

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV PROCESNÍHO A EKOLOGICKÉHO
INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PROCESS AND ENVIRONMENTAL
ENGINEERING

VÝPOČET TEPELNÝCH ZTRÁT A IZOLACE POTRUBÍ

CALCULATION OF HEAT LOSS AND PIPE INSULATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JAN TUČEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. BOHUSLAV KILKOVSKÝ, Ph.D.

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav procesního a ekologického inženýrství

Akademický rok: 2010/11

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Jan Tuček

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Energetika, procesy a ekologie (3904R030)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Výpočet tepelných ztrát a izolace potrubí

v anglickém jazyce:

Calculation of heat loss and pipe insulation

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Úkolem bakalářské práce je popsat princip ztrát tepla proudící látky v potrubí do okolí a provést její výpočet. Dále pak navrhnout vhodnou tloušťku izolace potrubí, která by zabránila nevyhovujícím tepelným ztrátám, kondenzaci vodní páry na povrchu potrubí nebo snížila jeho povrchovou teplotu.

Cíle bakalářské práce:

- popsat mechanismus tepelných ztrát tepla do okolí
- popsat typy izolací a jejich vlastností
- sestavit postup výpočtu tepelných ztrát a výpočtu potřebné tloušťky izolace
- aplikovat výpočtové postupy na konkrétních případech.

Seznam odborné literatury:


[1] Hewitt, G.F.: Process Heat Transfer. New York : Begell House, Inc., 1994.

[2] Hewitt, G.F. (ed.), Heat Exchanger Design Handbook. Begell House, Inc., New York, 1998.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Bohuslav Kilkovský, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/11.

V Brně, dne





prof. Ing. Petr Stehlík, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan

Abstrakt

V bakalářské práci „ Výpočet tepelných ztrát a izolace potrubí“ jsou popsány mechanismy přestupu tepla a uvedeny vztahy pro výpočet Nusseltova čísla při přestupu tepla konvekcí. Dále jsou popsány typy tepelných izolací jejich použití a vlastnosti. Poslední část bakalářské práce je věnována sestavení výpočtu tepelných ztrát, výpočtu požadované tloušťky izolace dle požadované teploty a výpočtů neekonomičtější tloušťky izolace.

Klíčová slova

Tepelná izolace, tepelné ztráty, tloušťka izolace potrubí.

Abstract

In this bachelor thesis "Calculation of heat loss and pipe insulation" describes the mechanisms of heat transfer and listed equations for calculating the Nusselt number for heat transfer by convection. The following describes the types of thermal insulation properties and their uses. The last part of this thesis is devoted to the preparation of calculating the heat loss calculation of the required thickness of insulation according to the required temperature and the most economical insulation thickness calculations.

Keywords

Thermal insulation, heat loss, pipe insulation thickness

Bibliografická citace mé práce:

TUČEK, J. *Výpočet tepelných ztrát a izolace potrubí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 68 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Bohuslav Kilkovský, Ph.D..

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, pouze za odborného vedení Ing. Bohuslava Kilkovského, Ph.D a veškeré zdroje, ze kterých jsem čerpal, jsou uvedeny v seznamu požité literatury.

V Brně dne 27. Května 2011

Podpis

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Bohuslavu Kilkovskému, Ph.D. za odborný dohled, za připomínky a cenné rady, které byly využity při zpracování této bakalářské práce. Rovněž děkuji za trpělivost a čas, který mě věnoval.

Obsah

Seznam symbolů	- 2 -
1 Úvod.....	- 4 -
2 Základní rovnice popisující přestup tepla	- 5 -
2.1 Mechanismy přestupu tepla	- 5 -
2.1.1 Přestup tepla prouděním (konvekcí)	- 5 -
2.1.2 Přestup tepla vedením (kondukcí).....	- 6 -
2.1.3 Přestup tepla sáláním (radiací)	- 8 -
2.2 Bezrozměrná kritéria	- 9 -
2.3 Přenosová rovnice.....	- 10 -
2.4 Popis problematiky tepelných ztrát a výpočtů izolací.....	- 11 -
3 Výpočtové vztahy pro určení Nusseltova čísla při přestupu tepla konvekcí	- 12 -
3.1 Přirozená konvekce.....	- 12 -
3.1.1 Tok v kanálech při přirozené konvekcí	- 12 -
3.1.2 Obtékání těles při přirozené konvekcí.....	- 13 -
3.2 Nucená konvekce.....	- 14 -
3.2.1 Tok v kanálech při nucené konvekcí.....	- 14 -
3.2.2 Obtékání těles při nucené konvekcí	- 16 -
4 Druhy tepelných izolací, jejich základní vlastnosti a provedení.....	- 18 -
4.1 Hlavní vlastnosti tepelných izolací.....	- 18 -
4.2 Nejběžnější izolační materiály potrubí	- 20 -
5 Výpočty izolace potrubí	- 23 -
5.1 Výpočet tepelných ztrát potrubí	- 23 -
5.1.1 Výpočet tepelných ztrát neizolovaného potrubí.....	- 25 -
5.1.2 Výpočet tepelné ztráty izolovaného potrubí.....	- 29 -
5.1.3 Vliv různých faktorů na tepelnou ztrátu a povrchovou teplotu izolovaného potrubí	- 35 -
5.2 Výpočet tloušťky izolace pro požadovanou povrchovou teplotu.....	- 37 -
5.3 Zjištění požadované tloušťky izolace zabráňující vzniku kondenzace na povrchu potrubí.....	- 46 -
5.4 Výpočet kritické tloušťky izolace.....	- 50 -
5.5 Výpočet ekonomické tloušťky izolace	- 53 -
6 Závěr	- 59 -
7 Přehled literatury.....	- 60 -
Přílohy	- 62 -

Seznam symbolů

Symbol	Název	Jednotka
A	teplosměnná plocha potrubí	$[m^2]$
A_i	vnitřní povrch potrubí	$[m^2]$
A_m	střední povrch potrubí	$[m^2]$
A_o	vnější povrch potrubí	$[m^2]$
c_p	měrná tepelná kapacita	$[J/kgK]$
d_1	vnitřní průměr potrubí	$[m]$
d_2	vnější průměr potrubí	$[m]$
d_3	vnější průměr izolace	$[m]$
D_e	ekvivalentní průměr – počítaný dle vztahu (2-22)	$[m]$
d_i	vnitřní průměr i - té vrstvy	$[m]$
d_{i+1}	vnější průměr i - té vrstvy	$[m]$
g	gravitační zrychlení	$[m/s^2]$
rh	relativní vlhkost vzduchu	$[%]$
k	součinitel prostupu tepla	$[W/(m^2K)]$
l	charakteristická rozměr (ekvivalentní průměr trubky)	$[m]$
L	délka trubky	$[m]$
O	smáčený obvod na straně plochy výměny tepla	$[m]$
Pr	Prandtlovo číslo	$[-]$
q	měrný tepelný tok	$[W/m^2]$
Q	tepelný tok	$[W]$
Re	Reynoldsovo číslo	$[-]$
S	průtočný průřez	$[m^2]$
t_a	teplota okolního média	$[°C]$
T_a	absolutní teplota okolního média (teplota okolí)	$[K]$
t_f	teplota tekutiny (na vnitřní nebo vnější straně)	$[°C]$
t_{st}	střední teplota (teplota filmu)	$[°C]$
t_{w1}	teplota vnitřního povrchu potrubí	$[°C]$
t_{w2}	teplota vnějšího povrchu potrubí	$[°C]$
t_{wi+1}	teplota vnějšího povrchu i - té vrstvy	$[°C]$
u	charakteristická rychlost	$[m/s]$
α	součinitel přestupu tepla	$[W/(m^2K)]$
α_0	celkový součinitel přestupu tepla na vnější straně	$[W/(m^2K)]$
α_i	součinitel přestupu tepla na vnitřní straně	$[W/(m^2K)]$
α_k	součinitel přestupu tepla konvekcí na vnější straně	$[W/(m^2K)]$
α_s	součinitel přestupu tepla sáláním na vnější straně	$[W/(m^2K)]$
β	koeficient teplotní objemové roztažnosti	$[1/K]$

Δt	rozdíl mezi teplotou povrchu a teplotou tekutiny	[°C]
ΔT_{LM}	logaritmická střední hodnota	[°C]
ΔT_M	střední teplotní rozdíl	[°C]
η	dynamická viskozita proudícího média	[Ns/m ²]
λ	tepelná vodivost materiálu	[W/(mK)]
λ_a	tepelná vodivost tekutiny	[W/(mK)]
λ_i	tepelná vodivost materiálu i-té vrstvy	[W/(mK)]
λ_{iz}	tepelná vodivost materiálu izolace	[W/(mK)]
λ_w	tepelná vodivost materiálu trubky	[W/(mK)]
ν	kinematická viskozita (z dynamické viskozity/ hustotou) μ/ρ	[m ² /s]
σ	Stefanova - Boltzmannova konstanta $\sigma= 5,67 \cdot 10^{-8}$	[m ² K ⁴]
τ	čas od zahájení procesu sdílení tepla prouděním	[s]

1 Úvod

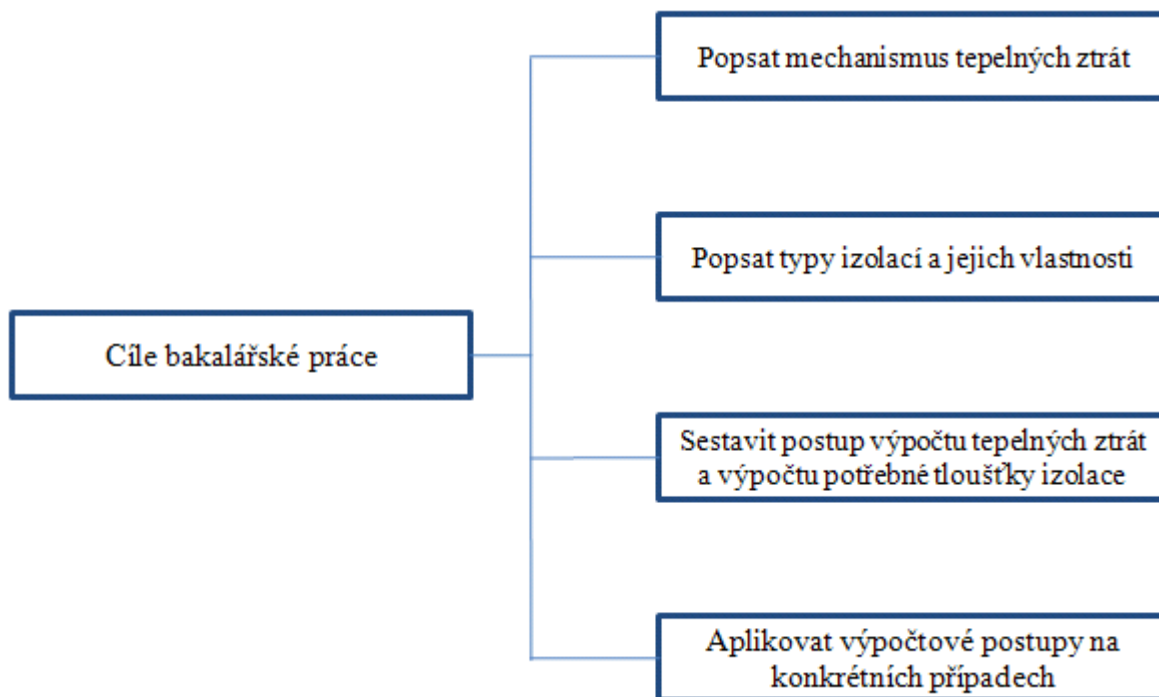
Tepelná energie vzniká spalováním tuhých, kapalných a plyných paliv v kotli či jiném tepelném zařízení, přetvořením slunečního záření v solárně-termickém kolektoru nebo štěpnou reakcí v jaderném reaktoru. Tato energie je přenášena různými druhy látek (nejčastěji vodou nebo vodní párou), které protékají potrubím. Mezi potrubím a okolím dochází k tepelné výměně, tudíž k tepelným ztrátám. Z tohoto důvodu bývá potrubí chráněno. K tomuto účelu se nejčastěji používá tepelných izolací. Izolace musí být tím odolnější, čím je teplota média uvnitř potrubí vyšší.

Například v elektrárnách se počítá, že odcházející páry poklesnou o teplotu 10 - 15 °C vlivem tepelných ztrát, než dojdou k turbíně. To znamená, že elektrárna o výkonu 200 M W má ztrátu kolem 4,5 M W. K této ztrátě dochází, pokud se spaluje uhlí s výhřevností 16 MJ/kg spálené s účinností 85 %, což odpovídá asi 1200 kg spáleného uhlí za hodinu. Elektrárna má celkové tepelné ztráty mnohem větší, protože je v ní mnohem více zdrojů tepelných ztrát. Tudíž kvalitní izolace potrubí může ročně ušetřit řádově i milióny tun uhlí.

Význam tepelných izolací je nejen v úspoře tepla, ale i v bezpečnosti provozu i personálu. Na mnohých místech bez tepelné izolace by nebylo možné pobývat nejen kvůli vysokým teplotám, ale také kvůli nebezpečí popálení od neizolovaných povrchů. Taktéž by mohla být ohrožena bezpečnost zvýšeným nebezpečím požáru.

V energetice mají izolace význam nejen u zařízení, kde je vysoká povrchová teplota, ale i jako ochrana proti chladu a proti vzniku kondenzace. Škody, které by mohly při těchto problémech vzniknout, jsou velice vážné (např. vnik koroze).

Cíle této bakalářské práce jsou zobrazeny na obr. 1.



Obr. 1 Schématické znázornění cílů bakalářské práce

2 Základní rovnice popisující přestup tepla

Tato kapitola popisuje základní mechanismy přestupu tepla a nejpoužívanější bezrozměrná kritéria, která jsou potřebná k výpočtům sdílení tepla a výpočtům izolací.

2.1 Mechanismy přestupu tepla

Při sdílení tepla v tepelných zařízeních (i v potrubí) jsou probíhající pochody velice složité. Základní rozdělení vychází ze tří způsobů sdílení tepla.

Obecně se přenos tepelné energie uskutečňuje

- vedením (konvekcí)
- prouděním (kondukcí)
- sáláním (radiací)

Přenos tepla se ve skutečnosti uskutečňuje většinou kombinací všech způsobů sdílení tepla. Obvykle však některé z nich mají natolik dominantní postavení, že při praktických výpočtech lze zbývající způsoby přenosu tepla zanedbat.

2.1.1 Přestup tepla prouděním (konvekcí)

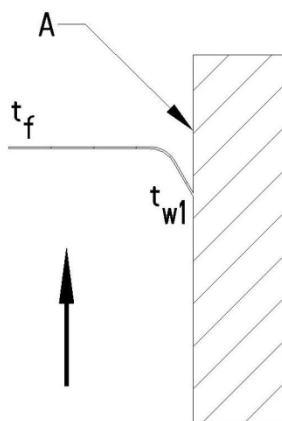
Přestup tepla prouděním (konvekcí) probíhá pohybem částic tekutiny nejčastěji mezi pracovní látkou a stěnou. Na velikost přestupu tepla prouděním má vliv intenzita proudění. Pohyb tekutiny uvnitř potrubí může být způsobený uměle (např.: čerpadlem nebo ventilátorem) – nucená konvekce nebo rozdílem hustot v důsledku rozdílných teplot – přirozená konvekce [1].

Sdílení tepla prouděním vyjadřuje Newtonův zákon [2] ve tvaru:

$$q = \alpha \cdot (t_f - t_{w1}) [W/m^2] \quad (2-1a)$$

respektive

$$Q = \alpha \cdot A \cdot (t_f - t_{w1}) [W] \quad (2-1b)$$



Obr. 2 Grafické znázornění přestupu tepla konvekcí

Součinitel přestupu tepla α závisí jednak na typu proudění a jednak na geometrii kanálu a je obsažen v Nusseltově bezrozměrném kritériu [2]:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda_a} [-] \quad (2-2)$$

Po vyjádření α :

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda_a}{l} [W/(m^2K)] \quad (2-3)$$

Výpočtem Nusseltova čísla Nu se zabývá kapitola 3.

2.1.2 Přestup tepla vedením (kondukcí)

Při tomto způsobu sdílení tepla přechází teplo od částice k částici jejich přímým stykem. K tepelné výměně dochází tím, že teplejší částice předávají energii chladnějším částicím. Při tomto ději se částice nepřemísťují, ale kmitají kolem vlastních rovnovážných poloh. Sdílením tepla vedením se teplo šíří nejčastěji v pevných látkách, v jejichž částech jsou různé teploty. V tekutinách se sdílení tepla vedením vyskytuje pouze ve zvláštních případech (např.: v laminárním filmu tekutiny podél vnitřních stěn potrubí) [1].

Při ustáleném ději je rychlost tepla mezi jednotlivými částmi tělesa stálá, tudíž nezávislá na čase. Tepelný tok vedením je popsán Fourierovou rovnicí [1]:

$$q = -\lambda \cdot grad(t) [W/m^2] \quad (2-4)$$

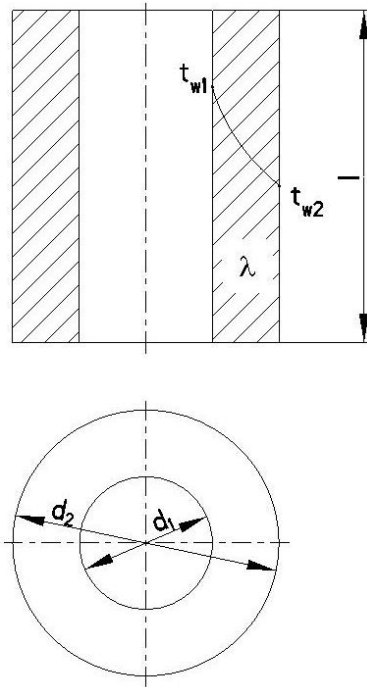
respektive

$$Q = -\lambda \cdot A \cdot grad(t) [W] \quad (2-5)$$

Tato rovnice udává přímou úměrnost mezi měrným tepelným tokem \dot{q} (respektive tepelným tokem Q) a gradientem teplot v příslušném směru. Součinitel úměrnosti λ představuje tepelnou vodivost materiálu stěny $[W/(m.K)]$ a závisí na typu materiálu a jeho teplotě.

Integrací této diferenciální rovnice lze získat vztah pro výpočet přeneseného tepelného toku pro různé tvary kanálů. Pro měrný tepelný tok při ustáleném stavu jednoduchou válcovou stěnou (obr. 3) platí vztah [2]

$$Q = 2\pi \cdot L \cdot \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\frac{1}{\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1}} [W] \quad (2-6)$$



Obr. 3 Přestup tepla vedením jednoduchou válcovou stěnou

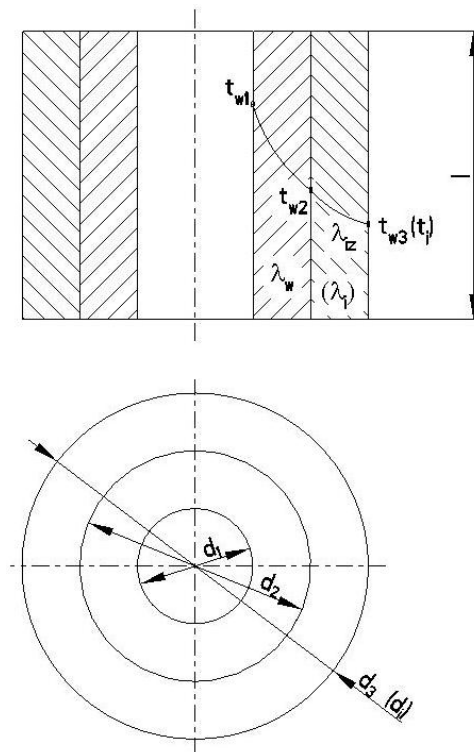
Pro složenou válcovou stěnu ze dvou vrstev (obr. 4) pak platí vztah pro přenesený tepelný tok ve tvaru [2]

$$Q = \frac{2\pi L (t_{w1} - t_{w2})}{\frac{1}{\lambda_w} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\lambda_{iz}} \cdot \ln \frac{d_3}{d_2}} [W] \quad (2-7)$$

a obecně pro n – vrstev platí vztah:

$$Q = \frac{2\pi L (t_{w1} - t_{wi+1})}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} \cdot \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}} [W] \quad (2-8)$$

kde i značí pořadí stěny (1 – stěna potrubí, 2 a více – stěna izolace).



Obr. 4 Přestup tepla vedením složenou válcovou stěnou

2.1.3 Přestup tepla sáláním (radiací)

Při tomto způsobu sdílení tepla je energie předávána prostorem jako elektromagnetické vlnění, které se může změnit v tepelnou energii a zvýšit teplotu média, jež záření absorbovalo. Každé těleso je schopné energii vyzařovat i vyzářenou energii přijímat. Energie, která se při dopadu projeví jako energie tepelná, se nazývá sálavá energie [2].

Tepelná energie sálaná na těleso se podle jeho povahy může pohltit nebo se může odrazit. Poměr pohlcené energie k dopadající energii nám určuje emisivita ε . Tento způsob přestupu tepla se uplatňuje hlavně u plynů při teplotě vyšší jak cca 400 °C, a to zejména u dvouatomových plynů.

Pro praktické výpočty ztrát tepla potrubí sáláním do okolí použijeme upravený Stefan-Boltzmannův zákon pro šedá (reálná) tělesa ve tvaru [3, 4]:

$$Q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_w^4 - T_a^4) [W] \quad (2-9)$$

kde ε je emisivita reálného tělesa, která je definována jako poměr intenzity vyzařování reálného tělesa k intenzitě vyzařování absolutně černého tělesa se stejnou teplotou. Materiály mají hodnotu emisivity mezi 0 a 1,0. Černé těleso má hodnotu vyzařování (emisivity) 1,0 a dokonalé odrazové sklo má hodnotu vyzařování 0. Emisivita materiálu je závislá na teplotě povrchu a konečném zpracování povrchu. V příloze P2 jsou uvedeny emisivity některých materiálů používaných na potrubí nebo krytí izolací.

Rovnice výměny energie mezi šedým tělesem a okolním médiem (2-9) předpokládá, že všechna energie vyzářená malým zářícím tělesem je absorbována okolním médiem.

Při výpočtech izolací je nutné vypočítat celkový součinitel přestupu tepla na vnější straně. Sálavý příspěvek tohoto součinitele se vypočte z určeného tepelného přestupu sáláním získaného z rovnice (2-9) a následným dopočítáním z Newtonovy rovnice přestupu tepla konvekcí (2-1b).

2.2 Bezrozměrná kritéria

Při výpočtech přestupu tepla se ve velké míře používá bezrozměrných kritérií, a to zejména při výpočtech součinitelů přestupu tepla. V následující části jsou popsána ta nejdůležitější z nich [5].

- **Nusseltovo kritérium:** slouží k získání součinitele přestupu tepla α . Vyjadřuje podobnost přenosu tepla konvekcí a vedením v mezní vrstvě tekutiny.

$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda_a} \quad (2-10)$$

Pro nekruhové potrubí (kanál) se charakteristický rozměr nahrazuje ekvivalentním průměrem, který se vypočítá podle vztahu:

$$d_e = \frac{4 \cdot S}{O} \quad (2-11)$$

- **Grashofovo kritérium:** slouží pro vyjádření intenzity cirkulace vlivem rozdílu teplot při přirozeném proudění tekutiny.

$$Gr = \frac{g l^3 \beta \Delta t}{\nu^2} \quad (2-12)$$

- **Prandtlovo kritérium:** je dalším důležitým bezrozměrným kritériem používaným při výpočtech sdílení tepla, které zahrnuje vlastnosti tekutiny podstatné při molekulárním sdílení tepla.

$$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{c_p \eta}{\lambda_a} \quad (2-13)$$

- **Pécletovo kritérium:** toto kritérium charakterizuje přechod tepla mezi proudícími látkami.

$$Pe = Re \cdot Pr = \frac{u \cdot l}{a} \quad (2-14)$$

- **Reynoldsovo kritérium:** je to bezrozměrné kritérium, které určuje charakter proudění, je to poměr mezi setrvačnými silami a viskózními silami.

$$Re = \frac{u l}{\nu} \quad (2-15)$$

2.3 Přenosová rovnice

Pro určení celkového přeneseného tepelného toku z teplejšího média do chladnějšího média se používá celková rovnice prostupu tepla [6], která zahrnuje přestup tepla vedením a konvekcí (může být zahrnut i přestup tepla sáláním).

$$\dot{Q} = A \cdot k \cdot \Delta T_M \quad (2-16)$$

V této rovnici je zohledněna plocha výměny tepla A , přestup tepla konvekcí (případně plus sálání) a vedením, který je zahrnutý do součinitele prostupu tepla k , a také teplota látek, kterou představuje střední teplotní rozdíl ΔT_M .

Součinitel prostupu tepla k [6, 7, 8] se nejčastěji vztahuje k vnější ploše výměny tepla (např. vnější povrch trubek nebo vnější povrch izolace). Vztah pro určení součinitele prostupu tepla má pak v základní podobě tvar:

$$k = \frac{1}{\frac{A_o}{A_i \alpha_i} + \frac{A_o}{A_m \frac{\lambda_w}{\delta}} + \frac{1}{\alpha_o}} \text{ [W/(m}^2\text{K)]} \quad (2-17)$$

Pro výpočty izolací potrubí se pak tento vztah modifikuje na tvar:

$$k = \frac{1}{\frac{d_o}{d_i} \frac{1}{\alpha_i} + \sum \frac{d_{i+1}}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{1}{\alpha_o}} \text{ [W/(m}^2\text{K)]} \quad (2-18)$$

V součiniteli přestupu tepla na vnější straně α_o může být zahrnut jak součinitel přestupu tepla konvekcí, tak i součinitel přestupu tepla sáláním, potom platí:

$$\alpha_o = \alpha_k + \alpha_s \text{ [W/(m}^2\text{K)]} \quad (2-19)$$

Střední teplotní rozdíl ΔT_M má obecně tvar

$$\Delta T_M = F \cdot \Delta T_{\ln} = F \cdot \frac{\Delta T_{\max} - \Delta T_{\min}}{\ln \frac{\Delta T_{\max}}{\Delta T_{\min}}} \text{ [K]} \quad (2-20)$$

U výpočtů izolací potrubí však uvažujeme ve většině případů s konstantní teplotou látky jak uvnitř potrubí, tak vně potrubí. Střední teplotní rozdíl se pak vypočte jen jako rozdíl jednotlivých teplot médií. Platí tedy pro něj tvar:

$$\Delta T_M = t_i - t_a \text{ [K]} \quad (2-21)$$

Případně, pokud je zadána povrchová teplota, vypočítá se střední teplotní rozdíl ze vztahu

$$\Delta T_M = t_w - t_a \text{ [K]} \quad (2-22)$$

2.4 Popis problematiky tepelných ztrát a výpočtů izolací

Při proudění horké látky v potrubí dochází ke ztrátám tepla do okolí. Ztráty jsou tím vyšší, čím vyšší je rychlost proudění média (vzduchu) kolem potrubí a čím je vyšší teplota povrchu potrubí. Ztráty pak mají za následek chladnutí média v potrubí. Dalším nebezpečím je ohřátí vnějšího povrchu trubek na teplotu, která by mohla ohrožovat zdraví lidí v jejím okolí. Vzniku tepelných ztrát a vysokých teplot na povrchu můžeme účinně zabránit přidáním izolace vhodné tloušťky. Izolace může sloužit i k zabránění kondenzace na povrchu či uvnitř potrubí nebo jako protihluková bariéra.

Výpočet tepelných izolací patří k základním inženýrským výpočtům. Výpočet izolací vychází ze základních výpočtových vztahů přenosu tepla. Procesní inženýr by je měl bez větších problémů umět aplikovat a dokázat tak vypočítat potřebnou tloušťku izolace. Tato práce by měla sloužit jako základní přehled typů izolací a metod (postupů) k jejich výpočtům. Práce se zabývá zejména výpočtem izolací kruhového potrubí. Princip výpočtu je ovšem shodný i pro nekruhová potrubí či výpočet izolace kotlů, pecí nebo jiných zařízení.

Výpočty uvedené v této bakalářské práci jsou prováděny za určitých zjednodušení. Jedná se zejména o tyto:

- vlastnosti materiálu potrubí a izolace nejsou závislé na teplotě, a tedy se s teplotou nemění,
- povrchovou teplotu potrubí je možné uvažovat rovnu vnitřní teplotě média,
- u potrubí nejsou uvažovány tepelné ztráty podpor, závěsů a armatur,
- v případě proudění kapalin o vyšší rychlosti je možné zanedbat ve vztahu (2-21 ÷ 2-22) zlomek obsahující součinitel přestupu tepla uvnitř trubky,
- vysálané teplo je pohlceno pouze okolním médiem,
- uvažuje se jen jednovrstvá izolace,
- při výpočtech se zanedbává vedení tepla ochranným plechem, uvažuje se pouze jeho emisivita povrchu.

Při výpočtech izolace potrubí se vychází ze tří hlavních rovnic. Jedná se o rovnici sdílení tepla konvekcí (Newtonův zákon), o rovnici sdílení tepla kondukcí (Fourierův zákon) a o celkovou rovnici prostupu tepla (přenosová rovnice). Tyto vztahy mohou být doplněny o rovnici přenosu tepla zářením. Vhodnou kombinací těchto tří, resp. čtyř rovnic vypočteme potřebnou tloušťku izolace, povrchové teploty, tepelné ztráty a další požadované informace.

Abychom však mohli aplikovat tyto rovnice (zejména pak rovnici sdílení tepla konvekcí a přenosovou rovnici), musíme ještě navíc disponovat vztahy pro výpočet součinitelů přestupů tepla. Ty totiž nejsou ve většině případů zadány. Vztahy pro výpočet těchto součinitelů jsou uvedeny v následující kapitole. Tato práce se zabývá zejména výpočty izolací kruhových potrubí, ale pro úplnost jsou uvedeny vztahy pro výpočet součinitelů přestupů tepla i pro nekruhová potrubí.

3 Výpočtové vztahy pro určení Nusseltova čísla při přestupu tepla konvekcí

Aby mohl být proveden správný výpočet izolace potrubí, musíme disponovat vhodnými vztahy pro výpočet součinitele přestupu tepla α . Základní rovnice pro jeho výpočet nabývá různých forem v závislosti na tom, jedná-li se o ustálené nebo neustálené proudění, volné nebo nucené proudění, dále podle toho, dochází-li při výměně tepla k laminárnímu nebo turbulentnímu charakteru proudění. Závisí také na typu kanálu a na jeho geometrii, či zda se jedná o tok v potrubí či jeho obtékání.

Při výpočtech se většinou postupuje tak, že se hledá hodnota Nusseltova čísla Nu , za pomoci kterého se z bezrozměrné rovnice pro Nusseltovo kritérium (2-10) vypočte součinitel přestupu tepla α . Obecný tvar kritériální rovnice pro sdílení tepla konvekcí je funkcí řady proměnných [9]

$$Nu = f(Fo, Re, Gr, Pr, \frac{l}{d}) \quad (3-1)$$

Nusseltovo číslo je závislé na bezrozměrných kritériích. Při nuceném turbulentním proudění, kdy je vliv vztlakových sil nevýznamný, odpadá Grashofovo číslo Gr a při ustáleném proudění odpadá rovněž Fourierovo číslo Fo . Toto vede ke zjednodušení obecné rovnice. Popis vztahů potřebných pro různé tvary kanálů a typy konvekce jsou popsány v další části této práce. Všechny vztahy jsou uvažovány pro jednofázové proudění bez změny fáze.

V praxi může nastat přirozená konvekce (např. při uložení potrubí v hale, kde neproudí žádný vzduch) nebo nucená konvekce (např. při uložení potrubí ve volném prostředí mimo halu, kde je významné proudění okolního vzduchu). Pro obě tyto možnosti konvektivního přenosu platí jiné výpočtové vztahy a je třeba to mít na paměti i při výpočtech tepelných ztrát izolací.

3.1 Přirozená konvekce

O přirozené neboli volné konvekci lze hovořit, je-li pohyb tekutiny vyvolán pouze rozdílem teplot. Volná konvekce se většinou uplatňuje v uzavřené místnosti. Při přirozené konvekci není dosahováno tak velkého přestupu tepla jako u nucené konvekce.

3.1.1 Tok v kanálech při přirozené konvekci

V potrubí je téměř vždy uvažována nucená konvekce, proto zde vztahy pro výpočet Nusseltova čísla v potrubí při přirozené konvekci nebudou uvedeny.

3.1.2 Obtékání těles při přirozené konvekcii

Uvedené vztahy platí, pokud je prostor vyplněný tekutinou mnohem větší než rozměry teplosměnné plochy a pokud je tato plocha současně izotermická. Pro výpočet Nusseltova čísla při **obtékání kolem potrubí** se může použít jednoduchý vztah ve tvaru [10]:

$$Nu = C(GrPr)^n \quad (3-2)$$

kde C a n jsou empirické konstanty závislé na součinu $GrPr$ (viz. Tab.1)

Tab. 1 Konstanty pro výpočet Nusseltova čísla pro obtékání potrubí při volné konvekcii

GrPr	C	N
$<1 \cdot 10^{-3}$	0,45	0
$1 \cdot 10^{-3} = 5 \cdot 10^2$	1,18	0,125
$5 \cdot 10^2 = 2 \cdot 10^7$	0,54	0,25
$2 \cdot 10^7 = 1 \cdot 10^{13}$	0,195	0,333

Korelace pro přenos tepla volnou konvekcii při obtékání těles jsou podobné jako vztahy pro přenos tepla nucenou konvekcii při vnějším obtékání potrubí, avšak při volné konvekcii neproudí žádné médium, takže nelze zadat danou rychlost do Reynoldsova čísla. Bezrozměrné číslo, které nahrazuje Reynoldsovo číslo a charakterizuje volnou konvekcii, je Grashofovo číslo [10].

Fyzikální vlastnosti látek jsou do rovnic počítány při střední teplotě (neboli teplotě filmu) definované rovnicí [10]:

$$t_{st} = \frac{1}{2}t_w + \frac{1}{2}t_a \quad (3-3)$$

K určení Nusseltova čísla při volné konvekcii pro vertikální válec může být použita rovnice, (3-4a), když poměr průměru k výšce bude větší jak $35/Gr^{0,25}$ [10].

$$Nu = \left(0,825 + \frac{0,387(GrPr)^{1/6}}{\left(1 + 0,671\left(\frac{1}{Pr}\right)^{9/16}\right)^{8/27}} \right)^2 \quad (3-4a)$$

Pro menší hodnoty D/L se vliv povrchu zakřivení stává významným. Je zapotřebí vynásobit rovnici (3-4a) korekčním faktorem uvedených v [11].

$$Nu = \left(0,825 + \frac{0,387(GrPr)^{1/6}}{\left(1 + 0,671\left(\frac{1}{Pr}\right)^{9/16}\right)^{8/27}} \right)^2 \cdot \left(1 + 1,43 \left(\frac{L}{D_e \cdot Gr^{0,25}} \right)^{0,9} \right) \quad (3-4b)$$

Pro určení Nuseltova čísla kolem **horizontálního válce** může být použita rovnice dle [12]:

$$Nu = \left(0,6 + \frac{0,387(GrPr)^{1/6}}{\left(1 + 0,721 \left(\frac{1}{Pr}\right)^{9/16}\right)^{8/27}} \right)^2 \quad (3-5)$$

V této rovnici se jako charakteristická délka používá vnější průměr válce. Tato rovnice je ověřena dle [14] pro oblast $10^{-5} \leq GrPr \leq 10^{12}$ a pro $0,7 < Pr < 100$ s chybou $\pm 15 \%$. V [13] je uvedena platnost rovnice pro oblast $10^{-6} \leq GrPr \leq 10^9$. Při hodnotách větších jak 10^9 přechází na turbulentní proudění.

3.2 Nucená konvekce

Proudění média je vyvoláno vnější silou (čerpadlo, ventilátor) nebo přírodními vlivy (geodetická výška, vítr). Jedná se o přestup tepla o větší intenzitě než při volné konvekci. Charakter nuceného proudění obvykle určuje Reynoldsovo kritérium Re .

Je nutné rozlišovat, zda tekutina teče uvnitř nebo obtéká kolem vnějšku těles. Do výpočetních vztahů se při proudění uvnitř trubek dosazuje za charakteristický rozměr u trubky kruhového průřezu její vnitřní průměr a u nekruhového průřezu potrubí jeho ekvivalentní délka počítaná dle vztahu (2-11). Při podélném obtékání těles platí totéž, co pro tok uvnitř trubky. Místo vnitřního průměru se však dosazuje vnější průměr nebo ekvivalentní průměr.

3.2.1 Tok v kanálech při nucené konvekci

Pro laminární proudění, kdy $Re < 2300$, je nutné nejdříve zjistit, jak významný vliv má volná konvekce [5].

V krátké trubce, kde ještě není stabilizovaný rychlostní ani teplotní profil kvůli nízké hodnotě L/D_e , je doporučeno užít vztah [14]:

$$Nu = 1,86 \left(\frac{Re Pr D_e}{L} \right)^{1/3} \left(\frac{\eta}{\eta_w} \right)^{0,14} \quad (3-6)$$

kde D_e je ekvivalentní průměr počítaný dle vztahu (2-11).

Podle [14] rovnice (3-6) platí pro rozsah $L/D_e > 1$. Podle experimentů s novějšími daty než v předchozí metodě [15] platí tato rovnice pro:

$13 < Re < 2030$; $0,0044 < \frac{\eta}{\eta_w} < 10$; $0,5 < Pr < 170$; $\frac{L}{D_e} < 220$, pokud vyjde $Nu > 3,65$. Jestliže vypočítané $Nu < 3,65$, tak není tato rovnice přesná. Chyba je zde udávaná $\pm 25 \%$.

Pro stabilizovaný rychlostní profil při $L/D_e > 50$ a $Re < 2300$ se používá dle [13] rovnice:

$$Nu = \left(3,65 + \frac{0,0668 Re Pr De}{L \left(1 + 0,04 \left(\frac{Re Pr De}{L} \right)^{2/3} \right)} \right) \left(\frac{\eta}{\eta_w} \right)^{0,14} \quad (3-7)$$

Tento vztah platí v oblasti: $0,0044 < \frac{\eta}{\eta_w} < 10$; $0,5 < Pr < 1,7 \cdot 10^2$; $Re Pr De / L > 20$.
Chyba se zde pohybuje ± 25 %.

Pro výpočet součinitele přestupu tepla v turbulentní oblasti lze použít jednoduché vztahy pro hydraulicky hladké trubky [2]. Těchto vztahů lze v odborné literatuře nalézt několik, mezi nejznámější patří rovnice podle:

- Colburna [3]:

$$Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^{\frac{1}{3}} \quad (3-8)$$

Tato rovnice platí pro oblast Re 20000 ÷ 300000.

- Dittus – Boeltera [3]:

$$Nu = 0,0243 Re^{0,8} Pr^{0,4} \quad (3-9)$$

- McAdamse [2]:

$$Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,4} \quad (3-10)$$

Platí pro $0,6 < Pr < 1,2 \cdot 10^2$; $L/D_e > 50$ a $10^4 < Re < 2 \cdot 10^6$. Pro plyny při $Pr = 0,7$ jsou vypočtené hodnoty téměř o 20 % vyšší než hodnoty experimentální. V oblasti $1,2 < Pr < 1,4$ je chyba ± 10 %, pro kapaliny při $Pr = 6$ je chyba -30 %, v oblasti $7 < Pr < 1,2 \cdot 10^2$ je chyba -20 %.

Tyto starší rovnice platí pro malý rozdíl teplot (teplotou stěny a střední teplotou média). Při výpočtu s větším teplotním rozdílem je zapotřebí rovnice vynásobit korekcí na fyzikální vlastnosti:

$$\left(\frac{\eta}{\eta_w} \right)^{0,14} \quad (3-11)$$

Tyto rovnice vykazují chybu $+25$ % až -40 % pro rozmezí $0,6 < Pr < 100$. Obvykle je chyba podstatně menší [13].

Novější rovnice, která bere v úvahu i drsnost povrchu trubek, pro výpočet turbulentního proudění publikoval Petukhov [16]:

$$Nu = \frac{1}{8} \frac{f Re Pr}{1,07 + 12,7 \sqrt{\frac{1}{8}} f (Pr^{\frac{2}{3}} - 1)} \quad (3-12)$$

v rovnici f značí Darcyho součinitel tření. Logaritmus je o základu 10. Vztah pro výpočet Darcyho součinitele tření je

$$f = \frac{1}{(1,82 \log(Re) - 1,64)^2} \quad (3-13)$$

Rovnice platí pro $10^4 < Re < 5^6$; $0,5 < Pr < 200$. Od experimentálních dat se odchyluje o ± 6 %. Pro hodnoty Pr v rozmezí $200 \div 2000$ je chyba kolem 10 %.

Pro přechodovou oblast podle Hausena uvádí ve [2] vztah:

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

platí pro oblast Reynoldsova čísla $2300 < Re < 10^4$

3.2.2 Obtékání těles při nucené konvekci

Tento typ proudění nastane, je-li proudící tekutině postavena překážka do cesty, např. tekoucí voda v řece, která proudí kolem pilíře mostu, proudící vzduch kolem různých předmětů na zemi nebo kolem potrubí. Obtékaná tělesa mohou být různého tvaru, např.: koule, válce, hranoly.

Hodnotu součinitele přestupu tepla získáme vyjádřením z kritériální rovnice Nusseltova čísla. Při výpočtu se používají vlastnosti látek při střední teplotě (teplotě filmu) [10].

$$t_{st} = \frac{1}{2} t_w + \frac{1}{2} t_a \quad (3-15)$$

Výpočet pro **kolmé obtékání válce** se střední součinitel přestupu tepla řídí vztahem [10]:

$$Nu = 0,3 + \frac{0,62 \sqrt{Re} Pr^{\frac{1}{3}}}{\left(1 + \left(\frac{0,4}{Pr} \right)^{\frac{2}{3}} \right)^{\frac{1}{4}}} \left(1 + \left(\frac{Re}{282000} \right)^{\frac{5}{8}} \right)^{\frac{4}{5}} \quad (3-16)$$

Tento vztah platí pro $RePr > 0,2$. Všechny vlastnosti jsou určeny při střední teplotě [10].

Pro hodnotu $Pe < 0,2$ by měl být použit vztah Nakai-Okazaki ve tvaru [13]:

$$Nu = \frac{1}{0,8237 - 0,5 \ln (Pe)} \quad (3-17)$$

Pro plyn proudící kolmo na potrubí čtvercového průřezu (vzduchové potrubí) je vhodná rovnice [3]:

$$Nu = 0,102 Re^{0,675} Pr^{\frac{1}{3}} \quad (3-18)$$

Re je počítáno stejně jak u kruhového potrubí. Výpočet se liší pouze tím, že místo průměru D se dosadí ekvivalentní průměr D_e – viz rovnice (2-11). Vlastnosti media jsou počítány při teplotě filmu. Rovnice platí v rozmezí $Re 5000 \div 10^5$.

Tyto rovnice mají přesnost kolem $\pm 25 \div 30 \%$, což by mělo být bráno v úvahu při jejich použití.

4 Druhy tepelných izolací, jejich základní vlastnosti a provedení

Hlavním úkolem tepelné izolace je vytvořit bariéru, která zabraňuje vniknutí tepla či jeho úniku. Aby tepelná izolace přinesla očekávaný efekt a dobře fungovala, je nutné vybrat správný typ, nešetřit, ale také zbytečně neplytvat finančními prostředky, a především dbát na přesné a pečlivé provedení izolací. Účelem tepelných izolací je udržet v potrubí teplo a chránit osoby tím, že tepelná izolace omezí povrchové teploty zařízení. Obecně mají tepelné izolace nízký stupeň tepelné vodivosti [17, 18, 19].

4.1 Hlavní vlastnosti tepelných izolací

Na tepelné izolace jsou kladeny nejrůznější nároky tak, aby zajistily co možná nejlepší funkce při daném provozu. Na základě těchto vlastností se tepelné izolace vybírají. Nejdůležitější vlastnosti kladené na tepelné izolace jsou:

- ***Nízká tepelná vodivost***

Je nejdůležitější vlastností tepelných izolací vyjadřující jejich tepelnou schopnost. Pro jednotlivé izolační látky se tepelná vodivost zjišťuje měřením a nejčastěji se udává v závislosti na teplotě izolace. U většiny izolačních materiálů tepelná vodivost s rostoucí teplotou stoupá. Podstata účinku tepelných izolací je v tom, že materiály obsahují vzduchové dutinky, které kladou prostupu tepla velký odpor. Čím jsou dutinky menší a rovnoměrně rozdělené, tím je výsledná tepelná vodivost izolačního materiálu menší. S rostoucí vlhkostí izolace tepelná vodivost stoupá [17].

- ***Nejvyšší teplota použití izolace a její trvanlivost při této teplotě***

Izolační materiál by neměl při provozní teplotě ani po delším čase výrazně měnit své chemické a fyzikální vlastnosti (degradace materiálu izolace) [17].

- ***Objemová hmotnost***

Objemová hmotnost je poměr hmotnosti tělesa (hmotnost objemové jednotky materiálu i s póry a dutinami) k objemu tělesa. Je důležitým sledovaným parametrem u tepelných izolací. Čím má izolace menší objemovou hmotnost, tím jsou lepší izolační vlastnosti. Toto neplatí u cpaných izolací [17].

- ***Měrná tepelná kapacita***

Čím je menší měrné teplo, tím je menší i akumulované teplo a tím dochází k menším tepelným ztrátám při přerušovaném provozu [17].

- ***Měrná hmotnost***

Měrná hmotnost neboli hustota je definována hmotností objemové jednotky homogenní látky při určité teplotě. Čím je měrná hmotnost u izolací vyšší, tím je možné izolace použít do vyšších provozních teplot, ve kterých má lepší izolační vlastnosti [20, 21].

- ***Chemické účinky na izolovanou plochu***

Některé izolační materiály zvláště ve vlhkém stavu vyvolávají na ocelových plochách korozi. Tyto materiály nejsou vhodné pro přerušovaný provozní režim [17].

- ***Nasákavost vodou a odolnost proti hnilobě***

Některé izolační materiály jsou hyroskopické. To vede k nárůstu jejich tepelné vodivosti a hmotnosti izolace a má za následek zhoršení izolačních vlastností a zvýšení její hmotnosti, což negativně působí na konstrukci potrubí [17].

- ***Pevnost (v tlaku, v tahu, stlačitelnost atd.)***

Izolační materiál má dle způsobu izolování a druhu izolovaného zařízení dané mechanické vlastnosti. Pevnost v tlaku, tahu, stlačitelnost atd. je možno definovat u kompaktních izolačních materiálů. U izolací z vláken (cpaných nebo sypaných) pevnost a kompaktilitu přebírá obal izolace [17].

- ***Odolnost proti změnám teploty***

Vlivem spouštění tepelného zařízení do provozu je nutno volit izolace takové, jejichž rozdíl teploty vnitřní a vnější vrstvy izolace není velký. Při velkém teplotním gradientu může dojít k destrukci izolace [17].

- ***Trvanlivost***

Izolační materiál musí mít dostatečnou trvanlivost. To znamená, že po určitý čas provozu potrubí se nesmí zhoršovat vlastnosti izolace. Trvanlivost izolace potrubí záleží nejen na vlastnostech materiálu, ale i na pracovních podmínkách, okolní teplotě a jejím kolísání a zejména na ochraně proti vlhkosti a mechanickému poškození, např. od hlodavců [17].

- ***Možnost pokrýt i tvarově složitě povrchy***

Při izolování složitých tvarů, jako jsou armatury, se musí při volbě druhu izolace přihlížet k tomu, jak často se bude armatura demontovat, popřípadě jak často se bude izolace demontovat v případě revizí armatur [17].

- ***Způsob montáže***

Montáž izolace by měla být rychlá, snadná a levná.

- ***Cena izolace***

Cena izolace se udává za 1 m² nebo 1 m³ obsahu, má zásadní vliv na použití izolace.

Všechna potrubní vedení, ale i chemické reaktory, nádrže, VZT potrubí, plochy (včetně závěsů potrubí a dalších doplňků) musí být izolovány tak, aby byly splněny bezpečnostní a funkční požadavky. Funkčními požadavky jsou minimální tepelná ztráta a minimální povrchová teplota izolovaného zařízení. U chladových izolací je nejdůležitějším požadavkem zamezení kondenzace na vnějším povrchu potrubí, respektive na povrchu izolace. Případně u vedení horkého vlhkého vzduchu (např. z jídelen) je požadavkem zamezení kondenzace uvnitř potrubí. Bezpečnostními požadavky se rozumí chování při hoření, ekologická nezávadnost a zdravotní nezávadnost materiálu. Na základě toho, pro jaký účel bude izolace používána, je prováděn i výběr. Ne každá izolace se hodí pro všechny aplikace. Každá má své specifické vlastnosti, možnosti a omezení a z toho vyplývající výhody a nevýhody.

4.2 Nejběžnější izolační materiály potrubí

Pro výběr vhodného izolačního materiálu existují různé požadavky. Zejména je důležité, aby izolační materiály byly použitelné v praktických provozních podmínkách. Z tohoto důvodu jsou při projektování hodnoceny jednak technické vlastnosti jednotlivých materiálů a jednak je věnována pozornost také jejich zpracovatelnosti. Tepelné izolace mohou být vyrobeny z nejrůznějších materiálů. Každý materiál má své specifické vlastnosti a hodí se pro různé účely. Dalším důležitým požadavkem je ekonomická stránka a životnost.

Podle [22] izolační materiály spadají do dvou kategorií, a to:

- organické pěny
- anorganické materiály

Mezi organické pěny patří: polystyren, polyetylen, fenolové pěny, polyuretanová pěna, aj.

Mezi anorganické materiály patří: minerální vlna, skelná vlna, pěnové sklo, mikroporézní oxid křemičitý, magnézium, keramická vlákna, perlit a vermikulit, aj.

Níže jsou nastíněny vlastnosti izolačních materiálů nejčastěji používaných v komerčním, tak i v průmyslovém odvětví.

Pěnové plasty

Izolaci v pěnových materiálech tvoří převážně vzduch, případně jiný plyn, který je uzavřen v malých bublinkách. Bublínky jsou tak malé, že v nich prakticky nedochází ke konvekci, teplo je přenášeno kondukcí plynem uvnitř a stěnami bublinek. Pěnové plasty jsou lehké a mají výbornou odolnost vůči vlhkosti, jejich nevýhodou je, že jsou velice hořlavé. Dodávají se jako tvarové (např. kruhové) nebo v podobě desek. Jsou použitelné v teplotním rozsahu od $-182\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $149\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Elastomerové materiály

Jedná se o buněčný materiál, který se skládá z pěnové pryskyřice v kombinaci s elastomery. Stejně jako pěnové plasty mají uzavřenou strukturu, jsou páro-nepropustné a vlhkosti odolné. Dodávají se jako tvarové (kruhové) nebo v podobě desek. Jejich teplotní použití je do $104\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Skelné materiály

Dělí se do dvou skupin na vláknité a na buněčné.

Vláknité sklo se dodává jako tvarové (např. kruhové) nebo v podobě pružných nebo tvrdých desek. Je nehořlavé a výborně tlumí zvuk. Jeho pracovní teplotní rozsah je od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $38\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Buněčné sklo se dodává ve stejných tvarech jako vláknité. Je pevnější, ale špatně odolává nárazům. Má dobrou odolnost i vůči některým chemikáliím a je neabsorpční. Rozsah pracovních teplot je od $-267\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $482\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Minerální materiály

Jedná se o kamenná nebo strusková vlákna, která jsou spojována tepelně odolným pojivem a lisují se do různých tvarů nebo desek. Tento materiál je nehořlavý a výborně tlumí zvuk. Použití těchto materiálů je do $1038\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Expandovaný perlit

Je vyroben z inertních křemičitých sopečných hornin v kombinaci s vodou. Tento materiál má vysokou odolnost proti korozi povrchu a disponuje nízkou smrštitelností. Perlit je nehořlavý a je použitelný ve středních teplotách do $315\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Křemičitan vápenatý

Je to zrnitý izolační materiál, který se vyrábí z vápna a oxidu křemičitanového. Jsou to vyztužená organická a anorganická vlákna, které jsou tvarována do tuhé formy. Materiál absorbuje vodu, je nehořlavý. Většinou se používá na izolování horkého potrubí. Pracovní rozsah teplot je od $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $648\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Žáruvzdorná vlákna

Je to izolační materiál, který se skládá z keramických vláken, oxidu hlinitého a oxidu křemičitého. Tyto složky se pojí vysokoteplotním pojivem. Vyrábí se formě pásů nebo v tuhé formě. Tento materiál je zcela nehořlavý. Maximální teplota použitelnosti je $1648\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Izolační cement

Tento materiál lze použít do vysokých teplot povrchu ($315\text{ }^{\circ}\text{C} \div 815\text{ }^{\circ}\text{C}$) jako jednovrstvou izolaci nebo jako povrchovou úpravu na jiném izolačním materiálu. V tomto případě je použitelný do středních teplot ($315\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Shrnutí použitelnosti těchto materiálů je zobrazeno v tab. 2.

Tab. 2 Základní přehled izolačních materiálů

Typ materiálu izolace	Rozsah teplot [°C]		Oblast použití	Další popis
	Min	Max		
Pěnové plasty	-182	149	Stavebnictví, Izolace vodovodního potrubí	Zdraví nezávadný, snadné použití, UV stálý, hořlavý
Elastomerové materiály	-40	104	Izolování chlazení, vzduchotechnika, solární energie	Flexibilní, nehořlavý
Vláknité sklo	-40	38	Stavebnictví, izolace průmyslových potrubí	Chemicky stálé, dobře tlumí hluk
Buněčné sklo	-267	482	Hutnictví, letecký průmysl	Nízká teplená vodivost, může být navržen jako UV stálý
Minerální materiály		1038	Nejčastěji ve stavebnictví	Nehořlavý, tlumí zvuk, poměrně levný
Expandovaný perlit		315	Stavebnictví, zvuková a požární ochrana	Přírodní materiál, levnější než minerální vlna, nízká hmotnost
Křemičitan vápenatý	37	648	Izolace kotlů, potrubí, hutnictví	Dražší než minerální vlna
Žáruvzdorná vlákna		1648	Hutnictví, energetika, sklárství,	Nehořlavý
Izolační cement	315	815	Stavebnictví	Nenavlhá, nehořlavý

Podrobnější přehled izolačních materiálů, jejich teplotní rozsah a použitelnost je uveden v příloze P1.

5 Výpočty izolace potrubí

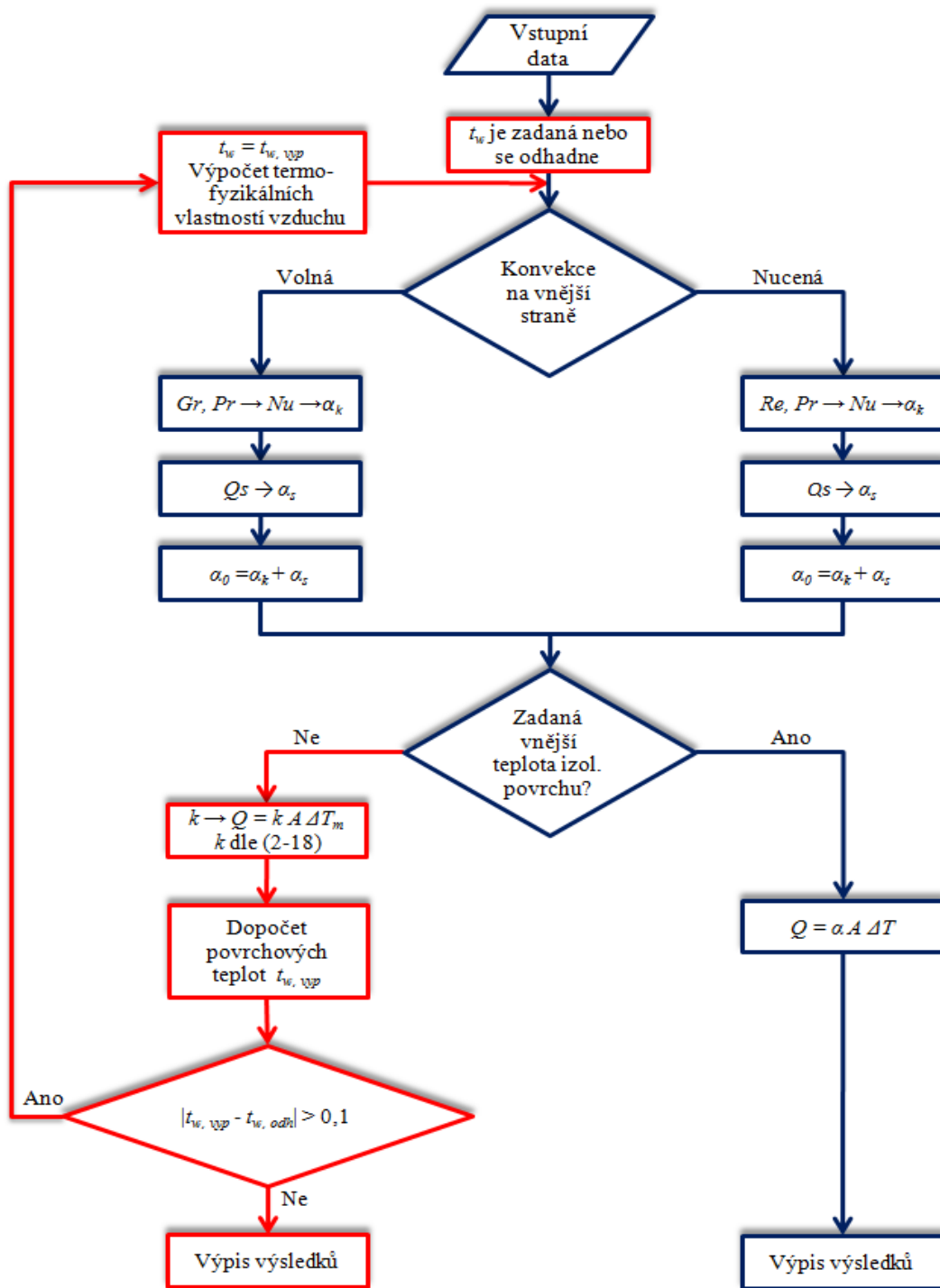
V této kapitole jsou uvedeny postupy výpočtů tepelných ztrát izolovaného i neizolovaného potrubí a postupy výpočtů izolace potrubí pro zadané podmínky. Výpočet izolace potrubí se provádí za účelem:

1. výpočtu tepelné ztráty neizolovaného a izolovaného potrubí,
2. zjištění požadované tloušťky izolace pro požadovanou teplotu povrchu izolace,
3. výpočtu tloušťky izolace zabraňující kondenzaci na povrchu potrubí,
4. výpočtu kritické tloušťky izolace,
5. výpočtu ekonomické tloušťky izolace.

Výpočet izolací potrubí je dále ještě možné počítat za účelem zjištění požadované tloušťky izolace potřebné k zabránění kondenzace uvnitř potrubí, výpočtu izolace k zabránění zamrznutí média v potrubí nebo výpočtu protihlukové izolace. Je také možné vypočítat ochlazení média ze vstupní teploty. Tyto případy však nejsou součástí bakalářské práce.

5.1 Výpočet tepelných ztrát potrubí

Tímto výpočtem zjišťujeme tepelnou ztrátu potrubí (izolovaného i neizolovaného). Při výpočtech se vychází zejména ze vztahů (2-1b), (2-9) a (2-16). Pro výpočty součinitele přestupu tepla a na vnější straně potrubí se použijí vztahy z kapitoly 3. Blokové schéma výpočtu tepelných ztrát izolovaného i neizolovaného potrubí je uvedeno na obr. 5.



Obr. 5 Blokové schéma výpočtu tepelné ztráty potrubí

Poznámka: Vlastnost vzduchu určujeme při střední teplotě (teplotě filmu). V případě, že neznáme povrchovou teplotu, tak ji v prvním kroku odhadneme, určíme fyzikální vlastnosti vzduchu a vypočítáme tepelné ztráty. Následně dopočteme povrchovou teplotu potrubí a tu porovnáme s povrchovou teplotou odhadnutou. Pokud se rozdíl výrazně liší, tak nově vypočtenou teplotu povrchu přiřadíme místo odhadnuté teplotě povrchu a výpočet opakujeme. Výpočet opakujeme tak dlouho, až se vypočtená povrchová teplota bude rovnat povrchové teplotě odhadnuté. Toto značí červená v blokovém schématu na obr. 5. Špatně odhadnutá

teplota povrchu izolace má vliv i na velikost součinitele přestupu tepla sáláním. Pokud je teplota povrchu zadána, tak postupujeme podle modré části schématu.

5.1.1 Výpočet tepelných ztrát neizolovaného potrubí

Zjištění tepelných ztrát neizolovaného potrubí je často prvním krokem ke zjištění potřeby izolace potrubí.

Vstupní data pro výpočet tepelných ztrát neizolovaného potrubí jsou:

1. Geometrie potrubí, materiál potrubí a její tepelná vodivost.
2. Teplota média uvnitř potrubí, včetně jeho průtočného množství (příp. rychlosti) nebo teplota povrchu potrubí.
3. Teplota a rychlost okolního vzduchu.

Na následujících příkladech je ukázán výpočet tepelné ztráty neizolovaného potrubí umístěného v prostoru o rychlosti vzduchu 10 m/s a v bezvětří. Při výpočtu tepelné ztráty potrubí se postupuje podle výše uvedeného blokového schématu (viz obr. 5). Pro tuto geometrii potrubí a vnější podmínky se počítají i ostatní příklady. Zadání úlohy vychází z příkladu 2.9 uvedeného v [10] na straně 64.

Příklad č. 1

Potrubí o vnějším průměru 60 mm je umístěno v prostoru, kde je rychlost větru 10 m/s. Teplota okolí je 20 °C. Teplota média v potrubí je 140 °C. Emisivita povrchu je $\varepsilon = 0,5$. Jaká je tepelná ztráta potrubí délky 1m?

Řešení:

Zjednodušení:

1. Vlastnosti okolního vzduchu a materiálu jsou konstantní, tzn. jsou nezávislé na teplotě.
2. Pro zjednodušení výpočtu se uvažuje, že teplota povrchu je rovna teplotě média.

Pro **nucenou** konvekci kolem kruhového potrubí se použije rovnice (3-15) pro výpočet střední teploty vzduchu (teploty filmu):

$$t_{st} = \frac{t_{w2} + t_a}{2} = \frac{140 + 20}{2} = 80 \text{ °C}$$

Fyzikální vlastnosti vzduchu jsou následující (konstantní, neměnné na teplotě):

$$\begin{aligned} \nu &= 21,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \\ \lambda_a &= 0,0293 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K}) \\ Pr &= 0,71 \end{aligned}$$

Nejprve vypočítáme Reynoldsovo číslo z rovnice (2-15), kde se za charakteristický rozměr l se dosadí vnější průměr potrubí:

$$Re = \frac{u l}{\nu} = \frac{10 \cdot 0,06}{21,5 \cdot 10^{-6}} = 2,79 \cdot 10^4$$

Výpočet Nuseltova čísla se provede z rovnice (3-16) pro obtékání horizontálního válce:

$$Nu = 0,3 + \frac{0,62\sqrt{Re}Pr^{\frac{1}{3}}}{\left(1 + \left(\frac{0,4}{Pr}\right)^{\frac{2}{3}}\right)^{\frac{1}{4}}} \left(1 + \left(\frac{Re}{282000}\right)^{\frac{5}{8}}\right)^{\frac{4}{5}}$$

$$Nu = 0,3 + \frac{0,62\sqrt{2,79 \cdot 10^4} \cdot 0,71^{\frac{1}{3}}}{\left(1 + \left(\frac{0,4}{0,71}\right)^{\frac{2}{3}}\right)^{\frac{1}{4}}} \left(1 + \left(\frac{2,79 \cdot 10^4}{282000}\right)^{\frac{5}{8}}\right)^{\frac{4}{5}} = 96,38$$

Výpočet α_k se určí podle vztahu (2-3), kde se za charakteristický rozměr l dosadí vnější průměr potrubí:

$$\alpha_k = \frac{Nu \cdot \lambda_a}{l} = \frac{96,38 \cdot 0,0293}{0,06} = 47 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Abychom mohli určit součinitel přestupu tepla sáláním, musíme nejprve vypočítat dle rovnice (2-9) přestup tepla sáláním:

$$Q_s = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_w^4 - T_a^4) = 0,5 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 0,1885 \cdot (413,15^4 - 293,15^4)$$

$$Q_s = 116,2 \text{ W}$$

Součinitel přestupu tepla se pak následně vypočítá z Newtonovy rovnice (2-1b):

$$\alpha_s = \frac{Q_s}{A \cdot (t_{w2} - t_a)} = \frac{116,2}{0,1885 \cdot (140 - 20)} = 5,1 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Součinitel přestupu tepla na vnější straně se pak vypočítá z rovnice (2-19):

$$\alpha_o = \alpha_k + \alpha_s = 47 + 5,1 = 52,1 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

Celková tepelná ztráta se pak vypočítá ze vztahu (2-1b):

$$Q = \alpha_o \cdot A \cdot (T_{w2} - T_{\infty}) = 52,1 \cdot \pi \cdot 0,06 \cdot 1 \cdot (140 - 20) = 1178,5 \text{ W}$$

Závěr

Tepeľná ztráta potrubí na 1 metr umístěného ve venkovním prostoru, kde je rychlost proudění vzduchu 10 m/s, je rovna 1178,5 W.

Příklad č. 2

Potrubí o vnějším průměru 60 mm je umístěno v prostoru, kde je nulová rychlost větru. Teplota okolí je 20 °C. Teplota média v potrubí je 140 °C. Emisivita povrchu je $\varepsilon = 0,5$. Jaká je tepelná ztráta potrubí délky 1 m?

Řešení:

Zjednodušení:

1. Vlastnosti okolního vzduchu a materiálu jsou konstantní, tzn. jsou nezávislé na teplotě.
2. Pro zjednodušení výpočtu se uvažuje, že teplota povrchu je rovna teplotě média.

Pro **volnou** konvekci kolem kruhového potrubí se použije rovnice (3-3) pro výpočet (teploty filmu) střední teploty vzduchu:

$$t_{st} = \frac{t_{w2} + t_a}{2} = \frac{140 + 20}{2} = 80 \text{ °C}$$

Fyzikální vlastnosti vzduchu se určí z tabulek a jsou:

$$\begin{aligned} \nu &= 21,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \\ \lambda_a &= 0,0293 \text{ W}/(\text{mK}) \\ Pr &= 0,71 \end{aligned}$$

Nejprve vypočítáme hodnotu Gr pomocí rovnice (2-12):

$$Gr = \frac{gl^3\beta\Delta t}{\nu^2} = \frac{9,81 \cdot 0,06^3 \cdot \frac{1}{293,15} \cdot (140 - 20)}{21,5 \cdot 10^{-6}{}^2} = 1,877 \cdot 10^6$$

$$GrPr = 1,877 \cdot 10^6 \cdot 0,71 = 1,332 \cdot 10^6$$

Součin $GrPr$ je v rozsahu $10^5 \leq GrPr \leq 10^{12}$, můžeme tudíž použít vztah (3-4a):

$$\begin{aligned} Nu &= \left(0,6 + \frac{0,387(GrPr)^{1/6}}{\left(1 + 0,721 \left(\frac{1}{Pr}\right)^{9/16}\right)^{8/27}} \right)^2 \\ Nu &= \left(0,6 + \frac{0,387(1,332 \cdot 10^6)^{1/6}}{\left(1 + 0,721 \left(\frac{1}{0,71}\right)^{9/16}\right)^{8/27}} \right)^2 = 14,52 \end{aligned}$$

Výpočet α_k se určí podle vztahu (2-3), kde se za charakteristický rozměr l dosadí vnější průměr potrubí:

$$\alpha_k = \frac{Nu \cdot \lambda_a}{l} = \frac{14,52 \cdot 0,0293}{0,06} = 7,1 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Abychom mohli určit součinitel přestupu tepla sáláním, musíme nejprve vypočítat dle rovnice (2-9) přestup tepla sáláním:

$$Q_s = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_w^4 - T_a^4) = 0,5 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 0,1885 \cdot (413,15^4 - 293,15^4)$$

$$Q_s = 116,2 \text{ W}$$

Součinitel přestupu tepla se pak následně vypočítá z Newtonovy rovnice (2-1b):

$$\alpha_s = \frac{Q_s}{A \cdot (t_{w2} - t_a)} = \frac{116,2}{0,1885 \cdot (140 - 20)} = 5,1 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Součinitel přestupu tepla na vnější straně je pak dán součtem konvektivní a sálavé složky:

$$\alpha_o = \alpha_k + \alpha_s = 7,1 + 5,1 = 12,2 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

Tepelná ztráta se vypočítá ze vztahu (2-1b):

$$Q = \alpha_o \cdot A \cdot (t_{w2} - t_a) = 12,2 \cdot \pi \cdot 0,06 \cdot 1 \cdot (140 - 20) = 276 \text{ W}$$

Závěr

Tepelná ztráta potrubí na 1 metr umístěného v uzavřeném prostoru, kde je nulová rychlost proudění vzduchu, je rovna 276 W.

Srovnání výsledků

V tab. 3 jsou pro srovnání uvedeny hlavní výsledky předchozích příkladů. Je vidět, že při umístění potrubí v místě, kde proudí vzduch, jsou tepelné ztráty mnohem vyšší, než při umístění potrubí na krytém místě, resp. za podmínek nulového proudění větru. Při výpočtech tepelných ztrát je tedy potřeba vhodně zvolit okrajové podmínky.

Tab. 3 Porovnání výsledků tepelných ztrát neizolovaného potrubí umístěného v bezvětří a ve větru

Příklad č.	Rychlost vzduchu [m/s]	Součinitel přestupu tepla na vnější straně [W/(m ² K)]	Tepelná ztráta [W]
1	10	52,1	1178,5
2	0	12,2	276

Tyto příklady byly přepočítány i pomocí programů sekce „Systémy pro přenos tepla“ ústavu procesního a ekologického inženýrství. Programy jsou zpracovány v prostředí MAPLE 13, a bere se v úvahu i změna vlastností vzduchu v závislosti na teplotě. Výsledky vypočtené tímto programem se dobře shodovaly. Programy uložené ve formátu pdf na CD jsou součástí této práce.

5.1.2 Výpočet tepelné ztráty izolovaného potrubí

Dalším základním výpočtem je výpočet potrubí pokrytého izolací o známé tloušťce. Tento typ výpočtu je možné použít i při hledání ekonomické tloušťky izolace (viz. kapitola 5.5). Blokové schéma výpočtu je uvedeno na obr. 5.

Příklad č. 3

Vzduch o teplotě 20 °C proudí kolem potrubí o vnějším průměru 60 mm a tloušťce 2 mm. V potrubí proudí médium o teplotě 140 °C. Potrubí je pokryto izolací z kamenné vaty o tloušťce 30 mm. Tepelná vodivost izolace je $\lambda = 0,04 \text{ W/(mK)}$. Tepelná vodivost materiálu potrubí je 45 W/(mK). Potrubí je umístěno venku, kde rychlost proudění větru je 10 m/s. Jaká je tepelná ztráta potrubí délky 1m?

Řešení:

Zjednodušení:

1. Vlastnosti okolního vzduchu a materiálu jsou konstantní, tzn. jsou nezávislé na teplotě.
2. Pro zjednodušení výpočtu se uvažuje, že teplota vnitřního povrchu potrubí je rovna teplotě média.

Nejprve odhadneme teplotu povrchu izolace $\rightarrow t_{w3} = 80 \text{ °C}$ a vypočteme si střední (teploty filmu) teplotu vzduchu:

$$t_{st} = \frac{t_{w3} + t_a}{2} = \frac{80 + 20}{2} = 50 \text{ °C}$$

Fyzikální vlastnosti suchého vzduchu jsou:

$$\begin{aligned} \nu &= 18,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \\ \lambda_a &= 0,0272 \text{ W/(mK)} \\ Pr &= 0,71 \end{aligned}$$

Dalším krokem je výpočet Reynoldsova čísla z rovnice (2-15), kde se za charakteristický rozměr l se dosadí vnější průměr potrubí včetně izolace:

$$Re = \frac{u l}{\nu} = \frac{10 \cdot 0,12}{18,6 \cdot 10^{-6}} = 64516$$

Výpočet Nusseltova čísla stejně jako v příkladě č. 1 se provede z rovnice (3-16) pro obtékání horizontálního válce:

$$Nu = 0,3 + \frac{0,62\sqrt{Re}Pr^{\frac{1}{3}}}{\left(1 + \left(\frac{0,4}{Pr}\right)^{\frac{2}{3}}\right)^{\frac{1}{4}}} \left(1 + \left(\frac{Re}{282000}\right)^{\frac{5}{8}}\right)^{\frac{4}{5}}$$

$$Nu = 0,3 + \frac{0,62\sqrt{64516} \cdot 0,71^{\frac{1}{3}}}{\left(1 + \left(\frac{0,4}{0,71}\right)^{\frac{2}{3}}\right)^{\frac{1}{4}}} \left(1 + \left(\frac{64516}{282000}\right)^{\frac{5}{8}}\right)^{\frac{4}{5}} = 161,6$$

Výpočet konvektivní složky součinitele přestupu tepla α_k se určí podle vztahu (2-3), kde se za charakteristický rozměr l dosadí vnější průměr potrubí:

$$\alpha_k = \frac{Nu \cdot \lambda_a}{l} = \frac{161,6 \cdot 0,0272}{0,12} = 36,6 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Pro určení koeficientu přestupu tepla sáláním nejprve vypočítáme rovnici přestupu tepla sáláním (2-9):

$$Q_s = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_{w3}^4 - T_a^4)$$

$$Q_s = 0,5 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 0,377 \cdot (353,15^4 - 293,15^4) = 87,3 \text{ W}$$

a z něho následně pomocí Newtonovy rovnice (2-1b) vyjádříme součinitel přestupu tepla:

$$\alpha_s = \frac{Q_s}{A \cdot (t_{w3} - t_a)} = \alpha_s = \frac{87,3}{0,377 \cdot (80 - 20)} = 3,9 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

Celkový součinitel přestupu tepla na vnější straně určíme součtem α_s a α_k :

$$\alpha_0 = \alpha_k + \alpha_s = 36,6 + 3,9 = 40,5 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

Výpočet tepelného výkonu Q provedeme dle rovnice (2-16). Pro výpočet součinitele prostupu tepla použijeme rovnici (2-18), kde zanedbáváme součinitel přestupu tepla na vnitřní stranu potrubí. Výpočet středního teplotního rozdílu se provede pomocí rovnice (2-22).

Výpočet součinitele prostupu tepla:

$$k = \frac{1}{\frac{d_2}{2\lambda_w} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{d_3}{2\lambda_{iz}} \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{\alpha_o}} = \frac{1}{\frac{0,06}{2 \cdot 45} \ln \frac{0,06}{0,054} + \frac{0,12}{2 \cdot 0,04} \ln \frac{0,12}{0,06} + \frac{1}{40,5}} = 0,94 \text{ W/(m.K)}$$

Výpočet středního rozdílu teplot:

$$\Delta T_M = t_{w1} - t_a = 140 - 20 = 120 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Výpočet přenosu tepla:

$$Q = k \cdot A \cdot \Delta T_M = 0,94 \cdot 0,377 \cdot 120 = 42,5 \text{ W}$$

Povrchová teplota t_{w2} a t_{w3} se vyjádří z rovnice (2-6):

$$t_{w2} = t_{w1} - \frac{Q \cdot \ln \frac{d_3}{d_2}}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_w \cdot L} = 140 - \frac{42,5 \cdot \ln \frac{0,12}{0,06}}{2 \cdot \pi \cdot 45 \cdot 1} = 139,99 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_{w3} = t_{w2} - \frac{Q \cdot \ln \frac{d_3}{d_2}}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{iz} \cdot L} = 140 - \frac{42,5 \cdot \ln \frac{0,12}{0,06}}{2 \cdot \pi \cdot 0,04 \cdot 1} = 22,8 \text{ } ^\circ\text{C}$$

jelikož hodnota teploty t_{w3} není shodná s teplotou odhadovanou ani se k ní neblíží, je zapotřebí provést další kroky iterace, jejíž výsledky jsou ukázány v tab. 4.

Tab. 4 Výsledky iterací povrchové teploty

i	T_{w3} odhadnutá	T_{w3} vypočtená
0	80	22,8
1	22,8	22,8

tudíž $t_{w3} = 22,8 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Hodnoty součinitele přestupu tepla na vnější straně dopočtené pro iterované povrchové teploty jsou ukázány v tab. 5.

Tab. 5 Součinitele přestupu tepla na vnější straně vypočtené pro povrchové teploty

i	T_{w3} odhadnutá	α_o
0	80	40,5
1	22,8	39,5

Výpočet tepelné ztráty izolovaného potrubí ze vztahu (2-1b):

$$Q = \alpha \cdot A \cdot (t_{w3} - t_a) = 39,5 \cdot \pi \cdot 0,12 \cdot 1 \cdot (22,8 - 20) = 42,5 \text{ W}$$

Závěr

Tepelná ztráta izolovaného potrubí o délce 1 m umístěného ve venkovním prostoru, kde je rychlost proudění vzduchu 10 m/s, je rovna 42,5W.

Příklad č. 4

Vzduch o teplotě 20 °C proudí kolem potrubí o vnějším průměru 60 mm a tloušťce stěny 2 mm. V potrubí proudí médium o teplotě 140 °C. Potrubí je pokryto izolací z kamenné vaty o tloušťce 30 mm. Tepelná vodivost izolace je $\lambda = 0,04 \text{ W/(mK)}$. Tepelná vodivost materiálu potrubí je 45 W/(mK). Potrubí je umístěno v uzavřené místnosti, kde je bezvětrí. Jaká je tepelná ztráta potrubí délky 1m?

Řešení:

Zjednodušení:

1. Vlastnosti okolního vzduchu a materiálu jsou konstantní, tzn. jsou nezávislé na teplotě.
2. Pro zjednodušení výpočtu se uvažuje, že teplota vnitřního povrchu potrubí je rovna teplotě média.

Stejně jako v předchozím příkladu nejprve odhadneme teplotu povrchu izolace a to $\rightarrow t_{w3} = 80 \text{ °C}$ a vypočteme si střední (teplotu filmu) teplotu vzduchu:

$$t_{st} = \frac{t_{w3} + t_a}{2} = \frac{80 + 20}{2} = 50 \text{ °C}$$

Fyzikální vlastnosti suchého vzduchu jsou:

$$\begin{aligned} \nu &= 18,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \\ \lambda_a &= 0,0272 \text{ W/(mK)} \\ Pr &= 0,71 \end{aligned}$$

Jedná se o volnou konvekci, takže nejprve vypočteme Grashofovo číslo pomocí rovnice (2-12):

$$Gr = \frac{gl^3 \beta \Delta t}{\nu^2} = \frac{9,81 \cdot 0,08^3 \cdot \frac{1}{293,15} \cdot (80 - 20)}{18,6 \cdot 10^{-6}{}^2} = 10,03 \cdot 10^6$$

Součin Grashofova a Prandtlůva čísla je:

$$GrPr = 2,97 \cdot 10^6 \cdot 0,71 = 7,12 \cdot 10^6$$

Součin $GrPr$ je v rozsahu $10^{-5} \leq GrPr \leq 10^{12}$, můžeme tudíž použít vztah (3-4a):

$$\begin{aligned} Nu &= \left(0,6 + \frac{0,387(GrPr)^{1/6}}{\left(1 + 0,721 \left(\frac{1}{Pr} \right)^{9/16} \right)^{8/27}} \right)^2 \\ Nu &= \left(0,6 + \frac{0,387(7,12 \cdot 10^6)^{1/6}}{\left(1 + 0,721 \left(\frac{1}{0,71} \right)^{9/16} \right)^{8/27}} \right)^2 = 25,6 \end{aligned}$$

Výpočet konvektivní složky součinitele přestupu tepla na vnější straně potrubí α_k se určí podle vztahu (2-3), kde se za charakteristický rozměr l dosadí vnější průměr potrubí:

$$\alpha_k = \frac{Nu \cdot \lambda_a}{l} = \frac{25,6 \cdot 0,0272}{0,12} = 5,8 \text{ W}/(m^2K)$$

Abychom mohli určit součinitel přestupu tepla sáláním, musíme nejprve vypočítat dle rovnice (2-9) přestup tepla sáláním:

$$Q_s = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_s^4 - T_a^4) = 0,5 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 0,377 \cdot (353,15^4 - 293,15^4) = 87,3 \text{ W}$$

Součinitel přestupu tepla se pak následně vypočítá z Newtonovy rovnice (2-1b):

$$\alpha_s = \frac{Q_s}{A \cdot (t_{w3} - t_a)} = \frac{87,3}{0,377 \cdot (80 - 20)} = 3,9 \text{ W}/m^2K$$

Celkový součinitel přestupu tepla na vnější straně určíme součtem α_s a α_k :

$$\alpha_0 = \alpha_k + \alpha_s = 5,8 + 3,9 = 9,7 \text{ W}/m^2K$$

Výpočet tepelného výkonu Q provedeme dle rovnice (2-16), pro výpočet součinitele prostupu tepla použijeme rovnici (2-18), kde zanedbáváme součinitel přestupu tepla na vnitřní stranu potrubí. Výpočet středního teplotního rozdílu se provede pomocí rovnice (2-22).

Výpočet součinitele prostupu tepla:

$$k = \frac{1}{\frac{d_2}{2\lambda_w} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{d_3}{2\lambda_{iz}} \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{\alpha_o}} = \frac{1}{\frac{0,06}{2 \cdot 45} \ln \frac{0,06}{0,054} + \frac{0,12}{2 \cdot 0,04} \ln \frac{0,12}{0,06} + \frac{1}{10,3}} = 0,87 \text{ W}/(m \cdot K)$$

Výpočet středního rozdílu teplot:

$$\Delta T_M = t_{w1} - t_a = 140 - 20 = 120 \text{ }^\circ\text{C}$$

Výpočet přenosu tepla:

$$Q = k \cdot A \cdot \Delta T_M = 0,87 \cdot 0,377 \cdot 120 = 39,6 \text{ W}$$

Nyní můžeme vypočítat povrchové teploty potrubí a izolace z rovnice (2-6):

$$t_{w2} = t_{w1} - \frac{Q \cdot \ln \frac{d_2}{d_1}}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_w \cdot L} = 140 - \frac{39,6 \cdot \ln \frac{0,12}{0,06}}{2 \cdot \pi \cdot 45 \cdot 1} = 139,99 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$t_{w3} = t_{w2} - \frac{Q \cdot \ln \frac{d_3}{d_2}}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{iz} \cdot L} = 140 - \frac{39,6 \cdot \ln \frac{0,12}{0,06}}{2 \cdot \pi \cdot 0,04 \cdot 1} = 30,87 \text{ }^\circ\text{C}$$

Jelikož hodnota teploty t_{w3} není shodná s teplotou odhadovanou a ani se k ní neblíží, je zapotřebí provést další kroky iterace, jejíž výsledky jsou ukázány v tab.6.

Tab. 6 Výsledky iterací povrchové teploty

i	T _i odhadnutá	F(T _i) vypočtená
0	80	30,9
1	30,9	35,4
2	35,4	34,5
3	34,5	34,6
4	34,6	34,6

tudíž $t_{w3} = 34,6$ °C.

Hodnoty součinitele přestupu tepla na vnější straně določtené pro iterované povrchové teploty jsou ukázány v tab. 7.

Tab. 7 Součinitele přestupu tepla z vnější strany vypočtené pro povrchové teploty

I	T _i odhadnutá	α_0
0	80	9,7
1	30,9	6,6
2	35,4	7,0
3	34,5	6,9
4	34,6	6,9

Výpočet tepelné ztráty 1 m izolovaného potrubí:

$$Q = \alpha_0 \cdot A \cdot (t_{w3} - t_a) = 6,9 \cdot \pi \cdot 0,12 \cdot 1 \cdot (34,6 - 20) = 38,2 \text{ W}$$

Závěr

Tepelná ztráta izolovaného potrubí o délce 1 m umístěného v uzavřeném prostoru, kde je rychlost proudění vzduchu 0 m/s, je rovna 38,2 W.

Srovnání výsledků

Jak ukazuje tab. 8, při izolovaném potrubí je tepelná ztráta výrazně menší oproti neizolovanému potrubí. Je vidět, že i na velikost tepelné ztráty potrubí má vliv rychlost okolního větru.

Tab. 8 Porovnání výsledků tepelných ztrát izolovaného potrubí umístěného v bezvětrí a ve větru

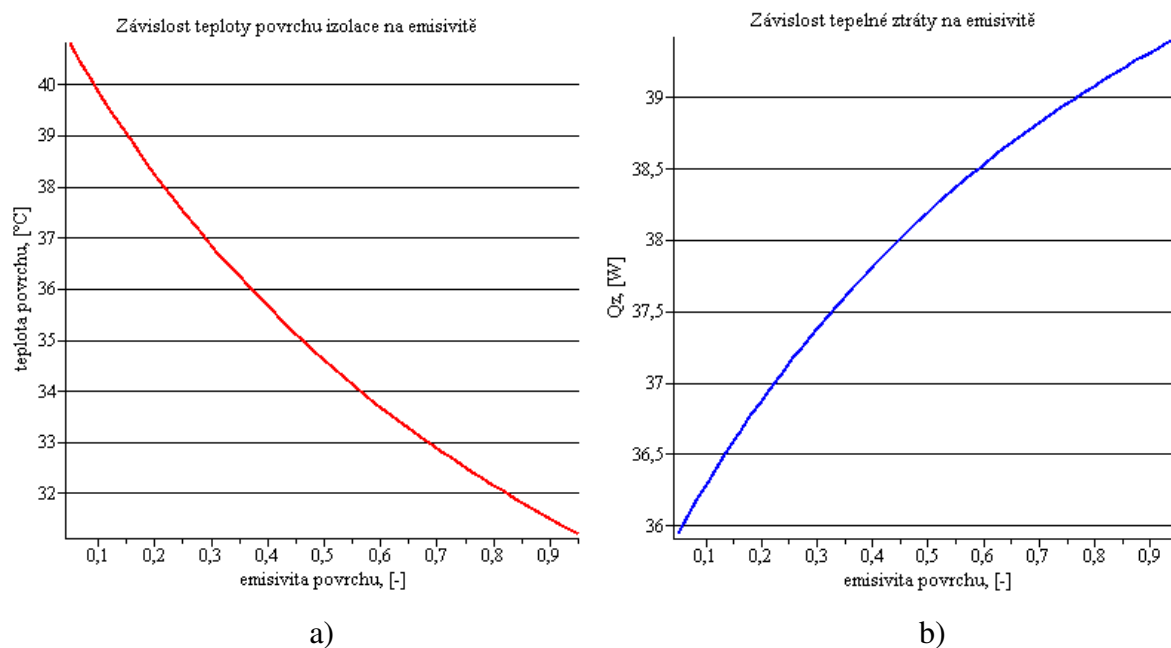
Příklad č.	Rychlost vzduchu [m/s]	Součinitel přestupu tepla na vnější straně [W/(m ² K)]	Tepelná ztráta [W]	Snížení tepelné ztráty oproti neiz. potrubí [%]
1	10	39,5	42,5	96,4
2	0	6,9	38,2	86,2

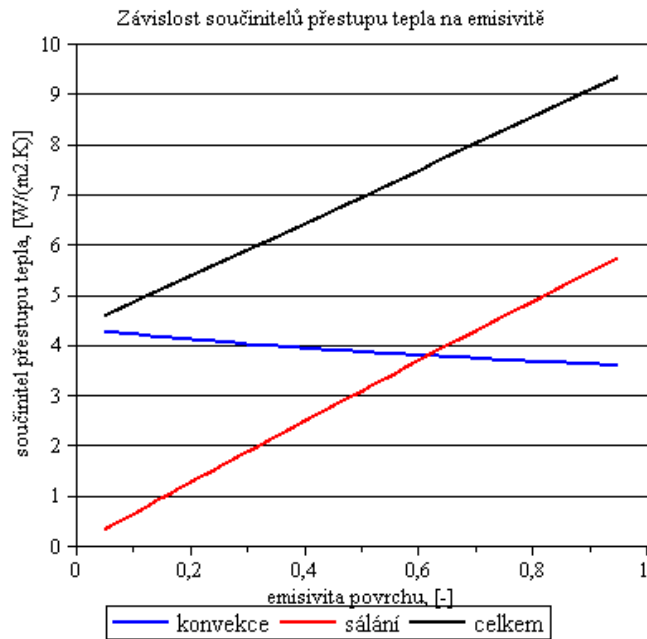
Příklady byly rovněž přepočítány pomocí programu sekce „Systémy pro přenos tepla“ Ústavu procesního a ekologického inženýrství, který je vytvořen v matematickém software Maple a bere v úvahu i teplotní závislost vzduchu. Výsledky získané tímto programem a zde vypočtené se dobře shodovaly. Vstupní zadávací list programu s výsledky je uložen ve formátu pdf na CD, které je součástí této práce.

5.1.3 Vliv různých faktorů na tepelnou ztrátu a povrchovou teplotu izolovaného potrubí

Pro předchozí příklady izolovaného a neizolovaného potrubí byly zkoumány vlivy emisivity povrchu a rychlosti proudění větru na teploty povrchu, tepelné ztráty a součinitele přestupu tepla. Pomocí programu sekce „Systémy pro přenos tepla“ Ústavu procesního a ekologického inženýrství, který je určen k výpočtům izolací, byly tyto závislosti vykresleny do grafů.

Na příkladu izolovaného potrubí umístěného v bezvětrí byla zkoumána závislost teploty povrchu, tepelné ztráty a součinitelů přestupu tepla na emisivitě povrchu izolace. Výsledky jsou graficky znázorněny na obr. 6.



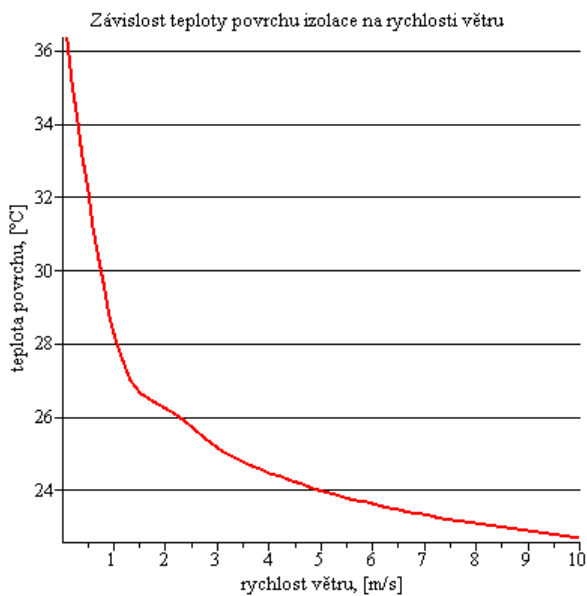


c)

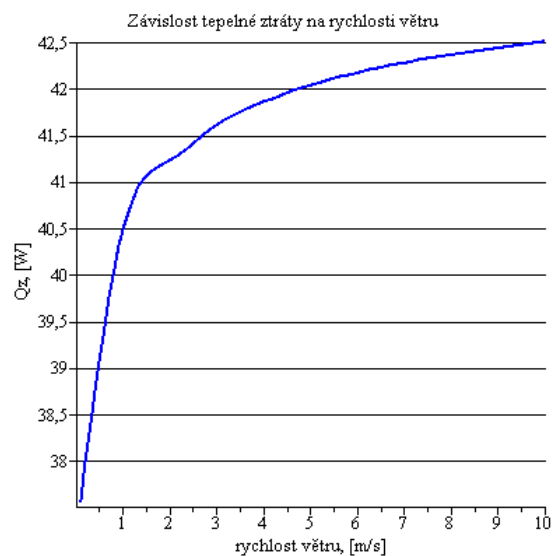
Obr. 6 Závislost teploty povrchu na emisivitě povrchu izolace a), závislost tepelné ztráty na emisivitě povrchu izolace b), a závislost součinitelů přestupu tepla na emisivitě povrchu izolace

Jak ukazuje obr. 6 a) a b) teplota povrchu se zvětšující emisivitou snižuje, ale tepelné ztráty se naproti tomu zvyšují. To je tím, že se zvyšuje součinitel přestupu tepla α_o , jak je vidět na obr. 6 c). Součinitel přestupu tepla konvekcí je téměř konstantní. Mění se jen mírně z důvodu změny fyzikálních vlastností vzduchu. Součinitel přestupu tepla sáláním se naproti tomu mění velmi výrazně se změnou emisivity.

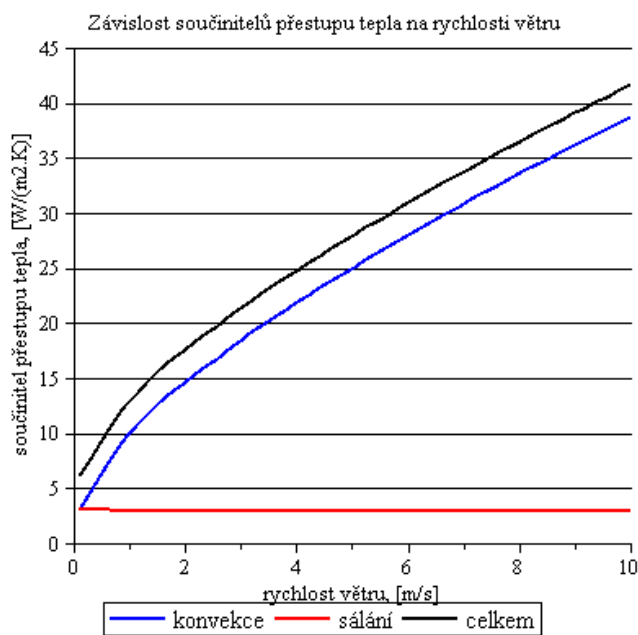
Dále byl zkoumán vliv rychlosti větru na teplotu povrchu, tepelnou ztrátu a součinitele přestupu tepla. Na obr. 7 a) a b) je vidět, že s rychlostí větru se zvětšují tepelné ztráty potrubí a snižuje povrchová teplota izolace. Je to dáno zvětšujícím se přestupem tepla na vnější straně.



a)



b)



c)

Obr. 7 Závislost teploty povrchu na rychlosti větru a), závislost tepelné ztráty na rychlosti větru b), a závislost součinitelů přestupu tepla na rychlosti větru

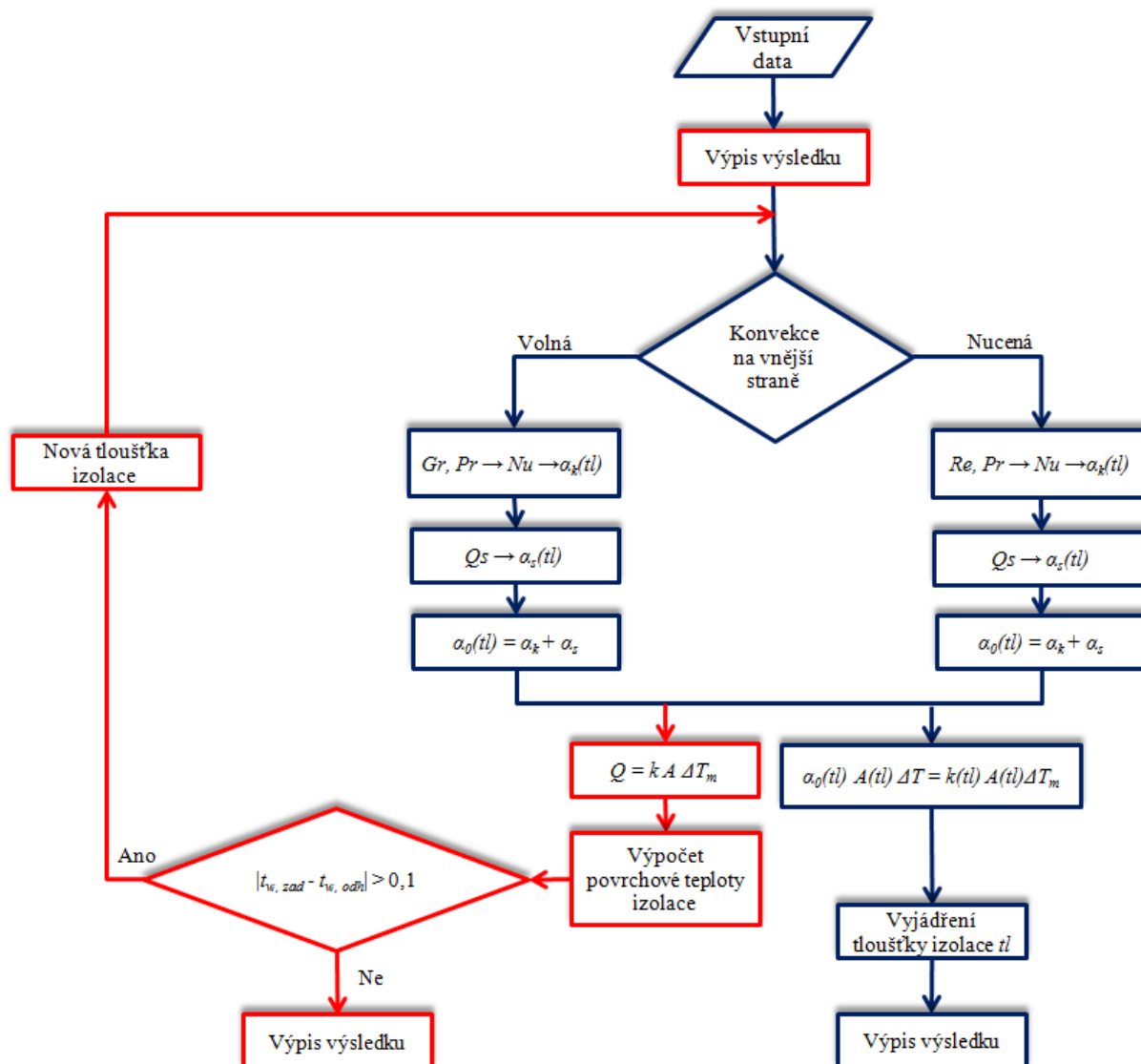
Podle obr. 7 c) součinitel přestupu tepla sáláním se s rychlostí větru nemění. Naopak s rostoucí rychlostí větru roste součinitel přestupu tepla konvekcí.

Jak ukazují výsledky, je nutné při návrhu vhodné izolace správně určit okrajové podmínky (vhodnou emisivitu povrchu a rychlost proudění větru). Emisivitu povrchů izolací případně krycích plechů je možné určit z tabulky v příloze P2.

5.2 Výpočet tloušťky izolace pro požadovanou povrchovou teplotu

Tento výpočet slouží pro zjištění tloušťky izolace potrubí, která bude mít požadovanou povrchovou teplotu. Tato teplota je požadovaná většinou z bezpečnostních důvodů, aby nedošlo k ujmě na zdraví pohybujících se osob kolem potrubí nebo k poškození vlivem tepla na okolních zařízeních [9]. Při výpočtu se stejně jak v předchozím případě vychází ze vztahů (2-1b), (2-16). Pro výpočty součinitele přestupu tepla se použijí vztahy z kapitoly 3. Blokové schéma výpočtu tepelných ztrát potrubí je uvedeno na obr. 8.

Požadovaná bezpečnostní teplota se určí z teploty okolí, kde se (dle sbírky zákonů č. 193/ 2007, vyhlášky ze dne 17. července 2007, §5 odstavec (3)) u vnitřních rozvodů s teplonosnou látkou do 115 °C teplota navrhuje maximálně o 20 °C vyšší než teplota okolí. U vnitřních rozvodů nad 115 °C musí být rozdíl teplot do 25 °C.



Obr. 8 Blokové schéma výpočtu tloušťky stěny izolace pro požadovanou povrchovou teplotu

Poznámka: Výpočet požadované tloušťky izolace pro zadanou teplotu může být proveden dvěma způsoby. Prvním z nich je položení přenosové rovnice (2-16) a rovnice tepelných ztrát konvekce na vnější straně (2-1b) do rovnosti a následně vyjádření tloušťky pomocí matematického softwaru Maple. Tento postup je použit i v této práci a je označen modrou barvou ve schématu.

U druhého způsobu nejprve odhadneme tloušťku izolace, vypočítáme z přenosové rovnice (2-16) tepelné ztráty a dopočítáme povrchovou teplotu. Tuto teplotu porovnáme se zadanou teplotou. Pokud se teploty povrchu liší, provedeme nový odhad tloušťky izolace a výpočet opakujeme tak dlouho, dokud se vypočtená teplota a zadaná teplota povrchu nebudou rovnat. Tento postup je naznačen červenou barvou ve schématu na obr. 8.

Vstupní data pro výpočet tloušťky pro požadovanou povrchovou teplotu:

1. Geometrie potrubí, materiál potrubí.
2. Teplota média uvnitř potrubí, včetně jeho průtočného množství (příp. rychlosti) nebo teplota povrchu potrubí.
3. Požadovaná teplota povrchu izolace.
4. Teplota a rychlost okolního vzduchu.
5. Materiál a tepelná vodivost izolace.

Příklad č. 5

Vzduch o teplotě 20 °C proudí kolem potrubí o vnějším průměru 60 mm a tloušťce 2 mm. V potrubí proudí médium o teplotě 140 °C. Potrubí je umístěno venku, kde rychlost proudění je 10 m/s. Jaká je tloušťka izolace pro povrchovou teplotu 40 °C? Tepelná vodivost potrubí je 45 W/(mK) a tepelná vodivost izolace je $\lambda = 0,04\text{W}/(\text{mK})$.

Řešení:

Zjednodušení:

1. Vlastnosti okolního vzduchu a materiálu potrubí a izolace jsou konstantní, tzn. jsou nezávislé na teplotě.
2. Pro zjednodušení výpočtu se uvažuje, že teplota vnitřního povrchu potrubí je rovna teplotě média.

Teplotu povrchu izolace máme zadanou, takže můžeme provést výpočet střední teploty vzduchu:

$$t_{st} = \frac{t_{w3} + t_a}{2} = \frac{40 + 20}{2} = 30 \text{ °C}$$

Fyzikální vlastnosti suchého vzduchu jsou určeny pro střední teplotu 30°C:

$$\begin{aligned} \nu &= 16,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \\ \lambda_a &= 0,0258 \text{ W}/(\text{mK}) \\ Pr &= 0,71 \end{aligned}$$

Vnější průměr potrubí včetně izolace se vypočítá dle vztahu:

$$d_3 = (d_2 + 2 \cdot tl) [m]$$

Výpočet Reynoldsova čísla z rovnice (2-15):

$$Re = \frac{u \cdot (d_2 + 2 \cdot tl)}{\nu} = \frac{10 \cdot (0,06 + 2 \cdot tl)}{16,6 \cdot 10^{-6}} = 3,62 \cdot 10^4 + 1,21 \cdot 10^6 \cdot tl [-]$$

Výpočet Nusseltova čísla se provede z rovnice (3-16) pro obtékání horizontálního válce:

$$Nu = 0,3 + \frac{0,62\sqrt{Re}Pr^{\frac{1}{3}}}{\left(1 + \left(\frac{0,4}{Pr}\right)^{\frac{2}{3}}\right)^{\frac{1}{4}}} \left(1 + \left(\frac{Re}{282000}\right)^{\frac{5}{8}}\right)^{\frac{4}{5}}$$

$$Nu = 0,3 + \frac{0,62\sqrt{3,62 \cdot 10^4 + 1,21 \cdot 10^6 \cdot tl} Pr^{\frac{1}{3}}}{\left(1 + \left(\frac{0,4}{Pr}\right)^{\frac{2}{3}}\right)^{\frac{1}{4}}} \left(1 + \left(\frac{3,62 \cdot 10^4 + 1,21 \cdot 10^6 \cdot tl}{282000}\right)^{\frac{5}{8}}\right)^{\frac{4}{5}} [-]$$

Pro výpočet součinitele přestupu konvekce tepla na vnější straně použijeme rovnici (2-3):

$$\alpha_k = \frac{Nu \cdot \lambda_a}{l} = \frac{Nu(tl) \cdot 0,0258}{(0,06 + 2 \cdot tl)} [W/m^2K]$$

Abychom mohli určit součinitel přestupu tepla sáláním, musíme nejprve vypočítat dle rovnice (2-9) přestupu tepla sáláním:

$$Q_s = \varepsilon \cdot \sigma \cdot \pi \cdot (d_2 + 2 \cdot tl) \cdot L \cdot (T_{w3}^4 - T_a^4)$$

$$Q_s = 0,5 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \pi \cdot (0,06 + 2 \cdot tl) \cdot 1 \cdot (313,15^4 - 293,15^4)$$

$$Q_s = 11,923 + 397,437 \cdot tl [W]$$

Součinitel přestupu tepla sáláním se následně vypočítá z Newtonovy rovnice (2-1b):

$$\alpha_s = \frac{Q_s}{\pi \cdot (d_2 + 2 \cdot tl) \cdot L \cdot (t_{w3} - t_a)} [W/m^2K]$$

$$\alpha_s = \frac{11,923 + 397,437 \cdot tl}{\pi \cdot (0,06 + 2 \cdot tl) \cdot L \cdot (40 - 20)} [W/m^2K]$$

$$\alpha_s = \frac{11,923 + 397,437 \cdot tl}{3,77 + 125,7 \cdot tl} [W/m^2K]$$

Celkový součinitel přestupu tepla na vnější straně určíme součtem α_s a α_k :

$$\alpha_0 = \alpha_k + \alpha_s = \frac{Nu(tl) \cdot 0,0258}{0,06 + 2 \cdot tl} + \frac{11,923 + 397,437 \cdot tl}{3,77 + 125,7 \cdot tl} [W/m^2K]$$

Pro výpočet tepelného výkonu Q dosadíme do rovnice (2-16). Pro výpočet součinitele přestupu tepla použijeme rovnici (2-18), kde zanedbáváme součinitel přestupu tepla z vnitřní strany potrubí. Výpočet středního teplotního rozdílu vypočteme z rovnice (2-22).

Výpočet součinitele prostupu tepla:

$$k = \frac{1}{\frac{d_2}{\lambda_w} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{d_2+2 \cdot tl}{\lambda_{iz}} \ln \frac{d_2+2 \cdot tl}{d_2} + \frac{1}{\alpha_0(tl)}}$$

$$k = \frac{1}{\frac{0,06}{45} \ln \frac{0,06}{0,056} + \frac{0,06+2 \cdot tl}{0,04} \ln \frac{0,06+2 \cdot tl}{0,06} + \frac{0,06+2 \cdot tl}{Nu(tl) \cdot 0,0258} + \frac{3,77+125,7 \cdot tl}{11,923+397,437 \cdot tl}} [W/(mK)]$$

Výpočet středního rozdílu teplot:

$$\Delta T_M = t_{w1} - t_a = 140 - 20 = 120 [^{\circ}C]$$

Výpočet tepelného toku přenosovou rovnicí:

$$Q = k \cdot \pi \cdot (d_2 + 2 \cdot tl) \cdot L \cdot \Delta T_M [W]$$

$$Q = \frac{1}{\frac{0,06}{45} \ln \frac{0,06}{0,056} + \frac{0,06+2 \cdot tl}{0,04} \ln \frac{0,06+2 \cdot tl}{0,06} + \frac{0,06+2 \cdot tl}{Nu(tl) \cdot 0,0258} + \frac{3,77+125,7 \cdot tl}{11,923+397,437 \cdot tl}} \cdot (22,6 + 753,8 \cdot tl) [W]$$

Pro výpočet tepelné ztráty izolovaného potrubí použijeme rovnice (2-1b):

$$Q = \alpha_0(tl) \cdot \pi \cdot (d_2 + 2 \cdot tl) \cdot L \cdot \Delta T [W]$$

$$Q = \frac{Nu(tl) \cdot 0,0258}{0,06 + 2 \cdot tl} + \frac{11,923 + 397,437 \cdot tl}{3,77 + 125,7 \cdot tl} \cdot (22,6 + 753,8 \cdot tl) [W]$$

Rovnice (2-1b) a (2-16) položíme do rovnosti:

$$k \cdot \pi \cdot (d_2 + 2 \cdot tl) \cdot L \cdot \Delta T_M = \alpha_0 \cdot \pi \cdot (d_2 + 2 \cdot tl) \cdot L \cdot \Delta T$$

$$\frac{1}{\frac{0,06}{45} \ln \frac{0,06}{0,056} + \frac{0,06+2 \cdot tl}{0,04} \ln \frac{0,06+2 \cdot tl}{0,06} + \frac{0,06+2 \cdot tl}{Nu(tl) \cdot 0,0258} + \frac{3,77+125,7 \cdot tl}{11,923+397,437 \cdot tl}} \cdot (22,6 + 753,8 \cdot tl) =$$

$$= \frac{Nu(tl) \cdot 0,0258}{0,06 + 2 \cdot tl} + \frac{11,923 + 397,437 \cdot tl}{3,77 + 125,7 \cdot tl} \cdot (22,6 + 753,8 \cdot tl)$$

Následně vyjádříme tloušťku izolace tl pomocí výpočetního programu Maple 13. Tento postup je uložen ve formátu pdf na příloženém CD.

Závěr

Minimální tloušťka izolace pro požadovanou teplotu povrchu $40 \text{ }^{\circ}C$ při nucené konvekci na otevřeném prostranství je 3,7 mm.

Vliv vnější teploty na tloušťku izolace pro požadovanou teplotu povrchu při nucené konvekcii

Pro předchozí zadání byla vypočítána, pomocí programu sekce „Systémy pro přenos tepla“ Ústavu procesního a ekologického inženýrství, který je určen k výpočtům izolací, tloušťka izolace potrubí a jeho tepelné ztráty pro dosažení povrchové teploty 40 °C při různých vnějších teplotách. Potrubí je umístěno venku, kde rychlost proudění je 10 m/s. Výsledky výpočtů jsou uvedeny v tab. 9.

Tab. 9 Závislost tloušťky izolace potrubí pro dosažení teploty 40 °C na teplotě okolí

Teplota okolí [°C]	Tepelné ztráty [W]	Součinitel přestupu tepla na vnější straně [W/(m ² K)]	Tloušťka izolace pro povrchovou teplotu 40 °C [mm]
-10	515,3	52,08	1,5
0	415,1	51,82	1,9
10	314,2	51,29	2,5
20	214	50,46	3,7
30	114	48,53	7,4

Výsledky v tab. 9 ukazují, že pokud chceme navrhnout izolaci pro maximální povrchovou teplotu 40 °C, musíme brát do úvahy nejteplejší dny (tzn. teploty pro letní období). Pokud bychom však navrhovali izolaci potrubí pro minimální tepelné ztráty, tak bychom naopak museli uvažovat s teplotami pro zimní období.

Příklad č. 6

Vzduch o teplotě 20 °C proudí kolem potrubí o vnějším průměru 60 mm a tloušťce 2 mm. V potrubí proudí médium o teplotě 140 °C. Potrubí je umístěno v prostředí, kde je nulová rychlost proudění větru. Jaká je tloušťka izolace pro povrchovou teplotu 40 °C? Tepelná vodivost materiálu stěn potrubí je 45 W/(mK) a tepelná vodivost materiálu izolace je $\lambda = 0,04$ W/(mK).

Řešení:

Zjednodušení:

1. Vlastnosti okolního vzduchu a materiálu potrubí a izolace jsou konstantní, tzn. jsou nezávislé na teplotě.
2. Pro zjednodušení výpočtu se uvažuje, že teplota vnitřního povrchu potrubí je rovna teplotě média.

V tomto případě budeme postupovat stejně jako v předchozím příkladu. Lišit se bude jen výpočet konvektivní složky součinitele přestupu tepla na vnější straně.

Střední teplota (teplota filmu) vzduchu je:

$$t_{st} = \frac{t_{w3} + t_a}{2} = \frac{40 + 20}{2} = 30 \text{ °C}$$

Pro tuto hodnotu střední teploty jsou určeny fyzikální vlastnosti vzduchu:

$$\begin{aligned} \nu &= 16,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \\ \lambda_a &= 0,0258 \text{ W}/(\text{mK}) \\ Pr &= 0,71 \end{aligned}$$

Průměr izolace se spočítá dle vztahu:

$$d_3 = (d_2 + 2 \cdot tl) [m]$$

Výpočet Grashofova čísla se provede pomocí rovnice (2-12):

$$Gr = \frac{gl^3 \beta \Delta t}{\nu^2} = \frac{9,81(d_2 + 2 \cdot tl)^3 \frac{1}{293,15} (40 - 20)}{(16,6 \cdot 10^{-6})^2} = 8,71 + 8,1 \cdot 10^4 \cdot tl^3$$

$$GrPr = 6,18 + 5,75 \cdot 10^4 \cdot tl^3$$

Součin $GrPr$ je v rozsahu $10^5 \leq GrPr \leq 10^{12}$, $0,7 < Pr < 100$, tudíž můžeme použít vztah (3-4a):

$$Nu = \left(0,6 + \frac{0,387(GrPr)^{1/6}}{\left(1 + 0,721 \left(\frac{1}{Pr} \right)^{9/16} \right)^{8/27}} \right)^2$$

$$Nu = \left(0,6 + \frac{0,387(6,18 + 5,75 \cdot 10^4 \cdot tl^3)^{1/6}}{\left(1 + 0,721 \left(\frac{1}{0,71} \right)^{9/16} \right)^{8/27}} \right)^2 [-]$$

Pro výpočet součinitele přestupu tepla konvekcí na vnější straně použijeme rovnici (2-3):

$$\alpha_k = \frac{Nu \cdot \lambda_a}{l} = \frac{Nu(tl) \cdot 0,0258}{(0,06 + 2 \cdot tl)} [W/m^2K]$$

Abychom mohli určit součinitel přestupu tepla sáláním, musíme nejprve vypočítat dle rovnice (2-9) přestup tepla sáláním:

$$Q_s = \varepsilon \cdot \sigma \cdot \pi \cdot (d_2 + 2 \cdot tl) \cdot L \cdot (T_w^4 - T_a^4)$$

$$Q_s = 0,5 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \pi \cdot (0,06 + 2 \cdot tl) \cdot 1 \cdot (313,15^4 - 293,15^4)$$

$$Q_s = 11,923 + 397,437 \cdot tl \text{ [W]}$$

Součinitel přestupu tepla sáláním se následně vypočítá z Newtonovy rovnice (2-1b):

$$\alpha_s = \frac{Q_s}{\pi \cdot (d_2 + 2 \cdot tl) \cdot L \cdot (t_{w3} - t_a)} \text{ [W/m}^2\text{K]}$$

$$\alpha_s = \frac{11,923 + 397,437 \cdot tl}{\pi \cdot (0,06 + 2 \cdot tl) \cdot L \cdot (40 - 20)} \text{ [W/m}^2\text{K]}$$

$$\alpha_s = \frac{11,923 + 397,437 \cdot tl}{3,77 + 125,66 \cdot tl} \text{ [W/m}^2\text{K]}$$

Celkový součinitel přestupu tepla na vnější straně určíme součtem α_s a α_k :

$$\alpha_0 = \alpha_k + \alpha_s = \frac{Nu(tl) \cdot 0,0258}{0,06 + 2 \cdot tl} + \frac{11,923 + 397,437 \cdot tl}{3,77 + 125,7 \cdot tl} \text{ [W/m}^2\text{K]}$$

Pro výpočet tepelného výkonu Q dosadíme do rovnice (2-16). Pro výpočet součinitele prostupu tepla použijeme rovnici (2-18), kde zanedbáváme součinitel přestupu tepla z vnitřní strany potrubí. Výpočet středního teplotního rozdílu vypočteme z rovnice (2-22).

Výpočet součinitele prostupu tepla:

$$k = \frac{1}{\frac{d_2}{\lambda_w} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{d_2+2 \cdot tl}{\lambda_{iz}} \ln \frac{d_2+2 \cdot tl}{d_2} + \frac{1}{\alpha_0(tl)}}$$

$$k = \frac{1}{\frac{0,06}{45} \ln \frac{0,06}{0,056} + \frac{0,06+2 \cdot tl}{0,04} \ln \frac{0,06+2 \cdot tl}{0,06} + \frac{0,06+2 \cdot tl}{Nu(tl) \cdot 0,0258} + \frac{3,77+125,7 \cdot tl}{11,923+397,437 \cdot tl}} \text{ [W/(mK)]}$$

Výpočet středního rozdílu teplot:

$$\Delta T_M = t_{w1} - t_a = 140 - 20 = 120 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Výpočet tepelného toku přenosovou rovnicí:

$$Q = k \cdot \pi \cdot (d_2 + 2 \cdot tl) \cdot L \cdot \Delta T_M [W]$$

$$Q = \frac{1}{\frac{0,06}{45} \ln \frac{0,06}{0,056} + \frac{0,06+2 \cdot tl}{0,04} \ln \frac{0,06+2 \cdot tl}{0,06} + \frac{0,06+2 \cdot tl}{Nu(tl) \cdot 0,0258} + \frac{3,77+125,7 \cdot tl}{11,923+397,437 \cdot tl}} \cdot (22,6 + 753,8tl) [W]$$

Pro výpočet tepelného toku konvekcí izolovaného potrubí:

$$Q = \alpha_0 \cdot \pi \cdot (d_2 + 2 \cdot tl) \cdot L \cdot \Delta T [W]$$

$$Q = \frac{Nu(tl) \cdot 0,0258}{0,06 + 2 \cdot tl} + \frac{11,923 + 397,437 \cdot tl}{3,77 + 125,7 \cdot tl} \cdot (22,6 + 753,8tl) [W]$$

Rovnice (2-2) a (2-16) položíme do rovnosti:

$$k(tl) \cdot \pi \cdot (d_2 + 2 \cdot tl) \cdot L \cdot \Delta T_M = \alpha_0 \cdot \pi \cdot (d_2 + 2 \cdot tl) \cdot L \cdot \Delta T$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\frac{0,06+2 \cdot tl}{0,049} \ln \frac{0,06+2 \cdot tl}{0,06} + \frac{0,06+2 \cdot tl}{Nu(tl) \cdot 0,0258} + \frac{3,77+125,7 \cdot tl}{11,923+397,437 \cdot tl}} \cdot (22,6 + 753,8tl) = \\ & = \frac{Nu(tl) \cdot 0,0258}{0,06 + 2 \cdot tl} + \frac{11,923 + 397,437 \cdot tl}{3,77 + 125,7 \cdot tl} \cdot (22,6 + 753,8tl) \end{aligned}$$

Následně vyjádříme tloušťku izolace tl pomocí výpočetního programu Maple 13. Výpočet v Maple je uložen v souboru pdf na CD, které je součástí této práce.

Závěr

Minimální tloušťka izolace pro požadovanou teplotu povrchu 40 °C při volné konvekcí v uzavřené místnosti je 20,8 mm.

Vliv vnější teploty na tloušťku izolace pro požadovanou teplotu povrchu při volné konvekcí

Pro předchozí zadání byla vypočítána tloušťka, pomocí programu sekce „Systémy pro přenos tepla“ Ústavu procesního a ekologického inženýrství, který je určen k výpočtům izolací potrubí a jeho tepelné ztráty pro dosažení povrchové teploty 40 °C při různých vnějších teplotách. Potrubí je umístěno v prostředí s nulovou rychlostí proudění větru. Výsledky výpočtů jsou uvedeny v tab. 10.

Tab. 10 Závislost tloušťky izolace potrubí pro dosažení teploty 40 °C na teplotě okolí a nulové rychlosti proudění větru

Teplota okolí [°C]	Tepelné ztráty [W]	Součinitel přestupu tepla na vnější straně [W/(m ² K)]	Tloušťka izolace pro povrchovou teplotu 40 °C [mm]
-10	105,5	8,82	8,1
0	85,6	8,46	10,2
10	66,3	8,03	13,8
20	47,7	7,47	20,8
30	29,4	6,64	40,5

Výsledky v tab. 10 opět ukazují, že pokud chceme navrhnout izolaci pro maximální povrchovou teplotu 40 °C, musíme brát do úvahy nejteplejší dny (tzn. teploty pro letní období). Naopak, pokud bychom navrhovali izolaci potrubí pro minimální tepelné ztráty, tak bychom museli uvažovat s teplotami pro zimní období. V porovnání s tab. 8 lze pozorovat, že při volné konvekci je součinitel přestupu tepla na vnější straně a tepelné ztráty výrazně menší.

5.3 Zjištění požadované tloušťky izolace zabraňující vzniku kondenzace na povrchu potrubí

Okolní vzduch vždy obsahuje vodní páru. Pokud klesne teplota vzduchu nasyceného vodní párou, na povrchu potrubí se vysráží přebytečné páry v podobě kapek. Čím je teplota nižší, tím méně může vzduch pojmout vody. Pro zamezení srážení vlhkosti na povrchu je potřeba potrubí izolovat tak, aby povrchová teplota izolace byla vyšší, než je teplota rosného bodu [2]. Při výpočtu se vychází z rovnic (2-1b) a (2-16). Pro výpočet součinitele přestupu tepla na vnější straně potrubí se použijí vztahy z kapitoly 3. Vztahy pro výpočet rosného bodu jsou uvedeny níže. Výpočet požadované tloušťky zabraňující kondenzaci vodních par na povrchu potrubí je shodný s výpočtem tloušťky izolace pro zadanou povrchovou teplotu. Rozdíl je pouze v tom, že požadovaná teplota povrchu je rovna teplotě rosného bodu. Jinak se postupuje dle blokového schématu na obr. 9.

Vstupní data pro výpočet tepelných ztrát potrubí jsou:

1. Geometrie potrubí, materiál potrubí.
2. Teplota média uvnitř potrubí včetně jeho průtočného množství (příp. rychlosti) nebo teplota povrchu potrubí.
3. Teplota, rychlost a vlhkost okolního vzduchu.
4. Typ a tepelná vodivost izolace.

Pro určení minimální teploty stěny potrubí, která by zabránila kondenzaci vodních par na jeho povrchu, je nutné vypočítat teplotu rosného bodu okolního vzduchu.

Výpočet rosného bodu

Výpočet rosného bodu vychází z ČSN 730540 – 3 [23]:

Pro $p_d < 610,75 \text{ Pa}$:

$$t_r = \frac{273 \cdot \ln(p_d) - 1751,21055}{28,9205 - \ln(p_d'')} \quad (5-1)$$

Pro $p_d \geq 610,75 \text{ Pa}$:

$$t_r = \frac{236 \cdot \ln(p_d) - 1513,867}{23,59 - \ln(p_d'')} \quad (5-2)$$

Pro výpočet parciálního tlaku nasycené vodní páry:

$$\text{- pro } -20 \text{ }^\circ\text{C} \leq t_a < 0 \text{ }^\circ\text{C}: \quad (5-3)$$

$$p_d'' = 4,689 \cdot \left(1,486 + \frac{t_a}{100}\right)^{12,30}$$

$$\text{- pro } 0 \text{ }^\circ\text{C} \leq t_a \leq 30 \text{ }^\circ\text{C}: \quad (5-4)$$

$$p_d'' = 288,68 \cdot \left(1,098 + \frac{t_a}{100}\right)^{8,02}$$

$$\text{- pro } 30 \text{ }^\circ\text{C} < t_a \leq 60 \text{ }^\circ\text{C}: \quad (5-5)$$

$$p_d'' = 931,46 \cdot \left(0,937 + \frac{t_a}{100}\right)^{7,125}$$

Výpočet parciálního tlaku vodní páry se provede ze vztahu pro výpočet relativní vlhkosti:

$$rh = \frac{p_d}{p_d''} \quad (5-6)$$

kde:

rh – relativní vlhkost vzduchu, [-]

p_d'' – parciální tlak nasycené vodní páry, [Pa]

p_d – parciální tlak vodní páry, [Pa]

t_{rb} – teplota rosného bodu, [°C]

Příklad č. 7

Vzduch o teplotě 20 °C a relativní vlhkosti 53 % proudí rychlostí 10 m/s kolem potrubí o vnějším průměru 60 mm a tloušťce 2 mm. V potrubí proudí médium o teplotě 6 °C. Potrubí je umístěno v prostředí, kde je nulová rychlost proudění větru. Jaká je tloušťka izolace nutná k zabránění kondenzace vodních par na povrchu potrubí? Tepelná vodivost potrubí je 45 W/(m.K) a tepelná vodivost izolace je 0,04 W/(mK).

Řešení:

Zjednodušení:

1. Vlastnosti okolního vzduchu a materiálu potrubí a izolace jsou konstantní, tzn. jsou nezávislé na teplotě.
2. Pro zjednodušení výpočtu se uvažuje, že teplota vnitřního povrchu potrubí je rovna teplotě média.

Pro tento typ výpočtu potřebné tloušťky izolace je nejprve zapotřebí vypočítat teplotu rosného bodu. Teplota rosného bodu se vypočítá podle výše uvedeného postupu.

Teplota okolí je 20 °C, proto parciální tlak nasycené vodní páry se vypočte podle rovnice (5-4):

$$p_d'' = 288,68 \cdot \left(1,098 + \frac{t_a}{100}\right)^{8,02} = 288,68 \cdot \left(1,098 + \frac{20}{100}\right)^{8,02} = 2338,2 \text{ Pa}$$

Z rovnice pro výpočet relativní vlhkosti (5-6) vyjádříme parciální tlak vodní páry a vypočteme dle rovnice (5-7):

$$p_d = rh \cdot p_d'' = 0,53 \cdot 2338,2 = 1239,2 \text{ Pa}$$

Následuje výpočet teploty rosného bodu ze vztahu pro $p_d \geq 610,75 \text{ Pa}$ (5-2):

$$t_{rb} = \frac{236 \cdot \ln(p_d) - 1513,867}{23,59 - \ln(p_d'')} = \frac{236 \cdot \ln(1239,2) - 1513,867}{23,59 - \ln(2338,2)} = 10,6 \text{ °C}$$

Teplota rosného bodu je stejná jako v předchozím případě, tedy 10,6 °C.

Dále postupujeme stejně jako v příkladu č. 5, kde se místo požadované povrchové teploty izolace dosadí vypočtená teplota rosného bodu. Teplota rosného bodu značí minimální teplotu, kterou může povrch izolace dosáhnout, aby nedošlo na jeho povrchu ke kondenzaci vodních par obsažených ve vzduchu.

Vyjádříme si rovnici celkových tepelných ztrát a tepelného toku konvekcí na vnější straně a položíme je do rovnosti. V těchto rovnicích je jedinou neznámou veličinou tloušťka izolace. K jejímu výpočtu opět můžeme využít matematický software Maple a vyřešit ji.

Závěr

Minimální tloušťka izolace pro vypočtenou teplotu rosného bodu při zadaných podmínkách je 0,4 mm. Takováto tloušťka izolace se standardně nevyrábí, musí se proto vybrat nejbližší vyšší tloušťka izolace.

Příklad č. 8

Vzduch o teplotě 20 °C a relativní vlhkosti 53 % obklopuje potrubí o vnějším průměru 60 mm a tloušťce 2 mm. V potrubí proudí médium o teplotě 6 °C. Potrubí je umístěno v prostředí, kde je nulová rychlost proudění větru. Jaká je tloušťka izolace nutná k zabránění kondenzace vodních par na povrchu potrubí? Tepelná vodivost potrubí je 45 W/(mK) a tepelná vodivost izolace je 0,04 W/(mK).

Řešení:

Zjednodušení:

1. Vlastnosti okolního vzduchu a materiálu potrubí a izolace jsou konstantní, tzn. jsou nezávislé na teplotě.
2. Pro zjednodušení výpočtu se uvažuje, že teplota vnitřního povrchu potrubí je rovna teplotě média.

Teplota rosného bodu je stejná jako v předchozím případě, tedy 10,6 °C.

Dále se aplikuje stejný postup jako v příkladu č. 6, kde se místo požadované povrchové teploty izolace dosadí vypočtená teplota rosného bodu. Teplota rosného bodu značí minimální teplotu, kterou může povrch izolace dosáhnout, aby nedošlo na jeho povrchu ke kondenzaci vodních par obsažených ve vzduchu.

Vyjádříme si rovnici celkových tepelných ztrát a tepelného toku konvekcí na vnější straně a položíme je do rovnosti. V těchto rovnicích je jedinou neznámou veličinou tloušťka izolace. K jejímu výpočtu opět můžeme využít matematický software Maple a vyřešit ji.

Závěr

Minimální tloušťka izolace pro vypočtenou teplotu rosného bodu při zadaných podmínkách vyšla 2,9 mm. Takováto tloušťka izolace se standardně nevyrábí, musí se proto vybrat nejbližší vyšší tloušťka izolace.

V tab. 11 jsou uvedeny výsledky pro oba příklady výpočtů tloušťky izolace zabraňující kondenzaci na povrchu potrubí.

Tab. 11 Porovnání výsledků požadované tloušťky izolace zabraňující vzniku kondenzace na potrubí

Příklad č.	Rychlost vzduchu [m/s]	Tloušťka izolace pro povrchovou teplotu 10,6 °C [mm]
1	10	0,4
2	0	2.9

5.4 Výpočet kritické tloušťky izolace

U izolovaného potrubí malých průměrů je možné, že se tepelná ztráta, místo aby se izolováním potrubí snížila, zvýší. Kritická tloušťka izolace je nejmenší možná tloušťka izolace, od které se tepelné ztráty nezvyšují, ale snižují [23].

Pro výpočet kritické tloušťky izolace tl_{krit} je zapotřebí zjistit kritický průměr izolovaného potrubí d_{3krit} , ze kterého zjistíme nejnižší tloušťku izolace, při níž je tepelný odpor nejnižší. Pro výpočet kritického průměru použijeme vztah pro výpočet tepelného odporu izolovaného potrubí a derivujeme podle průměru izolovaného potrubí d_{3krit} [10]:

$$R_t = \frac{1}{\pi \cdot L} \cdot \frac{1}{\alpha_i d_1} + \frac{1}{2\lambda_t} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\lambda_{iz}} \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{\alpha_0 d_{3krit}} [W/K]$$

Derivace R_t :

$$R_t'(d_{3krit}) = \frac{1}{2\lambda_{iz}} \cdot \frac{1}{\frac{d_{3krit}}{d_2}} \cdot \frac{d_2}{d_2^2} - \frac{1}{\alpha_0 d_{3krit}^2}$$

Derivaci $R_t'(d_3)$ položím rovno nule a vyjádřím d_{3krit} :

$$0 = \frac{1}{2\lambda_{iz} d_{3krit}} - \frac{1}{\alpha_0 d_{3krit}^2}$$

$$d_{3krit} = \frac{2\lambda_{iz}}{\alpha_0} [m]$$

Tento vztah upravím vyjádřením za d_{3krit} a vypočítám tl_{krit} :

$$d_2 + 2 \cdot tl_{krit} = \frac{2\lambda_{iz}}{\alpha_0}$$

$$tl_{krit} = \frac{\lambda_{iz}}{\alpha_0} - \frac{d_2}{2}$$

Tepelná ztráta se stoupající tloušťkou izolace se zvyšuje pouze u malých průměrů potrubí. Podle [7] platí, že:

- pokud $\frac{\alpha_0 d_2}{2 \cdot \lambda} > 1$, tak přidáním izolace se vždy sníží tepelné ztráty.
- pokud $\frac{\alpha_0 d_2}{2 \cdot \lambda} < 1$, tak přidáním izolace se vždy zvýší tepelné ztráty a je zapotřebí překročit kritickou tloušťku izolace větší vrstvou izolace.

Příklad č. 9

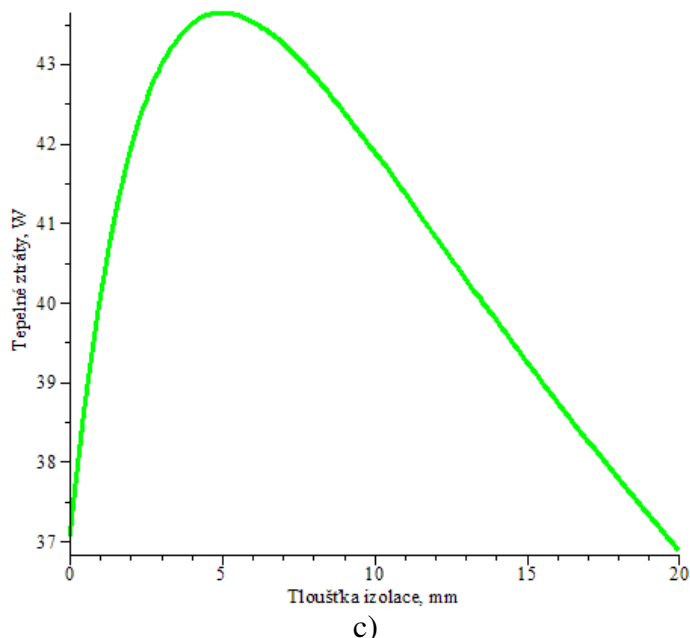
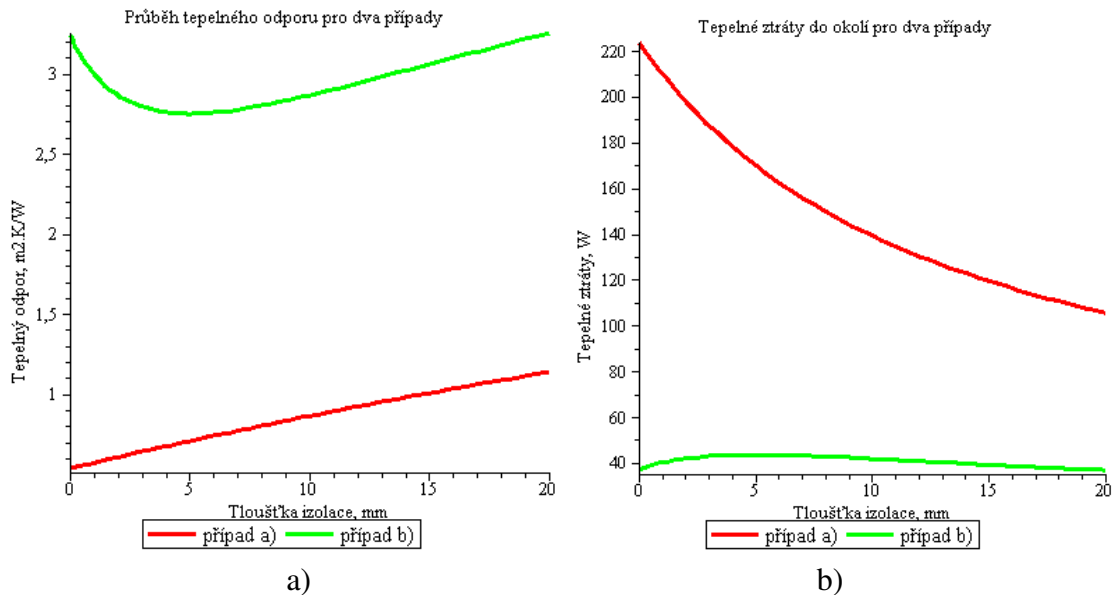
Vypočítejte kritickou tloušťku potrubí u dvou případů. V případě a) má potrubí průměr 60 mm a tloušťku stěny 2 mm a v případě b) má potrubí průměr 10 mm a tloušťku stěny 2 mm. Součinitel přestupu tepla na vnější straně je $\alpha_0 = 10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Pro oba případy potrubí bylo použito izolace s tepelnou vodivostí $\lambda_{iz} = 0,1 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

Příklad byl počítán programem sekce „Systémy pro přenos tepla“ Ústavu procesního a ekologického inženýrství, který je určen k výpočtům izolací. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tab. 12 a v grafech na obr. 9.

Tab. 12 Výsledné hodnoty kritické tloušťky izolace

Případ	$\frac{\alpha_o d_2}{2 \cdot \lambda_{iz}}$	$tl_{krit} = \frac{\lambda_{iz}}{\alpha_o} - \frac{d_2}{2}$
a) potrubí o průměru 60 mm	> 1	Jakékoli přidání izolace sníží tepelnou ztrátu
b) potrubí o průměru 10 mm	< 1	5,0 mm

V případě potrubí o vnějším průměru 60 mm jakékoli přidání izolace sníží tepelnou ztrátu. Pro případ potrubí o vnějším průměru 10 mm je poměr $\frac{\alpha_o d_2}{2 \cdot \lambda} < 1$, takže do určité tloušťky izolace se budou tepelné ztráty potrubí zvyšovat. Tento jev bude probíhat až do tloušťky izolace 5 mm. Od této tloušťky se budou tepelné ztráty snižovat. Grafický průběh výsledků je zobrazen na obr 9.



Obr. 9 Závislost tepelného odporu na tloušťce izolace a), závislost tepelných ztrát do okolí na tloušťce izolace b), detailní vykreslení průběhu tepelných ztrát potrubí o tloušťce 10 mm c)

Jak ukazuje obr. 9 a), v případě a) u průměru potrubí 60 mm se tepelný odpor neustále zvyšuje, tudíž se jedná o poměr $\frac{\alpha_e d_2}{2 \cdot \lambda} > 1$, v případě b) se tepelný odpor snižuje do určité tloušťky (kritické tloušťky) izolace a po jejím překročení se zase tepelný odpor zvyšuje, jedná se o poměr $\frac{\alpha_e d_2}{2 \cdot \lambda} < 1$. Z obr. 9 b) v případě b) je vidět, že se tepelné ztráty zvyšují, po překročení kritické tloušťky se snižují. Na obr. 9 c) je podrobněji zobrazený vliv kritické tloušťky na tepelné ztráty u potrubí o vnějším průměru 10 mm. Tento jev nastává ovšem jen u velmi malých průměrů trubek, které se jako potrubí v běžné praxi procesního inženýra nepoužívají (neizolují).

5.5 Výpočet ekonomické tloušťky izolace

Ekonomická tloušťka se počítá za účelem snížení tepelných ztrát a tím i snížení nákladů za energii. Vlivem velké tloušťky izolace se sice tepelné ztráty zmenšují, ale oproti tomu rostou náklady na pořízení větší tloušťky izolace. Hospodárná tloušťka izolací je tehdy, když součet nákladů na izolaci a nákladů na tepelné ztráty je nejmenší. Vždy je třeba hledat kompromis s nejnižšími náklady [25].

V literatuře lze nalézt postupy pro určení ekonomické tloušťky izolace v závislosti na její tloušťce. Takovýto výpočet nemá ale moc praktické využití, protože izolace se nedělají pro všechny tloušťky a navíc se mohou skládat z více druhů izolací. Lepší postup je vybrat reálné izolace, pro každou z nich vypočítat pořizovací náklady a náklady na energii (resp. ušetřené náklady na energii). Ta izolace, která bude mít nejnížší součet nákladů, se dá považovat za ideální.

Příklad č. 10

Navrhněte nejekonomičtější tloušťku izolace Orstech DP 80 na potrubí DN 200 (219 x 6 mm). V potrubí proudí voda o teplotě 130 °C. Teplota okolního prostředí je 15 °C. Izolace je opatřena hliníkovým oplechováním tloušťky 0,8 mm. Potrubí je v provozu během topné sezóny (222 dní po 24 h denně – 5328 h/rok). Další potřebné údaje jsou uvedeny níže a v tabulce 13.

Rychlost proudění vzduchu, m/s	0
Emisivita povrchu plechu, -	0,5
Odpisová doba, let	15
Inflace energie, %	6
Úroková sazba, %	3
Cena energie, Kč/kWh	2,5 (bez DPH)
Tepelná vodivost izolace, W/(m.K)	0,047
Podíl nákladů na údržbu, %	2

Další potřebná data pro výpočet ekonomické tloušťky izolace jsou v tab. 13.

Tab. 13 Cenové podklady pro výpočet ekonomické tloušťky izolace

Tloušťka izolace [mm]	Cena izolace [Kč/m ²]	Cena plechu [Kč/m ²]	Cena montáže (izolace + plech) [Kč/m ²]	Celková cena [Kč/m ²]	Délka rozvinu izolace [m]	Celková cena [Kč/m]
80	521	270	350	1141	1,19	1358
100	638	270	350	1258	1,32	1661
120	797	270	350	1417	1,44	2040
2x70	924	270	450	1644	1,57	2581
2x80	1042	270	450	1762	1,69	2978
80+100	1159	270	450	1879	1,82	3420
2x100	1276	270	450	1996	1,94	3872

Všechny ceny jsou uvedeny bez DPH.

Pozn.: Zadání vychází z příkladu uvedeného v [26]. Ceny izolací jsou aktualizovány a vychází z aktuálního ceníku uvedeném v [27].

Délka rozvinu izolace je vypočtena ze vztahu:

$$L_r = \pi \cdot (d_o + 2 \cdot tl), \text{ m} \quad (5-7)$$

Celkovou cenu uvedenou v tab. 13 v sedmém sloupci dostaneme vynásobením celkové ceny v Kč/m² (pátý sloupec) nutnou délkou rozvinu.

Všechny následující výpočty jsou prováděny na 1 metr délky potrubí.

Postup výpočtu

Nejprve si vypočítáme tepelnou ztrátu neizolovaného potrubí (emisivita povrchu = 0,5). Hlavní výsledky jsou uvedeny v tab. 14. Jednotlivé kroky výpočtu zde nejsou uváděny. K tomu se využije postup uvedený v příkladu č. 2.

Tab. 14 Výpočet pro zadané neizolované potrubí

Tepelná ztráta [W]	Součinitel přestupu tepla vně [W/(m ² K)]	Náklady na energii [Kč/m]
890,6	11,3	12024

Pro výpočet tepelných ztrát izolovaného potrubí využijeme postupu uvedeného v příkladu č. 4. Jednotlivé výpočty zde proto nebudou popisovány, ale jsou zde uvedeny pouze výsledky tepelných ztrát pro všechny typy izolací a součinitele přestupu tepla na vnější straně.

Tab. 15 Tepelné ztráty potrubí a součinitel přestupu tepla na vnější straně pro různé tloušťky izolací

Tloušťka izolace [mm]	Tepelná ztráta [W]	En. úspora oproti neizolovanému potrubí [%]	Součinitel přestupu tepla vně [W/(m ² K)]
80	57,4	93,6	5,7
100	49,2	94,5	5,5
120	43,6	95,1	5,3
2x70	39,5	95,6	5,2
2x80	36,3	95,9	5,1
80+100	33,8	96,2	5,0
2x100	31,7	96,4	4,9

Investiční náklady

Pokud se majitel potrubí rozhodne financovat izolování potrubí půjčkou, pak se k převedení pořizovacích (a investičních) nákladů na roční náklady používá tzv. anuitní faktor. Podle [28] se tento faktor může brát rovněž jako míra pro dobu odepisování zařízení. Během doby provozu zařízení dochází k jeho opotřebování a stárnutí a tím ke snížení jeho hodnoty, což se také objevuje v celkových nákladech [25].

Lze uvažovat splátkový plán poskytnutého úvěru se stejnou výší celkové platby (tzv. anuitou), což je obvyklý způsob splácení úvěrů v procesním průmyslu. Vyznačuje se tím, že v průběhu celého období splácení úvěru je celkové splácení úvěru a úhrada úroků ve stejné výši. V závislosti na postupném snižování úvěru se zvyšuje podíl splátky úvěru a snižuje podíl placených úroků [25]. S ohledem na úročení investičních nákladů lze vypočítat anuitní faktor např. podle [28, 29, 30] jako:

$$a_f = \frac{p(1+p)^n}{(1+p)^n - 1} \quad (5-8)$$

kde p [-] je úroková míra poskytnutého úvěru a n [rok] doba splácení úvěru (obvykle je totožná s plánovanou dobou provozu, resp. životností technologického celku).

Pro převod celkových pořizovacích nákladů na roční náklady pak použijeme vztah:

$$K_G = a_f (K_A + mK_A) \quad (5-9)$$

kde K_A je celková cena izolace (včetně montáže a plechu) [Kč/m] a m je podíl nákladů na údržbu. Pro izolaci potrubí lze brát dle [31] hodnotu $m = 0,02$.

Anuitní faktor je pro zadaný příklad:

$$a_f = \frac{p(1+p)^n}{(1+p)^n - 1} = \frac{3/100(1+3/100)^{15}}{(1+3/100)^{15} - 1} = 0,083767$$

Celkové investiční náklady včetně nákladů na opravy a údržbu vztažené na 1 rok jsou uvedeny v tab. 16 ve druhém sloupci.

Náklady na energii

Náklady na energii se vypočtou z ceny energie, hodin provozu na plný průtok potrubí a z tepelných ztrát potrubí. Při výpočtech je dobré uvažovat s inflací ceny energií. Do nákladů na energii se tak započítá zdražení energií v příštích letech. Je tak potřeba udělat náklady na každý rok zvlášť a ty pak zprůměrovat (převést na náklady na 1 rok).

Výpočtový počet hodin provozu určíme z počtu hodin provozu potrubí při uvažování, že 70 % doby se provozuje na plný průtok, 15 % na poloviční průtok a 15 % na čtvrtinový průtok.

Pro náš příklad dostaneme tedy

$$\left(0,7 + \frac{0,15}{2} + \frac{0,15}{2}\right) \cdot 5328 = 4329 \text{ h / rok}$$

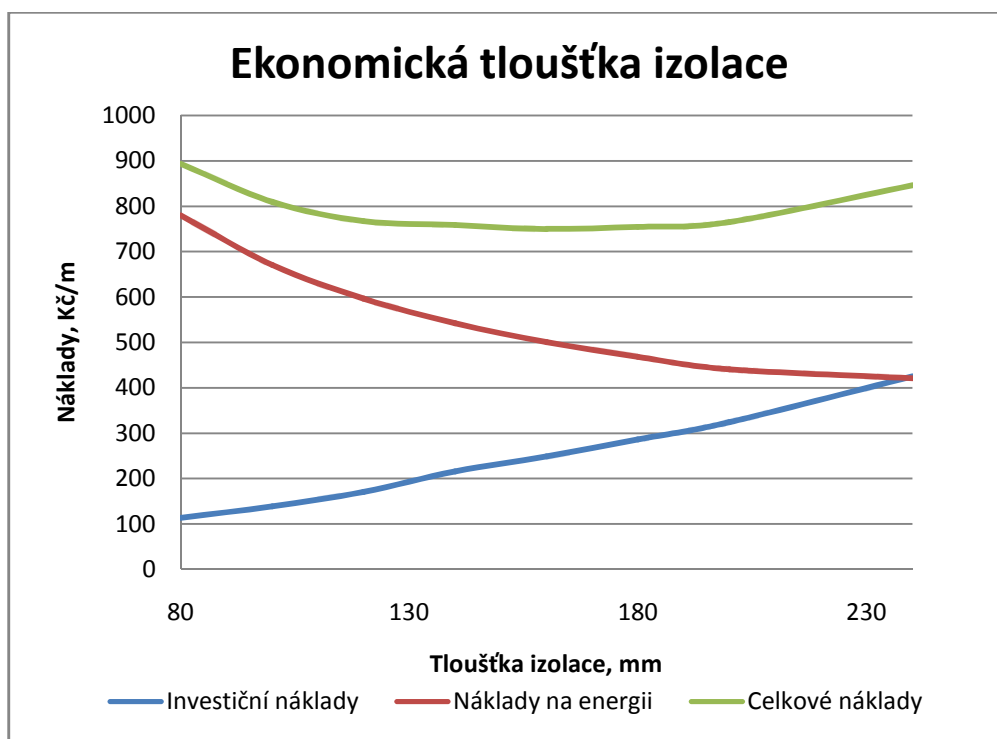
Náklady na energii jsou uvedeny v tab. 16 ve třetím sloupci.

Celkové náklady

Celkové náklady jsou součtem investičních nákladů a nákladů na energii. Ekonomická tloušťka izolace je tloušťka, která vykazuje nejmenší celkové náklady. Jak je vidět z tab. 16, pro zadaný případ vychází nejlépe izolace dvouvrstvá 2x80 mm. Tyto výsledky jsou i graficky znázorněny na obr. 10.

Tab. 16 Náklady různých tloušťek izolací na 1 metr izolovaného potrubí

Tloušťka izolace [mm]	Investiční náklady [Kč/m]	Náklady na energii [Kč/m]	Celkové náklady [Kč/m]
bez izolace	12024	-	12024
80	114	780	894
100	139	671	810
120	171	597	768
2x70	216	543	759
2x80	249	501	750
80+100	286	468	755
2x100	324	441	766



Obr. 10 Grafické znázornění nákladů různých tloušťek izolací

Úspora financí

Úsporu, kterou získáme použitím izolace, spočteme rozdílem nákladů za energii neizolovaného potrubí a celkových nákladů izolovaného potrubí. Přehled úspor pro potrubí o délce 1 metr a 10 metrů za jeden rok je uveden v tab. 17.

Tab. 17 Tabulka úspor pro různé délky potrubí o tloušťce 2x80 mm

Délka potrubí [m]	Úspora financí za 1 rok [Kč/m]
1	11274
10	112740

Návratnost investice

Návratnost investice vypočteme podílem celkových nákladů izolovaného potrubí a celkových ušetřených finančních prostředků za 1 rok. Pro zadaný příklad tedy vychází:

$$\text{Návratnost} = \frac{750}{11274} \cdot 15 = 0,9978 \text{ let} = 364 \text{ dnů}$$

Investice do izolace se vrátí už za 364 dnů.

6 Závěr

Úkolem této bakalářské práce bylo seznámit se s typy izolací potrubí, tepelnými ztrátami a výpočtem těchto izolací. V teoretické části jsou popsány mechanismy přenosu tepla, přenosová rovnice a její aplikace při výpočtech tepelných ztrát potrubí. Dále byly popsány výpočtové vztahy pro určení Nuseltova čísla (a následně součinitele přestupu tepla) uvnitř potrubí a vně potrubí.

V praktické části práce je pak aplikace těchto vztahů na výpočty tepelných ztrát neizolovaného a izolovaného potrubí, určení potřebné tloušťky izolace pro zajištění požadované teploty povrchu izolace, pro určení tloušťky izolace zabraňující kondenzaci vodních par na povrchu potrubí a výpočet ekonomické tloušťky izolace.

U příkladů tepelných ztrát izolovaného potrubí je ukázán vliv emisivity povrchu potrubí a rychlosti větru na teplotu povrchu potrubí, tepelné ztráty a součinitele přestupu tepla. Krátce je popsána i minimální tloušťka izolace, od které se tepelné ztráty nezvyšují, ale snižují. Tento jev se vyskytuje zejména u potrubí malých průměrů. Na jednoduchém příkladu je ukázán i její výpočet a průběh tepelných ztrát.

V závěru práce je ukázán postup výpočtu ekonomické tloušťky izolace. Jsou počítány různé tloušťky komerčně prodávaných izolací a proveden výběr a zhodnocení nejekonomičtější tloušťky izolace.

V práci jsou použita sice některá zjednodušení při výpočtech, ale i tak může práce sloužit jako podklad při navrhování vhodné tloušťky izolace.

7 Přehled literatury

- [1] Prof. Dr. Pilař Antonín a kol. *Chemické inženýrství, díl druhý*. SNTL, 1964. 360s. ISBN L16– C3 – IV – 41/6417/II.
- [2] Oldřih Holeček, Dalimil Šinta, *Sdílení tepla* [online]. 2010 [cit. 2010 – 05 - 13]. Dostupné z WWW: <http://www.vscht.cz/uchi/ped/chi/chi.ii.text.k16.sdileni.tepla.pdf>.
- [3] Yuns a. Cengel, *Heat Transfer: A Practical Approach, Second Edition*, McGraw-Hill, 2003, 921s. ISBN 0 – 07 – 245893 – 3.
- [4] V. Ganpathy, *Steam plant calculations manual – 2nd edition. revised. and expanded*, Marcel Dekker, Inc., 1994 ISBN 0 - 8247 - 9147 – 9.
- [5] *Přenos tepla prouděním* [online]. 2010 [cit. 2010 – 05 - 13]. Dostupné z WWW: <http://www.vscht.cz/uchi/ped/chi/chi.ii.text.k16.sdileni.tepla.pdf>.
- [6] Kakac, S., Liu, H.: *Heat exchangers – selection, rating and thermal design*. CRC PressLLC, 2002.
- [7] Hewitt, G.F.: *Process Heat Transfer*. New York : Begall House, Inc., 1994.
- [8] Hewitt, G.F. (ed.), *Heat Exchanger Design Handbook*. Begell House, Inc., NewYork, 1998.
- [9] Prof. Ing. Dr. Vladimír Enenkl, Doc. Ing. Jaromír Chrastina, Csc., *Termomechanika* Rektorát Vysokého učení technického v Brně, 1972. 405s. ISBN 55 – 565 – 72.
- [10] Robert W. Serth. *Process heat transfer principles and applications, Elsevier Science & Technology Books*, 2007. ISBN: 0123735882.
- [11] White, E M., *Heat Transfer*, Addison-Wesley, Reading, MA, 1984.
- [12] Churchill, S. W. and H. H. S. Chu, *Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a horizontal cylinder*, Int. J. Heat Mass Transfer, 18, 1049-1053, 1975.
- [13] Lienhard, J.H. IV, Lienhard, J.H. V, *A Heat Transfer Handbook; 3rd. edition*, Phlogiston Press, Cambridge, Massachusetts, USA, 2006.
- [14] Sieder E.N., Tate C.E: Ind. Eng. Chem. 28 , 1428 , (1936).
- [15] Whitaker S.: *Elementary Heat Transfer Analysis*, Pergamon Press, N.Y., 1975.
- [16] Petukhov B.S.: *Heat Transfer and Friction in Turbulent Pipe Flow with Variable Physical Properties*, in *Advances in Heat Transfer*, Volume 6., Academic Press N.Y., London, 1970 (Editors: Hartnet J.P., Irvine T.F. jr.).

- [17] Ing. Jelínek Josef, CSc, doc. RNDr. Málek Zdeněk, CSc. *Kryogení technika*. SNTL, 1982. 356s. ISBN L11 – B3 – IV - 41f/11 826.
- [18] Ing. Černý František, Ing. Dr. Vlach Josef. *Tepelné izolace v energetice*. SNTL, 1958. 164s. ISBN L12 – B3 – 4 – I/2202.
- [19] Prof. Dr. Pilař Antonín a kol. *Chemické inženýrství, díl druhý*. SNTL, 1964. 360s. ISBN L16– C3 – IV – 41/6417/II
- [20] *Stavební – stanovení objemové hmotnosti apórovitosti přístupné vodě – teoretická část* [online]. 2010 [cit. 2010 – 05 - 13]. Dostupné z WWW: <http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/res_stavebni_materialy_objem_hmotnost/index.htm>.
- [21] *Tepelné izolace* [online]. 2011 [cit. 2011 – 04 - 10]. Dostupné na WWW: <http://www.azizolace.cz/pagel_4_1.html>.
- [22] *Proper selection of insulation material is an art* [online]. 2011 [cit. 2011 – 05 - 23]. Dostupné z WWW: <<http://www.energymanagertraining.com/Documents/Sethuraman-2-EE07.pdf>>
- [23] *Tabulky a výpočty* [online]. 2010 [cit. 2011 – 05 - 20]. Dostupné z WWW: <<http://www.tzb-info.cz/t.py?t=16&i=57>>.
- [24] Coulson J. M., Richardson J. F, Backhurst J.R, Harker J.H., *Chemical engineering volume 1: Fluid flow, heat transfer and mass transfer v.1*. A Butterworth-Heinemann, 1999. 928s. ISBN 978-0750644440.
- [25] KILKOVSKÝ, B. *Modelování zařízení pro výměnu tepla v procesech termického zpracování*. Disertační práce, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního a ekologického inženýrství, 2008. 185 s. Vedoucí disertační práce doc. Ing. Jegla, Z., Ph.D., 2008.
- [26] ISOVER Výpočetní program IsoCal pro návrh technických izolací – Manuál se vzorovými příklady, 2009
- [27] *ORSTECH DP 100* [online]. 2011 [cit. 2011 – 05 - 22]. Dostupné z WWW: <<http://www.isover.cz/orstech-dp-100>>.
- [28] Vlachynský, K. a kol.: *Co by měl podnikatel vědět o financích.*, Edice Firma & Trh, Bratislava. 1993.
- [29] Peters, M. S. and Timmerhaus, K. D.: *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*. 3rd ed., McGraw-Hill, New York. 1981.
- [30] Perry, R. H.; Green, D. V.; Maloney, J. O.: *Perry's Chemical Engineers' Handbook*, 6th edition, McGraw-Hill, New York. 1984.
- [31] Schnell, H.: *Technisch-wirtschaftliche Optimierung von Wärmeaustauschern*. In *Handbuch Wärmeübertragung*. Essen: Vulkan-Verlag. 1991.

Přílohy

Příloha P1 Přehled izolačních materiálů

Příloha P2 Tabulka emisivit kovových materiálů

Příloha P3 Vlastnosti vzduchu

Obsah přiloženého CD:

Elektronická podoba diplomové práce

Tepelné ztráty neizolovaného potrubí

Tepelné ztráty izolovaného potrubí

Vliv parametrů na izolace

Výpočet tloušťky izolace pro zadanou teplotu povrchu

Příloha P1 Přehled izolačních materiálů

Typ	Izolační materiál	Teplotní použitelnost [°C]	Oblast použití	Další popis
Organická pěna	Polystyrenová pěna	do 75°C	Izolování střech, lednic	Není toxický, vodě odolný, nízká cena
Organická pěna	PUR	- 185 ÷ 110 °C		Nízká tepelná vodivost, je drahý ale má levnou instalaci
Organická pěna	PIR	- 185 ÷ 110 °C	Petrochemická zařízení, budovy, cisterny	Velice drahý, dobrá odolnost proti ohni
Organická pěna	Fenolová pěna	- 180 ÷ 120 °C	Potrubí klimatizace, izolační sendvičové panely	Velice nízká tepelná vodivost, Odolnost proti ohni.
Organická pěna	ENR	do 150 °C	Vytápění domácností, instalatérské práce	Dražší než minerální vlna, používá se v tenkých vrstvách
Organická pěna	Polyetylenové pěny	do 100 °C	Vytápění domácností, instalatérské práce	
Anorganický materiál	Křemičitan vápenatý	37 ÷ 648 °C	Izolace kotlů, potrubí, hutnictví	Dražší než minerální vlna
Anorganický materiál	Buněčné sklo	- 267 °C ÷ 482 °C	Ve stavebnictví	Vodě odolný, vysoká pevnost v tlaku dobrá chemická stálost, nehořlavý, vysoké výrobní náklady
Anorganický materiál	Mikroporézní oxid křemičitý	400 °C ÷ 1000 °C	Hutnictví, letecký průmysl	Nízká tepelná vodivost, může být navržen jako UV stálý
Anorganický materiál	Keramické vlákna	do 1600 °C	Hutnictví	Nízká hustota a dobrá odolnost proti teplotním šokům. Vysoká cena oproti minerální vlně
Anorganický materiál	Expandovaný vermikulit	do 1000 °C	Výroba cementových pojiv pro výrobu izol. desek	Přírodní zrnitý materiál lehké váhy, má vysoký bod tání a je inertní
Anorganický materiál	Expandovaný perlit	do 650 °C	Užívaný jako sypaný materiál	Přírodní materiál, levnější než minerální vlna

Příloha P2 Tabulka emisivit kovových materiálů

Materiál	Teplota, °C	Emisivita
Hliník		
Nezoxidovaný	25	0,02
Nezoxidovaný	100	0,03
Nezoxidovaný	500	0,06
Zoxidovaný	199	0,11
Zoxidovaný	599	0,19
Silně zoxidovaný	93	0,2
Silně zoxidovaný	504	0,31
Vysoký lesk	100	0,09
Hrubě leštěný	100	0,18
Fólie	100	0,09
Vysoce leštěný plát	227	0,04
Vysoce leštěný plát	577	0,06
Měď		
Oxid měďný	38	0,87
Oxid měďný	260	0,83
Oxid měďný	538	0,77
Černá, zoxidovaná	38	0,78
Hrubě leštěná	38	0,07
Leštěná	38	0,03
Vysoce leštěná	38	0,02
Válcovaná	38	0,64
Mosaz		
73%Cu, 27%Zn, leštěná	247	0,03
73%Cu, 27%Zn, leštěná	357	0,03
62%Cu, 37%Zn, leštěná	257	0,03
62%Cu, 37%Zn, leštěná	377	0,04
83%Cu, 17%Zn, leštěná	277	0,03
Cu-Zn, mosaz zoxidovaná	200	0,61
Cu-Zn, mosaz zoxidovaná	400	0,6
Cu-Zn, mosaz zoxidovaná	600	0,61
Nezoxidovaná	25	0,04
Nezoxidovaná	100	0,04
Ocel		
Válcovaná za studena	93	0,75 - 0,85
Plech leštěný	38	0,07
Plech leštěný	260	0,1
Plech leštěný	538	0,14
Měkká ocel, leštěná	24	0,1
Měkká ocel, hladká	24	0,12
Ocel, nezoxidovaná	100	0,08

Ocel, zoxidovaná	25	0,8
Ocelo-slítiny		
Typ 301, leštěná	24	0,27
Typ 301, leštěná	232	0,57
Typ 301, leštěná	949	0,55
Typ 316, leštěná	24	0,28
Typ 316, leštěná	232	0,57
Typ 316, leštěná	949	0,66
Bavlněná látka		
Nátěry		
Modrý, Cu ₂ O ₃	24	0,94
Černý, CuO	24	0,96
Zelený, Cu ₂ O ₃	24	0,92
Červený, Fe ₂ O ₃	24	0,91
Bílý, Al ₂ O ₃	24	0,94
Bílý, Y ₂ O ₃	24	0,9
Bílý, ZnO	24	0,95
Bílý, MgCO ₃	24	0,91
Bílý, ZrO ₂	24	0,95
Bílý, ThO ₂	24	0,9
Bílý, MgO	24	0,91
Bílý, PbCO ₃	24	0,93
Žlutý, PbO	24	0,9
Žlutý, PbCrO ₄	24	0,93
Nátěry olejové		
Všechny barvy	93	0,92 - 0,96
Černá	93	0,92
Černý lesk	21	0,9
Maskovací zelená	52	0,85
Matná čern	27	0,88
Matná běloba	27	0,91
Šedozelená	21	0,95
Zelená	93	0,95
Lampová čern	93	0,96
Červená	93	0,95
Bílá	93	0,94

Příloha P3 Vlastnosti vzduchu

Tlak nasycené vodní páry:

$$p_{s,w} = e^{\left(\frac{23,19-3816,44}{273,15-t_a-46,13}\right)}$$

Aktuální parciální tlak vody:

$$p'_p = \frac{e^{\left(\frac{23,19-3816,44}{273,15-t_a-46,13}\right)} \cdot RH}{100}$$

Absolutní vlhkost:

$$Ah = 0,622 \cdot \frac{\frac{e^{\left(\frac{23,19-3816,44}{273,15-t_a-46,13}\right)} \cdot RH}{100}}{p_a - \frac{e^{\left(\frac{23,19-3816,44}{273,15-t_a-46,13}\right)} \cdot RH}{100}}$$

Molová frakce:

$$C_w = \frac{0,622 \cdot \frac{e^{\left(\frac{23,19-3816,44}{273,15-t_a-46,13}\right)} \cdot RH}{100}}{\left(0,622 + 0,622 \cdot \frac{e^{\left(\frac{23,19-3816,44}{273,15-t_a-46,13}\right)} \cdot RH}{100} + p_a - \frac{e^{\left(\frac{23,19-3816,44}{273,15-t_a-46,13}\right)} \cdot RH}{100}\right)}$$

Teplota rosného bodu:

$$t_{rb} = 6,54 + 14,526 \left(\frac{\ln p'_p}{1000}\right) + 0,7389 \cdot \left(\frac{\ln p'_p}{1000}\right)^2 + 0,09486 \cdot \left(\frac{\ln p'_p}{1000}\right)^3 + 0,4569 \cdot \left(\frac{\ln p'_p}{1000}\right)^{0,1984}$$

Střední teplota filmu:

$$t_f = \frac{t_w + t_a}{2}$$

Hustota suchého vzduchu:

$$\rho_{da} = \frac{0,003484 + p_a}{273,15 + t_f}$$

Viskozita suchého vzduchu:

$$\eta_{da} = 0,000001 \cdot (17,11 + 0,0536 \cdot t_f + 0,0000009058 \cdot p_a)$$

Tepelná vodivost vzduchu:

$$\lambda_{da} = 0,02402 + 0,000074 \cdot t_f$$

Výpočet hustoty vody:

$$\rho_w = 0,002165 \cdot \left(\frac{p_a}{273,15 + t_f} \right)$$

viskozita vody:

$$\eta_w = 0,000001 \cdot (8,19 + 0,0407 \cdot t_f + 0,000000473 \cdot p_a)$$

Tepelná vodivost vody:

$$\lambda_{pw} = 0,0158 + 0,000084 \cdot t_f$$

Hustota vlhkého vzduchu:

$$\rho_{da} = \frac{p_a \cdot (3,484 - 1,317 \cdot C_w)}{\frac{273,15 + t_f}{1000}}$$

Viskozita vlhkého vzduchu:

$$\eta_{ha} = \frac{(\eta_{da} \cdot C_w \cdot (0,7887 \cdot \eta_w - \eta_{da}))}{(1 - 0,1464 \cdot C_w)}$$

Tepelná vodivost vlhkého vzduchu:

$$\lambda_{ha} = \frac{\eta_{da} + C_w \cdot (0,8536 \cdot \eta_w \cdot \lambda_{pw} - \lambda_{da})}{((1 + 0,1464 C_w))}$$

Specifické teplo :

$$Sh = 1 + Ah \cdot 1,87$$

Prandtlovo číslo:

$$Pr = \frac{1 \cdot 1000 \cdot \eta_{ha}}{\lambda_{ha}}$$

Koeficient roztažnosti vzduchu:

$$\beta = \frac{\eta_{ha}}{\frac{0,0288 \cdot 8,3144}{p_a}}$$

Grashofovo číslo:

$$Gr = \frac{g \cdot l^3 \cdot 1/T_a}{\eta_{ha}}$$

Zdroj přílohy P1:

Proper selection of insulation material is an art [online]. 2011 [cit. 2011 – 05 – 23]. Dostupné na WWW: <<http://www.energymanagertraining.com/Documents/Sethuraman-2-EE07.pdf>>

Zdroj přílohy P2:

Newport, *Tabůlka emisivit kovových materiálů* [online]. 2011 [cit. 2010 – 05 - 24]. Dostupné na WWW: < <http://www.newport.cz/techinfo/emiskovy.html>>.