

Možnosti minimalizace tepelných ztrát při distribuci tepla

Jaroslav Pařenica

Bakalářská práce
2025



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta aplikované informatiky

Ústav automatizace a řídicí techniky

Akademický rok: 2024/2025

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Jaroslav Pařenica
Osobní číslo:	A22154
Studijní program:	B0714A150006 Aplikovaná informatika v průmyslové automatizaci
Specializace:	Průmyslová automatizace
Forma studia:	Kombinovaná
Téma práce:	Možnosti minimalizace tepelných ztrát při distribuci tepla
Téma práce anglicky:	Possibilities of minimizing heat losses during distribution of heat

Zásady pro vypracování

- Proveďte literární studii týkající se současného stavu v oblasti distribuce tepla.
- V teoretické části se zaměřte na mechanismy sdílení tepla, způsoby výpočtu tepelných ztrát a možnosti minimalizace teplotních ztrát při distribuci tepla.
- V praktické části proveďte výpočty tepelných ztrát pro vybrané prvky distribuční sítě.
- Pro výpočty tepelných ztrát vytvořte programovou aplikaci.
- V závěru zhodnotte výsledky a přínos bakalářské práce.

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

Seznam doporučené literatury:

1. BEJAN, Adrian a KRAUS, Allan D. (ed.). *Heat transfer handbook*. Hoboken: John Wiley & Sons, [2003]. ISBN 0471390151. Dostupné z: <http://www.loc.gov/catdir/toc/wiley031/2002028857.html>.
2. BIRD, R.B., STEWARD, W.E., LIGHTFOOT, E.N. *Transport Phenomena*. John Wiley & Sons, 2007. 905 s. ISBN 0-470-11539-4.
3. KOZUBKOVÁ, M., BLEJCHAŘ, T., BOJKO, M. *Modelování přenosu tepla, hmoty a hybnosti*. Ostrava: FS VŠB-TU, 2019.
4. JÍCHA, Miroslav. *Přenos tepla a látky. Učební texty vysokých škol*. Brno: CERM, 2001. ISBN 80-214-2029-4.
5. BEJAN, Adrian. *Convection Heat Transfer*. 4 th. United States: John Wiley & Sons, 2013. ISBN 0470900377.

Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Dagmar Janáčková, CSc.**
Ústav automatizace a řídicí techniky

Datum zadání bakalářské práce: **6. prosince 2024**
Termín odevzdání bakalářské práce: **27. května 2025**

doc. Ing. Jiří Vojtěšek, Ph.D. v.r.
děkan



prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 6. prosince 2024

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že

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

Prohlašuji, že

- jsem na bakalářské práci pracoval(a) samostatně a použitou literaturu jsem řádně citoval(a); v případě publikace výsledků budu uveden(a) jako spoluautor;
- odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne

.....
podpis autora

ABSTRAKT

Obsahem této bakalářské práce je řešení problematiky tepelných ztrát při distribuci tepla a možnostmi jejich minimalizace. Teoretická část se věnuje jednotlivým mechanismům sdílení tepla vedením, konvekcí a sáláním a vlivům konstrukčních, materiálových a environmentálních parametrů na velikost tepelných ztrát. Praktická část zahrnuje výpočty tepelných ztrát u neizolovaného i izolovaného potrubí a ventilu s využitím analytických vztahů a dále obsahuje popis tvorby i ověření aplikace pro výpočet tepelných ztrát.

Klíčová slova: tepelné ztráty, izolace, potrubí, vedení tepla, konvekce, sálání, distribuce tepla

ABSTRACT

The content of this bachelor's thesis is to solve the problem of heat losses during heat distribution and the possibilities of their minimization. The theoretical part is dedicated to the individual mechanisms of heat transfer by conduction, convection and radiation and the effects of structural, material, and environmental parameters on the magnitude of heat losses. The practical part includes calculations of heat losses for both non-insulated and insulated piping and a valve using analytical relationships. It also contains a description of the development and verification of an application designed to calculate heat losses.

Keywords: heat loss, insulation, piping, heat conduction, convection, radiation, heat distribution

Na tomto místě bych chtěl poděkovat prof. Ing. Dagmar Janáčové, CSc. za pomoc, návrhy a připomínky k práci a své rodině za podporu při studiu.

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

OBSAH

ÚVOD.....	11
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 LITERÁRNÍ STUDIE DISTRIBUCE TEPLA	13
2 MECHANISMY SDÍLENÍ TEPLA.....	16
2.1 VEDENÍ (KONDUKCE)	17
2.1.1 Vedení tepla vícevrstvou stěnou	18
2.1.2 Vedení tepla válcovou stěnou	19
2.2 SDÍLENÍ TEPLA PROUDĚNÍM (KONVEKCI).....	21
2.2.1 Používaná kritéria podobnosti	22
2.2.2 Výpočet tepelných ztrát při přestupu konvekcí.....	24
2.2.3 Volná konvekce.....	24
2.2.4 Nucená konvekce	26
2.3 SDÍLENÍ TEPLA SÁLÁNÍM (ZÁŘENÍM, RADIACÍ)	27
2.4 KOMBINOVANÉ SDÍLENÍ TEPLA.....	30
3 TEPELNÉ ZTRÁTY.....	32
3.1 PODZEMNÍ INSTALACE.....	32
3.2 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ TEPELNÉ ZTRÁTY	32
3.2.1 Vlivy materiálů.....	32
3.2.2 Vlivy prostředí	34
3.3 MINIMALIZACE TEPELNÝCH ZTRÁT IZOLACÍ.....	36
3.3.1 Tepelná izolace.....	36
3.3.2 Vybrané izolační materiály	38
II PRAKTICKÁ ČÁST.....	41
4 ZPŮSOB VÝPOČTU TEPELNÝCH ZTRÁT.....	42
4.1 VÝPOČET TEPELNÝCH ZTRÁT NEIZOLOVANÉHO POTRUBÍ	42
4.2 VÝPOČET TEPELNÝCH ZTRÁT IZOLOVANÉHO POTRUBÍ	46
4.3 VÝPOČET TEPELNÝCH ZTRÁT VENTILU	54
5 APLIKACE PRO VÝPOČET TEPELNÝCH ZTRÁT	58
5.1 PROSTŘEDÍ MATLAB APP DESIGNER	58
5.2 TVORBA APLIKACE	58
5.3 PŘÍKLADY VÝPOČTU.....	74
ZÁVĚR	77
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	78
SEZNAM OBRÁZKŮ	81
SEZNAM TABULEK.....	82

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	83
SEZNAM PŘÍLOH.....	86

ÚVOD

Distribuce tepla je nezbytnou součástí moderních energetických systémů, které zajišťují pohodlí a funkčnost v obytných, komerčních a průmyslových objektech. S rostoucími požadavky na energetickou účinnost a ekologickou šetrnost se otázka minimalizace tepelných ztrát stává klíčovým aspektem při návrhu a provozu těchto systémů. Tepelné ztráty, které vznikají při distribuci tepla od jeho zdroje k uživatelským místům, nejen že ovlivňují energetickou náročnost a provozní náklady, ale také mají dopad na environmentální zátěž, zejména na emise skleníkových plynů.

Tepelný přenos v potrubních systémech probíhá různými mechanismy, mezi které patří vedení, konvekce a sálání. Každý z těchto mechanismů se liší a je třeba je při návrhu a provozu systémů pečlivě zohlednit.

Jedním z hlavních cílů této práce je identifikovat klíčové faktory, které ovlivňují tepelné ztráty v různých typech potrubních systémů, a to jak v nadzemním, tak podzemním uložení. Mezi těmito faktory jsou kromě samotného typu potrubí a použitého materiálu i environmentální podmínky, jako je teplota okolí, rychlost proudění vzduchu, vlhkost a další. Dále se práce zaměřuje na metody, které umožňují snížení těchto tepelných ztrát. Nejefektivnější z nich je použití tepelné izolace, která může výrazně zpomalit přenos tepla mezi potrubím a okolním prostředím.

I TEORETICKÁ ČÁST

1 LITERÁRNÍ STUDIE DISTRIBUCE TEPLA

Distribuce tepla je klíčovým prvkem energetických systémů, zejména ve městech a průmyslových aglomeracích. Moderní technologie a přechod k udržitelným zdrojům energie významně ovlivňují vývoj této oblasti. [1]

Kromě technologického pokroku čelí distribuce tepla různým výzvám, jako jsou rostoucí ceny paliv, potřeba modernizace infrastruktury a požadavky na snížení emisí skleníkových plynů. Přechod na efektivnější a ekologičtější systémy distribuce tepla je proto nezbytný pro dosažení cílů udržitelného rozvoje a energetické bezpečnosti. [1]

Distribuce tepla hraje roli v přechodu na nízkouhlíkové hospodářství. Například Evropská unie prostřednictvím své zelené dohody podporuje vývoj nízkoemisních technologií a zvyšování energetické účinnosti. Efektivní distribuce tepla umožňuje snížení energetických ztrát a zároveň podporuje integraci obnovitelných zdrojů energie. [1],[2]

Systémy distribuce tepla lze rozdělit na centralizované a decentralizované. Centralizované systémy, například dálkové vytápění, jsou běžné v Evropě a umožňují efektivní využívání obnovitelných zdrojů. Centralizované zásobování teplem (CZT) využívá rozsáhlé teplotenské sítě k distribuci tepla z jednoho centrálního zdroje, což umožňuje efektivní řízení zdrojů energie a snížení emisí skleníkových plynů. Hlavními zdroji tepla v CZT mohou být spalování biomasy, kombinovaná výroba elektřiny a tepla (kogenerace), geotermální energie nebo odpadní teplo z průmyslových provozů. [1],[3]

Hlavní výhody centralizovaných systémů:

- Lepší kontrola nad emisemi – umožňuje efektivní filtraci škodlivin a využití ekologických paliv.
- Vyšší účinnost – kogenerace umožňuje vyšší účinnost než samostatná výroba elektřiny nebo tepla.
- Možnost integrace obnovitelných zdrojů – modernizované systémy mohou využívat solární tepelnou energii, biomasu nebo tepelná čerpadla.
- Nižší provozní náklady – při dostatečně husté síti odběratelů jsou provozní náklady CZT nižší než u individuálního vytápění.

Decentralizované systémy jsou založené na individuálních kotlích, tepelných čerpadlech nebo solárních termických systémech. Tyto systémy jsou stále populárnější díky

jejich flexibilitě, nižším infrastrukturním nákladům a možnosti využití obnovitelných zdrojů energie na lokální úrovni. [1]

Výhody decentralizovaných systémů:

- Nezávislost na centrální dodávce – domácnosti a firmy mohou lépe řídit svou spotřebu.
- Možnost rychlého přizpůsobení technologickým inovacím – decentralizované systémy lze snadněji modernizovat
- Nižší náklady na rozvodnou infrastrukturu – nejsou potřeba dlouhé potrubní rozvody.

Moderní technologie v distribuci tepla

Mezi hlavní inovace patří:

- Inteligentní sítě – umožňují efektivní řízení dodávek a minimalizaci tepelných ztrát. Pokročilé měřicí systémy a automatizace umožňují optimalizaci provozu sítí a přizpůsobení dodávek tepla aktuální poptávce.
- Nízkoteplotní distribuční systémy – snižují energetickou náročnost a zvyšují účinnost. Tyto systémy pracují s nižšími teplotami vody v rozvodech, což umožňuje lepší využití obnovitelných zdrojů, jako jsou tepelná čerpadla a solární kolektory.
- Použití tepelných čerpadel a odpadního tepla – podporuje udržitelnost a snižuje závislost na fosilních palivech. Odpadní teplo z průmyslových procesů nebo datových center lze využít k vytápění budov, což přispívá k efektivnějšímu využití dostupné energie.
- Digitální monitorování a optimalizace – přináší vyšší efektivitu a transparentnost provozu. Moderní řídicí systémy umožňují lepší predikci spotřeby, což pomáhá snížit náklady a optimalizovat výkon distribuční sítě. [1],[2]

Ekonomické a legislativní aspekty

Distribuce tepla je ovlivněna regulačními rámci a podporou ze strany vlád. V EU existují různé dotační programy pro modernizaci CZT a zavádění nízkoemisních technologií. Tyto programy podporují přechod na ekologicky šetrné zdroje energie, jako jsou bioplyn, solární tepelná energie a geotermální zdroje.

K dalším důležitým ekonomickým faktorům patří cena paliv, investiční náklady na modernizaci a návratnost investic. V některých zemích je podpora obnovitelných zdrojů

doprovázena systémem daňových úlev a výhodných úvěrů pro projekty energetické účinnosti. [1],[2]

Environmentální dopady

Modernizace distribučních soustav přispívá ke snižování emisí CO₂ a zlepšení kvality ovzduší. Přechod na obnovitelné zdroje a vyšší efektivita sítí hrají klíčovou roli v dekarbonizaci teplárenství. Hlavní výzvy zahrnují nutnost vysokých investic a omezenou dostupnost některých ekologických paliv. [1],[4]

Využití odpadního tepla, chytrých technologií a obnovitelných zdrojů energie umožní snížení emisí skleníkových plynů, což je zásadní pro boj proti změně klimatu. [1]

Budoucnost distribuce tepla

Distribuce tepla prochází dynamickým vývojem, který je poháněn technologickými inovacemi, ekonomickými faktory a ekologickými požadavky. Budoucnost této oblasti bude záviset na efektivní integraci obnovitelných zdrojů a chytrých řešení, které zajistí udržitelnou a ekonomicky výhodnou distribuci tepla. Budoucnost distribuce tepla bude určena kombinací technologických inovací, regulačních opatření a změn v poptávce po energetických službách. Očekává se širší nasazení umělé inteligence pro optimalizaci sítí, rozvoj tepelných úložišť pro lepší řízení spotřeby a propojení distribučních soustav s chytrými budovami. Digitalizace a automatizace přinesou vyšší flexibilitu a umožní přesnější řízení spotřeby. Vzhledem k rostoucím požadavkům na dekarbonizaci bude nutné rozšířit využití zelených technologií a digitalizace v sektoru teplárenství. [1],[2],[3],[4],[5]

2 MECHANISMY SDÍLENÍ TEPLA

Sdílení tepla je fyzikální proces, při kterém dochází k přenosu tepla – vnitřní energie vyměněné mezi tělesy nebo částmi systému v důsledku rozdílu teplot. Tento proces probíhá v souladu s druhým termodynamickým zákonem, který říká, že teplo se přenáší vždy od teplejšího tělesa k chladnějšímu. [6]

Teplo Q [J] lze vypočítat ze vztahu:

$$Q = c_p \cdot m \cdot (t_2 - t_1), \quad (1)$$

kde c_p je měrná tepelná kapacita, m hmotnost a $(t_2 - t_1)$ je rozdíl teplot a hnací silou systému.

Teplený tok $\dot{Q}$ [W] je fyzikální veličina, která popisuje množství tepla přeneseného za jednotku času. Jinými slovy, vyjadřuje rychlost přenosu tepla v určitém směru. [6]

Vztah pro vyjádření tepelného toku:

$$\dot{Q} = c_p \cdot \dot{m} \cdot (t_2 - t_1), \quad (2)$$

kde $\dot{m}$ je hmotnostní průtok látky.

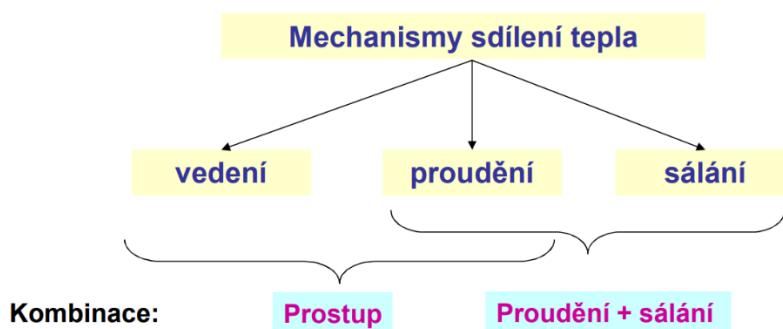
S předáváním tepla se běžně můžeme setkat v přírodě jako např. slunce vyzařující teplotní záření, které ohřívá Zemi, teplo sálající z ohně, vítr, mořské proudy, koloběh vody, vypařování a kondenzace.

Přenosu tepla a hmoty se využívá ve všech oblastech techniky např. solární panely, jaderné reaktory, pájení a svařování kovů, klimatizace a vytápění místností v domě, spalovací motory, chlazení počítačů, výměníky tepla aj. [7]

Sdílení tepla můžeme rozdělit do dvou skupin na žádoucí a nežádoucí, zda je přenos tepla v dané situaci výhodný nebo ne. Žádoucí přenos tepla znamená, že teplo je přenášeno v takovém množství a směru, které podporuje požadovanou činnost nebo funkci. V těchto případech je přenos tepla pozitivní a zaměřuje se na efektivitu a využitelnost tepelné energie např. chlazení elektronických zařízení nebo tepelná energie v topení. Naopak k nežádoucímu přenosu dochází, když teplo uniká nebo se šíří na místa, kde to není výhodné, což může vést k nežádoucím energetickým ztrátám, snížení účinnosti nebo k poškození zařízení např. únik tepla z budov nebo ztráty v elektrických zařízeních (trouba, varná konev).

Sdílení tepla lze rozdělit podle způsobu přenosu tepla na tři základní mechanismy – vedením (kondukcí), prouděním (konvekcí), sáláním (zářením, radiací). Každý z těchto

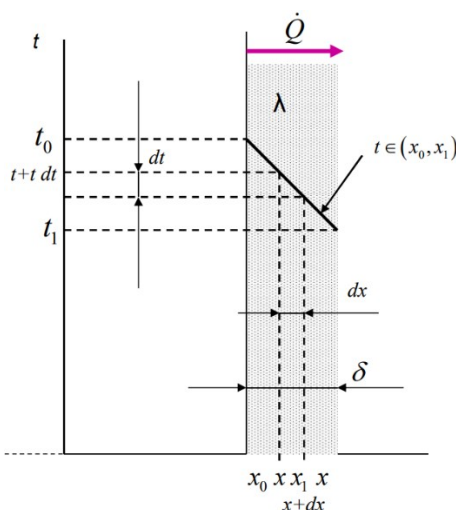
způsobů přenosu tepla se uplatňuje v různých situacích a může se vyskytovat samostatně nebo v kombinaci. [8]



Obrázek 1 – Mechanismy sdílení tepla [9]

2.1 Vedení (kondukce)

Vedení tepla je sdílení tepla související s tepelným pohybem molekul, atomů a iontů a jejich vzájemnou interakcí. Zahřátím tělesa dochází ke zvýšení jeho vnitřní energie, která umožňuje pohyb částic. Tento proces probíhá především v pevných látkách, ale také v kapalinách a plynech při dostatečné hustotě částic. Podmínkou kondukce je nerovnoměrné rozložení teplot. Toto teplo se postupně šíří tělesem, dokud nedojde ke vzájemnému vyrovnání teplot. Tepelná vodivost tělesa určuje rychlost vedení tepla. Součinitel tepelné vodivosti umožňuje porovnat látky podle jejich schopnosti vést teplo. [10]



Obrázek 2 – Teplotní profil napříč deskou [9]

Fourierův zákon popisuje tok tepla v materiálu. Udává, že se teplo přenáší z míst s vyšší teplotou do míst s nižší teplotou a že intenzita tohoto přenosu závisí na rozdílu teplot Δt a součiniteli tepelné vodivosti materiálu λ [11]:

$$q = -\lambda \cdot \Delta t \quad (3)$$

Uvedený vztah platí pouze pro lineární kondukcii. Pro nelineární vedení tepla je Fourierův zákon zapsán tvarem:

$$d\dot{Q} = -\lambda \cdot \frac{dt}{dx} \cdot dA, \quad (4)$$

kde $|d\dot{Q}|$ je změna tepelného toku, $|dt|$ změna teploty, $|dx|$ změna pozice a $|dA|$ teplosměnná plocha kolmá ke směru tepelného toku. [11]

Po integraci pro desku ve tvaru:

$$\dot{Q} = \lambda \cdot \frac{(t_2 - t_1)}{\delta} \cdot A, \quad (5)$$

kde δ je tloušťka stěny, A teplosměnná plocha (povrch stěny).

Intenzita toku tepla q [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$][10]:

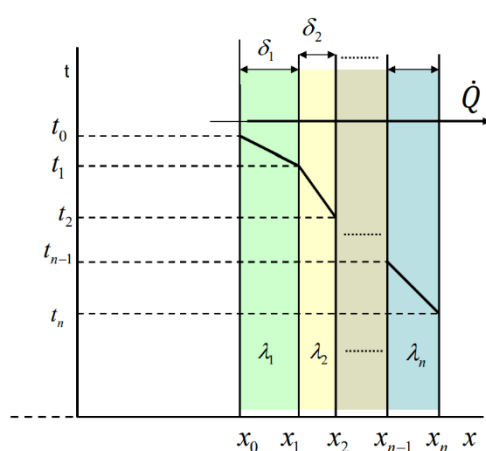
$$q = \frac{d\dot{Q}}{dA} = -\lambda \cdot \frac{dt}{dx} \quad (6)$$

2.1.1 Vedení tepla vícevrstvou stěnou

Pokud teplo prochází stěnou složenou z více vrstev různých materiálů, každá vrstva představuje tepelný odpor vůči vedení tepla různým způsobem v závislosti na svých vlastnostech. Tento odpor závisí na tloušťce vrstvy, tepelně vodivosti materiálu a ploše, skrze kterou teplo prochází. Vícevrstvá stěna se chová jako soustava tepelných odporů zapojených sériově, což znamená, že celkový tepelný odpor se rovná součtu jednotlivých odporů vrstev. Čím vyšší je celkový tepelný odpor, tím menší množství tepla stěnou projde, což je klíčové pro návrh tepelných izolací například ve stavebnictví (např.: izolace stěn domu) nebo pro průmyslové aplikace (např.: žáruvzdorná izolace pece). Naopak materiály s vysokou tepelnou vodivostí, jako jsou kovy a beton, umožňují rychlejší přenos tepla toho můžeme využít třeba v elektronice (např.: chladič procesoru) a energetice (např.: tepelné výměníky v elektrárnách).

Při návrhu vícevrstvé stěny je důležité zohlednit nejen tepelnou vodivost jednotlivých materiálů, ale také faktory jako tepelná kapacita, vlhkostní vlastnosti a odolnost vůči vnějším podmínkám. Například v zimních podmínkách musí vnější vrstvy odolávat proměnlivým teplotám a vlhkosti, zatímco vnitřní vrstvy by měly zajišťovat stabilní tepelný komfort v místnosti.

V praxi se proto vícevrstvé stěny často skládají z kombinace nosných materiálů (cihly, beton) a izolačních vrstev (polystyren, minerální vata), což umožňuje optimalizovat jak pevnost konstrukce, tak tepelnou izolaci. [10]



Obrázek 3 – Teplotní profil napříč vícevrstvou stěnou [9]

Pro výpočet vedení tepla jednotlivých deskových vrstev [10]:

$$\dot{Q}_1 = \lambda_1 \cdot A \cdot \frac{t_0 - t_1}{\delta_1} \quad (7)$$

$$\dot{Q}_2 = \lambda_2 \cdot A \cdot \frac{t_1 - t_2}{\delta_2} \quad (8)$$

$$\dot{Q}_n = \lambda_n \cdot A \cdot \frac{t_{n-1} - t_n}{\delta_n} \quad (9)$$

Pro výpočet celkového tepelného toku vícevrstvou deskovou stěnou [10]:

$$\dot{Q} = A \cdot \frac{t_0 - t_n}{\sum_{j=1}^n \frac{\delta_j}{\lambda_j}} \quad (10)$$

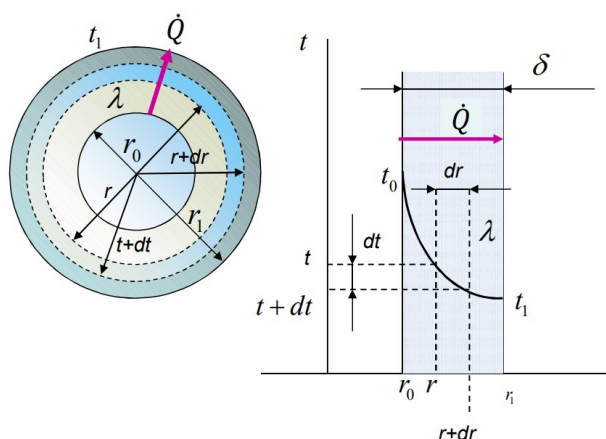
2.1.2 Vedení tepla válcovou stěnou

Vedení tepla válcovou stěnou (např. trubkou) se liší od vedení tepla rovinnou stěnou tím, že teplotní gradient probíhá v radiálním směru, nikoli v přímce. To znamená, že se teplo šíří

soustřednými válcovými vrstvami, jejichž plocha se s rostoucím poloměrem zvětšuje. V důsledku toho nelze použít jednoduchý lineární vztah pro tepelný tok jako u rovinných stěn, ale je nutné využít diferenciální přístup v polárních souřadnicích.

Tento typ vedení tepla je klíčový v široké škále technických a průmyslových aplikací. V energetice se používá při návrhu tepelných výměníků, kde horká pára nebo kapalina předává teplo přes stěnu trubky do chladnějšího média. Ve stavebnictví se tepelný tok válcovou stěnou zohledňuje při izolaci potrubí, teplovodních a horkovodních rozvodů, aby se minimalizovaly tepelné ztráty a zvýšila účinnost vytápění.

V praxi se lze setkat i s vícevrstevnými válcovými stěnami, kdy například ocelové trubky mají na povrchu několik vrstev tepelných izolací, jako je minerální vata nebo pěnové materiály, které výrazně omezují ztráty tepla do okolí. Správná volba materiálů a tloušťky izolace je zásadní pro zajištění energetické účinnosti, bezpečnosti provozu a snížení nákladů na ohřev nebo chlazení.



Obrázek 4 – Teplotní profil napříč vícevrstvou válcovou stěnou [9]

Fourierův zákon pro vedení tepla válcovou stěnou:

$$d\dot{Q} = -2 \cdot \pi \cdot L \cdot \lambda \cdot \frac{dt}{dr}, \quad (11)$$

kde L je délka (výška) válce, $|dr|$ změna poloměru.

Po integraci pro výpočet vedení tepla jednotlivých válcových vrstev:

$$\dot{Q}_1 = 2 \cdot \pi \cdot L \cdot \lambda_1 \cdot \frac{t_0 - t_1}{\ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)} \quad (12)$$

$$\dot{Q}_2 = 2 \cdot \pi \cdot L \cdot \lambda_2 \cdot \frac{t_1 - t_2}{\ln\left(\frac{d_3}{d_2}\right)} \quad (13)$$

$$\dot{Q}_n = 2 \cdot \pi \cdot L \cdot \lambda_n \cdot \frac{t_{n-1} - t_n}{\ln\left(\frac{d_{n+1}}{d_n}\right)}, \quad (14)$$

kde d_n je průměr dané vrstvy válce.

Po úpravě vznikne rovnice pro výpočet tepelného toku složené válcové stěny [12]:

$$\dot{Q} = 2\pi L \frac{t_0 - t_n}{\sum_{j=1}^n \left(\frac{1}{\lambda_j}\right) \ln\left(\frac{d_{j+1}}{d_j}\right)} \quad (15)$$

2.2 Sdílení tepla prouděním (konvekci)

Sdílení tepla pomocí proudění (konvekce) je jeden z hlavních mechanismů přenosu tepla. Ve srovnání s kondukcí, která se uplatňuje hlavně v pevných látkách a je založena na molekulárním pohybu částic bez jejich makroskopického přemísťování, konvekce probíhá pouze v kapalinách a plynech a teplo se přenáší jak molekulárním pohybem, tak prostřednictvím proudění samotné tekutiny. Prouděním dochází k výměně tepla mezi pevnou plochou a pohybující se tekutinou (kapalinou nebo plynem), ale vždy z teplejší oblasti do chladnější. Konvekce hraje zásadní roli v různých oblastech, jako je atmosférická cirkulace, ohřev a chlazení tekutin, klimatizačních systémy, chlazení elektroniky aj. [13]

Míra přenosu (přestupu) tepla konvekci je ovlivněna několika klíčovými faktory, včetně rychlosti proudění tekutiny, její hustoty, viskozity, tepelné vodivosti, specifického tepla a teplotního rozdílu mezi povrchem a okolní tekutinou. Obecně platí, že čím rychleji se tekutina pohybuje, tím vyšší je přenos tepla, protože dochází k intenzivnější výměně energie mezi částicemi tekutiny a povrchem pevného tělesa. V mnoha technických aplikacích se proto používají různá opatření ke zvýšení intenzity konvekce, například zvětšení povrchu přenosu tepla (pomocí žebër a lamel), optimalizace tvaru proudících kanálů nebo použití silnějšího průtoku kapaliny či vzduchu. [13]

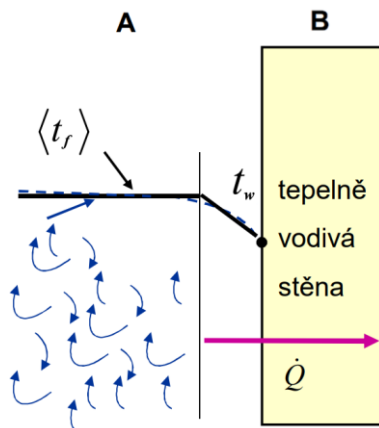
Pro popis sdílení tepla konvekci se uplatňuje Newtonův ochlazovací zákon:

$$dQ = \alpha \cdot |\langle t_f \rangle - t_w| \cdot dA, \quad (16)$$

kde α je součinitel přestupu tepla, $\langle t_f \rangle$ průměrná teplota tekutiny t_w teplota povrchu stěny.

Po integraci ve tvaru [13]:

$$\dot{Q} = \alpha \cdot |\langle t_f \rangle - t_w| \cdot A \quad (17)$$



Obrázek 5 – Přestup tepla konvekcí [9]

Proudění tekutiny může být buď volné (přirozené), kdy je pohyb tekutiny způsoben rozdíly v hustotě vyvolanými teplotními změnami (například stoupání teplého vzduchu nad topným tělesem nebo přirozená cirkulace mořských proudů), nebo nucené, kdy je tekutina poháněna vnějším zdrojem, jako je čerpadlo, ventilátor nebo kompresor (například chlazení motoru automobilu pomocí chladicí kapaliny nebo nucená cirkulace vzduchu v klimatizaci). Nucená konvekce umožňuje mnohem efektivnější přenos tepla, protože proudění lze regulovat a optimalizovat podle potřeb daného systému. [10]

2.2.1 Používaná kritéria podobnosti

Při analýze přenosu tepla a proudění tekutin se často používají kritéria podobnosti (bezrozměrná čísla), která umožňují zobecnit výsledky experimentů a aplikovat je na různé fyzikální situace. Tato kritéria vyjadřují poměry různých sil nebo vlivů v systému a pomáhají předpovídat chování tekutin v podobných podmínkách.

Nusseltovo kritérium (Nu)

Vyjadřuje poměr mezi konvekčním a vodivým přenosem tepla.

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda_a}, \quad (18)$$

kde l je charakteristický rozměr a λ_a součinitel tepelné vodivosti tekutiny. [8]

Reynoldsovo kritérium (Re)

Udává poměr setrvačných sil k viskózním silám. Určuje režim proudění mezi laminárním, turbulentním a přechodovým prouděním.

$$Re = \frac{v \cdot l}{\nu_a}, \quad (19)$$

kde v je rychlost proudění tekutiny a ν_a představuje kinematickou viskozitu tekutiny. [8]

Prandtlovo kritérium (Pr)

Udává poměr mezi přenosem hybnosti a přenosem tepla.

$$Pr = \frac{Pe}{Re} = \frac{\frac{v \cdot l}{a}}{\frac{v \cdot l}{\nu_a}} = \frac{\nu_a}{a} = \frac{c_p \cdot \eta}{\lambda_a}, \quad (20)$$

kde Pe je Pécletovo kritérium, Re Reynoldsovo kritérium, a teplotní součinitel vodivosti tekutiny a η dynamická viskozita. [8]

Fourierovo kritérium (Fo)

Používá se při výpočtech nestacionárního vedení tepla.

$$Fo = \frac{a \cdot \tau}{l^2}, \quad (21)$$

kde τ je doba procesu sdílení tepla. [8]

Pécletovo kritérium (Pe)

Charakterizuje poměr mezi přenosem tepla konvekcí a vedením (difuzí) v tekutině.

$$Pe = \frac{v \cdot l}{a} = Re \cdot Pr, \quad (22)$$

kde Pr je Prandtlovo kritérium. [8]

Grashofovo kritérium (Gr)

Vyjadřuje poměr mezi vztakovými a viskózními silami v přirozené konvekci.

$$Gr = \frac{g \cdot l^3 \cdot \beta \cdot \Delta t}{\nu_a^2} = \frac{g \cdot l^3 \cdot \frac{1}{T_{st}} \cdot \Delta t}{\nu_a^2}, \quad (23)$$

kde g je gravitační zrychlení, β součinitel teplotní objemové roztažnosti, Δt rozdíl teplot (tekutiny a povrchu teplosměnné plochy) a T_{st} je absolutní střední teplota. [8]

2.2.2 Výpočet tepelných ztrát při přestupu konvekci

Výpočet tepelných ztrát při přestupu tepla konvekci představuje důležitý krok při analýze energetických toků v různých technických a inženýrských aplikacích, jako jsou vytápění, chlazení, klimatizace, tepelná izolace nebo návrh výměníků tepla. Ztráty tepla konvekci nastávají tehdy, když teplo přechází z pevného povrchu (například stěny nebo potrubí) do okolní tekutiny, která je v kontaktu s tímto povrchem.

Základem výpočtu je součinitel přestupu tepla, který vyjadřuje schopnost konkrétní tekutiny odvádět teplo od povrchu a který zahrnuje vliv fyzikálních vlastností tekutiny (např. hustoty, viskozity, tepelné vodivosti, měrné tepelné kapacity) i charakteru proudění (např. laminární nebo turbulentní tok). Součinitel přestupu tepla lze vypočítat z Nusseltova kritéria (18). Pro tento výpočet je nutné znát Nusseltovo číslo (Nu). To se obvykle neurčuje přímo, ale vychází se z empirických korelací a výpočtů podle dalších bezrozměrných čísel, jako jsou Reynoldsovo číslo a Prandtlovo číslo. V nejvíce obecném tvaru je Nu funkcí ve tvaru [8]:

$$Nu = f\left(Re, Pr, Gr, \frac{L}{D}\right), \quad (24)$$

kde L je délka a D je průměr.

Aby došlo ke správnému výpočtu tepelných ztrát je třeba použít vhodné vztahy pro výpočet Nu na základě mnoha faktorů jako jsou například ustálenost a charakter proudění, jestli dochází k volné či nucené konvekci, tvaru tělesa nebo jestli dochází k toku uvnitř či kolem tělesa. V následující části práce jsou uvedeny a popsány vybrané výpočetní vztahy pro konvekci bez změny fáze.

2.2.3 Volná konvekce

Volná konvekce nastává, když je proudění tekutiny vyvoláno pouze rozdílem teplot mezi povrchem tělesa a okolním prostředím. Zahřátý vzduch v blízkosti teplejšího povrchu

se stává lehčím (má nižší hustotu) a začne stoupat vzhůru, zatímco chladnější a těžší vzduch klesá dolů, čímž dochází k přirozenému pohybu.

Pokud je prostředí, ve kterém dochází k přirozenému proudění relativně velké pro výpočet Nusseltova čísla tak lze použít jednoduchý vztah ve tvaru [8]:

$$Nu = C \cdot (Gr \cdot Pr)^n, \quad (25)$$

kde C a n jsou konstanty závislé na součinu Gr a Pr uvedené v tabulce 1.

$Gr \cdot Pr$	C	n
$<10^{-3}$	0,5	0
$<1 \cdot 10^{-3} ; 5 \cdot 10^2>$	1,18	1/8
$<5 \cdot 10^2 ; 2 \cdot 10^7>$	0,54	1/4
$<2 \cdot 10^7 ; 1 \cdot 10^{23}>$	0,135	1/3

Tabulka 1 – Konstanty pro výpočet Nusseltova čísla v závislosti na hodnotě $GrPr$ [8]

Fyzikální vlastnosti látek jsou zjištěny z tabulek při střední teplotě [8]:

$$t_{st} = \frac{t_w + t_a}{2}, \quad (26)$$

kde t_w je teplota povrchu a t_a teplota okolí.

Pokud dochází k obtékání svislého válce lze pro $L/D > 35/Gr^{0,25}$ použít rovnici (27), pokud $L/D < 35/Gr^{0,25}$ musí se ještě rovnice (27) vynásobit korekčním faktorem (28) [14]:

$$Nu = \left(0,825 + \frac{0,387 \cdot (Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{6}}}{\left(1 + 0,671 \cdot \left(\frac{1}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{8}{27}}} \right)^2 \quad (27)$$

$$\left(1 + 1,43 \left(\frac{L}{D_{ek} \cdot Gr^{0,25}} \right)^{0,9} \right), \quad (28)$$

kde D_{ek} je ekvivalentní průměr dle vztahu (30).

Pokud dochází k obtékání vodorovného válce lze v oblasti $10^{-5} \leq Gr \cdot Pr \leq 10^{12}$ použít rovnici [14]:

$$Nu = \left(0,6 + \frac{0,387 \cdot (Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{6}}}{\left(1 + 0,721 \cdot \left(\frac{1}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{8}{27}}} \right)^2 \quad (29)$$

2.2.4 Nucená konvekce

Nucená konvekce nastává tehdy, když je proudění tekutiny vyvoláno vnějším zdrojem (např. ventilátorem, čerpadlem nebo proudem vzduchu v otevřeném prostoru). V důsledku toho je přenos tepla z povrchu tělesa výrazně intenzivnější než při volné (přirozené) konvekci.

Tok uvnitř trubky

U potrubí kruhového průřezu se při proudění uvnitř trubek dosazuje za charakteristický rozměr l vnitřní průměr a pro nekruhové průřezy potrubí jeho ekvivalentní průměr počítaný dle vztahu [15]:

$$D_{ek} = \frac{4 \cdot S}{o}, \quad (30)$$

kde S je plocha průtočného průřezu a o obvod smočený tekutinou.

Pro proudění v laminární oblasti, tj. $Re < 2300$ lze použít vztah: [15].

$$Nu = 0,15 \cdot Re^{0,32} \cdot Pr^{0,33} \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,1} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_w} \right)^{0,25}, \quad (31)$$

kde Pr_w je Prandtlovo číslo při teplotě u povrchu stěny.

Pro turbulentní oblast lze pro výpočet Nusseltova čísla použít vztah:

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4}, \quad (32)$$

který platí pro oblast $10^4 < Re < 5 \cdot 10^4$ a $L/d > 50$. [15]

Pro přechodovou oblast proudění lze použít rovnici:

$$Nu = 0,116 \cdot \left(Re^{\frac{2}{3}} - 125 \right) \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \cdot \left(1 + \left(\frac{d}{L} \right)^{\frac{2}{3}} \right) \cdot \left(\frac{\eta}{\eta_w} \right)^{0,14}, \quad (33)$$

která platí když $2300 < Re < 2 \cdot 10^6$; $0,5 < Pr < 500$ a $d/L \leq 1$. [15]

Obtékání těles při nucené konvekci

K obtékání dochází, když je proudící tekutině postavena překážka do cesty (např. voda v řece proudící kolem pilíře mostu nebo vzduch proudící kolem potrubí) [14].

Hodnotu Nusseltova čísla lze získat z rovnice pro výpočet kolmého obtékání válce:

$$Nu = 0,3 + \frac{0,62 \cdot \sqrt{Re} \cdot Pr^{\frac{1}{3}}}{\left(1 + \left(\frac{0,4}{Pr} \right)^{\frac{2}{3}} \right)^{\frac{1}{4}}} \cdot \left(1 + \left(\frac{Re}{282000} \right)^{\frac{5}{8}} \right)^{\frac{4}{5}} \quad (34)$$

tento vztah platí pro $(Re \cdot Pr) > 0,2$. [14]

Pro $Pe < 0,2$, pak vztah ve tvaru [14]:

$$Nu = \frac{1}{0,8237 - 0,5 \cdot \ln(Pe)} \quad (35)$$

Pro výpočet obtékání podél rovinné stěny lze použít rovnici [8]:

$$Nu = 0,0356 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \quad (36)$$

2.3 Sdílení tepla sáláním (zářením, radiací)

Sálání (radiace) je způsob přenosu tepla, který probíhá prostřednictvím elektromagnetického záření. Na rozdíl od vedení a proudění nevyžaduje žádné médium k přenosu energie, což znamená, že se může šířit i ve vakuu. Intenzita sálání závisí především na teplotě tělesa a jeho emisivitě, tedy schopnosti materiálu vyzařovat energii. V opačném případě při přeměně záření na teplo pak záleží na absorpci tělesa, tedy schopnost pohlcovat vyzařovanou energii.

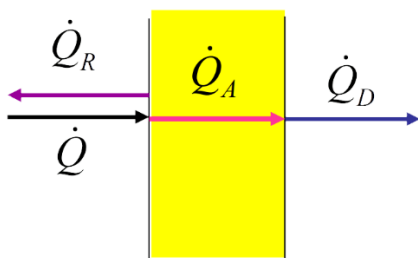
Podle délky vln se rozlišuje záření na rentgenové, ultrafialové, světelné, infračervené a elektromagnetické vlny. Teplejší tělesa vyzařují více energie a vyšší podíl záření se posouvá směrem ke kratším vlnovým délkám, což je důvodem, proč rozžhavené objekty mohou zářit i viditelným světlem. Tento princip hraje klíčovou roli v mnoha přirozených i technologických procesech, například při přenosu sluneční energie na Zemi, tepelném vyzařování topných těles nebo chlazení povrchů. [16]

Na povrchu tělesa může dojít k nerovnoměrnému rozložení energie, takže plošnou hustotu zářivého toku $\dot{Q}$ dopadajícího na ozářenou plochu A je intenzita záření E . [10]

$$E = \frac{d\dot{Q}}{dA} \quad (37)$$

Pokud dopadne zářivý tok $\dot{Q}$ na těleso, část $\dot{Q}_R$ se odrazí, část $\dot{Q}_A$ se pohltí, a část $\dot{Q}_D$ tělesem projde. [17]

$$\dot{Q} = \dot{Q}_R + \dot{Q}_A + \dot{Q}_D \quad (38)$$



Obrázek 6 – Rozklad zářivého toku $\dot{Q}$ [9]

Poměrná odrazivost [17]:

$$R_p = \frac{\dot{Q}_R}{\dot{Q}} \quad (39)$$

Poměrná pohltivost [17]:

$$A_p = \frac{\dot{Q}_A}{\dot{Q}} \quad (40)$$

Poměrná propustnost [17]:

$$D_p = \frac{\dot{Q}_D}{\dot{Q}} \quad (41)$$

Dle 1. Kirchhoffova zákona platí [17]:

$$R_p + A_p + D_p = 1 \quad (42)$$

Dle 2. Kirchhoffova zákona platí [17]:

$$\frac{E}{A_p} = E_{\zeta} \quad (43)$$

Emisivita povrchu ε je bezrozměrné číslo v rozsahu 0 až 1 a popisuje, jak dobře povrch materiálu vyzařuje a pohlcuje tepelnou energii při srovnání s absolutním černým tělesem. Pro výpočet emisivity lze použít vztah [17]:

$$\frac{E}{E_{\zeta}} = \varepsilon, \quad (44)$$

kde E_{ζ} je vyzářená energie absolutně černého tělesa.

Po dosazení vztahu pro výpočet emisivity (44) do 2. Kirchhoffova zákona (43), bude platit $A_p = \varepsilon$. [17]

Pro výpočet úhrnné emisivity [17]:

$$\varepsilon_{1-2} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (45)$$

Absolutní černé těleso je ideální fyzikální objekt, který pohlcuje veškeré dopadající elektromagnetické záření bez jakéhokoliv odrazu nebo přenosu skrz materiál. Zároveň je dokonalým zářičem, protože vyzařuje maximální možné množství tepelného záření při dané teplotě [17].

Stefan-Boltzmannův zákon udává celkové množství tepelného toku vyzářené z povrchu absolutně černého tělesa vztahem [17]:

$$\dot{Q}_{\zeta} = \sigma \cdot A \cdot T^4, \quad (46)$$

kde σ je Stefan-Boltzmannova konstanta ($5,669 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$) a T absolutní teplota povrchu.

Pro šedé těleso pak ve tvaru [17]:

$$\dot{Q} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4 \quad (47)$$

Pokud dvě absolutně černá tělesa s různými teplotami sálají teplo mezi sebou, pak výsledný tok tepla mezi nimi lze vyjádřit jako [17]:

$$\dot{Q}_c = \varphi_{1-2} \cdot A \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (48)$$

Pro šedá tělesa pak ve tvaru [17]:

$$\dot{Q} = \varphi_{1-2} \cdot A \cdot \varepsilon_{1-2} \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4), \quad (49)$$

kde φ_{1-2} úhlový součinitel naklonění povrchu tělesa 1 vzhledem k povrchu tělesa 2

Pro výpočty tepelný ztrát potrubí sáláním do okolí v praktické části práce jsem použil upravený tvar rovnice (49) [14]:

$$\dot{Q} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_w^4 - T_a^4), \quad (50)$$

kde T_w teplota povrchu a T_a teplota okolí.

2.4 Kombinované sdílení tepla

Kombinace vedení a proudění tepla – prostup tepla

Prostup tepla se vyskytuje při postupném přenosu tepla mezi dvěma tekutinami přes pevnou bariéru, přičemž nedochází k vzájemnému mísení tekutin. Tento proces je klíčový v mnoha technických a stavebních aplikacích, kde je potřeba minimalizovat tepelné ztráty nebo naopak zajistit efektivní chlazení či ohřev. Prostup tepla se vyskytuje například v tepelných výměnících a potrubních systémech.

Součinitel prostupu tepla (k , jednotka $W/(m^2K)$) vyjadřuje schopnost stavební konstrukce nebo vícevrstvého materiálu propouštět teplo. Tento parametr popisuje kombinovaný přenos tepla vedením skrz pevné materiály a přestupem tepla na jejich površích. Součinitel prostupu tepla určíme z koeficientů přestupu tepla na obou stranách pevné přepážky a z hodnot tloušťek a tepelných vodivostí jednotlivých vrstev přepážky. [18]

Délkový součinitel prostupu tepla k_L se používá v případě, že dochází k prostupu tepla válcovou stěnou (např.: potrubí). Rozdílem proti součiniteli prostupu tepla k je, že se namísto plochy vztahuje na délku potrubí.

Pro výpočet součinitele prostupu tepla k [18]:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_A} + \sum_{j=1}^n \frac{\delta_j}{\lambda_j} + \frac{1}{\alpha_B} \quad (51)$$

Pro výpočet délkového součinitele prostupu tepla k_L [18]:

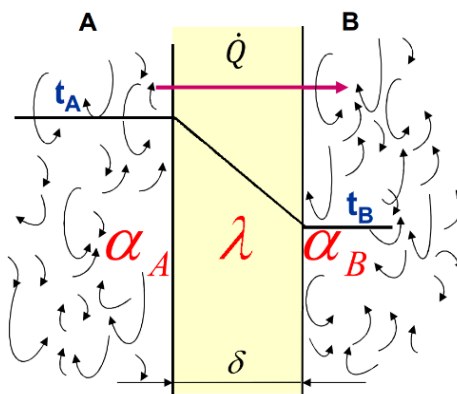
$$\frac{\pi}{k_L} = \frac{1}{\alpha_A \cdot d_A} + \sum_{j=1}^n \frac{\ln \frac{d_{j+1}}{d_j}}{2 \cdot \lambda_j} + \frac{1}{\alpha_B \cdot d_B} \quad (52)$$

Pro výpočet prostoupeného tepla deskou [18]:

$$\dot{Q} = k \cdot (t_A - t_B) \cdot A \quad (53)$$

Pro výpočet prostoupeného tepla válcem (trubkou) [18]:

$$\dot{Q} = k_L \cdot (t_A - t_B) \cdot L \quad (54)$$



Obrázek 7 – Prostup tepla přes bariéru [9]

Kombinace proudění a sálání

Ke kombinaci sálání a konvekce dochází v případě kdy těleso 1 o teplotě T_1 sdílí teplo sáláním na povrch tělesa 2 o teplotě T_2 a zároveň konvekcí do plynu obklopující těleso 2.

Výpočet celkového toku tepla je součet toků tepla prouděním a sáláním:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_k + \dot{Q}_s = A \cdot (\alpha_k + \alpha_s) \cdot (T_w - T_a), \quad (55)$$

kde $(\alpha_k + \alpha_s)$ součet součinitelů přestupu tepla konvekcí a sáláním a $(T_w - T_a)$ rozdíl absolutních teplot povrchu a okolí. [18]

3 TEPELNÉ ZTRÁTY

3.1 Podzemní instalace

V současné době je převážná část teplovodních potrubních tras ukládána do země a potrubí, kterým je teplo dopravováno je v předizolovaném stavu. Jde o tak zvané uložení bezkanálové. Tento způsob je prováděn i v případech rekonstrukcí starších rozvodů i celých soustav. Výhody podzemní proti nadzemní instalaci [19]:

- Stabilnější teplota okolí – půda funguje jako přirozený izolant a zmírňuje teplotní výkyvy, což snižuje tepelné ztráty nebo nárůst teploty média.
- Menší vliv slunečního záření – potrubí není vystaveno přímému slunečnímu záření, což eliminuje přehřívání v letních měsících.
- Omezené proudění vzduchu – teplo se přenáší hlavně vedením (kondukcí) mezi potrubím a okolní půdou, což zpomaluje ztráty i ohřev média.

Nevýhodou podzemní instalace může být riziko koroze a degradace izolace v případě, že není správně navržená ochrana potrubí.

Pro výpočet součinitele přestupu tepla pro potrubí, které je uloženo pod zeminou v hloubce h lze použít vztah [20]:

$$\alpha_z = \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda_z}{d_{ref} \cdot \ln \frac{4 \cdot h + s + d_2}{d_2}}, \quad (56)$$

kde λ_z je součinitel tepelné vodivosti zeminy, d_{ref} vnější průměr potrubí (v případě že je na potrubí izolace, tak $d_{ref} = d_3$, jinak $d_{ref} = d_2$), h hloubka uložení potrubí a s tloušťka izolace.

3.2 Faktory ovlivňující tepelné ztráty

3.2.1 Vlivy materiálů

Výběr správného materiálu ovlivňuje účinnost systémů vytápění, chlazení, průmyslových procesů i distribuce energií. Různé materiály mají odlišné tepelné vlastnosti, což ovlivňuje rychlost přenosu tepla, tepelné ztráty a celkovou efektivitu daného systému. Hlavní materiálové faktory, které mají vliv na přenos tepla v potrubí, zahrnují:

Tepelná vodivost materiálu

Součinitel tepelné vodivosti (λ , jednotka $W/(m \cdot K)$) je fyzikální veličina, která vyjadřuje schopnost materiálu vést teplo. Vyšší hodnota tepelné vodivosti znamená, že materiál přenáší teplo efektivněji, zatímco nižší hodnota značí horší přenos tepla a lepší izolační vlastnosti. [9]

Tloušťka stěny

Tloušťka stěny (d , jednotka m) ovlivňuje tepelné ztráty, protože určuje tepelný odpor materiálu R . Čím silnější je stěna potrubí, tím větší je odpor proti toku tepla, což vede k menšímu přenosu tepla mezi médiem uvnitř potrubí a okolním prostředím. Naopak tenkostěnná potrubí umožňují efektivnější přenos tepla, protože kladou menší tepelný odpor. [9]

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (57)$$

V praxi se často kombinuje silnější potrubí s přídavnou tepelnou izolací, aby se minimalizovaly tepelné ztráty. U chladicích systémů se naopak může použít tenkostěnné potrubí pro maximalizaci přenosu tepla. [14]

Povrchová úprava a drsnost

Povrchová úprava a drsnost potrubí ovlivňují přenos tepla, a to jak z vnitřní, tak z vnější strany. Drsnost povrchu ovlivňuje proudění kapaliny nebo plynu uvnitř potrubí, zatímco povrchová úprava může změnit emisivitu a tepelnou vodivost materiálu. [16]

- Hladký povrch – Umožňuje laminární proudění, což znamená menší tření a rovnoměrnější přenos tepla a zároveň se méně usazují nečistoty, což zajišťuje stabilní tepelné vlastnosti po delší dobu.
- Drsný povrch – Způsobuje turbulentní proudění, což může zvýšit přenos tepla mezi médiem a potrubím, ale zároveň zvyšuje tlakové ztráty. Může způsobovat vyšší zanášení potrubí nečistotami, což snižuje účinnost přenosu tepla a vyžaduje častější údržbu.
- Povlaky a nátěry – chrání potrubí před korozí, která by mohla snížit tepelnou vodivost a poškodit konstrukci. Černé oxidové vrstvy zvyšují emisivitu povrchu, čímž zlepšují sálání tepla u vysokoteplotních aplikací (např. v pecích). [16]

Délka potrubí

Délka potrubí má přímý vliv na celkové tepelné ztráty, protože teplo se ztrácí po celé délce povrchu potrubí. Při delších trasách potrubí dochází k postupnému ochlazování média což může vést k dosažení nežádoucí teploty na konci trasy, a tudíž nutnosti jeho přehřívání nebo zvýšení výkonu čerpadel či ventilátorů. [20]

3.2.2 Vlivy prostředí

Teplota okolí

Teplota okolí má zásadní vliv na tepelné ztráty v potrubí, protože určuje rychlost tepelné výměny mezi médiem uvnitř potrubí a okolním prostředím. Rozdíl teplot mezi těmito dvěma prostředími ovlivňuje směr a intenzitu přenosu tepla. [21]

Pokud je okolní teplota vyšší než teplota média uvnitř potrubí, může dojít k ohřívání média. To je významné zejména v případech:

- Chlazení kapalin a plynů – potrubí, které transportuje chladicí médium (např. chladicí vodu nebo klimatizační plyn), může v teplém prostředí ztrácet svou účinnost.
- Přeprava pitné vody – potrubí s pitnou vodou vystavené vysokým teplotám (například na slunci) může způsobit nežádoucí ohřev vody, což ovlivňuje její kvalitu a chuť.
- Průmyslové procesy – některé chemické nebo potravinářské provozy vyžadují, aby médium zůstalo chladné. Vysoká okolní teplota může vést ke změnám ve fyzikálních vlastnostech přepravovaných látek.

Naopak pokud je okolní teplota nižší než teplota média v potrubí, dochází k tepelným ztrátám, což může mít negativní dopady:

- Ztráty tepla u teplovodního potrubí – potrubí přenášející horkou vodu nebo páru (např. v topných systémech) může v chladném prostředí ztrácet teplo, což vede k vyšší spotřebě energie na dohřev.
- Riziko zamrznutí – pokud teplota okolí klesne pod bod mrazu, může voda v potrubí zamrznout a způsobit jeho poškození nebo prasknutí. Tomu lze předejít vhodnou izolací nebo instalací topných kabelů.

- Pomalá reakce průmyslových procesů – v chemickém a farmaceutickém průmyslu může nechtěné ochlazení zpomalit nebo změnit chemické reakce, což ovlivňuje kvalitu výsledných produktů.

Dynamické změny teploty okolí – ve venkovním prostředí dochází ke změnám teploty mezi dnem a nocí, sezónními změnami nebo vlivem klimatických podmínek. To ovlivňuje dilataci potrubí – materiály potrubí se při zahřívání rozpínají a při ochlazování smršťují, což může vést k mechanickému namáhání a poškození. [20]

Vlhkost a kondenzace

Přítomnost vlhkosti v okolním vzduchu a vznik kondenzace na povrchu potrubí mohou negativně ovlivnit tepelně-izolační vlastnosti, urychlit korozi a poškodit stavební konstrukce.

Vlhkost v prostředí se měří jako relativní vlhkost (%), která udává množství vodní páry ve vzduchu vzhledem k jeho maximální kapacitě při dané teplotě. [22]

- Vysoká relativní vlhkost – vzduch obsahuje více vodní páry, což zvyšuje riziko kondenzace na chladnějších površích potrubí.
- Nízká relativní vlhkost – vzduch je suchý, což snižuje pravděpodobnost vzniku kondenzace, ale může způsobit jiné problémy, jako je rychlejší vysychání těsnění a materiálů potrubí.

Vlhkost ovlivňuje přenos tepla hlavně skrze změnu tepelných vlastností izolace a interakci s materiály potrubí. Pokud se izolační materiály nasáknou vodou, jejich tepelný odpor se sníží, což vede k vyšším tepelným ztrátám. [22]

Kondenzace vzniká, když teplota povrchu potrubí klesne pod rosný bod okolního vzduchu. Rosný bod je teplota, při které se vodní pára začne srážet do kapalné podoby. [22]

Faktory ovlivňující vznik kondenzace:

- Teplota média v potrubí – pokud je médium v potrubí chladnější než okolní vzduch, povrch potrubí se ochlazuje a může dojít ke kondenzaci.
- Teplota a vlhkost okolního vzduchu – při vysoké vlhkosti a teplých podmínkách je pravděpodobnost kondenzace vyšší.
- Tepelná izolace potrubí – pokud izolace není dostatečná nebo je poškozená, může docházet k ochlazování povrchu potrubí pod rosný bod a tím ke kondenzaci.

- Proudění vzduchu – v klidném prostředí se kolem potrubí může vytvořit stabilní vrstva vzduchu s vysokou vlhkostí, což podporuje kondenzaci. Naopak proudícím vzduchem se srážení vlhkosti může omezit.

Sluneční záření a radiační přenos tepla

Sluneční záření a radiační přenos tepla ovlivňují potrubní systémy, zejména v exteriéru. Sluneční záření může způsobit ohřívání potrubí a změnu teploty média uvnitř, což ovlivňuje provozní parametry. Radiační přenos tepla ovlivňuje také celkovou tepelnou bilanci potrubí, a to jak ve formě absorpce sluneční energie, tak i vyzařování tepla do okolí. [16]

Sluneční záření lze rozdělit do dvou složek:

- Přímé sluneční záření – přímé paprsky dopadají na povrch potrubí
- Odražené záření – část slunečního záření se odráží od okolních povrchů (země, budov) a může dodatečně ohřívat potrubí.

3.3 Minimalizace tepelných ztrát izolací

Distribuce tepla je nedílnou součástí teplárenských soustav, průmyslových provozů i systémů centrálního zásobování teplem. Při přenosu tepla od zdroje ke konečným uživatelům však dochází k tepelným ztrátám, které mají přímý dopad na celkovou energetickou účinnost systému, provozní náklady, energetickou bezpečnost, životnost zařízení a také na ekologickou zátěž. Existuje celá řada technických a organizačních opatření, která mohou tyto ztráty výrazně snížit. Hlavní možností, jak efektivně minimalizovat tepelné ztráty při distribuci tepla jsou izolace. [20]

3.3.1 Tepelná izolace

Izolace rozvodů tepla je jeden z nejúčinnějších způsobů, jak snížit tepelné ztráty při distribuci. Tepelná izolace funguje na principu omezování přenosu tepla mezi dvěma prostředím s rozdílnou teplotou. Jejím cílem je zpomalit únik nebo vniknutí tepla. Izolační materiály obsahují vzduchové dutinky, které kladou prostupu tepla velký odpor. [14]

Hlavními vlastnostmi tepelné izolace jsou:

Nízká tepelná vodivost

Je nejdůležitější vlastností tepelných izolací určující kolik tepelné energie projde materiálem o tloušťce 1 metru při rozdílu teplot 1 °C mezi jeho stranami. U většiny izolačních materiálů s rostoucí teplotou stoupá tepelná vodivost, čímž snižuje schopnost izolovat. [22]

Odolnost vůči vlhkosti

Vlhkost má velmi negativní dopad na většinu izolačních materiálů – zvyšuje jejich tepelnou vodivost, a tím výrazně snižuje účinnost tepelné izolace. Některé materiály mohou vlivem vlhkosti navíc degradovat, ztrácet tvar nebo plesnivět. [22]

Chemická odolnost a stárnutí

Tepelné izolace jsou často vystaveny agresivním podmínkám prostředí, které mohou ovlivnit jejich funkčnost, životnost i bezpečnost. Mezi tyto podmínky patří například kontakt s chemikáliemi, oleji, spaliny, UV zářením. Dlouhodobé působení těchto vlivů může vést k degradaci izolačního materiálu – změně jeho struktury, křehnutí, ztrátě pružnosti, nebo i vzniku trhlin. [14]

Reakce na oheň

Reakce na oheň udává, jak se materiál chová při vystavení plamenům nebo vysoké teplotě – zda hoří, jak rychle se vznítí, kolik tepla a kouře uvolňuje a zda vytváří kapky taveniny, které by mohly zapálit další předměty. [22]

Mechanická pevnost a pružnost

Mechanická pevnost a pružnost tepelné izolace jsou důležité zejména tam, kde je izolace namáhána tlakem, vibracemi, pohybem potrubí nebo jiným mechanickým zatížením. Izolace musí být schopna udržet svůj tvar, funkčnost a přilnavost po celou dobu životnosti systému bez deformace, praskání nebo sesedání. [14]

Montážní vlastnosti

Montážní a praktické vlastnosti tepelné izolace jsou klíčové pro efektivitu, rychlost a kvalitu instalace a pro snadnou údržbu izolovaného systému v průběhu jeho životnosti. Kromě samotné izolační schopnosti je třeba zohlednit faktory jako snadnost manipulace, flexibilita při aplikaci, trvanlivost a údržba. [14]

Odolnost proti změnám teploty

Tato vlastnost popisuje, jak dobře materiál zvládá teplotní změny bez toho, aby došlo k jeho mechanickému poškození nebo degradaci. Zohledňuje se schopnost materiálu odolat tepelnému šoku, což je náhlá změna teploty, kterou materiál prochází bez ztráty své funkce. [14]

Cena izolace

Cena izolace se udává za 1 m² nebo 1 m³ objemu. [14]

Tloušťka izolace

Při výběru tepelné izolace je důležité věnovat pozornost nejen volbě izolačního materiálu, ale také tloušťce, která sice snižuje tepelné ztráty, ale zároveň zvyšuje náklady na pořízení větší tloušťky izolace.

3.3.2 Vybrané izolační materiály

Izolační materiály se liší svými fyzikálními vlastnostmi, odolností vůči teplotám, vlhkosti a mechanickému namáhání. Následující přehled představuje nejčastěji používané typy izolací v technických instalacích, jejich hlavní výhody a specifické oblasti použití:

Minerální vlna

Minerální vlna je nejběžněji používaný izolační materiál v rozvodech tepla. Má velmi dobré tepelněizolační vlastnosti, je nehořlavá a odolná vůči vysokým teplotám (až do 800 °C). Využívá se pro izolaci potrubí, nádrží a kotlen. Dobře pohlcuje hluk a je dostupná v různých tvarech (rohože, desky, pláště). [20]

Elastomerická pěna

Jedná se o flexibilní pěnový materiál na bázi syntetického kaučuku. Je určený hlavně pro nízkoteplotní aplikace (např. chladicí potrubí), ale používá se i v teplovodních rozvodech do cca 105 °C. Má nízkou tepelnou vodivost, omezuje kondenzaci a jeho montáž je velmi snadná. [20]

Polyuretanová a polyisokyanurátová pěna (PUR/PIR)

Tyto tuhé pěny se používají hlavně v předizolovaných potrubích pro nízkopotenciálové rozvody tepla a jako izolace armatur a ventilů. Mají velmi nízkou tepelnou vodivost, jsou mechanicky pevné a odolné vůči vlhkosti. Provozní teplota PUR je od -200 do 140 °C. PIR nabízí teplotní odolnost 0 až 160 °C. [20]

Pěnové sklo

Pěnové sklo je materiál na bázi recyklovaného skla s uzavřenou buněčnou strukturou. Je zcela nenasákavé, nehořlavé a velmi odolné proti chemikáliím. Používá se hlavně v průmyslu a na rozvody s vysokými nároky na životnost a bezpečnost. Rozsah provozní teploty -260 až 480 °C. [14]

Křemičitá vlákna

Vhodná pro vysoké teploty (až 1000 °C). Používají se na izolaci parních rozvodů, kotlů a výměníků. Materiál je nehořlavý a odolává tepelnému šoku, ale bývá dražší než běžné izolace.

Aerogel

Aerogel je jeden z nejúčinnějších tepelněizolačních materiálů na světě. Má velmi nízkou tepelnou vodivost a používá se tam, kde je málo prostoru pro silnější izolaci. Je velmi lehký, ale zároveň křehký a nákladný. Použití do cca 650 °C.

Kalciumsilikát

Tvrký a odolný materiál, používaný hlavně pro průmyslovou izolaci vysokoteplotních rozvodů a zařízení pro teploty až do 1100 °C. Vyniká nehořlavostí, tvarovou stálostí a dlouhou životností. Dobře se opracovává do tvaru tvarovek a desek.

Perlit

Expandovaný perlit se používá jako sypaná nebo lisovaná izolace. Vhodný pro rozvody s vyššími teplotami (do 900 °C), ale je omezeně nasákavý. Využívá se například u zásobníků horké vody nebo kotlů.

Vakuově izolované panely (VIP)

Velmi tenké panely s extrémně nízkou tepelnou vodivostí díky vakuu uvnitř. Používají se tam, kde je potřeba co nejefektivnější izolace v minimální tloušťce. Jsou ale drahé a citlivé na mechanické poškození. Provozní teplota pouze od -40 do 80 °C.

Expandovaný polystyren (EPS) a extrudovaný polystyren (XPS)

Používají se spíše u nízkoteplotních rozvodů nebo jako doplňková izolace, například pro zemní části rozvodů. XPS je odolnější vůči vlhkosti a tlaku než EPS, ale má omezenou teplotní odolnost (do cca 75–80 °C).

Izolační cement

Izolační cement je speciální druh cementové směsi, která se používá k tepelněizolačním účelům, zejména v průmyslovém prostředí (např. kotelny, parovody, výměníky, pecní systémy). Na rozdíl od běžného stavebního cementu má nízkou tepelnou vodivost, odolnost vůči vysokým teplotám (až 1000 °C) a často také schopnost odolávat vibracím, mechanickému namáhání nebo chemickému prostředí. [14]

II PRAKTICKÁ ČÁST

4 ZPŮSOB VÝPOČTU TEPELNÝCH ZTRÁT

V této části práce jsou uvedeny příklady a jejich postupy řešení výpočtů tepelných ztrát vybraných prvků distribuční sítě – neizolovaného a izolovaného potrubí, a to jak pro nadzemní, tak i podzemní vedení. Nakonec je ještě uveden i zjednodušený výpočet pro ventil.

4.1 Výpočet tepelných ztrát neizolovaného potrubí

Stanovení tepelných ztrát u neizolovaného potrubí bývá často klíčovým krokem k určení nutnosti jeho izolace. Zadávanými daty pro výpočet tepelných ztrát neizolovaného potrubí jsou:

- Rozměry a emisivita povrchu potrubí.
- Teplota média uvnitř potrubí.
- Pro nadzemní vedení potrubí – teplota a rychlost okolního vzduchu.
- Pro podzemní vedení potrubí – hloubka h , teplota v hloubce h a tepelná vodivost zeminy

Pro zjednodušení jsou příklady řešené za předpokladu, že vlastnosti okolního vzduchu, materiálu a země jsou konstantní a teplota vnitřního povrchu potrubí je rovna teplotě média.

Př. č. 1

Je třeba spočítat tepelnou ztrátu z povrchu potrubí o délce 100 m. Potrubí má vnější průměr 300 mm a je umístěno do prostoru, kde dochází k proudění vzduchu rychlostí 10 m/s. Je počítáno s průměrnou teplotou okolního vzduchu 20 °C. Teplota média v potrubí je 130 °C. Emisivita povrchu potrubí je 0,5.

Řešení:

Vypočítal jsem střední teplotu vzduchu z rovnice (26):

$$t_{st} = \frac{t_w + t_a}{2} = > \frac{130 + 20}{2} = 75 \text{ °C}$$

Vlastnosti vzduchu při $t_{st} = 75 \text{ °C}$:

$$\nu_a = 21,1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$$

$$\lambda_a = 0,029 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$$

$$Pr = 0,73$$

Vzhledem k tomu, že dochází k proudění okolního vzduchu pro výpočet nucené konvekce kolem potrubí nejprve jsem vypočítal Re z rovnice (19), protože se jedná o kruhový průřez potrubí za l se dále jsem dosadil vnější průměr potrubí:

$$Re = \frac{v \cdot l}{\nu_a} \Rightarrow \frac{10 \cdot 0,3}{21,1 \cdot 10^{-6}} = 142180$$

Z výsledku Re vyplývá, že se jedná o turbulentní proudění. Hodnotu Nu jsem vypočítal z rovnice (34) pro obtékání horizontálního válce:

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

Po dosazení číselných hodnot:

$$Nu = 0,3 + \frac{0,62 \cdot \sqrt{142180} \cdot 0,73^{\frac{1}{3}}}{\left(1 + \left(\frac{0,4}{0,73}\right)^{\frac{2}{3}}\right)^{\frac{1}{4}}} \cdot \left(1 + \left(\frac{142180}{282000}\right)^{\frac{5}{8}}\right)^{\frac{4}{5}} = 276,992$$

Dle vztahu (18) jsem určil součinitel přestupu konvekci α_k .

$$\alpha_k = \frac{Nu \cdot \lambda_a}{l} \Rightarrow \frac{276,992 \cdot 0,029}{0,3} = 26,77 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

Pro výpočet součinitele přestupu tepla sáláním α_s ze vztahu (17) jsem nejprve ještě spočítal teplo přestoupené sáláním $\dot{Q}_s$ ze vztahu (50):

$$\dot{Q}_s = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_w^4 - T_a^4)$$

$$\dot{Q}_s = 0,5 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \pi \cdot 0,3 \cdot 100 \cdot (403,15^4 - 293,15^4) = 50848,83 \text{ W}$$

z toho pak α_s :

$$\alpha_s = \frac{\dot{Q}_s}{A \cdot (t_w - t_a)} \Rightarrow \frac{50848,83}{\pi \cdot 0,3 \cdot 100 \cdot (130 - 20)} = 4,9 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí a sáláním z povrchu potrubí do okolí jsem vypočítal součtem α_k a α_s :

$$\alpha_o = \alpha_k + \alpha_s \Rightarrow 26,77 + 4,9 = 31,67 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

Celkovou tepelnou ztrátu jsem nakonec spočítal ze vztahu (17):

$$\dot{Q} = \alpha_o \cdot A \cdot (t_w - t_a) \Rightarrow 31,67 \cdot \pi \cdot 0,3 \cdot 100 \cdot (130 - 20) = 328331 \text{ W}$$

Výsledek:

Celková tepelná ztráta v případě umístění potrubí délky 100 m do prostoru, kde dochází k proudění okolního vzduchu o rychlosti 10 m/s, je rovna 328331 W.

Př. č. 2

Potrubí má vnější průměr 300 mm a je uloženo v prostoru o průměrné teplotě okolního vzduchu 20 °C. Teplota média v potrubí je 130 °C. Emisivita povrchu potrubí je stanovena 0,5. Jaká je tepelná ztráta potrubí dlouhého 100 m, jestliže se jedná o volnou konvekci?

Řešení:

$$t_{st} = \frac{t_w + t_a}{2} \Rightarrow \frac{130 + 20}{2} = 75 \text{ °C}$$

Vlastnosti vzduchu při teplotě $t_{st} = 75 \text{ °C}$:

$$\nu_a = 21,1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$$

$$\lambda_a = 0,029 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$$

$$Pr = 0,73$$

Jelikož se jedná o volnou konvekci nejprve jsem zjistil Gr z rovnice (23):

$$Gr = \frac{g \cdot l^3 \cdot \beta \cdot \Delta t}{\nu_a^2} \Rightarrow \frac{9,81 \cdot 0,3^3 \cdot \frac{1}{75 + 273,15} \cdot (130 - 20)}{(21,1 \cdot 10^{-6})^2} = 1,88 \cdot 10^8$$

následně součin $Gr \cdot Pr$:

$$Gr \cdot Pr \Rightarrow 1,88 \cdot 10^8 \cdot 0,73 = 1,37 \cdot 10^8$$

výsledek se nachází v rozsahu platnosti $10^{-5} \leq Gr \cdot Pr \leq 10^{12}$, proto pro výpočet Nu lze použít vztah (29):

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

Po dosazení hodnot:

$$Nu = \left(0,6 + \frac{0,387 \cdot (1,37 \cdot 10^8)^{\frac{1}{6}}}{\left(1 + 0,721 \cdot \left(\frac{1}{0,73} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{8}{27}}} \right)^2 = 62,6$$

Z čehož jsem dle vztahu (18) určil α_k :

$$\alpha_k = \frac{Nu \cdot \lambda_a}{l} \Rightarrow \frac{62,6 \cdot 0,029}{0,3} = 6,05 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

$$\dot{Q}_s = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_w^4 - T_a^4)$$

$$\dot{Q}_s = 0,5 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \pi \cdot 0,3 \cdot 100 \cdot (403,15^4 - 293,15^4) = 50848,83 \text{ W}$$

$$\alpha_s = \frac{\dot{Q}_s}{A \cdot (t_w - t_a)} \Rightarrow \frac{50848,83}{\pi \cdot 0,3 \cdot 100 \cdot (130 - 20)} = 4,9 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

$$\alpha_o = \alpha_k + \alpha_s \Rightarrow 6,05 + 4,9 = 10,95 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

$$\dot{Q} = \alpha_o \cdot A \cdot (t_w - t_a) \Rightarrow 10,95 \cdot \pi \cdot 0,3 \cdot 100 \cdot (130 - 20) = 113521 \text{ W}$$

Výsledek:

Celková tepelná ztráta v případě umístění potrubí délky 100 m do prostoru, kde dochází pouze k přirozené konvekci, je rovna 113521 W.

Př. č. 3

Potrubí o vnějším průměru 300 mm je uloženo v hloubce 0,9 m pod povrchem. Průměrná teplota zeminy v této hloubce je 15°C. Teplota vodní páry uvnitř potrubí je 130 °C. Emisivita povrchu potrubí je 0,5. Zemina, kterou je potrubí zasypáno má měrnou tepelnou vodivost 1,7 Wm⁻¹K⁻¹. Jaká je tepelná ztráta z povrchu potrubí o délce 100 m?

Řešení:

Nejprve jsem dle vztahu (56) určil součinitel přestupu tepla α_z , kde jsem za d_{ref} dosadil d_2 neboli vnější průměr potrubí:

$$\alpha_z = \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda_z}{d_{ref} \cdot \ln \frac{4 \cdot h + 0,5 \cdot d}{d}} \Rightarrow \frac{2 \cdot \pi \cdot 1,7}{0,3 \cdot \ln \frac{4 \cdot 0,9 + 0,5 \cdot 0,3}{0,3}} = 14,1 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

$$\dot{Q}_s = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_w^4 - T_a^4)$$

$$\dot{Q}_s = 0,5 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \pi \cdot 0,3 \cdot 100 \cdot (403,15^4 - 288,15^4) = 52161 \text{ W}$$

$$\alpha_s = \frac{\dot{Q}_s}{A \cdot (t_w - t_a)} \Rightarrow \frac{52161}{\pi \cdot 0,3 \cdot 100 \cdot (130 - 15)} = 4,81 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

$$\alpha_o = \alpha_z + \alpha_s \Rightarrow 14,1 + 4,81 = 18,91 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

$$\dot{Q} = \alpha_o \cdot A \cdot (t_w - t_a) \Rightarrow 18,91 \cdot \pi \cdot 0,3 \cdot 100 \cdot (130 - 15) = 204984 \text{ W}$$

Výsledek:

Celková tepelná ztráta v případě umístění potrubí délky 100 m pod povrch je rovna 204984 W.

4.2 Výpočet tepelných ztrát izolovaného potrubí

Zadávanými daty pro výpočet tepelných ztrát izolovaného potrubí jsou:

- Rozměry, tepelná vodivost a emisivita potrubí.
- Tloušťka a tepelná vodivost izolačního materiálu
- Teplota média uvnitř potrubí.
- Pro nadzemní vedení potrubí – teplota a rychlost okolního vzduchu.

- Pro podzemní vedení potrubí – hloubka h , teplota v hloubce h a tepelná vodivost zeminy

Pro zjednodušení jsou opět příklady řešené za předpokladu, že vlastnosti okolního vzduchu, materiálu a země jsou konstantní a teplota vnitřního povrchu potrubí je rovna teplotě média.

Př. č. 4

Potrubí z oceli o vnějším průměru 300 mm a tloušťce 6 mm je vedeno nad zemí, kde proudí okolní vzduch rychlostí 10 m/s, přičemž průměrná teplota okolního vzduchu je 20 °C. Teplota vodní páry v potrubí je 130 °C. Potrubí je pokryto vrstvou izolace z kamenné vlny o tepelné vodivosti 0,045 Wm⁻¹K⁻¹ a tloušťce 70 mm. Ocelové potrubí má tepelnou vodivost 50 Wm⁻¹K⁻¹. Emisivita povrchu se uvažuje 0,5. Jaká je tepelná ztráta potrubí pokrytého izolací délky 100 m?

Řešení:

Pro vypočítání střední teploty vzduchu z rovnice (26) jsem nejprve potřeboval teplotu povrchu izolace t_{w3} , protože není zadána musel jsem nejprve teplotu odhadnout $\rightarrow t_{w3} = 75$ °C a po dopočítání provést výpočet znova pro teplotu t_{w3} vypočítanou.

$$t_{st} = \frac{t_{w3} + t_a}{2} \Rightarrow \frac{75 + 20}{2} = 47,5 \text{ °C}$$

Vlastnosti vzduchu při teplotě $t_{st} = 47,5$ °C:

$$\nu_a = 18,35 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$$

$$\lambda_a = 0,027 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$$

$$Pr = 0,73$$

Pro výpočet nucené konvekce kolem potrubí jsem nejprve vypočítal Re z rovnice (19), kde za l jsem dosadil vnější průměr potrubí s izolací d_3 :

$$l = d_3 = d_2 + 2 \cdot s \Rightarrow 0,3 + 2 \cdot 0,07 = 0,44 \text{ m}$$

$$Re = \frac{v \cdot l}{\nu_a} \Rightarrow \frac{10 \cdot 0,44}{18,35 \cdot 10^{-6}} = 239782$$

Nu jsem vypočítal stejně jako v př.č.1 použitím rovnice (34):

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

$$Nu = 0,3 + \frac{0,62 \cdot \sqrt{239782} \cdot 0,73^{\frac{1}{3}}}{\left(1 + \left(\frac{0,4}{0,73}\right)^{\frac{2}{3}}\right)^{\frac{1}{4}}} \cdot \left(1 + \left(\frac{239782}{282000}\right)^{\frac{5}{8}}\right)^{\frac{4}{5}} = 402,78$$

$$\alpha_k = \frac{Nu \cdot \lambda_a}{l} \Rightarrow \frac{402,78 \cdot 0,027}{0,44} = 24,72 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

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

$$\dot{Q}_s = 0,5 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \pi \cdot 0,44 \cdot 100 \cdot (348,15^4 - 293,15^4) = 28632 \text{ W}$$

$$\alpha_s = \frac{\dot{Q}_s}{A \cdot (t_{w3} - t_a)} \Rightarrow \frac{28632}{\pi \cdot 0,44 \cdot 100 \cdot (75 - 20)} = 3,77 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

$$\alpha_o = \alpha_k + \alpha_s \Rightarrow 24,72 + 3,77 = 28,49 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

Pro výpočet celkové tepelné ztráty ještě potřebuji délkového součinitele prostupu tepla z rovnice (52), kde jsem pro zjednodušení zanedbal součinitel přestupu tepla z média na vnitřní stranu potrubí, jelikož se v případě vodní páry jedná o vysokou hodnotu, která má v jmenovateli minimální dopad na konečný výsledek.

$$k_L = \frac{\pi}{\frac{\ln \frac{d_2}{d_1}}{2 \cdot \lambda_w} + \frac{\ln \frac{d_3}{d_2}}{2 \cdot \lambda_{iz}} + \frac{1}{\alpha_o \cdot d_3}}$$

$$k_L = \frac{\pi}{\frac{\ln \frac{0,3}{0,288}}{2 \cdot 50} + \frac{\ln \frac{0,44}{0,3}}{2 \cdot 0,045} + \frac{1}{28,49 \cdot 0,44}} = 0,725 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$$

$$\dot{Q} = k_L \cdot L \cdot (t_{w1} - t_a) \Rightarrow 0,725 \cdot 100 \cdot (130 - 20) = 7970,55 \text{ W}$$

Teplotu na povrchu potrubí t_{w2} a izolace t_{w3} jsem vypočítal z upravené rovnice (14):

$$t_{w2} = t_{w1} - \frac{\dot{Q} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1}}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_w \cdot L} \Rightarrow 130 - \frac{7970,55 \cdot \ln \frac{0,3}{0,288}}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 100} = 129,9 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_{w3} = t_{w2} - \frac{\dot{Q} \cdot \ln \frac{d_3}{d_2}}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{iz} \cdot L} \Rightarrow 129,9 - \frac{7970,55 \cdot \ln \frac{0,44}{0,3}}{2 \cdot \pi \cdot 0,045 \cdot 100} = 21,9 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Jelikož vnější teplota povrchu izolace t_{w3} není stejná a ani se nepřibližuje k teplotě odhadované v prvním kroku řešení je potřeba provést celý výpočet znova, ale tentokrát použít teplotu t_{w3} vypočítanou. Tento proces je potřeba opakovat alespoň dokud bude platit zvolená přesnost:

$$|t_{w3} \text{ vypočítaná} - t_{w3} \text{ odhadovaná}| > 0,1^\circ\text{C}$$

Výsledky opakování výpočtu př.4 jsou ukázány v tabulce 2:

Číslo výpočtu	t_{w3} odhadovaná [$^\circ\text{C}$]	t_{w3} vypočítaná [$^\circ\text{C}$]	α_o [$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$]	k_L [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]
1	75	21,9	28,49	0,725
2	21,9	21,9	28,72	0,724

Tabulka 2 – Výsledky opakování výpočtu př.4

Pro výpočet celkové tepelné ztráty izolovaného potrubí jsem použil vztah (54):

$$\dot{Q} = k_L \cdot L \cdot (t_{w1} - t_a) \Rightarrow 0,724 \cdot 100 \cdot (130 - 20) = 7964 \text{ W}$$

Výsledek:

Celková tepelná ztráta v případě umístění izolovaného potrubí délky 100 m do prostoru, kde dochází k proudění okolního vzduchu je rovna 7964 W.

Př. č. 5

Ocelové potrubí o vnějším průměru 300 mm a tloušťce 6 mm je vedeno v prostoru, kde je průměrná teplota okolního vzduchu 20 °C. Vodní pára v potrubí má teplotu 130 °C. Potrubí je pokryto izolací z kamenné vlny o tepelné vodivosti 0,045 Wm⁻¹K⁻¹ a tloušťce 70 mm. Ocel má tepelnou vodivost 50 Wm⁻¹K⁻¹ Emisivita povrchu je 0,5. Jaká je tepelná ztráta potrubí s izolací délky 100 m, dochází-li pouze k volné konvekci?

Řešení:

Pro vypočítání střední teploty vzduchu rovnici (26) jsem nejprve odhadnul teplotu povrchu izolace $t_{w3} = 75$ °C a po dopočítání jsem provedl výpočet znova pro teplotu t_{w3} vypočítanou.

$$t_{st} = \frac{t_{w3} + t_a}{2} \Rightarrow \frac{75 + 20}{2} = 47,5 \text{ °C}$$

Vlastnosti vzduchu při $t_{st} = 47,5$ °C:

$$\nu_a = 18,35 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$$

$$\lambda_a = 0,027 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

$$Pr = 0,73$$

Pro výpočet Gr jsem použil rovnici (23), kde jsem za l dosadil vnější průměr potrubí s izolací d_3 :

$$l = d_3 = d_2 + 2 \cdot s \Rightarrow 0,3 + 2 \cdot 0,07 = 0,44 \text{ m}$$

$$Gr = \frac{g \cdot l^3 \cdot \beta \cdot \Delta t}{\nu_a^2} \Rightarrow \frac{9,81 \cdot 0,44^3 \cdot \frac{1}{47,5 + 273,15} \cdot (75 - 20)}{(21,1 \cdot 10^{-6})^2} = 4,25 \cdot 10^8$$

$$Gr \cdot Pr \Rightarrow 4,25 \cdot 10^8 \cdot 0,73 = 3,11 \cdot 10^8$$

výsledek se nachází v rozsahu $10^{-5} \leq Gr \cdot Pr \leq 10^{12}$, proto jsem pro výpočet Nu použil vztah (29):

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

$$Nu = \left(0,6 + \frac{0,387 \cdot (3,11 \cdot 10^8)^{\frac{1}{6}}}{\left(1 + 0,721 \cdot \left(\frac{1}{0,73} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{8}{27}}} \right)^2 = 80,63$$

$$\alpha_k = \frac{Nu \cdot \lambda_a}{l} \Rightarrow \frac{80,63 \cdot 0,027}{0,44} = 4,95 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

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

$$\dot{Q}_s = 0,5 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \pi \cdot 0,44 \cdot 100 \cdot (348,15^4 - 293,15^4) = 28632 \text{ W}$$

$$\alpha_s = \frac{\dot{Q}_s}{A \cdot (t_{w3} - t_a)} \Rightarrow \frac{28632}{\pi \cdot 0,44 \cdot 100 \cdot (75 - 20)} = 3,77 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

$$\alpha_o = \alpha_k + \alpha_s \Rightarrow 4,95 + 3,77 = 8,72 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

$$k_L = \frac{\pi}{\frac{\ln \frac{d_2}{d_1}}{2 \cdot \lambda_w} + \frac{\ln \frac{d_3}{d_2}}{2 \cdot \lambda_{iz}} + \frac{1}{\alpha_o \cdot d_3}}$$

$$k_L = \frac{\pi}{\frac{\ln \frac{0,3}{0,288}}{2 \cdot 50} + \frac{\ln \frac{0,44}{0,3}}{2 \cdot 0,045} + \frac{1}{8,72 \cdot 0,44}} = 0,696 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$$

$$\dot{Q} = k_L \cdot L \cdot (t_{w1} - t_a) \Rightarrow 0,696 \cdot 100 \cdot (130 - 20) = 7651 \text{ W}$$

$$t_{w2} = t_{w1} - \frac{\dot{Q} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1}}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_w \cdot L} \Rightarrow 130 - \frac{7651 \cdot \ln \frac{0,3}{0,288}}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 100} = 129,9 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_{w3} = t_{w2} - \frac{\dot{Q} \cdot \ln \frac{d_3}{d_2}}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{iz} \cdot L} \Rightarrow 129,9 - \frac{7651 \cdot \ln \frac{0,44}{0,3}}{2 \cdot \pi \cdot 0,045 \cdot 100} = 26,26 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Jelikož vnější povrchová teplota t_{w3} není shodná a ani se nepřibližuje k teplotě odhadované na začátku příkladu je potřeba provést celý výpočet znova, ale tentokrát použít teplotu t_{w3} vypočítanou. Tento proces je potřeba opakovat alespoň dokud nebudou teploty ve zvolené odchylce:

$$|t_{w3} \text{ vypočítaná} - t_{w3} \text{ odhadovaná}| > 0,1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Výsledky opakování výpočtu př.5 jsou ukázány v tabulce 3:

Číslo výpočtu	t_{w3} odhadovaná [°C]	t_{w3} vypočítaná [°C]	α_o [Wm ⁻² K ⁻¹]	k_L [Wm ⁻¹ K ⁻¹]
1	75	26,26	8,72	0,696
2	26,26	29,54	5,62	0,674
3	29,54	28,97	6,01	0,678
4	28,97	29,06	5,95	0,677

Tabulka 3 – Výsledky opakování výpočtu př.5

Pro výpočet celkové tepelné ztráty izolovaného potrubí jsem použil vztah (54):

$$\dot{Q} = k_L \cdot L \cdot (t_{w1} - t_a) \Rightarrow 0,677 \cdot 100 \cdot (130 - 20) = 7447 \text{ W}$$

Výsledek:

Celková tepelná ztráta v případě umístění izolovaného potrubí délky 100 m do prostoru, kde dochází k přirozené konvekci je rovna 7447 W.

Př. č. 6

Potrubí z oceli o vnějším průměru 300 mm a tloušťce 6 mm je uloženo v hloubce 0,9 m pod povrchem. Průměrná teplota zeminy obklopující potrubí je 15°C. Teplota média v potrubí je 130 °C. Potrubí je pokryto izolací o tepelné vodivosti 0,045 Wm⁻¹K⁻¹ a tloušťce 70 mm. Ocelové potrubí má tepelnou vodivost 50 Wm⁻¹K⁻¹. Emisivita povrchu je 0,5. U zeminy je uvažována měrná tepelná vodivost 1,7 Wm⁻¹K⁻¹. Jaká je tepelná ztráta potrubí délky 100 m?

Řešení:

Nejprve jsem dle vztahu (56) zjistil součinitele přestupu tepla α_z , kde d_{ref} je d_3 neboli vnější průměr potrubí s izolací:

$$d_3 = d_2 + 2 \cdot s \Rightarrow 0,3 + 2 \cdot 0,07 = 0,44 \text{ m}$$

$$\alpha_z = \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda_z}{d_{ref} \cdot \ln \frac{4 \cdot h + s + 0,5 \cdot d_2}{d_2}}$$

$$\alpha_z = \frac{2 \cdot \pi \cdot 1,7}{0,44 \cdot \ln \frac{4 \cdot 0,9 + 0,07 + 0,5 \cdot 0,3}{0,3}} = 9,54 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

Vzhledem k tomu, že jsem potřeboval teplotu povrchu izolace t_{w3} , která není zadaná musel jsem ji nejprve odhadnout $\rightarrow t_{w3} = 75$ °C a po spočítání příkladu opakovat výpočet pro teplotu vypočítanou.

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

$$\dot{Q}_s = 0,5 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \pi \cdot 0,44 \cdot 100 \cdot (348,15^4 - 288,15^4) = 30557 \text{ W}$$

$$\alpha_s = \frac{\dot{Q}_s}{A \cdot (t_{w3} - t_a)} \Rightarrow \frac{30557}{\pi \cdot 0,44 \cdot 100 \cdot (75 - 15)} = 3,68 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

$$\alpha_o = \alpha_z + \alpha_s \Rightarrow 9,54 + 3,68 = 13,22 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

$$k_L = \frac{\pi}{\frac{\ln \frac{d_2}{d_1}}{2 \cdot \lambda_w} + \frac{\ln \frac{d_3}{d_2}}{2 \cdot \lambda_{iz}} + \frac{1}{\alpha_o \cdot d_3}}$$

$$k_L = \frac{\pi}{\frac{\ln \frac{0,3}{0,288}}{2 \cdot 50} + \frac{\ln \frac{0,44}{0,3}}{2 \cdot 0,045} + \frac{1}{13,22 \cdot 0,44}} = 0,71 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

$$\dot{Q} = k_L \cdot L \cdot (t_{w1} - t_a) \Rightarrow 0,71 \cdot 100 \cdot (130 - 15) = 8159,4 \text{ W}$$

$$t_{w2} = t_{w1} - \frac{\dot{Q} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1}}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_w \cdot L} \Rightarrow 130 - \frac{8159,4 \cdot \ln \frac{0,3}{0,288}}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 100} = 129,9 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_{w3} = t_{w2} - \frac{\dot{Q} \cdot \ln \frac{d_3}{d_2}}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{iz} \cdot L} \Rightarrow 129,9 - \frac{8159,4 \cdot \ln \frac{0,44}{0,3}}{2 \cdot \pi \cdot 0,045 \cdot 100} = 19,38 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Jelikož povrchová teplota izolace t_{w3} není shodná a ani se nepřibližuje k teplotě odhadované musím opakovat výpočet pro teplotu t_3 vypočítanou, dokud nebudou tyto teploty alespoň v odchylce:

$$|t_{w3} \text{ vypočítaná} - t_{w3} \text{ odhadovaná}| > 0,1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Výsledky opakování výpočtu př.6 jsou ukázány v tabulce 4:

Číslo výpočtu	t_{w3} odhadovaná [$^\circ\text{C}$]	t_{w3} vypočítaná [$^\circ\text{C}$]	α_o [$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$]	k_L [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]
1	75	19,38	13,22	0,71
2	19,38	19,69	12,31	0,707
3	19,69	19,69	12,32	0,7075

Tabulka 4 – Výsledky opakování výpočtu př.6

Pro výpočet celkové tepelné ztráty izolovaného potrubí jsem použil vztah (54):

$$\dot{Q} = k_L \cdot L \cdot (t_{w1} - t_a) \Rightarrow 0,7075 \cdot 100 \cdot (130 - 15) = 8136 \text{ W}$$

Výsledek:

Celková tepelná ztráta v případě umístění izolovaného potrubí délky 100 m pod povrch země do hloubky 0,9 m je rovna 8136 W.

4.3 Výpočet tepelných ztrát ventilu

Zadávanými daty pro výpočet tepelných ztrát ventilu jsou:

- Rozměry, emisivita ventilu.
- Průměrné teploty na povrchu ventilu.
- Teplota a rychlost okolního vzduchu.

Pro zjednodušení jsou opět příklady řešené za předpokladu, že vlastnosti okolního vzduchu a materiálu jsou konstantní a na povrchu ventilu jsou uvažovány průměrné teploty.

Př. č. 7

Jaká je tepelná ztráta z povrchu ocelového ventilu, jestliže má izolovaná vodorovná část teplosměnnou plochu 1 m^2 , průměr 440 mm a průměrnou teplotu na povrchu $30 \text{ }^\circ\text{C}$. Vertikální část tvaru válce o průměru 200 mm, výšce 300 mm a teplosměnné ploše $0,2 \text{ m}^2$ má průměrnou teplotu neizolovaného povrchu $75 \text{ }^\circ\text{C}$. Na horní straně vertikální části o teplosměnné ploše 3 dm^2 je průměrná teplota $60 \text{ }^\circ\text{C}$. Emisivita povrchu je 0,5. Ventil je umístěn do prostoru o teplotě okolního vzduchu $20 \text{ }^\circ\text{C}$. K přenosu tepla dochází volnou konvekcí a u vodorovné části navíc i sáláním.

Řešení:

Nejprve jsem vypočítal tepelnou ztrátu pro vodorovnou část ventilu, dále označovanou jako část A. Ze zadání příkladu:

$$A_A = 1 \text{ m}^2$$

$$l_A = 440 \text{ mm} = 0,44 \text{ m}$$

$$t_{wA} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$$

Pro výpočet střední teploty vzduchu jsem použil rovnici (26):

$$t_{stA} = \frac{t_{wA} + t_a}{2} = \frac{30 + 20}{2} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$$

Vlastnosti vzduchu při $t_{sA} = 25\text{ °C}$:

$$\nu_{aA} = 16,15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$$

$$\lambda_{aA} = 0,0255 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

$$Pr_A = 0,73$$

Jelikož dochází k volné konvekci zjistil jsem Gr_A ze vztahu (23):

$$Gr_A = \frac{g \cdot l_A^3 \cdot \beta \cdot \Delta t}{\nu_{aA}^2} \Rightarrow \frac{9,81 \cdot 0,44^3 \cdot \frac{1}{25 + 273,15} \cdot (30 - 20)}{(16,15 \cdot 10^{-6})^2} = 1,07 \cdot 10^8$$

$$Gr_A \cdot Pr_A \Rightarrow 1,07 \cdot 10^8 \cdot 0,73 = 7,845 \cdot 10^7$$

výsledek se nachází v rozsahu $10^{-5} \leq Gr_A \cdot Pr_A \leq 10^{12}$, proto pro výpočet Nu_A mohu použít vztah (29):

$$Nu_A = \left(0,6 + \frac{0,387 \cdot (Gr_A \cdot Pr_A)^{\frac{1}{6}}}{\left(1 + 0,721 \cdot \left(\frac{1}{Pr_A} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{8}{27}}} \right)^2$$

$$Nu_A = \left(0,6 + \frac{0,387 \cdot (7,845 \cdot 10^7)^{\frac{1}{6}}}{\left(1 + 0,721 \cdot \left(\frac{1}{0,73} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{8}{27}}} \right)^2 = 52,73$$

$$\alpha_{kA} = \frac{Nu_A \cdot \lambda_{aA}}{l_A} \Rightarrow \frac{52,73 \cdot 0,0255}{0,44} = 3,06 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

$$\dot{Q}_{sA} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_A \cdot (T_{wA}^4 - T_a^4)$$

$$\dot{Q}_{sA} = 0,5 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 1 \cdot (303,15^4 - 293,15^4) = 30,064 \text{ W}$$

$$\alpha_{sA} = \frac{\dot{Q}_{sA}}{A_A \cdot (t_{wA} - t_a)} \Rightarrow \frac{30,064}{1 \cdot (30 - 20)} = 3,006 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

$$\alpha_{oA} = \alpha_{kA} + \alpha_{sA} \Rightarrow 3,06 + 3,006 = 6,066 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

$$\dot{Q}_A = \alpha_{oA} \cdot A_A \cdot (t_{wA} - t_a) \Rightarrow 6,066 \cdot 1 \cdot (30 - 20) = 60,66 \text{ W}$$

Dále jsem vypočítal tepelnou ztrátu pro plášť vertikální části ventilu, dále označovanou jako část B. Ze zadání příkladu:

$$A_B = 0,2 \text{ m}^2$$

$$l_B = 300 \text{ mm} = 0,3 \text{ m}$$

$$t_{wB} = 75 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$t_{stB} = \frac{t_{wB} + t_a}{2} \Rightarrow \frac{75 + 20}{2} = 47,5 \text{ }^\circ\text{C}$$

Vlastnosti vzduchu při $t_{stB} = 47,5 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$\nu_{aB} = 18,35 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$$

$$\lambda_{aB} = 0,027 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

$$Pr_B = 0,73$$

$$Gr_B = \frac{g \cdot l_B^3 \cdot \beta \cdot \Delta t}{\nu_{aB}^2} \Rightarrow \frac{9,81 \cdot 0,3^3 \cdot \frac{1}{47,5 + 273,15} \cdot (75 - 20)}{(18,35 \cdot 10^{-6})^2} = 1,35 \cdot 10^8$$

$$Gr_B \cdot Pr_B \Rightarrow 1,35 \cdot 10^8 \cdot 0,73 = 9,85 \cdot 10^7$$

výsledek se nachází v rozsahu $10^{-5} \leq Gr_B \cdot Pr_B \leq 10^{12}$, proto jsem pro výpočet Nu_B použil vztah pro svislý válec (27):

$$Nu_B = \left(0,825 + \frac{0,387 \cdot (Gr_B \cdot Pr_B)^{\frac{1}{6}}}{\left(1 + 0,671 \cdot \left(\frac{1}{Pr_B} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{8}{27}}} \right)^2$$

$$Nu_B = \left(0,825 + \frac{0,387 \cdot (9,85 \cdot 10^7)^{\frac{1}{6}}}{\left(1 + 0,671 \cdot \left(\frac{1}{0,73} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{8}{27}}} \right)^2 = 61,02$$

$$\alpha_{kB} = \frac{Nu_B \cdot \lambda_{aB}}{l_B} \Rightarrow \frac{61,02 \cdot 0,027}{0,3} = 5,49 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

$$\dot{Q}_B = \alpha_{kB} \cdot A_B \cdot (t_{wB} - t_a) \Rightarrow 5,49 \cdot 0,2 \cdot (75 - 20) = 60,405 \text{ W}$$

Nakonec jsem vypočítal tepelnou ztrátu pro horní část ventilu, dále označovanou jako část C. Ze zadání příkladu:

$$A_C = 3 \text{ dm}^2 = 0,03 \text{ m}^2$$

$$l_C = 200 \text{ mm} = 0,2 \text{ m}$$

$$t_{wC} = 60 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$t_{stC} = \frac{t_{wC} + t_a}{2} \Rightarrow \frac{60 + 20}{2} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$$

Vlastnosti vzduchu při $t_{stC} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$\nu_{aC} = 17,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$$

$$\lambda_{aC} = 0,0265 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

$$Pr_C = 0,73$$

$$Gr_C = \frac{g \cdot l_C^3 \cdot \beta \cdot \Delta t}{\nu_{aC}^2} \Rightarrow \frac{9,81 \cdot 0,2^3 \cdot \frac{1}{40 + 273,15} \cdot (60 - 20)}{(17,6 \cdot 10^{-6})^2} = 3,24 \cdot 10^7$$

$$Gr_C \cdot Pr_C \Rightarrow 3,24 \cdot 10^7 \cdot 0,73 = 2,36 \cdot 10^7$$

výsledek se nachází dle tabulky 1 v rozsahu $2 \cdot 10^7 < Gr_C \cdot Pr_C < 10^{13}$, proto pro výpočet Nu_C mohu použít rovnici (25), kde konstanty $C = 0,135$ a $n = 1/3$:

$$Nu_C = C \cdot (Gr_C \cdot Pr_C)^n \Rightarrow 0,135 \cdot (2,36 \cdot 10^7)^{\frac{1}{3}} = 38,74$$

$$\alpha_{kC} = \frac{Nu_C \cdot \lambda_{aC}}{l_C} \Rightarrow \frac{38,74 \cdot 0,0265}{0,2} = 5,133 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

$$\dot{Q}_C = \alpha_{kC} \cdot A_C \cdot (t_{wB} - t_a) \Rightarrow 5,133 \cdot 0,03 \cdot (60 - 20) = 6,16 \text{ W}$$

Celkovou tepelnou ztrátu jsem vypočítal součtem jednotlivých částí:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_A + \dot{Q}_B + \dot{Q}_C \Rightarrow 60,66 + 60,405 + 6,16 = 126,97 \text{ W}$$

Výsledek:

Celková tepelná ztráta z povrchu ventilu v případě umístění do prostoru, kde dochází k přenosu pouze volnou konvekcí je rovna 126,97 W.

5 APLIKACE PRO VÝPOČET TEPELNÝCH ZTRÁT

5.1 Prostředí Matlab App Designer

Matlab App Designer je výkonný nástroj pro tvorbu interaktivních aplikací, které mohou být použity pro různé účely, jako je analýza dat, vizualizace, simulace nebo ovládání systémů. Tento nástroj jsem si vybral hlavně kvůli intuitivnímu prostředí pro návrh grafických uživatelských rozhraní (GUI), které jsou přizpůsobitelné a umožňují vytvářet aplikace s přehledným a snadno ovladatelným rozhraním. S využitím App Designeru lze snadno integrovat funkce Matlabu s interaktivními vizualizacemi a ovládacími prvky, jako jsou tlačítka, textová pole, grafy nebo jiné komponenty.

Aplikace vytvořené v App Designeru se skládají ze dvou hlavních částí:

- Design aplikace – V této části je definováno uživatelské rozhraní aplikace, kam jsou přidávány různé komponenty a vizuální prvky.
- Kód aplikace – Tato část obsahuje všechny skripty pro definování chování aplikace, tedy jak aplikace reaguje na interakce uživatele.

Každá aplikace má obvykle několik callback funkcí, které jsou přiřazeny ke konkrétním komponentům. Kromě těchto funkcí může být v aplikaci definována i interní logika pro zpracování dat nebo interakci s dalšími programovými objekty.

5.2 Tvorba aplikace

Pro hlavní okno jsem použil z knihovny komponentů grafický prvek okna se záložkami (*Tab Group*). Dále jsem využil prvky – pro pole zadávání číselných hodnot nebo vypisování výsledků *Edit Field (Numeric)*, pro pole s možností vkládat text *Edit Field (Text)*, pro tlačítka provedení výpočtu, otevření dalšího okna a mazání *Button*, pro text a popisy *Label*, pro výběr *Radio Button Group* nebo zaškrťovací box *Check Box*, pro tabulky *Table*, pro seznam *List Box* a pro nápovědu textové pole *Text Area*.

Výpočet tepelné ztráty pro nadzemní uložení potrubí

Výpočet tepelných ztrát potrubí - nadzemní uložení

Teplota média °C
Teplota okolí °C
Vnější průměr trubky mm
Tloušťka trubky mm
Tepelná vodivost trubky W/(mK)
Emisivita trubky
Délka potrubí m
Emisivita vnějšího povrchu izolace

☐ Dochází k proudění okolního vzduchu
Rychlost vzduchu m/s
☐ Výpočet minimální tloušťky izolace
Maximální povrchová teplota °C
☐ Součinitel přestupu tepla na vnitřní straně
Vlastní součinitel přestupu tepla W/(m²K)

Orientace potrubí
☒ Vodorovné potrubí ☐ Svislé potrubí

☐ Doplnkové prvky potrubí

Název prvku
Ekvivalentní délka potrubí m
Počet kusů

☐ 1. Vrstva izolace
Tepelná vodivost izolace 1 W/(mK)
Tloušťka izolace 1 mm
☐ 2. Vrstva izolace
Tepelná vodivost izolace 2 W/(mK)
Tloušťka izolace 2 mm
☐ 3. Vrstva izolace
Tepelná vodivost izolace 3 W/(mK)
Tloušťka izolace 3 mm
☐ 4. Vrstva izolace
Tepelná vodivost izolace 4 W/(mK)
Tloušťka izolace 4 mm

Tepelná vodivost pro vybrané izolace

Název	Tepelná vodivost
Kamenná izolace	0.0450
Skelná izolace	0.0390
Pěnové sklo	0.0500
EPS	0.0370
Vakuová izolace	0.0300
Aerogel	0.0100
Minerální vlna	0.0350
PUR	0.0250
PIR	0.0220
Perlit	0.0500
XPS	0.0320

Výsledky

Celková tepelná ztráta bez izolace W
Teplota vnějšího povrchu °C
Vnější součinitel přestupu tepla W/(m²K)
Součinitel prostupu tepla W/(mK)
Tepelná ztráta na metr potrubí W/m
Celková tepelná ztráta W

Obrázek 8 – Hlavní okno – nadzemní uložení potrubí

V tomto okně si uživatel může vybrat pro který prvek chce tepelnou ztrátu vypočítat. Volí si mezi nadzemním, podzemním uložením potrubí nebo ventilem změnou záložky v horní části okna.

Při výběru nadzemního uložení potrubí (viz. Obrázek 8) zadává uživatel vlevo nahoře základní data o potrubí. Tyto boxy jsou rovnou zpřístupněny a je potřeba je všechny vyplnit. Vstupní pole jsou ošetřena ve vlastnostech prvku, aby nebylo možné zadat nesprávnou hodnotu (např.: teplotu média lze zadat v rozsahu od -50 °C do 1200 °C). Druhou možností ošetření vstupů je programově, například vnější průměr trubky nemůže být nulové/záporné číslo a zároveň nesmí být menší nebo roven dvojnásobku tloušťky trubky. Ukázka této funkce, která upozorní uživatele a zamezí výpočet:

```
%Value changed function: TloukatrubkyEditField, VnjprrmrtrubkyEditField
function VnjprrmrtrubkyEditFieldValueChanged(app, event)
    if (app.VnjprrmrtrubkyEditField.Value <= 2*app.TloukatrubkyEditField.Value)
        app.VypotejButton.Enable=false;
```

```

        app.pozor.Visible=true;
        app.pozor.Enable=true;
        app.VnjprmrubkyEditField.BackgroundColor=[1.00,0.51,0.51];
        app.TloukatrubkyEditField.BackgroundColor=[1.00,0.51,0.51];
    else
        app.VypotejButton.Enable=true;
        app.pozor.Visible=false;
        app.pozor.Enable=false;
        app.VnjprmrubkyEditField.BackgroundColor=[1.00,1.00,1.00];
        app.TloukatrubkyEditField.BackgroundColor=[1.00,1.00,1.00];
    end
end
end

```

Pokud je na potrubí izolace lze si zvolit v levé dolní části okna až 4 vrstvy izolace, tak jak je to zrovna možné tzn. pokud zvolím 1. vrstvu zaškrtnutím boxu, zpřístupní se vstupní pole pro zadání tepelné vodivosti a tloušťky a zároveň se odemkne možnost volby 2. vrstvy izolace atd. Pokud ale zvolím např. 3 vrstvy a změním odškrtnutím volbu 1. izolace, při výpočtu se nebude počítat ani s jednou izolací.

Další volbou nahoře uprostřed je, zda na vnějším povrchu dochází k přirozené nebo nucené konvekci. Zaškrtnutím boxu se zpřístupní zadání rychlosti proudění okolního vzduchu. Funkce je implementována takto:

```

%Value changed function: DochzkproudnokolnhovzduchuCheckBox_2
function DochzkproudnokolnhovzduchuCheckBox_2ValueChanged(app, event)
    app.volnuc = app.DochzkproudnokolnhovzduchuCheckBox_2.Value;
    if app.volnuc
        app.RychlostvzduchuEditField.Enable = true;
    else
        app.RychlostvzduchuEditField.Enable = false;
    end
end
end

```

Zaškrtnutím boxu „Doplňkové prvky potrubí“ se zpřístupní možnost započítání tepelné ztráty prvků, které potrubí obsahuje (např.: ventil). Uživatel zadává název prvku, jeho ekvivalentní délku potrubí a počet prvků a přidá do seznamu tlačítkem „Přidat položku“. Funkce tlačítka je obsloužena takto:

```

%Button pushed function: PidatpolokuButton
function PidatpolokuButtonPushed(app, event)
    typ=app.NzevprvkuEditField.Value;
    ekvdelka = app.EkvivalentndlkapotrubEditField.Value;

```

```

kusy = app.PoetkusEditField.Value;
%Pokud nepojmenováno
if isempty (typ)
    app.NzevprvkuEditField.BackgroundColor=[1.00,0.51,0.51];
else
    novaPolozka=struct('typ', typ, 'ekvdelka', ekvdelka, 'kusy', kusy);
    app.Polozky1(end+1)=novaPolozka;
    polozka = sprintf('%s | Ekvivalentní délka: %g m| Počet kusů: %g', typ, ekvdelka,
kusy);
    app.ListBox.Items{end+1} = polozka;
end
end
end

```

V opačném případě, kdy je potřeba zvolenou položku ze seznamu smazat tlačítkem „Smazat zvolenou položku“ je funkce obsloužena takto:

```

%Button pushed function: SmazatzvolenoupolokuButton
function SmazatzvolenoupolokuButtonPushed(app, event)
    polozky = app.ListBox.Items;
    zvolena = app.ListBox.Value;
    if isempty(zvolena)
        return;
    end
    odstranit = find(strcmp(polozky, zvolena), 1);
    if ~isempty(odstranit)
        polozky(odstranit) = [];
        app.Polozky1(odstranit)=[];
        app.ListBox.Items = polozky;
        %Nastavení nové hodnoty výběru, pokud ještě něco zbylo
        if ~isempty(polozky)
            app.ListBox.Value = polozky{1};
        end
    end
end
end
end

```

Pro výpočet součinitele přestupu tepla na vnitřní straně může uživatel zaškrtnutím boxu buď zadat vlastní hodnotu nebo kliknutím na tlačítko „Výpočet součinitele přestupu tepla“ otevřít další okno pro výpočet (viz. Obrázek 9). Při otevření tohoto okna se zablokuje možnost otevření stejného dalšího okna, dokud se první okno nezavře. Funkce pro otevření okna a blokaci tlačítka:

```

function VpoetsouinitelepestuputeplaButtonPushed(app, event)
    %Otevření okna pro výpočet součinitele přestupu tepla na vnitřní straně
    app.soucprestupuvnejsi = BP_soucinitel_prestupu(app);

```

```
%Blokace tlačítek
```

```
app.tretioknocheck=true;
```

```
app.VpoetsouinitelepestuputeplaButton.Enable=false;
```

```
app.VpoetsouinitelepestuputeplaButton_2.Enable=false;
```

```
end
```

Výpočet součinitele přestupu tepla na vnitřní straně potrubí

Výpočet součinitele přestupu tepla na vnitřní straně potrubí

Výpočet Re:

Chrakteristický rozměr mm

Rychlost proudění média v potrubí m/s

Kinematická viskozita média m²/s

Re

Zadání vlastností média:

Teplota média °C

Teplota vnitřní stěny trubky °C

Vlastnosti média při střední teplotě média:

Hustota kg/m³

Součinitel tepelné vodivosti W/(m K)

Měrná tepelná kapacita J/(kg K)

Výpočetní vztah:

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4}$$

Pr

Nu

Součinitel přestupu tepla na vnitřní straně W/(m²K)

Obrázek 9 – Okno pro výpočet přestupu tepla na vnitřní straně

Pro výpočet součinitele přestupu tepla na vnitřní straně potrubí je nutné nejprve zadat hodnoty pro výpočet Re, který se provede dle vzorce (19) pokaždé, když dojde ke změně vstupních dat. Podle hodnoty Re se v části zadávání vlastností média zobrazují vstupní pole, které jsou potřeba vyplnit. Stiskem tlačítka „Vypočítej“ se provede výpočet Nu dle výpočetního vztahu vlevo dole, následně se vypočítá dle rovnice (18) součinitel přestupu tepla a výsledek se vypíše i do hlavního okna do pole pro zadání součinitele přestupu tepla. Ukázka části kódu pro výpočet v programu:

```

dynviza=kinviza*hustotaa;
dynvizw=kinvizw*hustotaw;
Pr=(cpa*dynviza)/lambdaa;
Prw=(cpw*dynvizw)/lambdaw;
if app.Re<=2300
    tst=(ta+tw)/2;
    Gr=(9.81*(l^3)*(1/(273.15+tst))*(abs(ta-tw)))/(kinviza)^2;
    Nu=0.15*((app.Re^0.32)*(Pr^0.33)*((Gr*Pr)^0.1))*((Pr/Prw)^0.25);
    app.GrEditField.Value=Gr;
elseif ((app.Re>2300) && (app.Re<=10000))
    Nu=0.116*(app.Re^(2/3)-125)*(Pr^(1/3))*(1+((l/L)^(2/3)))*((dynviza/dynvizw)^
0.14);
elseif app.Re > 10000
    Nu=0.023*(app.Re^0.8)*(Pr^0.4);
end
app.PrEditField.Value=Pr;
alfavnitri=(Nu*lambdaa)/l;
app.NuEditField.Value=Nu;
app.SouinitelpestuputeplanavnitnstranEditField.Value=alfavnitri;
app.volanidruheho.VlastnsouinitelpestuputeplaEditField.Value=alfavnitri;
app.volanidruheho.VlastnsouinitelpestuputeplaEditField_2.Value=alfavnitri;

```

Pokud je tekutinou v potrubí voda nebo vzduch je zadávání vlastností jednodušší, jelikož stačí pouze zadat teplotu média a vnitřní stěny trubky a stisknout buď tlačítko „Vložit vlastnosti pro vodu“ nebo „Vložit vlastnosti pro vzduch“. Program pak spočítá a vypíše hodnoty z tabulky. Funkce implementována takto:

```

function vlastnosti(app,a)
tst=(app.TeplotamdiaEditField.Value+app.TeplotavnitnstnytrubkyEditField.Value)/2;
t=table2array(a(:,"t"));
delka=height(a);
for i = 1:delka
    x = a.t(i);
    if x <= tst
        x1=x;
        r=i;
    elseif x > tst
        i=delka;
    end
end
if x1==tst
    app.SouiniteltepelnvodivostiEditField.Value=(a.lmb(r));
    app.KinematickviskozitamdiaEditField.Value=(10^-6)*(a.v(r));
    app.HustotaEditField.Value=(a.ro(r));
    app.MrntepelnkapacitaEditField.Value=1000*(a.cp(r));
elseif x1<tst
    app.SouiniteltepelnvodivostiEditField.Value=(a.lmb(r)+((tst-x1)*((a.lmb(r+1)-
a.lmb(r))/(a.t(r+1)-x1))));

```

```

app.KinematickviskozitamdiaEditField.Value=(10^-6)*(a.v(r)+((tst-x1)*((a.v(r+1)-
a.v(r))/(a.t(r+1)-x1))));
app.HustotaEditField.Value=a.ro(r)+((tst-x1)*((a.ro(r+1)-a.ro(r))/(a.t(r+1)-x1)));
app.MrntepelnkapacitaEditField.Value=1000*(a.cp(r)+((tst-x1)*((a.cp(r+1)-
a.cp(r))/(a.t(r+1)-x1))));
end
end

```

V případě, že uživatel chce vypočítat minimální tloušťku izolace může zaškrtnutím boxu v hlavním okně zadat maximální teplotu, která má být na povrchu izolace a tepelnou vodivost této izolace. Teplota na povrchu nemůže být vyšší než teplota v potrubí nebo nižší než teplota okolního vzduchu, což je opět ošetřeno funkcí, která upozorní uživatele a znemožní výpočet.

Pokud je zvolena možnost výpočtu tloušťky izolace po stisku tlačítka „Vypočítej“ se nejprve provede tato funkce:

%Button pushed function: VypotejButton

function VypotejButtonPushed(app, event)

ButtonGroupSelectionChanged(app, event)

Dochzkproud nokoln hovzduchu CheckBox_2 ValueChanged(app, event)

Souinitelpustuputeplanavnitnstran CheckBox ValueChanged(app, event)

resetmezivys(app)

%výpočet minimální tloušťky izolace - volná konvekce

function y = f(x)

if (app.VpoetminimlntloukyizolaceCheckBox.Value &&

~app.Dochzkproud nokoln hovzduchu CheckBox_2.Value)

ta=app.TeplotaokolEditField.Value;

treal = app.MaximlnpovrchovteplotaEditField.Value;

tst=(treal+ta)/2;

[lambdaa,vizvzduchu,Pr] = vlastvz(app,tst); **%funkce pro vlastnosti vzduchu**

d2 = app.VnjprmrtrubkyEditField.Value/1000;

d1 = d2-2*(app.TloukatrubkyEditField.Value/1000);

Dvnejsi=(d2+2*abs(x)); **%x je hledaná tloušťka izolace**

emisivita=app.EmisivitavnjhovpovrchuEditField.Value;

lambda1=app.TepelnvodivosttrubkyEditField.Value;

lambda2 = app.Tepelnvodivostizolace1EditField_2.Value;

tw0 = app.TeplotamdiaEditField_3.Value;

L = app.DlkapotrubEditField.Value;

plocha=pi*Dvnejsi*L;

GrPr=(Pr*(9.81*(Dvnejsi^3)*(1/(273.15+tst))*(abs(treal-

ta)))/(vizvzduchu^2);

%orientace potrubí svislé/vodorovné

if app.orientace

Nu=(0.6+((0.387*(GrPr)^(1/6))/(1+0.721*(1/Pr)^(9/16))^(8/27)))^2;

```

elseif ~app.orientace
    Nu=(0.825+((0.387*(GrPr)^(1/6))/(1+0.671*(1/Pr)^(9/16))^(8/27)))^2;
end

alfak=((Nu*lambdaa)/Dvnejsi);
alfas=salani(app,plocha,treal,ta,emisivita); %funkce pro výpočet přestupu
tepla sáláním
alfao=alfak+alfas;
kL=(pi/((1/(d1*app.alfai))+((log(d2/d1))/(2*lambda1)) +
((log(Dvnejsi/d2))/(2*lambda2)) + (1/(alfao*Dvnejsi)))));
Qcelkem=kL*L*(tw0-ta);
Qcelkem2=alfao*pi*Dvnejsi*L*(treal-ta);
y = Qcelkem-Qcelkem2;

%výpočet minimální tloušťky izolace - nucená konvekce
elseif(app.VpoetminimlntloukyizolaceCheckBox.Value &&
app.Dochzkproud nokolnhovzduchuCheckBox_2.Value)
    ta=app.TeplotaokolEditField.Value;
    treal = app.MaximlnpovrchovteplotaEditField.Value;
    tst=(treal+ta)/2;
    [lambdaa,vizvzduchu,Pr] = vlastvz(app,tst); %funkce pro vlastnosti vzduchu
    d2 = app.VnjprmrubkyEditField.Value/1000;
    d1 = d2-2*(app.TloukatrubkyEditField.Value/1000);
    Dvnejsi=(d2+2*abs(x)); %x je hledaná tloušťka izolace
    emisivita=app.EmisivitavnjhovpovrchuEditField.Value;
    lambda1=app.TepelnvodivosttrubkyEditField.Value;
    lambda2 = app.Tepelnvodivostizolace1EditField_2.Value;
    tw0 = app.TeplotamdiaEditField_3.Value;
    L = app.DlkapotrubEditField.Value;
    plocha=pi*Dvnejsi*L;
    v=app.RychlostvzduchuEditField.Value;

    Re=((v*(Dvnejsi))/vizvzduchu);
    Nu=(0.3+((0.62*sqrt(Re)*Pr^(1/3)) / ((1+(0.4/Pr)^(2/3))^(1/4))) *
(1+(Re/282000)^(5/8))^(4/5));
    alfak=((Nu*lambdaa)/Dvnejsi);
    alfas=salani(app,plocha,treal,ta,emisivita); %funkce pro výpočet přestupu tepla
sáláním
    alfao=alfak+alfas;

    kL=(pi/((1/(d1*app.alfai))+((log(d2/d1))/(2*lambda1)) +
((log(Dvnejsi/d2))/(2*lambda2)) + (1/(alfao*Dvnejsi)))));
    Qcelkem=kL*L*(tw0-ta);
    Qcelkem2=alfao*pi*Dvnejsi*L*(treal-ta);
    y = Qcelkem-Qcelkem2;
end
end

%výpočet minimální tloušťky izolace funkcí + výpis
if app.VpoetminimlntloukyizolaceCheckBox.Value
    fun = @f;

```

```

x0=0;
vyslednahod = fzero(fun,x0); %funkce pro vyřešení rovnice
vyslednahod = abs(vyslednahod);
app.Tloukaizolace1EditField_2.Value = vyslednahod*1000;
app.MinimlntloukaizolaceEditField.Value = vyslednahod*1000;
end

```

Dále se provede výpočet tepelné ztráty, kde se nejprve odhadne teplota vnějšího povrchu potrubí nebo izolace, vypočítá se celková tepelná ztráta, ze které se zjistí reálná teplota povrchu a výpočet se opakuje s teplotou povrchu vypočítanou, dokud u těchto teplot nebude splněna podmínka požadované odchylky 0,1 °C. Ukázka části kódu:

```

%Výpočet tepelných ztrát nadzemního vedení potrubí
twodh=0;
twvyp=60;
VrstvaizolaceCheckBox_ValueChanged(app, event);
tw0=app.TeplotamdiaEditField_3.Value;
ta=app.TeplotaokolEditField.Value;
L=app.DlkapotrubEditField.Value;
[d1,d2,d3,d4,d5,d6,Dvnejsi,plocha] = frozmary(app,L); %funkce pro získání rozměrů
emisivita=app.EmisivitavnjhovrchuEditField.Value;
    %if rozhodující nucenou/volnou konvekci
    %nucená konvekce
    if app.volnuc
        while (abs(twvyp-twodh) > 0.1)
            twodh=twvyp;
            tst=(twodh+ta)/2;
            [lambdaa,vizvzduchu,Pr] = vlastvz(app,tst); %funkce pro vlastnosti vzduchu
            v=app.RychlostvzduchuEditField.Value;

            Re=((v*(Dvnejsi))/vizvzduchu);
            Nu=(0.3+(((0.62*sqrt(Re)*Pr^(1/3)) / ((1+(0.4/Pr)^(2/3))^(1/4)))) *
(1+(Re/282000)^(5/8))^(4/5));
            alfak=((Nu*lambdaa)/Dvnejsi);
            %funkce pro výpočet přestupu tepla sáláním
            alfas=salani(app,plocha,twodh,ta,emisivita);
            alfao=alfak+alfas;
        %funkce pro výpočet součinitele prostupu tepla, celkové tepelné ztráty a teploty povrchu
            [kL,Qcelkem,twvyp] = kLQt(app,d1,d2,d3,d4,d5,d6,alfao,L,tw0,ta);
            app.Rev=Re;
        end
        %volná konvekce
    elseif app.volnuc==false
        while (abs(twvyp-twodh) > 0.1)
            twodh=twvyp;
            tst=(twodh+ta)/2;
            [lambdaa,vizvzduchu,Pr] = vlastvz(app,tst); %funkce pro vlastnosti vzduchu

```

```

GrPr=(Pr*(9.81*(Dvnejsi^3)*(1/(273.15+tst))*(abs(twodh-
ta)))/(vizvzduchu)^2);

%orientace potrubí svislé/vodorovné
if app.orientace
    Nu=(0.6+((0.387*(GrPr)^(1/6))/(1+0.721*(1/Pr)^(9/16))^(8/27)))^2;
elseif ~app.orientace
    Nu=(0.825+((0.387*(GrPr)^(1/6))/(1+0.671*(1/Pr)^(9/16))^(8/27)))^2;
end

alfak=((Nu*lambdaa)/Dvnejsi);
%funkce pro výpočet přestupu tepla sáláním
alfas=salani(app,plocha,twodh,ta,emisivita);
alfao=alfak+alfas;
%funkce pro výpočet součinitele prostupu tepla, celkové tepelné ztráty a teploty povrchu
[kL,Qcelkem,twvyp] = kLQt(app,d1,d2,d3,d4,d5,d6,alfao,L,tw0,ta);
app.GrPrv=GrPr;
end
end

```

Nakonec se ještě provede výpočet tepelné ztráty pro potrubí bez izolace a výpočet pro doplňkové prvky podle kódu:

```

DoplkovprvkypotrubCheckBoxValueChanged(app, event);
for iopak=1:app.doplujiciprvkycheckbox1
    twodh=0;
    twvyp=1;
    app.pocetizolaci = 0;
    if iopak==2
        delkanavic = doplprvky(app);
        L=delkanavic;
    end
    [d1,d2,d3,d4,d5,d6,Dvnejsi,plocha] = frozmery(app,L);%funkce pro získání rozměrů
    emisivita=app.EmisivitatrubkyEditField.Value;
    %nucená konvekce
    if app.volnuc
        while (abs(twvyp-twodh) > 0.1)
            twodh=twvyp;
            tst=(twodh+ta)/2;
            [lambdaa,vizvzduchu,Pr] = vlastvz(app,tst);%funkce pro vlastnosti vzduchu
            v=app.RychlostvzduchuEditField.Value;

            Re=((v*(Dvnejsi))/vizvzduchu);
            Nu=(0.3+((0.62*sqrt(Re)*Pr^(1/3)) / ((1+(0.4/Pr)^(2/3))^(1/4))) *
            (1+(Re/282000)^(5/8))^(4/5));
            alfak=((Nu*lambdaa)/Dvnejsi);
            %funkce pro výpočet přestupu tepla sáláním
            alfas=salani(app,plocha,twodh,ta,emisivita);

```

```

        alfao=alfak+alfas;
%funkce pro výpočet součinitele prostupu tepla, celkové tepelné ztráty a teploty povrchu
[kL,Qcelkem,twvyp] = kLQt(app,d1,d2,d3,d4,d5,d6,alfao,L,tw0,ta);
    end
    %volná konvekce
    elseif app.volnuc==false
        while (abs(twvyp-twodh) > 0.1)
            twodh=twvyp;
            tst=(twodh+ta)/2;
            [lambdaa,vizvzduchu,Pr] = vlastvz(app,tst);%funkce pro vlastnosti vzduchu

            %orientace potrubí svislé/vodorovné
            if app.orientace
                Nu=(0.6+((0.387*(GrPr)^(1/6))/(1+0.721*(1/Pr)^(9/16)))^(8/27))^2;
            elseif ~app.orientace
                Nu=(0.825+((0.387*(GrPr)^(1/6))/(1+0.671*(1/Pr)^(9/16)))^(8/27))^2;
            end
            %funkce pro výpočet přestupu tepla sáláním
            alfas=salani(app,plocha,twodh,ta,emisivita);
            alfao=alfak+alfas;
%funkce pro výpočet součinitele prostupu tepla, celkové tepelné ztráty a teploty povrchu
[kL,Qcelkem,twvyp] = kLQt(app,d1,d2,d3,d4,d5,d6,alfao,L,tw0,ta);
    end
end
end

```

Výpočet tepelné ztráty pro podzemní uložení potrubí

Výpočet pro podzemní uložení potrubí je až na výpočetní vztahy obslužen podobně jako nadzemní uložení viz. zdrojový kód v příloze.

Výpočet tepelných ztrát

Nadzemní uložení potrubí Podzemní uložení potrubí Ventil

Výpočet tepelných ztrát potrubí - podzemní uložení

Teplota média °C
Teplota zeminy °C
Vnější průměr trubky mm
Tloušťka trubky mm
Tepelná vodivost trubky W/(mK)
Emisivita trubky
Délka potrubí m
Tepelná vodivost zeminy W/(mK)
Hloubka uložení potrubí m
Emisivita vnějšího povrchu izolace

☐ Výpočet minimální tloušťky izolace
 Maximální povrchová teplota °C
☐ Součinitel přestupu tepla na vnitřní straně
 Vlastní součinitel přestupu tepla W/(m²K)

☐ Doplnkové prvky potrubí

Název prvku
 Ekvivalentní délka potrubí m
 Počet kusů

☐ 1. Vrstva izolace
 Tepelná vodivost izolace 1 W/(mK)
 Tloušťka izolace 1 mm
☐ 2. Vrstva izolace
 Tepelná vodivost izolace 2 W/(mK)
 Tloušťka izolace 2 mm
☐ 3. Vrstva izolace
 Tepelná vodivost izolace 3 W/(mK)
 Tloušťka izolace 3 mm
☐ 4. Vrstva izolace
 Tepelná vodivost izolace 4 W/(mK)
 Tloušťka izolace 4 mm

Tepelná vodivost pro vybrané izolace

Název	Tepelná vodivost
Kamenná izolace	0.0450
Skelná izolace	0.0390
Pěnové sklo	0.0500
EPS	0.0370
Vakuová izolace	0.0300
Aerogel	0.0100
Minerální vlna	0.0350
PUR	0.0250
PIR	0.0220
Perlit	0.0500
XPS	0.0320

Výsledky

Celková tepelná ztráta bez izolace W
 Teplota vnějšího povrchu °C
 Vnější součinitel přestupu tepla W/(m²K)
 Součinitel prostupu tepla W/(mK)
 Tepelná ztráta na metr potrubí W/m
 Celková tepelná ztráta W

Obrázek 10 – Hlavní okno – podzemní uložení potrubí

Výpočet tepelné ztráty pro ventil

Výpočet tepelných ztrát ventilu

Nadzemní uložení potrubí Podzemní uložení potrubí Ventil

Nápověda ?

Teplosměnný povrch A_A 1 m² Vnější průměr části A - I_A 440 mm Průměrná teplota povrchu části A - t_A 30 °C

Teplosměnný povrch A_B 0.2 m² Výška části B - I_B 300 mm Průměrná teplota povrchu části B - t_B 75 °C

Teplosměnný povrch A_C 0.03 m² Vnější průměr části C - I_C 200 mm Průměrná teplota povrchu části C - t_C 60 °C

Emisivita materiálu ventilu 0.5

Teplota okolí 20 °C

☐ Dochází k proudění okolního vzduchu

Rychlost vzduchu 10 m/s

☐ Výpočet ekvivalentní délky potrubí

Tepelná ztráta neizolovaného potrubí stejného průměru při délce 1 m 1100 W

Výsledky

Tepelná ztráta části A 0 W

Tepelná ztráta části B 0 W

Tepelná ztráta části C 0 W

Celková tepelná ztráta 0 W

Zobrazit mezivýpočty Vypočítej

Obrázek 11 – Hlavní okno – tepelná ztráta ventilu

V tomto okně lze provést výpočet tepelných ztrát pro zjednodušený ventil. Uživatel může zadat vlastnosti ventilu a zvolit, zda dochází k proudění okolního vzduchu – nucená konvekce. Tlačítko „Vypočítej“ je implementováno takto:

%Výpočet tepelné ztráty ventilu

%nucená konvekce

if app.volnuc2

%Tepelná ztráta plochy A

tst=(tA+ta)/2;

[lambdaa,vizvzduchu,Pr] = vlastvz(app,tst);

Re=((v*(lA))/vizvzduchu);

Nu=(0.3+(((0.62*sqrt(Re)*Pr^(1/3)) / ((1+(0.4/Pr)^(2/3))^(1/4)))) *

(1+(Re/282000)^(5/8))^(4/5));

alfak=((Nu*lambdaa)/lA);

alfas=salani(app,AA,tA,ta,emisivitaventil);

alfao=alfak+alfas;

QA=alfao*AA*(tA-ta);

if app.druheoknocheck == true

```

        zapisdatventilA(app.mezivyp, GrPr, Re, tst, lambdaa, vizvzduchu, Nu, Pr, alfas,
alfak)
    end
    %Tepelná ztráta plochy B
    tst=(tB+ta)/2;
    [lambdaa,vizvzduchu,Pr] = vlastvz(app,tst);
    Re=((v*(lC))/vizvzduchu);
    Nu=(0.3+((0.62*sqrt(Re)*Pr^(1/3)) / ((1+(0.4/Pr)^(2/3))^(1/4))) *
(1+(Re/282000)^(5/8))^(4/5));
    alfak=((Nu*lambdaa)/lC);
    QB=alfak*AB*(tB-ta);
    if app.druheoknocheck == true
        zapisdatventilB(app.mezivyp, GrPr, Re, tst, lambdaa, vizvzduchu, Nu, Pr, alfak)
    end
    %Teplená ztráta plochy C
    tst=(tC+ta)/2;
    [lambdaa,vizvzduchu,Pr] = vlastvz(app,tst);
    Re=((v*(lC))/vizvzduchu);
    Nu=0.0356*(Re^0.8)*(Pr^0.4);
    alfak=((Nu*lambdaa)/lC);
    QC=alfak*AC*(tC-ta);
    if app.druheoknocheck == true
        zapisdatventilC(app.mezivyp, GrPr, Re, tst, lambdaa, vizvzduchu, Nu, Pr, alfak)
    end
    %volná konvekce
elseif app.volnuc2 == false
    %Tepelná ztráta plochy A
    tst=(tA+ta)/2;
    [lambdaa,vizvzduchu,Pr] = vlastvz(app,tst);
    GrPr=(Pr*(9.81*(lA^3)*(1/(273.15+tst))*(abs(tA-ta)))/(vizvzduchu)^2);
    Nu=(0.6+((0.387*(GrPr)^(1/6))/(1+0.721*(1/Pr)^(9/16)))^(8/27))^2;
    alfak=((Nu*lambdaa)/lA);
    alfas=salani(app,AA,tA,ta,emisivitaventil);
    lfao=alfak+alfas;
    QA=alfao*AA*(tA-ta);
    if app.druheoknocheck == true
        zapisdatventilA(app.mezivyp, GrPr, Re, tst, lambdaa, vizvzduchu, Nu, Pr, alfas,
alfak)
    end
    %Tepelná ztráta plochy B
    tst=(tB+ta)/2;
    [lambdaa,vizvzduchu,Pr] = vlastvz(app,tst);
    GrPr=(Pr*(9.81*(lB^3)*(1/(273.15+tst))*(abs(tB-ta)))/(vizvzduchu)^2);
    Nu=(0.825+((0.387*(GrPr)^(1/6))/(1+0.671*(1/Pr)^(9/16)))^(8/27))^2;
    alfak=((Nu*lambdaa)/lB);
    QB=alfak*AB*(tB-ta);
    if app.druheoknocheck == true
        zapisdatventilB(app.mezivyp, GrPr, Re, tst, lambdaa, vizvzduchu, Nu, Pr, alfak)
    end

```

```

%Teplená ztráta plochy C
tst=(tC+ta)/2;
[lambdaa,vizvzduchu,Pr] = vlastvz(app,tst);
GrPr=(Pr*(9.81*(lC^3)*(1/(273.15+tst))*(abs(tC-ta)))/(vizvzduchu)^2);
if and((GrPr >= (2*(10^7))), (GrPr < (10^23)))
    konsC=0.135;konsn=(1/3);
elseif and((GrPr >= 500), (GrPr < (2*(10^7))))
    konsC=0.54;konsn=(1/4);
elseif and((GrPr >= (10^(-3))), (GrPr < 500))
    konsC=1.18;konsn=(1/8);
elseif GrPr < (10^(-3))
    konsC=0.5;konsn=0;
else
    %Vysoká hodnota GrPr
    app.ChybavpotusouinGrPrprostCplivysokhodnotaLabel.Visible=true;
    app.TepelnztrtastiAEditField.Value=0;
    app.TepelnztrtastiBEditField.Value=0;
    app.TepelnztrtastiCEditField.Value=0;
    app.CelkovtepelnztrtaEditField_3.Value=0;
    app.EkvivalentndlkapotrubEditField_3.Value=0;
    return
end
Nu=konsC*((GrPr)^konsn);
alfak=((Nu*lambdaa)/lC);
QC=alfak*AC*(tC-ta);
if app.druheoknocheck == true
    zapisdatventilC(app.mezivyp, GrPr, Re, tst, lambdaa, vizvzduchu, Nu, Pr, alfak)
end
end

Qcelkem=QA+QB+QC;
%Výpočet ekvivalentní délky potrubí
if app.VpoetekvivalentndlkypotrubCheckBox.Value
    app.EkvivalentndlkapotrubEditField_3.Value=Qcelkem/app.tepelneztratyneizol.Value;
end
%Výpis výsledků tepelné ztráty pro ventil
app.TepelnztrtastiAEditField.Value=QA;
app.TepelnztrtastiBEditField.Value=QB;
app.TepelnztrtastiCEditField.Value=QC;
app.CelkovtepelnztrtaEditField_3.Value=Qcelkem;

```

Výpočet tepelné ztráty pro ventil

Toto okno lze vyvolat tlačítkem „Zobrazit mezivýpočty“ v hlavním okně.

Mezivýpočty tepelných ztrát

Nadzemní uložení potrubí

GrPr

Re

střední teplota vzduchu °C

tepelná vodivost vzduchu W/(mK)

viskozita vzduchu m²/s

Nu

Pr

součinitel přestupu tepla konvekcí W/(m²K)

součinitel přestupu tepla sáláním W/(m²K)

teplosměnná plocha m²

Podzemní uložení potrubí

přestup mezi zemínou a potrubím W/(m²K)

Mezivýpočty pro ventil

Část A		Část B		Část C	
GrPr	0	GrPr	0	GrPr	0
Re	0	Re	0	Re	0
Nu	0	Nu	0	Nu	0
střední teplota vzduchu	0 °C	střední teplota vzduchu	0 °C	střední teplota vzduchu	0 °C
tepelná vodivost vzduchu	0 W/(mK)	tepelná vodivost vzduchu	0 W/(mK)	tepelná vodivost vzduchu	0 W/(mK)
viskozita vzduchu	0 m ² /s	viskozita vzduchu	0 m ² /s	viskozita vzduchu	0 m ² /s
Pr	0	Pr	0	Pr	0
součinitel přestupu tepla konvekcí	0 W/(m ² K)	součinitel přestupu tepla konvekcí	0 W/(m ² K)	součinitel přestupu tepla konvekcí	0 W/(m ² K)
součinitel přestupu tepla sáláním	0 W/(m ² K)				

Smazat

Obrázek 12 – Okno s mezivýpočty

5.3 Příklady výpočtu

Výsledky výpočtu příkladu 4:

$$t_{w3} = 21,9 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\alpha_o = 28,72 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

$$k_L = 0,724 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$$

$$\dot{Q} = 7964 \text{ W}$$

Výpočet tepelných ztrát

Nadzemní uložení potrubí | Podzemní uložení potrubí | Ventil

Výpočet tepelných ztrát potrubí - nadzemní uložení

Teplota média °C
Teplota okolí °C
Vnější průměr trubky mm
Tloušťka trubky mm
Tepelná vodivost trubky W/(mK)
Emisivita trubky
Délka potrubí m
Emisivita vnějšího povrchu izolace

☒ Dochází k proudění okolního vzduchu
Rychlost vzduchu m/s
☐ Výpočet minimální tloušťky izolace
Maximální povrchová teplota °C
☐ Součinitel přestupu tepla na vnitřní straně
Vlastní součinitel přestupu tepla W/(m²K)

Orientace potrubí
☒ Vodorovné potrubí ☐ Svislé potrubí

☐ Doplnkové prvky potrubí

Název prvku
Ekvivalentní délka potrubí m
Počet kusů

☒ 1. Vrstva izolace
Tepelná vodivost izolace 1 W/(mK)
Tloušťka izolace 1 mm
☐ 2. Vrstva izolace
Tepelná vodivost izolace 2 W/(mK)
Tloušťka izolace 2 mm
☐ 3. Vrstva izolace
Tepelná vodivost izolace 3 W/(mK)
Tloušťka izolace 3 mm
☐ 4. Vrstva izolace
Tepelná vodivost izolace 4 W/(mK)
Tloušťka izolace 4 mm

Tepelná vodivost pro vybrané izolace

Název	Tepelná vodivost
Kamenná izolace	0.0450
Skelná izolace	0.0390
Pénové sklo	0.0500
EPS	0.0370
Vakuová izolace	0.0300
Aerogel	0.0100
Minerální vlna	0.0350
PUR	0.0250
PIR	0.0220
Perlit	0.0500
XPS	0.0320

Výsledky

Celková tepelná ztráta bez izolace W
Teplota vnějšího povrchu °C
Vnější součinitel přestupu tepla W/(m²K)
Součinitel prostupu tepla W/(mK)
Tepelná ztráta na metr potrubí W/m
Celková tepelná ztráta W

Obrázek 13 – Výpočet příkladu 4 pomocí aplikace

Výsledky výpočtu příkladu 6:

$$t_{w3} = 19,69\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\alpha_o = 12,32\text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

$$k_L = 0,7075\text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$$

$$\dot{Q} = 8136\text{ W}$$

Výpočet tepelných ztrát

Nadzemní uložení potrubí Podzemní uložení potrubí Ventil

Výpočet tepelných ztrát potrubí - podzemní uložení Nápověda ?

Teplota média °C

Teplota zeminy °C

Vnější průměr trubky mm

Tloušťka trubky mm

Tepelná vodivost trubky W/(mK)

Emisivita trubky

Délka potrubí m

Tepelná vodivost zeminy W/(mK)

Hloubka uložení potrubí m

Emisivita vnějšího povrchu izolace

☒ 1. Vrstva izolace

Tepelná vodivost izolace 1 W/(mK)

Tloušťka izolace 1 mm

☐ 2. Vrstva izolace

Tepelná vodivost izolace 2 W/(mK)

Tloušťka izolace 2 mm

☐ 3. Vrstva izolace

Tepelná vodivost izolace 3 W/(mK)

Tloušťka izolace 3 mm

☐ 4. Vrstva izolace

Tepelná vodivost izolace 4 W/(mK)

Tloušťka izolace 4 mm

☐ Výpočet minimální tloušťky izolace

Maximální povrchová teplota °C

☐ Součinitel přestupu tepla na vnitřní straně

Vlastní součinitel přestupu tepla W/(m²K)

Výpočet součinitele přestupu tepla

☐ Doplnkové prvky potrubí

Název prvku

Ekvivalentní délka potrubí m

Počet kusů

Tepelná vodivost pro vybrané izolace

Název	Tepelná vodivost
Kamenná izolace	0.0450
Skelná izolace	0.0390
Pénové sklo	0.0500
EPS	0.0370
Vakuová izolace	0.0300
Aerogel	0.0100
Minerální vlna	0.0350
PUR	0.0250
PIR	0.0220
Perlit	0.0500
XPS	0.0320

Výsledky

Celková tepelná ztráta bez izolace W

Teplota vnějšího povrchu °C

Vnější součinitel přestupu tepla W/(m²K)

Součinitel prostupu tepla W/(mK)

Tepelná ztráta na metr potrubí W/m

Celková tepelná ztráta W

Obrázek 14 – Výpočet příkladu 6 pomocí aplikace

Výsledky výpočtu příkladu 7:

$$\dot{Q}_A = 60,66 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_B = 60,405 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_C = 6,16 \text{ W}$$

$$\dot{Q} = 126,97 \text{ W}$$

Výpočet tepelných ztrát ventilu

Nadzemní uložení potrubí Podzemní uložení potrubí Ventil

Nápověda ?

Teplosměnný povrch A_A 1 m² Vnější průměr části A - I_A 440 mm Průměrná teplota povrchu části A - t_A 30 °C

Teplosměnný povrch A_B 0.2 m² Výška části B - I_B 300 mm Průměrná teplota povrchu části B - t_B 75 °C

Teplosměnný povrch A_C 0.03 m² Vnější průměr části C - I_C 200 mm Průměrná teplota povrchu části C - t_C 60 °C

Emisivita materiálu ventilu 0.5

Teplota okolí 20 °C

☐ Dochází k proudění okolního vzduchu

Rychlost vzduchu 10 m/s

☐ Výpočet ekvivalentní délky potrubí

Tepelná ztráta neizolovaného potrubí stejného průměru při délce 1 m 1100 W

Výsledky

Tepelná ztráta části A 60.6228 W

Tepelná ztráta části B 60.4611 W

Tepelná ztráta části C 6.15912 W

Celková tepelná ztráta 127.243 W

Zobrazit mezivýpočty Vypočítej

Obrázek 15 – Výpočet příkladu 7 pomocí aplikace

ZÁVĚR

Obsahem této bakalářské práce je řešení problematiky minimalizace tepelných ztrát při distribuci tepla, což je téma s rostoucím významem v souvislosti s požadavky na energetickou účinnost, ekologickou udržitelnost a ekonomickou optimalizaci provozu teplotních a průmyslových systémů. V teoretické části jsem se zaměřil zejména na analýzu mechanismů sdílení tepla – vedením, prouděním a sáláním – a popsal hlavní faktory ovlivňující velikost tepelných ztrát v potrubních rozvodech. Porovnal jsem rozdíly mezi nadzemním a podzemním uložením potrubí a značný význam správné volby izolačních materiálů.

V praktické části práce jsem provedl konkrétní výpočty tepelných ztrát u vybraných částí distribuční sítě – neizolovaného a izolovaného, svislého a vodorovně uloženého potrubí a ventilu. Na základě zadávaných parametrů jsem měl možnost vypočítat a rovněž porovnat rozdíly mezi jednotlivými případy a také sledovat výsledky v závislosti na zadávaných vstupních parametrech a které jednoznačně potvrdily, že vhodně zvolená a správně dimenzovaná tepelná izolace může výrazně snížit tepelné ztráty a tím i spotřebu energie na dohřev teplotního média. Zároveň dosažené výsledky práce prokázaly, že faktory jako jsou: rychlost proudění okolního vzduchu, hloubka uložení potrubí nebo druh a tloušťka izolace mají zásadní vliv na výslednou energetickou bilanci. Dále jsem se v práci věnoval tvorbě, popisu a ověření funkčnosti programové aplikace v prostředí Matlab App Designer pro výpočet tepelných ztrát pro výše uvedené případy. V práci jsem také uvedl použité prvky a zásadní výpočetní části kódu a možnosti aplikace. Funkčnost aplikace a správnost výsledků jsem ověřil porovnáním se správnými výsledky kontrolních příkladů. Drobné nepřesnosti v řádu 0,1 % byly způsobeny zaokrouhlováním v kontrolních příkladech.

Vypracování této bakalářské práce pro mě bylo novou a zároveň podnětnou zkušeností. Problematika sdílení tepla pro mě nebyla zpočátku příliš známá a s jejím fyzikálním základem i matematickým popisem jsem se důkladněji seznámil až během studia.

I přes počáteční nejistotu se mi podařilo propojit teoretické poznatky s praktickými výpočty a programováním a vytvořit nástroj, který dává ověřené správné výsledky a pomůže v krátkém čase řešit poměrně časově náročné úlohy týkající se minimalizace tepelných ztrát v potrubních rozvodech, a to jak v izolovaném, neizolovaném provedení a způsobu uložení. Programovou aplikaci bude možno využít nejen pro výpočty v praxi ale také poslouží jako pomůcka při výuce studentů.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] KNÁPEK, Jaroslav; VALENTOVÁ, Michaela; KREJCAR, Rostislav; VAŠÍČEK, Jiří a VECKA, Jiří. KLIMATICKO-ENERGETICKÉ INVESTICE V TEPLÁRENSTVÍ 2014–2030. Online. In: Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd. 2021-02. Dostupné z: <https://ekonom.fel.cvut.cz/cs/katedra/lide/valenmi7/cic2030/reports/ipp-teplarenstvi-report-final.pdf>. [cit. -03-18].
- [2] PLESNÍK, Svetozár. Moderní teplárny a moderní budovy: představení nových směrů Svazu moderní energetiky. Online. In: České-novinky. 2025-01-22. Dostupné z: <https://www.ceske-novinky.cz/wp-content/uploads/2025/01/SME-Moderni-teplo-budovy.pdf>. [cit. -03-18].
- [3] Optimalizace spotřeby energie či akumulace energie a chytré řízení. Jak dále mohou české firmy v roce 2025 výrazně ušetřit v energetice? Online. In: Efektivniuspory. 2024-12-29. Dostupné z: <https://efektivniuspory.cz/optimalizace-spotreby-energie-ci-akumulace-energie-a-chytre-rizeni-jak-dale-mohou-ceske-firmy-v-roce-2025-vyrazne-usetrit-v-energetice/>. [cit. -03-18].
- [4] TRNAVSKÝ, Jiří. Modernizace v teplárnách a úspornější budovy posílí energetickou bezpečnost Česka. Online. In: Profipress. 2025-01-26. Dostupné z: <https://energie21.cz/trend-roku-2025-modernizace-v-teplarenstvi-a-uspornejsi-budovy-posili-energetickou-bezpecnost-ceska-svaz-moderni-energetiky-spousti-nove-tematicke-divize/>. [cit. -03-18].
- [5] Trend roku 2025: Modernizace v teplárnách a úspornější budovy posílí energetickou bezpečnost Česka. Svaz moderní energetiky spouští nové tematické divize. Online. In: Svaz moderní energetiky. 2025-01-23. Dostupné z: <https://www.modernienergetika.cz/aktuality/trend-roku-2025-modernizace-v-teplarenstvi-a-uspornejsi-budovy-posili-energetickou-bezpecnost-ceska-svaz-moderni-energetiky-spousti-nove-tematicke-divize/>. [cit. -03-18].
- [6] KOZUBKOVÁ, M., BLEJCHAŘ, T., BOJKO, M. Modelování přenosu tepla, hmoty a hybnosti. Ostrava: FS VŠB-TU, 2019. [cit. 2025-03-18].
- [7] JÍCHA, Miroslav. Přenos tepla a látky. Učební texty vysokých škol. Brno: CERM, 2001. ISBN 80-214-2029-4. [cit. 2025-03-18].

- [8] KOLŮCHOVÁ, Jana. Programová aplikace pro řešení sdílení tepla konvekcí. Online, Bakalářská práce. Zlín: Univerzita Tomáše Bati, 2018. Dostupné z: https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/43502/kol%20afchov%20a1_2018_dp.pdf?sequence=1&isAllowed=y. [cit. 2025-03-18].
- [9] JANÁČOVÁ, Dagmar, Sdílení tepla, výukové materiály, UTB FAI 2024.
- [10] BEDNÁŘ, Radim. Optimalizace spotřeby energie pro chlazení elektronických počítačových komponent. Online, Bakalářská práce. Zlín: Univerzita Tomáše Bati, 2021. Dostupné z: https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/49836/bedn%20a1%2099_2021_dp.pdf?sequence=1&isAllowed=y. [cit. 2025-03-18].
- [11] BEJAN, Adrian a KRAUS, Allan D. (ed.). Heat transfer handbook. Hoboken: John Wiley & Sons, [2003]. ISBN 0471390151. Dostupné z: <http://www.loc.gov/catdir/toc/wiley031/2002028857.html>. [cit. 2025-03-18].
- [12] BIRD, R.B., STEWARD, W.E., LIGHTFOOT, E.N. Transport Phenomena. John Wiley & Sons, 2007. 905 s. ISBN 0-470-11539-4. [cit. 2025-03-18].
- [13] BEJAN, Adrian. Convection Heat Transfer. 4 th. United States: John Wiley & Sons, 2013. ISBN 0470900377. [cit. 2025-03-18].
- [14] TUČEK, Jan. Výpočet tepelných ztrát a izolace potrubí. Online. Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně. 2011. Dostupné z: <https://theses.cz/id/2sn65z/>. [cit. 2025-03-18].
- [15] Janáčková, D.: Kurz Procesní inženýrství PI-AŘT, Sdílení tepla (přestup. prostup tepla) – přílohy, PDF dokument dostupný na: https://moodle.utb.cz/pluginfile.php/359188/mod_resource/content/1/Sd%C3%ADlen%C3%AD%20tepla%20VM%C3%ADka.pdf [cit. 2025-03-18].
- [16] POKORNÝ, Marek. Sálání tepla. Online. In: Server Fire. 2006, 2006-11-10. Dostupné z: http://fire.fsv.cvut.cz/vzdelavani/specialiste/1/1-4_Salani_tepla.pdf. [cit. 2025-03-18].
- [17] JANÁČOVÁ, Dagmar, Sdílení tepla sálání, výukové materiály, UTB FAI 2018. [cit. 2025-03-18].

- [18] HOLEČEK, Oldřich a ŠNITA, Dalimil. Sdílení tepla. Online. In: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze. Dostupné z: <https://old.vscht.cz/uchi/ped/chi/chi.ii.ulohy.k11.sdileni.tepla.pdf>. [cit. 2025-03-18].
- [19] ZELENÝ, Karel. STUDIE PROBLEMATIKY SNIŽOVÁNÍ ENERGETICKÝCH ZTRÁT A ZVÝŠENÍ SPOLEHLIVOSTI PŘI DODÁVKÁCH TEPLA. Online. RAEN. 2007, roč. 2007, č. 1, s. 63. ISSN 222004 7215. Dostupné z: https://efekt.gov.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/Studie_problematiky_snizovani_energetickych_ztrat_a_zvyseni_spolehlivosti__pri_dodavkach_tepla_2220047215.pdf. [cit. 2025-04-23].
- [20] Potenciál úspor energie při přechodu CZT pára-horká voda. Online. EFEKT. 2020, roč. 2020, č. 1, s. 57. Dostupné z: https://efekt.gov.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/0209_209-15-potencial-uspor-energie-pri-prechodu-czt-para-horka-voda-s-mapou.pdf. [cit. 2025-04-23].
- [21] REINBERK, Zdeněk. Výpočet tepelné ztráty potrubí s izolací. Online. In: Tzbinfo. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/44-vypocet-tepelne-zraty-potrubu-s-izolaci>. [cit. 2025-04-24].
- [22] DUFKA, Jaroslav. Izolace potrubí studené vody v budovách - 1. část. Online. Topenářství instalace. 2021, roč. 2021, č. 1, s. 1. Dostupné z: <https://www.topin.cz/clanky/izolace-potrubu-studene-vody-v-budovach-1-cast-detail-11942>. [cit. 2025-04-24].

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 – Mechanismy sdílení tepla [9]	17
Obrázek 2 – Teplotní profil napříč deskou [9]	17
Obrázek 3 – Teplotní profil napříč vícevrstvou stěnou [9]	19
Obrázek 4 – Teplotní profil napříč vícevrstvou válcovou stěnou [9]	20
Obrázek 5 – Přestup tepla konvekcí [9]	22
Obrázek 6 – Rozklad zářivého toku Q [9]	28
Obrázek 7 – Prostup tepla přes bariéru [9]	31
Obrázek 8 – Hlavní okno – nadzemní uložení potrubí	59
Obrázek 9 – Okno pro výpočet přestupu tepla na vnitřní straně	62
Obrázek 10 – Hlavní okno – podzemní uložení potrubí	69
Obrázek 11 – Hlavní okno – tepelná ztráta ventilu	70
Obrázek 12 – Okno s mezivýpočty	73
Obrázek 13 – Výpočet příkladu 4 pomocí aplikace	74
Obrázek 14 – Výpočet příkladu 6 pomocí aplikace	75
Obrázek 15 – Výpočet příkladu 7 pomocí aplikace	76

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 – Konstanty pro výpočet Nusseltova čísla v závislosti na hodnotě $GrPr$ [8]	25
Tabulka 2 – Výsledky opakování výpočtu př.4	49
Tabulka 3 – Výsledky opakování výpočtu př.5	52
Tabulka 4 – Výsledky opakování výpočtu př.6	53

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

A	teplosměnná plocha	$[\text{m}^2]$
A_p	poměrná pohltivost	$[1]$
$ dA $	teplosměnná plocha kolmá ke směru $\dot{Q}$	$[\text{m}^2]$
a	součinitel teplotní vodivosti tekutiny	$[\text{m}^2 \text{s}^{-1}]$
CZT	centralizované zásobování teplem	
c_p	měrná tepelná kapacita	$[\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}]$
d, D	průměr	$[\text{m}]$
d_1	vnitřní průměr trubky	$[\text{m}]$
d_2	vnější průměr trubky	$[\text{m}]$
d_3	vnější průměr izolace potrubí	$[\text{m}]$
d_{ref}	vnější průměr potrubí	$[\text{m}]$
D_p	poměrná propustnost	$[1]$
D_{ek}	ekvivalentní průměr	$[\text{m}]$
E	intenzita záření	$[\text{W m}^{-2}]$
$E_{\check{c}}$	vyzařená energie absolutně černého tělesa	$[\text{W}]$
Fo	Fourierovo kritérium	$[1]$
GUI	grafické uživatelské rozhraní	
g	gravitační zrychlení	$[\text{m s}^{-2}]$
k	součinitel prostupu tepla	$[\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}]$
k_L	délkový součinitel prostupu tepla	$[\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}]$
l	charakteristický rozměr	$[\text{m}]$
L	délka	$[\text{m}]$
m	hmotnost	$[\text{kg}]$
$\dot{m}$	hmotnostní průtok	$[\text{kg s}^{-1}]$
Nu	Nuseltovo kritérium	$[1]$

o	obvod smočený tekutinou	[m]
Pe	Pécletovo kritérium	[1]
Pr	Prandtlovo kritérium	[1]
Pr_w	Prandtlovo kritérium při teplotě u povrchu stěny	[1]
Q	teplo	[J]
$ d\dot{Q} $	změna tepelného toku	[W]
$\dot{Q}$	tepelný tok	[W]
$\dot{Q}_A$	část zářivého toku pohlcená	[1]
$\dot{Q}_D$	část zářivého toku propuštěná	[1]
$\dot{Q}_R$	část zářivého toku odražená	[1]
q	intenzita tepelného toku	[W m ⁻²]
$ dr $	změna poloměru	[m]
R	tepelný odpor	[K ⁻¹ W ⁻¹]
R_p	poměrná odrazivost	[1]
Re	Reynoldsovo kritérium	[1]
s	tloušťka izolace	[m]
S	plocha průtočného průřezu	[m ²]
Δt	rozdíl teplot	[°C]
$ dt $	změna teploty	[°C]
$\langle t_f \rangle$	průměrná teplota tekutiny	[°C]
t_w	teplota povrchu stěny	[°C]
t_{w1}	teplota vnitřního povrchu stěny trubky	[°C]
t_{w2}	teplota vnějšího povrchu stěny trubky	[°C]
t_{w3}	teplota vnějšího povrchu stěny izolace	[°C]
t_a	teplota okolí	[°C]
t_{st}	střední teplota	[°C]

t_n	teplota	[°C]
T_n	absolutní teplota	[K]
T_{st}	absolutní střední teplota	[K]
T_w	absolutní teplota povrchu	[K]
T_a	absolutní teplota okolí	[K]
$ dx $	změna pozice	[1]
v	rychlost proudění tekutiny	[m s ⁻¹]
α	součinitel přestupu tepla	[W m ⁻² K ⁻¹]
α_k	součinitel přestupu tepla konvekcí	[W m ⁻² K ⁻¹]
α_s	součinitel přestupu tepla sáláním	[W m ⁻² K ⁻¹]
α_o	celkový součinitel přestupu tepla z povrchu	[W m ⁻² K ⁻¹]
α_z	součinitel přestupu tepla potrubí pod zemí	[W m ⁻² K ⁻¹]
β	teplotní součinitel objemové roztažnosti	[K ⁻¹]
ε	emisivita	[1]
ε_{1-2}	úhrnná emisivita	[1]
δ	tloušťka stěny	[m]
η	dynamická viskozita tekutiny	[Pa s]
φ_{1-2}	úhlový součinitel osálení	[1]
λ	součinitel tepelné vodivosti	[W m ⁻¹ K ⁻¹]
λ_a	součinitel tepelné vodivosti tekutiny	[W m ⁻¹ K ⁻¹]
λ_z	součinitel tepelné vodivosti zeminy	[W m ⁻¹ K ⁻¹]
ν_a	kinematická viskozita tekutiny	[m ² s ⁻¹]
σ	Stefan-Boltzmannova konstanta	[W m ⁻² K ⁻⁴]
ρ	hustota	[kg m ⁻³]
τ	doba procesu sdílení tepla	[s]

SEZNAM PŘÍLOH

prilohy.zip zdrojové soubory k programu