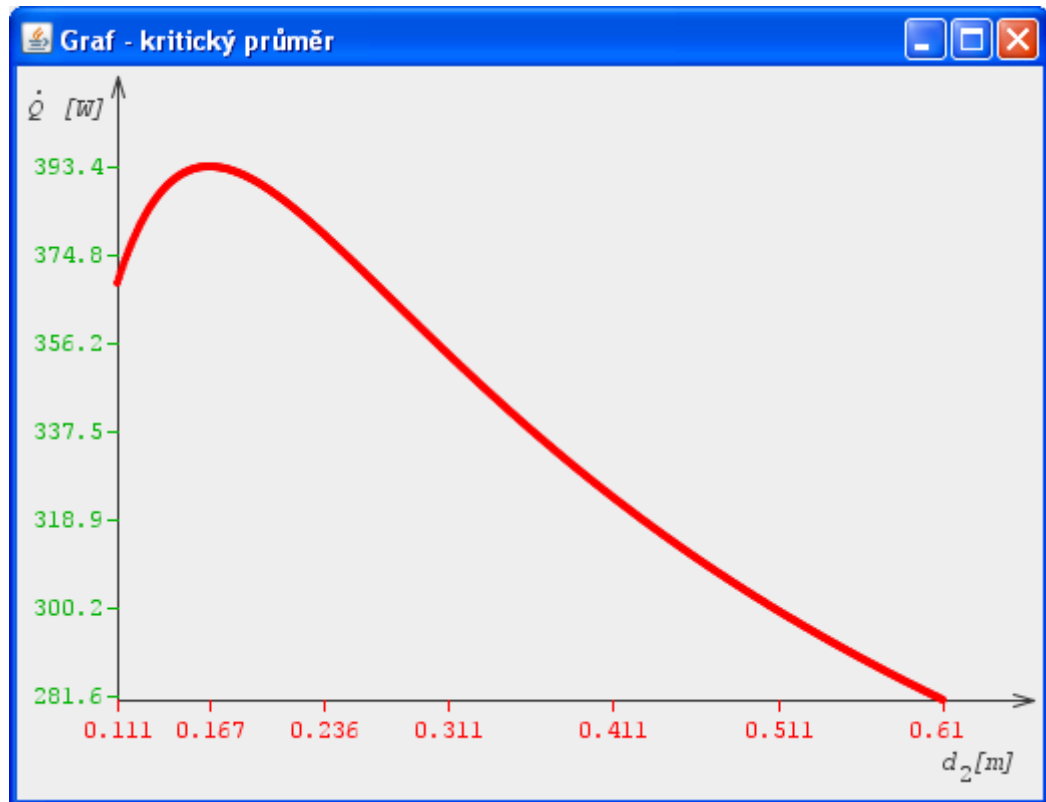
Tepelné ztráty při doporučené tloušťce izolace
 \dot{Q}_s W

Úspora energie při doporučené tloušťce izolace
 u %

Obr. 25 Hlavní okno s vypočítanými hodnotami

Aplikace zde také nabízí zobrazení grafu, na němž je zobrazena závislost tepelného toku na vnějším průměru izolace. Na Obr. 26 je jasně patrné maximum v bodě

$d_2 = 0,167\text{ m}$, jemuž odpovídá $\dot{Q} = 393,4\text{ W}$ a to je pro daný případ kritický průměr izolace, od kterého se tepelné ztráty potrubí pouze snižují a konvergují k nule v plus nekonečnu.



Obr. 26 Graf závislosti prostupu tepla na vnějším průměru izolace pro první příklad

5.2 Výpočet součinitele přestupu tepla na vnější straně izolace při volné konvekci

Zadání:

Vypočítejte součinitel přestupu tepla mezi povrchem izolace a okolním prostředím, jestliže znáte následující hodnoty:

- pro vodorovné - vnější průměr izolace $d_2 = 0,2\text{ m}$
- pro svislé – výška potrubí $l = 3\text{ m}$

teplota okolního prostředí $t_B = 20\text{ °C}$

teplota povrchu izolace $t_{iz} = 30\text{ °C}$

střední teplota povrchu izolace $t_{stř} = (t_B + t_{iz}) / 2 = 25\text{ °C}$.

Následující vlastnosti se týkají okolního prostředí, kterým je vzduch, jehož termofyzikální vlastnosti jsou uvedeny při jeho střední teplotě:

$$\text{součinitel tepelné vodivosti } \lambda = 0,02609 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$\text{hustota } \rho = 1,1454 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$\text{měrná tepelná kapacita } c_p = 993,77 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$\text{kinematická viskozita } \nu = 0,000016 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\text{a teplotní objemová roztažnost } \beta = 0,003354 \text{ K}^{-1}.$$

Řešení:

Nejprve spočítám Prandtlovo kritérium podle vztahu (24) a poté Grashofovo kritérium podle vztahu (25). Po výpočtu těchto dvou kritérií určím koeficienty C a n podle (Tab. 1) a následně spočítám Nusseltovo kritérium podle rovnice (26). Jakmile mám spočteno Nusseltovo kritérium, tak z rovnice (20) vyjádřím součinitel přestupu tepla α a spočítám jeho hodnotu.

5.2.1 Výpočet Prandtlova kritéria

Stačí dosadit hodnoty do vztahu (24):

$$\text{Pr} = c_p \frac{\eta}{\lambda} = c_p \cdot \frac{\nu \cdot \rho}{\lambda} = \frac{0,000016 \cdot 1,1454}{0,02609} = 0,6981 \quad (45)$$

5.2.2 Výpočet Grashofova kritéria

Opět dosadím potřebné parametry tentokrát do vztahu (25):

$$\text{a) } Gr = \frac{gd_2^3}{\nu^2} \beta \Delta t = \frac{9,82 \cdot 0,2^3}{0,000016^2} \cdot 0,003354 \cdot (30 - 20) = 1,0292 \cdot 10^7 \quad (46)$$

$$\text{b) } Gr = \frac{gl^3}{\nu^2} \beta \Delta t = \frac{9,82 \cdot 3^3}{0,000016^2} \cdot 0,003354 \cdot (30 - 20) = 3,47 \cdot 10^{10}. \quad (47)$$

5.2.3 Určení koeficientů C a n

Koeficienty určím podle součinu Grashofova a Prandtlova kritéria:

$$\text{a) } Gr \cdot \text{Pr} = 1,0292 \cdot 10^7 \cdot 0,6981 = 7,185 \cdot 10^6 \quad (48)$$

$$b) \quad Gr \cdot Pr = 3,47 \cdot 10^{10} \cdot 0,6981 = 2,43 \cdot 10^{10} . \quad (49)$$

Z (Tab. 1) podle výsledku předešlého součinu určím koeficienty C , n :

$$a) \quad C = 0,54, \quad n = 0,25 \quad (50)$$

$$b) \quad C = 0,135, \quad n = 1/3 \quad (51)$$

5.2.4 Výpočet Nusseltova kritéria

Do vztahu (26) dosadím součin Grashofova a Prandtlova kritéria s koeficienty C a n :

$$a) \quad Nu = C \cdot (Gr \cdot Pr)^n = 0,54 \cdot (0,6981 \cdot 1,0292 \cdot 10^7)^{0,25} = 27,957 \quad (52)$$

$$b) \quad Nu = C \cdot (Gr \cdot Pr)^n = 0,135 \cdot (3,47 \cdot 10^{10} \cdot 0,6981)^{1/3} = 390,45 \quad (53)$$

5.2.5 Výpočet součinitele přestupu tepla

Z rovnice (20) vyjádřím a spočítám α :

$$a) \quad Nu = \frac{\alpha \cdot d_2}{\lambda} \Rightarrow \alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_2} = \frac{27,957 \cdot 0,02609}{0,2} = 3,647W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \quad (54)$$

$$b) \quad Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} \Rightarrow \alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{l} = \frac{390,45 \cdot 0,02609}{3} = 3,396W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \quad (55)$$

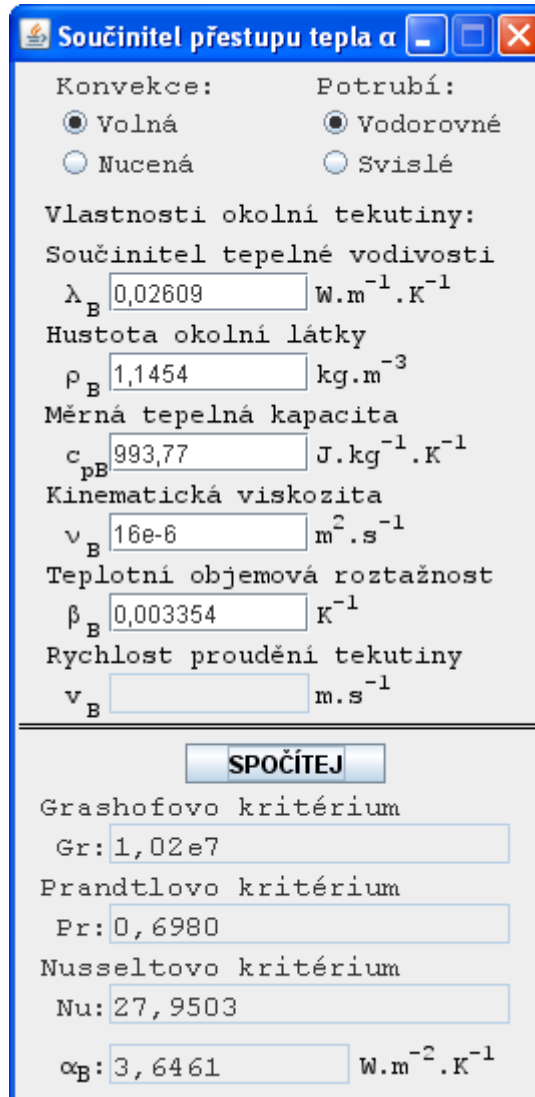
5.2.6 Porovnání vypočítaných hodnot

Při ručním výpočtu u vodorovného potrubí za pomoci kalkulačky mi hodnota Prandtlova kritéria vyšla $Pr = 0,6981$, hodnota Grashofova $Gr = 1,0292 \cdot 10^7$ a hodnota Nusseltova kritéria byla $Nu = 27,957$. Součinitel přestupu tepla vyšel $\alpha = 3,647W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$.

Aplikace vygenerovala $Pr = 0,6980$, $Gr = 1,02 \cdot 10^7$, $Nu = 27,9503$ a $\alpha = 3,6461W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$, jak je patrné z Obr. 27.

Při výpočtu u svislého potrubí Prandtlovo kritérium vyšlo stejně jako u svislého potrubí. Hodnoty Grashofova a Nusseltova kritéria byly $Gr = 3,47 \cdot 10^{10}$ a $Nu = 390,45$. Součinitel přestupu tepla vyšel $\alpha = 3,396W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$.

Program vypočítal $Gr = 3,47 \cdot 10^{10}$, $Nu = 390,6148$ a $\alpha = 3,3970 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$. Rozdíly mezi ručním výpočtem a výpočtem pomocí programu byly minimální a byly způsobeny zaokrouhlováním.



Součinitel přestupu tepla α

Konvekce: Potrubí:
 Volná Vodorovné
 Nucená Svislé

Vlastnosti okolní tekutiny:
Součinitel tepelné vodivosti
 λ_B 0,02609 $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Hustota okolní látky
 ρ_B 1,1454 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Měrná tepelná kapacita
 c_{pB} 993,77 $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Kinematická viskozita
 ν_B 16e-6 $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
Teplotní objemová roztažnost
 β_B 0,003354 K^{-1}
Rychlost proudění tekutiny
 v_B $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

SPOČÍTEJ

Grashofovo kritérium
Gr: 1,02e7
Prandtlovo kritérium
Pr: 0,6980
Nusseltovo kritérium
Nu: 27,9503
 α_B : 3,6461 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$

Obr. 27 Okno s vypočítaným součinitelem přestupu tepla

5.3 Výpočet součinitele přestupu tepla na vnější straně izolace při nucené konvekci

Zadání:

Vypočítejte součinitele přestupu tepla na mezi povrchem izolace a okolním prostředím, jestliže znáte:

$$\text{rychlost proudění } v = 0,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Ostatní potřebné hodnoty jsou stejné, jako v zadání předchozího příkladu.

Řešení:

U nucené konvekce se za charakteristický rozměr l dosazuje pouze vnější průměr izolace.

Nejprve spočítám Prandtlovo kritérium podle vztahu (24), jehož hodnota bude stejná jako u výše uvedeného příkladu s výpočtem součinitele přestupu tepla při volno konvekci. Poté vypočítám Reynoldsovo kritérium podle vztahu (22). Po výpočtu obou kritérií určím podle rovnice (32) Nusseltovo kritérium. Součinitel přestupu tepla α spočítám obdobně jako v předchozím příkladu.

5.3.1 Výpočet Reynoldsova kritéria

Dosazením potřebných argumentů do vztahu (22) jsem obdržel:

$$\text{Re} = \frac{\nu \cdot l}{\nu} = \frac{0,2 \cdot 0,2}{0,000016} = 2500 \quad (56)$$

5.3.2 Výpočet Nusseltova kritéria a součinitele přestupu tepla

Nusseltovo kritérium jsem vypočítal podle vzorce (32) dosazením Reynoldsova a Prandtlava kritéria:

$$\text{Nu} = 0,3 + \frac{0,62 \cdot \text{Re}^{0,5} \cdot \text{Pr}^{1/3}}{\left[1 + \left(\frac{0,4}{\text{Pr}}\right)^{2/3}\right]^{0,25}} \left[1 + \left(\frac{\text{Re}}{282000}\right)^{5/8}\right]^{0,8} \quad (57)$$

$$\text{Nu} = 0,3 + \frac{0,62 \cdot 2500^{0,5} \cdot 0,6981^{1/3}}{\left[1 + \left(\frac{0,4}{0,6981}\right)^{2/3}\right]^{0,25}} \left[1 + \left(\frac{2500}{282000}\right)^{5/8}\right]^{0,8} = \quad (58)$$

$$\text{Nu} = 0,3 + \frac{27,5 \cdot 1,0415}{1,1402} = 25,419 \quad (59)$$

Součinitele přestupu tepla jsem spočítal stejně jako v předchozím příkladu:

$$\alpha = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda}{l} = \frac{25,419 \cdot 0,02609}{0,2} = 3,316 \quad (60)$$

5.3.3 Porovnání vypočítaných hodnot

Při ručním počítání za pomoci kalkulačky Reynoldsovo kritérium vyšlo $Re = 2500$, Nusseltovo $Nu = 25,419$ a součinitel přestupu tepla vyšel $\alpha = 3,316W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$.

Aplikace vygenerovala $Re = 2500$, $Nu = 25,4202$ a $\alpha = 3,3160W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$.

Rozdíly mezi ručním výpočtem a výpočtem pomocí programu jsou stejně jako v předchozím příkladu opět minimální a jsou způsobeny zaokrouhlováním zejména při složitém ručním výpočtu podle vztahu (32).

5.4 Určení optimální tloušťky izolace potrubí

Zadání:

Ověřte výpočet optimální tloušťky izolace dle vyhlášky číslo 193 Sb. pro trubku o vnitřním průměru 32 mm a o tloušťce stěny 2 mm. Délka potrubí je 1 metr. Také ověřte úsporu energie. Součinitel tepelné vodivosti pro trubku je $372 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ a pro izolaci $0,04W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$. Teplota média uvnitř trubky je $70^{\circ}C$ a teplota okolního prostředí je $20^{\circ}C$. Součinitel přestupu tepla na vnitřní straně trubky je $500 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ a na vnější straně izolace $10 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$.

Řešení:

Po spuštění aplikace jsem vložil potřebné parametry a spustil jsem výpočet. Program vygeneroval optimální tloušťku izolace. Poté jsem dosadil do vztahu (34) programem určenou optimální tloušťku izolace a spočítal délkový součinitel prostupu tepla a srovnal jsem jej s hodnotou z (Tab. 3), kterou jsem určil podle vnitřního průměru trubky $0,18 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$. Dále jsem spočítal pomocí vztahu (35) tepelný tok stěnou nezaizolované trubky a poté tepelný tok trubkou pokrytou izolací a vypočítal jsem úsporu energie v procentech.

5.4.1 Ověření optimální tloušťky izolace

Program vygeneroval optimální tloušťku izolace 50,6 mm. To znamená, že vnější průměr izolace je 137,2 mm. Nyní jsem vnější průměr izolace dosadil do rovnice (34) a pomocí kalkulačky spočítal délkový součinitel prostupu tepla.

$$K_L = \frac{\pi}{\frac{1}{\alpha_A \cdot d_0} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_1} \cdot \ln \frac{d_1}{d_0} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_{iz}} \cdot \ln \frac{d_{iz}}{d_1} + \frac{1}{\alpha_B \cdot d_{iz}}} \quad (61)$$

$$K_L = \frac{\pi}{\frac{1}{500 \cdot 0,032} + \frac{1}{2 \cdot 372} \cdot \ln \frac{0,036}{0,032} + \frac{1}{2 \cdot 0,04} \cdot \ln \frac{0,1372}{0,036} + \frac{1}{10 \cdot 0,1372}} \quad (62)$$

$$K_L = 0,1793W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$$

Podle vztahu (35) jsem vypočítal tepelný tok samotnou stěnou trubky bez izolace:

$$\dot{Q} = \frac{\pi \cdot (t_A - t_B) \cdot l}{\frac{1}{\alpha_A \cdot d_0} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_1} \cdot \ln \frac{d_1}{d_0} + \frac{1}{\alpha_B \cdot d_1}} \quad (63)$$

$$\dot{Q} = \frac{\pi \cdot (70 - 20) \cdot 1}{\frac{1}{500 \cdot 0,032} + \frac{1}{2 \cdot 372} \cdot \ln \frac{0,036}{0,032} + \frac{1}{10 \cdot 0,036}} = 55,3W \quad (64)$$

Nyní jsem spočítal tepelný tok potrubím s izolací. Využil jsem už spočítaný délkový součinitel prostupu tepla.

$$\dot{Q}_S = K_L \cdot L \cdot \Delta T = 0,1793 \cdot 1 \cdot 50 = 8,965W \quad (65)$$

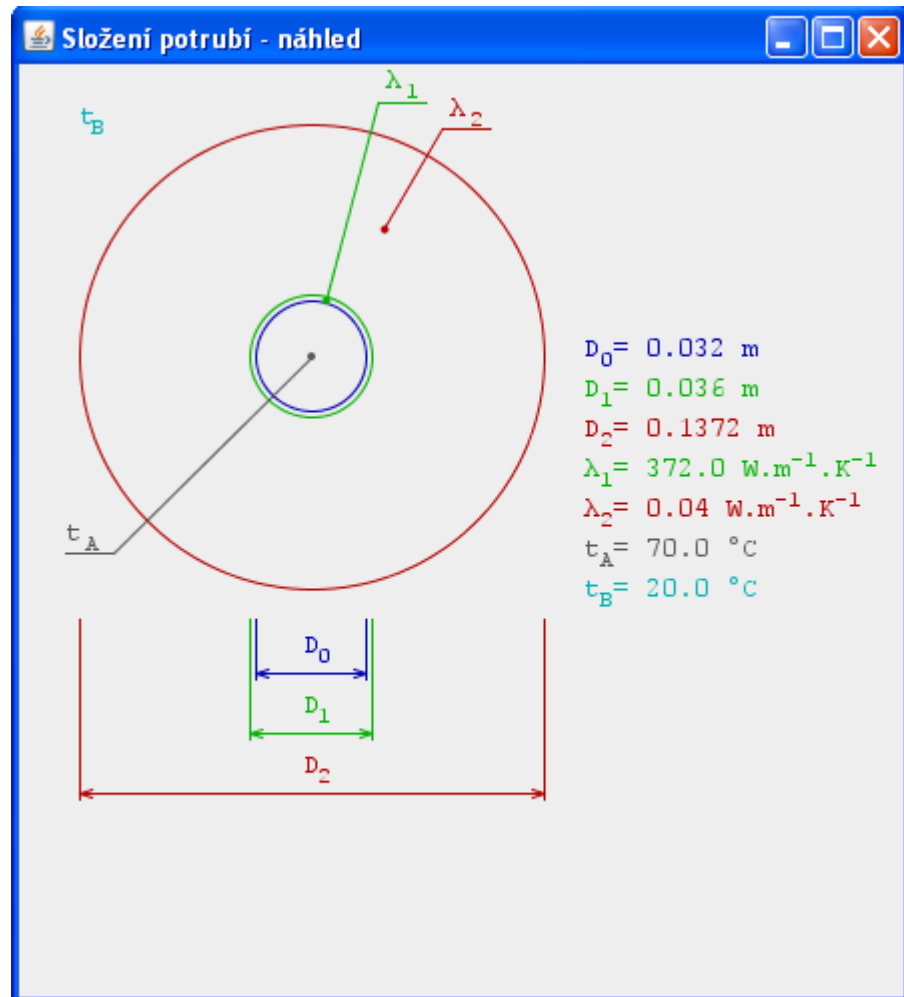
Na závěr jsem určil tepelnou úsporu v procentech:

$$u = 100 \cdot \left(1 - \frac{\dot{Q}_S}{\dot{Q}}\right) = 100 \cdot \left(1 - \frac{8,965}{55,3}\right) = 83,79\% \quad (66)$$

5.4.2 Porovnání vypočítaných hodnot

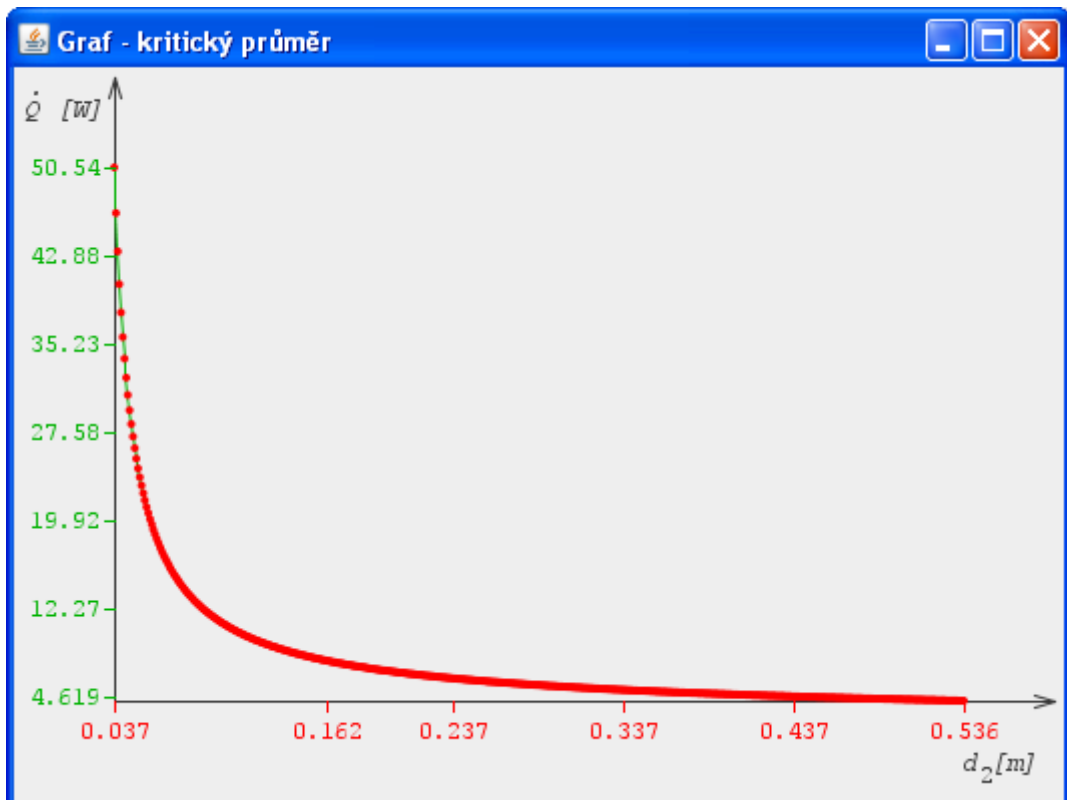
Pomocí vytvořeného programu jsem určil optimální tloušťku izolace jako 50,6 mm pro potrubí o vnitřním průměru 0,032 mm a energetická úspora podle aplikace dosahuje 83,76%. Ručním výpočtem jsem ověřil správnost vypočtené tloušťky izolace. Ve výpočtu se úspora energie lišila pouze o dvě setiny procenta z důvodu zaokrouhlování.

Geometrický náčrt stěny trubky s vypočtenými hodnotami je zobrazen na Obr. 28.



Obr. 28 Náhled na složení potrubí s optimální tloušťkou izolace

Ukážeme si také jak, vypadá závislost prostupu tepla na vnějším průměru izolace pro vhodně zvolený materiál, viz (Obr. 29). Na grafu je jasně patrné, že od vnějšího průměru potrubí 16,2 cm se tepelné ztráty jenom pozvolna zmenšují a konvergují v nule pro teoreticky nekonečnou tloušťku izolace.



Obr. 29 Graf závislosti prostupu tepla na vnějším průměru izolace pro vhodně zvolený materiál izolace

ZÁVĚR

Cílem mé bakalářské práce bylo stanovení kritické a optimální tloušťky izolace na základě tepelných ztrát vzniklých prostupem tepla složenou válcovou stěnou.

V teoretické části práce jsem se zabýval studiem prostupu tepla složenou válcovou stěnou. Popsal a uvedl jsem základní myšlenky a vztahy týkající se vedení tepla ve stěně válce a sdílení tepla pomocí proudění. Dále jsem popsal vztahy pro výpočet tepelných ztrát prostupem složenou válcovou stěnou. Uvedl jsem kritériální rovnice, které jsou nezbytné pro výpočet součinitele přestupu tepla.

V praktické části práce jsem v programovacím jazyku Java ve vývojovém prostředí NetBeans IDE 7.0.1 vytvořil softwarovou aplikaci pro výpočet tepelných ztrát potrubí. Na základě těchto ztrát je stanovena optimální tloušťka tepelné izolace. Program umožňuje provádět výpočet tepelných ztrát vícevrstvou válcovou stěnou tvořenou stěnou trubky a izolací s optimální tloušťkou. Takto vypočítané tepelné ztráty porovná s tepelnými ztrátami neizolovaného potrubí. Poté spočítá energetickou úsporu v procentech vzhledem k neizolovanému potrubí. Aplikace vypočítá také kritický průměr izolace, což je hodnota, od které se tepelné ztráty pouze snižují. Program nabízí možnost zobrazení závislosti tepelných ztrát na vnějším průměru izolace. Ze závislosti můžeme vyčíst, zda je zvolený materiál pro izolaci vhodný. Aplikace nabízí také náhled na geometrický náčrt potrubí a umožňuje také výpočet tepelných ztrát válcovou stěnou složenou ze dvou až pěti vrstev.

V praktické části bakalářské práce jsem uvedl vzorové příklady na výpočet tepelných ztrát potrubí, kritického průměru izolace, výpočet součinitele přestupu tepla na vnější straně izolace pro volnou a nucenou konvekci, pro vodorovné a svislé potrubí. Jako poslední vzorový příklad jsem uvedl stanovení optimální tloušťky izolace dle vyhlášky čísla 193 Sb. Na těchto příkladech jsem demonstroval a ověřil správnost výpočtů mé aplikace. Uvedené výsledky, které jsem spočítal bez použití aplikace se shodují s výsledky aplikace.

Přínos mé práce spočívá především v možnosti využití aplikace pro dílčí výpočty při návrhu izolací válcových stěn v technické praxi, které zajistí optimální tepelné ztráty stěnou potrubí, což se může výrazně projevit ve snížení ekonomických nákladů.

ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ

The aim of my thesis was to determine the critical and optimum thickness of insulation based on heat losses arisen from heat transfer at composite cylindrical wall.

In the theoretical part of the work I have studied the heat transfer at composite cylindrical wall. I stated and described the basic ideas and relations concerning heat conduction in the cylinder wall and heat transfer by convection. I also described the relations for calculating heat loss at the composite cylindrical wall. I stated criterial equations necessary for calculating the heat transfer coefficient.

I have created software application to calculate the heat losses at pipes in Java language (programming environment NetBeans IDE 7.0.1) in the practical part. From these losses is calculated optimal insulation thickness. The program allows to calculate the heat loss at multilayer cylindrical wall formed by the wall of the pipe and insulation with optimum thickness. Calculated heat loss is compared to the heat loss of uninsulated piping. Then is calculated percentage of energy savings due to uninsulated pipe. The application also calculates the critical diameter of insulation, which is the value from which the heat loss will be only reduced. The program offers the opportunity to show heat loss depending on the outer diameter of the insulation. We can then determine whether the selected material is suitable for insulation. The application also offers insight into the geometric layout of pipes and also allows the calculation of heat losses at cylindrical wall composed of two to five layers.

In the practical part of the thesis I pointed out examples of calculation the heat loss from pipes, critical diameter of the insulation, heat transfer coefficient on the outer side of the insulation for free and forced convection, horizontal and vertical pipes. As last example, I determined the optimal thickness of insulation according to the decree number 193 Sb. In these examples, I demonstrated and verified accuracy of calculations of my application. Results calculated without using application coincide with the application results.

The contribution of my work lies in the possibilities of using the application in the design calculations of cylindrical wall insulation in engineering practice to ensure optimal heat pipe wall loss, which can result in significant reduction of economic costs.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] KOLOMAZNÍK, K., J. SEDLÁŘ a A. MACHÁČKOVÁ. *Teorie technologických procesů III*. Brno: VUT v Brně, 1978.
- [2] MÍKA, V. a J. VLČEK. *Příklady a úlohy z chemického inženýrství. Díl 2*. Praha: VŠCHT, 1997. ISBN 80-7080-305-3.
- [3] HASAL, P. a D. ŠNITA A KOLEKTIV. *Chemické inženýrství I*. Praha: VŠCHT, 2007. ISBN 978-80-7080-002-7.
- [4] ŠNITA, D. A KOLEKTIV. *Příklady a úlohy z chemického inženýrství. III*. Praha: VŠCHT, 2002. ISBN 80-7080-493-9.
- [5] PŘÍHODA, M. a M. RÉDR. *Sdílení tepla a proudění*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1748-4.
- [6] HEJZLAR, R. *Sdílení tepla*. Praha: ČVUT, Jaderná a fyzikálně inženýrská fakulta, 1999. ISBN 80-01-01982-9.
- [7] VOMOČIL, Z. a Z. HAJKR. *Cvičení do sdílení tepla a proudění*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství, 2000. ISBN 80-7078-793-7.
- [8] Stavba - TZB-info [online]. 2001-2012 [cit. 2012-01-17]. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/>
- [9] JÍLEK, Miroslav a Zdeněk RANDA. *Termomechanika: sbírka příkladů*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004, 168 s. ISBN 80-01-03107-1.
- [10] *Chemické inženýrství pro bakaláře: Sdílení tepla*. 2005. Dostupné z: <http://www.vscht.cz/uchi/ped/bc05/07.sdileni.tepla.pdf>
- [11] *Vedení tepla* - Wikipedie. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2012-06-03]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Vedení_tepla
- [12] *Měření*. *Gymnázium Klatovy, Fyzikální sekce: O pohár Becaria* [online]. © 2003 - 2004 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: <http://bec.fyzika.net/silomer.html>
- [13] *Proudění, nepřetržitý, souvislý, hromadný pohyb tekutin, elektřiny, shluku pevných částic* - CoJeCo - *Vaše encyklopedie*. *CoJeCo - Vaše encyklopedie*

- [online]. ©1999-2012 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: http://www.cojeco.cz/index.php?detail=1&id_desc=77176&s_lang=2
- [14] Minerální izolace a její použití. *Odborný portál pro profesionály v oblasti stavebnictví | asb-portal.cz* [online]. 17.09.2009 [cit. 2012-05-28]. Dostupné z: <http://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/materialy-a-vyrobky/tepelne-izolace/mineralni-izolace-a-jeji-pouziti-1459.html>
- [15] Technické a průmyslové izolace | ISOVER. *ISOVER: tepelné izolace, zvukové izolace a protipožární izolace* [online]. [2012] [cit. 2012-05-28]. Dostupné z: <http://www.isover.cz/technicke-a-prumyslove-izolace>
- [16] Systém PUR-IZOLACE. PUR IZOLACE [online]. © 2010 [cit. 2012-05-28]. Dostupné z: <http://www.pur.cz/cz/svisle-plochy/system-pur-izolace/>
- [17] Izolace trubek z minerálních vláken. *NÁŘADÍ PRO* [online]. [2012] [cit. 2012-05-28]. Dostupné z: <http://www.naradi-pro.cz/izolace-trubek-z-mineralnich-vlaken>
- [18] K-Flex EC hadice | K-FLEX izolace ze syntetického kaučuku. *K-FLEX izolace ze syntetického kaučuku* [online]. © 2007 - 2010 [cit. 2012-05-28]. Dostupné z: <http://www.kflex-izolace.cz/izolace/kflex-ec-adhesive.php>
- [19] Tepelné izolace: trubice MIRELON. MIREL TRADING a.s. [online]. © 2000-2010 [cit. 2012-05-29]. Dostupné z: <http://www.mirelon.com/cs/trubice.php>
- [20] Vyhláška, kterou se stanoví podrobnosti účinnosti užití energie při rozvodu tepelné energie a vnitřním rozvodu tepelné energie a chladu. In: č. 193/2007 Sb. 2007. Dostupné z: <http://aplikace.mvcr.cz/archiv2008/sbirka/2007/sb062-07.pdf>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

A	plocha [m ²]
C	konstanta [1]
Gr	Grashofovo kritérium [1]
Nu	Nusseltovo kritérium [1]
L	délka potrubí [m]
Pe	Pécletovo kritérium [1]
Pr	Prandtlovo kritérium [1]
Pr_w	Prandtlovo kritérium při teplotě stěny [1]
Q	teplo, tepelná energie [J]
\dot{Q}	tepelný tok [W]
R	tepelný odpor [K·W ⁻¹]
Re	Reynoldsovo kritérium [1]
S	průřez [m ²]
T	teplota [K nebo °C]
a	součinitel teplotní vodivosti [m ² ·s ⁻¹]
c_p	měrná tepelná kapacita [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
K_L	délkový součinitel prostupu tepla [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
l	charakteristický rozměr [m]
n	konstanta [1]
q	hustota tepelného toku [W·m ⁻²]
r	poloměr válce [m]
t	teplota [°C]
$\langle t \rangle$	střední teplota tekutiny [°C]
t_f	teplota tekutin [°C]

t_w	teplota tekutiny na rozhraní [$^{\circ}\text{C}$]
v	rychlost proudící tekutiny [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
α	součinitel přestupu tepla [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]
β	teplotní objemová roztažnost [K^{-1}]
δ	tloušťka stěny válce [m]
η	dynamická viskozita [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]
η_w	dynamická viskozita při teplotě stěny [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]
λ	součinitel tepelné vodivosti [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]
τ	čas [s]
ρ	hustota [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
ν	kinematická viskozita [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Řez jednoduchou válcovou stěnou [3], [11].....	12
Obr. 2 Odvození teplotního gradientu [11].....	13
Obr. 3 Řez složenou válcovou stěnou [3], [11]	15
Obr. 4 Znázornění přestupu tepla [4], [11]	16
Obr. 5 Laminární proudění [13].....	19
Obr. 6 Turbulentní proudění [13]	20
Obr. 7 Prostup tepla složenou válcovou stěnou[1], [6].....	21
Obr. 8 Prostup tepla válcovou stěnou složenou z trubky a izolace [6].....	24
Obr. 9 Vhodně zvolená izolace.....	26
Obr. 10 Nevhodně zvolená izolace	26
Obr. 11 Izolace potrubí kamennou minerální vlnou [17]	29
Obr. 12 Izolace potrubí PUR pěnou [17].....	30
Obr. 13 Izolace potrubí pěnovým polyethylenem [17].....	31
Obr. 14 Izolace syntetickým kaučukem[17]	31
Obr. 15 Hlavní okno aplikace	35
Obr. 16 Okno pro výpočet součinitele prostupu tepla na vnější straně izolace.....	37
Obr. 17 Chybová hláška u hlavního okna aplikace	38
Obr. 18 Chybová hláška u okna pro výpočet přestupu tepla	38
Obr. 19 Graf znázorňující závislost prostupu tepla na vnějším průměru izolace.....	39
Obr. 20 Chybová hláška pro neexistující soubor u grafu	39
Obr. 21 Chybová hláška u grafu pro málo platných dat	40
Obr. 22 Náhled na geometrické složení třívrstvého potrubí.....	40
Obr. 23 Chybová hláška pro špatně zadané nebo neuvedené parametry pro náhled.....	41
Obr. 24 Vývojový diagram pro výpočet optimální tloušťky izolace.....	43
Obr. 25 Hlavní okno s vypočítanými hodnotami.....	46
Obr. 26 Graf závislosti prostupu tepla na vnějším průměru izolace pro první příklad	47
Obr. 27 Okno s vypočítaným součinitelem přestupu tepla.....	50
Obr. 28 Náhled na složení potrubí s optimální tloušťkou izolace	54
Obr. 29 Graf závislosti prostupu tepla na vnějším průměru izolace pro vhodně zvolený materiál izolace.....	55

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Konstanty pro výpočet rovnice (26)	18
Tab. 2 Nejpoužívanější materiály na izolace [8]	23
Tab. 3 Délkové součinitele tepla pro vnitřní rozvody [20].....	31

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha PI

**PŘÍLOHA P I: CD DISK SE ZDROJOVÝMI KÓDY VYTVOŘENÉ
SOFTWAREVÉ APLIKACE A ELEKTRONICKOU VERZÍ
BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**