

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Měření povrchových teplot v rozsahu infračerveného a
viditelného spektra záření**

vedoucí práce: Prof.Ing.Jiří Kožený, CSc

2014

autor: Bc. Jana Šimanová

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jana ŠIMANOVÁ**
Osobní číslo: **E12N0037P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Měření povrchových teplot v rozsahu infračerveného a viditelného spektra záření**
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Uveďte teorii sdílení tepla radiací.
2. Popište metody bezdotykového měření povrchových teplot.
3. Provedte měření povrchových teplot IR-kamerou na vybraném průmyslovém zařízení za účelem posouzení tepelných ztrát.
4. Porovnejte výsledky měření s výsledky měření optickým pyrometrem.
5. Uveďte závěry pro praxi.

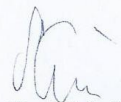
Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

1. Literaturu určí vedoucí diplomové práce

Vedoucí diplomové práce: **Prof. Ing. Jiří Kožený, CSc.**
Katedra elektroenergetiky a ekologie
Konzultant diplomové práce: **Ing. Stanislav Jiřinec**
Katedra elektroenergetiky a ekologie
Datum zadání diplomové práce: **14. října 2013**
Termín odevzdání diplomové práce: **12. května 2014**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Vlastimil Škočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

Anotace

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na měření povrchových teplot v rozsahu infračerveného a viditelného spektra záření. První kapitola vysvětluje teorii šíření tepla radiací. V této kapitole jsou popsány základní pojmy, které je třeba znát. Druhá kapitola uvádí bezdotykové měření teplot, zde je popsáno co bezdotykové měření a jeho použití. Další kapitoly popisují měření na vybraném průmyslovém zařízení pomocí termokamery. Z výsledků byly spočítány ztráty, které se porovnaly se ztrátami změřenými pyrometry. V závěru jsou uvedeny závěry pro praxi a shrnutí zjištěných výsledků.

Klíčová slova

Teplota, teploměr, bezkontaktní měření, černé těleso, teplotní senzory, emisivita

Abstract

This dissertation focuses on surface temperatures in the range of infrared and visible light radiation. The first chapter explains the theory of heat transfer by radiation. This chapter describes the basic concepts that you need to know. The second chapter shows the non-contact temperature measurement, here described as non-contact measurement and its application. Other chapters describe measurements on selected industrial devices with a thermal imager. The results were calculated losses were compared with the losses measured by the pyrometers. At the end conclusions are presented for practice and provide a summary the results.

Key words

Temperature, thermometer, non-contact measurement, black body, temperature sensors, emissivity

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 2.5.2014

Jméno příjmení

.....

Poděkování

Tímto bych ráda poděkovala vedoucímu diplomové práce panu prof. Ing. Jiřímu Koženému, CSc. za odborné vedení a užitečné podněty k vypracování. Pak bych ráda poděkovala za konzultace Ing. Stanislavu Jiřincovi, za ochotu a rady potřebné ke zdárnému dokončení této diplomové práce.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ	11
1 TEORIE SDÍLENÍ TEPLA RADIACÍ.....	13
1.1 ZÁKLADNÍ POJMY A JEJICH VYSVĚTLENÍ	13
1.1.1 Vysvětlení pojmu teplo a teplota.....	13
1.1.2 Teplotní stupnice.....	13
1.1.3 Teploměr.....	14
1.2 HISTORIE MĚŘENÍ TEPLoty	14
1.3 TEORIE SDÍLENÍ TEPLA	14
1.4 SDÍLENÍ TEPLA – RADIACE.....	16
1.4.1 Druhy sálavé energie dopadající na povrch tělesa	17
2 METODY BEZDOTYKOVÉHO MĚŘENÍ POVRCHOVÝCH TEPLot	18
2.1 INFRAČERVENÉ ZÁŘENÍ V MINULÝCH STOLETÍCH.....	18
2.2 INFRAČERVENÉ ZÁŘENÍ A JEHO POUŽITÍ	18
2.2.1 Elektromagnetické spektrum.....	19
2.2.2 Využití infračerveného záření v průmyslu	20
2.2.3 Využití infračerveného záření ve zdravotnictví.....	22
2.3 PRINCIP BEZKONTAKTNÍHO MĚŘENÍ TEPLoty	22
2.4 INFRAČERVENÉ TEPLOMĚRY.....	24
2.4.1 Konstruktivní schéma IR teploměru.....	24
2.5 ROZDĚLENÍ TEPLOMĚRŮ PRO BEZDOTYKOVÉ MĚŘENÍ TEPLoty.....	24
2.5.1 Pyrometry	25
2.5.2 Zobrazovací metody.....	26
2.6 DALŠÍ MOŽNÉ DĚLENÍ INFRAČERVENÝCH TEPLOMĚRŮ	27
2.7 ZÁKLADNÍ TYPY TEPLOMĚRŮ	27
2.7.1 Absolutně černé těleso	28
2.7.2 Kalibrace infračervených teploměrů	28
2.7.3 Emisivita	29
2.8 ZÁKONY ZÁŘENÍ	31
• Planckův zákon	31
• Planckův zákon vyjádřený jako tok fotonů	32
• Wienův zákon	32
• Wienův zákon posuvu.....	32
• Planckův zákon vyjádřený jako tok fotonů Chyba! Záložka není definována.	
• Stefan-Boltzmannův zákon.....	33
• Lambertův zákon.....	33
• Kirhhofův zákon.....	33
3 VÝPOČET TEPELNÝCH ZTRÁT NA DANÉM PRŮMYSLOVÉM OBJEKTU ...	35

3.1	PARAMETRY PECE	35
3.1.1	<i>Zapojení pece</i>	36
3.1.2	<i>Skladba materiálů</i>	37
3.2	POUŽITÉ MĚŘICÍ PŘÍSTROJE, POPIS PROVEDENÉHO MĚŘENÍ.....	38
3.3	MATERIÁLY POTŘEBNÉ K VÝPOČTU ZTRÁT	40
3.3.1	<i>AlsitraMOD 1400/200</i>	40
3.3.2	<i>Materiál AlsitraMat 1300/128</i>	41
3.3.3	<i>Cihly Porrath FL 24-10</i>	41
3.3.4	<i>Materiál Kerform KVF 121</i>	42
3.3.5	<i>Nízkocementový beton CARATH 1450 – LC</i>	42
3.3.6	<i>Izolační beton CARATH FL – 1250</i>	43
3.3.7	<i>Kalciumsilikátové desky CAS 1000</i>	44
3.3.8	<i>Desky z minerální vlny P 750-120</i>	44
3.3.9	<i>Tvarovka ze žárobetonu Lancast 145 – BT</i>	45
3.3.10	<i>Materiál KPS081/900</i>	46
3.3.11	<i>Šamotové cihly</i>	46
3.3.12	<i>Konstrukční ocel</i>	47
3.3.13	<i>Vzduch</i>	48
3.4	VÝPOČET TEPELNÝCH ZTRÁT PECE	49
3.4.1	<i>Strop</i>	49
3.4.2	<i>Boční stěny</i>	52
3.4.3	<i>Levá boční stěna</i>	53
3.4.4	<i>Pravá boční stěna</i>	63
3.4.5	<i>Dno</i>	65
3.4.6	<i>Dveře</i>	69
3.5	CELKOVÉ ZTRÁTY PECE.....	72
•	<i>Konečné tepelné ztráty pece</i>	74
•	<i>Konečné tepelné ztráty pece</i>	75
4	POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ TERMOKAMEROU S VÝSLEDKY MĚŘENÍ OPTICKÝMI PYROMETRY	77
5	ZÁVĚRY PRO PRAXI	80
	PŘÍLOHY	81
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	83

Úvod

Významnou roli má infračervené záření v mnoha oblastech. Usnadňuje práci například ve stavebnictví, lékařství, strojírenství i v rozvodech elektrické energie atd. Bezkontaktní měření využívají pyrometry a zobrazovací systémy. Princip bezkontaktního měření spočívá v tom, že se zamíří na objekt vysílající infračervené záření. Přijme ho senzor a pak se zobrazí teplota.

Využití termovize má nezastupitelný účel jak hlediska finančního, tak z funkčního. Z toho vyplývá aplikace v těžko dostupných místech, kde nemohou být použity ostatní způsoby měření teploty.

Principem termokamery je využití infračerveného záření a následné zobrazení teplotního rozložení na povrchu pozorovaných předmětů. Termovize se používá ke zjištění ztrát. Její předností je, že nezkrsluje naměřené hodnoty na rozdíl od kontaktního měření. Další výhody jsou uvedeny dále v práci.

Tato diplomová práce se zabývá využitím infračerveného záření. Cílem byl výpočet tepelných ztrát na základě změřených teplot na objektu. Měření bylo provedeno, jak termokamerou, tak pomocí dvou pyrometrů. Následně byly porovnány výsledky.

Hlavní cíle této diplomové práce jsou:

- Uvést teorii sdílení tepla radiací
- Popsat metody bezdotykového měření povrchových teplot
- Provést měření a následné spočtení tepelných ztrát na daném průmyslovém zařízení
- Porovnat výsledky měření s výsledky měření optickým pyrometrem
- Stanovit závěry pro praxi

Seznam symbolů a zkratk

$C [W.m^{-2}.K^{-4}]$	sálavost
$M_e [W.m^{-2}]$	intenzita vyzařování
$T [K]$	teplota zdroje záření
$E [W.m^{-2}]$	intenzita záření
C_{ef}	efektivní sálavost tepla
C_1	vlastní sálavé teplo dáno teplotou a fyzikálními vlastnostmi tělesa
C_2	dopadající sálavé teplo dáno dopadem energie od jiných těles
$(1-\zeta) \cdot C_2$	odražené sálavé teplo
$\zeta \cdot C_2$	pohlcené sálavé teplo
λ	vlnová délka
$\nu [Hz]$	frekvence
$H_m(T)$	energie vyzařovaná měřeným objektem o teplotě T
$H_C(T)$	energie vyzařovaná černým tělesem o teplotě T
$M_{0\lambda}$	spektrální hustota vyzařování černého tělesa
$L_{0\lambda}$	spektrální hustota záře černého tělesa
c	rychlost světla
k	Boltzmannova konstanta
h	Planckova konstanta
c_1	první vyzařovací konstanta
c_2	druhá vyzařovací konstanta
$Q [foton \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}]$	spektrální měrný tok fotonů
I_n	maximální hodnota zářivosti ve směru kolmice
$\vartheta_{postř} [^{\circ}C]$	střední hodnota povrchových teplot
$\vartheta_s [^{\circ}C]$	střední hodnota teploty mezi střední hodnotou povrchových hodnot teplot a vnitřní teplotou peci
$\vartheta_p [^{\circ}C]$	provozní teplota pece
$\lambda, a [W/mK]$	tepelná vodivost materiálu
$\lambda_{ekv} [W/mK]$	ekvivalentní vodivost vrstvy
$\alpha_k [W/m^2K]$	sdílení tepla konvekcí vzhůru pro vodorovnou stěnu
$\alpha_r [W/m^2K]$	součinitel prostupu tepla radiací

α [W/m ² K]	součinitel prostupu tepla radiací i konvekcí
q_{st} [W/m ² K]	výpočet ztrát tepla konvekcí, vedením a radiací stropu
q_{slh} [W/m ²]	výpočet ztrát tepla konvekcí, vedením a radiací pro levou horní část boční stěny
q_{sls} [W/m ²]	výpočet ztrát tepla konvekcí, vedením a radiací pro levou spodní část boční stěny
q_{sph} [W/m ²]	výpočet ztrát tepla konvekcí, vedením a radiací pro pravou horní část boční stěny
q_{sps} [W/m ²]	výpočet ztrát tepla konvekcí, vedením a radiací pro pravou spodní část boční stěny
q_{zd} [W/m ² K]	výpočet ztrát tepla konvekcí, vedením a radiací pro zavřené dveře
q_{od} [W/m ² K]	výpočet ztrát tepla konvekcí, vedením a radiací pro otevřené dveře
q_d [W/m ²]	celkové množství ztrát dnem
q_{dvp} [W/m ²]	množství tepla vedením a prouděním
q_{rd} [W/m ²]	radiace mezi podpěrnou konstrukcí a podlahou
F [m ²]	plochy
$q_{celk z}$ [W/m ² K]	celkové ztráty
ε [-]	součinitel emisivity tělesa
$\sigma_{\check{c}}$ [-]	Stefanovo-Boltzmannova konstanta
θ_{po} [K]	termodynamická teplota podpěrné konstrukce
$\theta_{postř1}$ [K]	termodynamická teplota středních povrchových hodnot teploty
θ_{ok} [K]	termodynamická teplota okolí pece
θ [°C]	teploty materiálů
θ_{po} [°C]	odhadnutá teplota
θ_{podl} [°C]	odhadnutá teplota sálání do místa pod pecí
d [m]	tloušťka materiálu
A [m ²]	plocha

1 Teorie sdílení tepla radiací

1.1 Základní pojmy a jejich vysvětlení

Tato kapitola obsahuje základní pojmy, jako je teplo a teplota, které jsou vysvětleny. Dále obsahuje pojem teplotní stupnice, kde jsou uvedeny známé i méně používané teplotní stupnice. Obsahuje pojem teploměr a rozdělení teploměrů, které byly následně zapsány do tabulky pro přehlednost. Krátce je popsána historie měření teploty. Poslední kapitola se zabývá teorií sdílení tepla radiací a popisuje způsoby šíření tepla.

1.1.1 Vysvětlení pojmu teplo a teplota

Důležité je nezaměňovat pojmy teplo a teplota. Teplota patří mezi fyzikální veličiny a popisuje stav soustavy. Měří se nepřímo. To znamená, že se měří pomocí jiných veličin. Jednotkou teploty mohou být C° , F, K.

Teplo se dá charakterizovat jako pohyb molekul a je vztahuje se k určitému ději. Jednotka tepla je Joule.

[1]

1.1.2 Teplotní stupnice

Mezi nejznámější teplotní stupnice patří:

- **Celsiova** - stupnice je rozdělena na 100 dílků mezi bodem tání ledu a bodem varu. Bodu tání ledu přitom odpovídá $0 C^{\circ}$ a bodu varu vody $100 C^{\circ}$.
- **Fahrenheitova** - stav mrznutí byl přiřazen hodnotě $32^{\circ}F$. Teplota varu vody byla stanovena na $212^{\circ}F$. Z toho vyplývá, že mezi oběma hodnotami je 180 dílků na stupnici
- **Kelvinova** - počátek je v absolutní nule. Druhý základní bod této stupnice je teplota trojného bodu vody, jehož velikost je $273,16 K$. Teplotní intervaly nebo rozdíly mohou být vyjádřeny pomocí jednotky kelvin (K).

Méně známé a používané stupnice:

- Rankinova
- Réaumurova
- Ramerova

- Newtonova
- Delisleova

Tab. 1.1 Tabulka převodů teplotní stupnice

Teplotní stupnice	Jednotka	Značka	Převod na °C	Převod ze °C
Kelvinova	kelvin	K	$t_C = T - 273,15$	$T = t_C + 273,15$
Celsiova	stupeň Celsia	°C		
Fahrenheitova	stupeň Fahrenheita	°F	$t_C = 5/9 \cdot (t_F - 32)$	$t_F = 9/5 \cdot t_C + 32$
Rankinova	stupeň Rankina	°R	$t_C = 5/9 \cdot (t_R - 273,15)$	$t_R = 9/5 \cdot t_C + 273,15$
Réamurova	stupeň Réamura	°R	$t_C = 5/4 \cdot t_R$	$t_R = 4/5 \cdot t_C$

[2]

1.1.3 Teploměr

Teploměr je zařízení, které slouží k přesnému určení teploty. Teplota se dá určit pro pevné, kapalné a plynné látky. Při měření je důležitý výběr a vhodné zabudování snímače.

[3]

1.2 Historie měření teploty

V 17. Století využil tepelné roztažnosti vzduchu k měření teploty známý astronom, fyzik a filozof Galileo Galilei. Teploměr se skládal z tenké skleněné trubičky a baňky. Princip spočíval v tom, že vytlačený vzduch ukazoval teplotu.

I další vědci se zabývali vytvořením teploměru. Problém byl v tom, že nebyli schopni vytvořit vakuum, ve kterém by nepůsobil atmosférický tlak. V 18. století byl vytvořen lihový a rtuťový teploměr fyzikem Danielem Fahrenheitem.

[1]

1.3 Teorie sdílení tepla

Teplu se dá přenést buď vedením, prouděním, zářením. Nejčastější způsob šíření je přenos tepla jejich spojením.

▪ Vedení tepla (kondukce)

Kondukce se objevuje v hmotném prostředí. Vlivem srážek částic dochází k předání energie. Při tomto způsobu předání tepla se prostředí nepohybuje. Kondukce se dá rozdělit na vedení tepla v ustáleném čili stacionárním stavu a v neustáleném čili nestacionárním stavu. Rozdíl mezi těmito stavy je ten, že pro stacionární stav se teplota s časem nemění na rozdíl od neustáleného stavu, kde se teplota s časem mění.

- Fourierův-kirchhoffův zákon v diferenciálním tvaru pro vedení tepla

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \frac{\lambda}{cs} \cdot \left[\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2} \right] \quad (1.1)$$

kde:

$$\frac{\lambda}{cs} = a \text{ [W/mK]} \text{ součinitel tepelné vodivosti}$$

- Vedení tepla pro rovinnou stěnu:

$$P = \frac{\lambda}{d} \cdot [\vartheta_1 - \vartheta_2] \cdot A \text{ [W]} \quad (1.2)$$

kde:

λ [W/mK] součinitel tepelné vodivosti

d [m] tloušťka materiálu

ϑ_1, ϑ_2 [°C] teploty materiálů

A [m²] plocha

- Vedení tepla pro válcovou stěnu

$$P = \frac{2\pi l[\vartheta_1 - \vartheta_2]}{\frac{1}{\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1}} \text{ [W]} \quad (1.3)$$

λ [W/mK] součinitel tepelné vodivosti

d [m] tloušťka materiálu

ϑ_1, ϑ_2 [°C] teploty materiálů

$S = 2\pi l$ [m²] plocha válce

- pro ustálený stav platí:

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = 0 \quad (1.4)$$

▪ Proudění tepla (konvekce)

Teplu se tímto způsobem šíří v kapalinách a plynech. Když se porovná šíření částic vedením tepla s konvekcí, tak je proudění tepla rychlejším způsobem. Teplejší částice předají teplo studeným a naopak chladnější proudí k teplejším.

$$P = \alpha \cdot [\vartheta_1 - \vartheta_2] \cdot A \text{ [W]} \quad (1.5)$$

kde:

α [W/m² K] součinitel přestupu tepla

ϑ_1, ϑ_2 [°C] teploty materiálů

A [m²] plocha

▪ Sálání tepla (radiace)

Vyskytuje se v plynech, kapalinách i v pevném prostředí. Elektromagnetické záření přenáší energii. Více podrobně je sálání tepla rozepsáno v následující kapitole Sdílení tepla – radiace.

$$P = \frac{A \cdot \sigma_{\varepsilon}}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2}} \cdot \left[\left(\frac{\theta_1}{100} \right)^4 + \left(\frac{\theta_2}{100} \right)^4 \right] \text{ [W]} \quad (1.6)$$

kde:

P [W] ztráty tepla sáláním

ε [-] součinitel emisivity tělesa

σ_{ε} [-] Stefanovo-Boltzmannova konstanta

θ_1, θ_2 [°C] teploty materiálů

A [m²] plocha

[4]

1.4 Sdílení tepla – radiace.

Elektromagnetické vlnění o různých vlnových délkách zprostředkovává přenos energie vyzařované tělesem. Záření je rozděleno do několika skupin (rentgenové, světelné, ultrafialové, atd.). Sálání nebo také radiace probíhá při infračerveném záření. Těleso ho absorbuje a změní na tepelnou energii. Emise je název pro vznik tepelného záření z tepelné energie. Přeměna záření na tepelnou energii se označuje jako absorpce. Přenos sáláním tepla

se liší od předchozích dvou způsobů přenosu tepla, tím že nepotřebuje k přenosu zprostředkující látku. Absorpce závisí na hmotnosti tělesa. Parametry zářiče ovlivňují vyzařenou energii. Emise může být ovlivněna teplotou zářiče, ale také povrchovou plochou tělesa.

1.4.1 Druhy sálavé energie dopadající na povrch tělesa

Těleso může energii vyzařovat, pohlcovat odrážet a propouštět. Sálavost je množství energie, které vysílá povrchová jednotka tělesa v časové jednotce. Značí se C .

$$C = M_e \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^{-4} [\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}] \quad (1.7)$$

M_e [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$] intenzita vyzařování

T [K] teplota zdroje záření

Intenzita záření - charakterizuje dopadající nebo odražené záření na jednotku plochy.

$$E = \frac{d\Phi}{dA} [\text{W}\cdot\text{m}^{-2}] \quad (1.8)$$

Efektivní sálavost tepla – součet vlastního sálavého tepla a odraženého sálavého tepla

$$C_{ef} = C_1 + (1 - \xi) \cdot C_2 \quad (1.9)$$

C_1 vlastní sálavé teplo, dáno teplotou a fyzikálními vlastnostmi tělesa

C_2 dopadající sálavé teplo, dáno dopadem energie od jiných těles

$(1 - \xi) \cdot C_2$ odražené sálavé teplo

$\xi \cdot C_2$ pohlcené sálavé teplo

[5]

2 Metody bezdotykového měření povrchových teplot

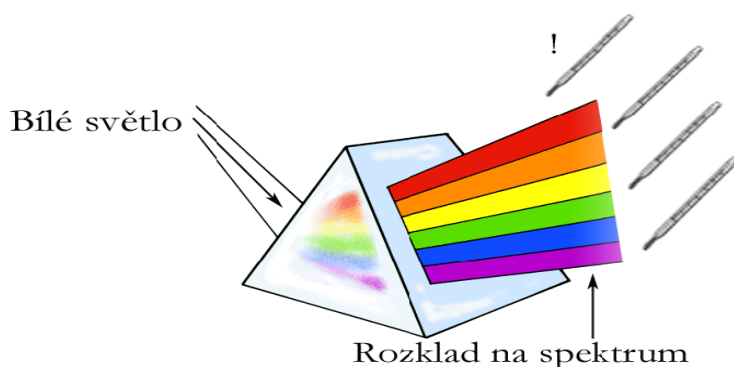
Kapitola popisuje infračervené záření a uvádí jeho použití v praxi.

2.1 Infračervené záření v minulých stoletích

Oko člověka záření nemůže zachytit, ale člověk ho může vnímat v podobě tepla. Tuto znalost využili již egyptští řemeslníci při tváření železa. Pomocí znalosti barev určili vhodnou jeho teplotu. Infračervené záření se uplatnilo k vysoušení cihel pomocí slunce. Cihly pak byly následně použity k výstavbě chrámů.

Významný anglický vědec a astronom Frederick William Herschel zkoušel pokusy s hranoly ze skla a rtuťovými teploměry. Teploměry změřil, jaká barva přísluší dané teplotě. Posouváním teploměru směrem k oblasti červeného spektra zjistil, že se teplota zvyšuje. Napadla ho myšlenka posunout teploměr až za hranici červeného spektra. Očekával, že tepelná část spektra zmizí. Nestalo se tak, ba naopak, teplota vzrostla. Spektrum zkoumali i další vědci. Fyzik Joseph von Fraunhofer přišel na to, že tmavé čáry mohou přerušit sluneční spektrum. Stejnou otázku řešil i James Clark Maxwell.

[6]



Obr. 2.1 Rozklad světla hranolem [7]

2.2 Infračervené záření a jeho použití

Kapitola popisuje elektromagnetické spektrum, jehož součástí je infračervené záření. Záření má široké uplatnění jak v lékařství, tak i v průmyslu. V lékařství využívá záření bezkontaktní teploměr pro zjištění teploty pacienta, regeneraci a rehabilitaci a dalších oborů. Průmysl ho může využít při: kontrole potravin, požární bezpečnosti, strojírenství, elektrotechnice atd. (viz popsáno dále)

2.2.1 Elektromagnetické spektrum

Spektrum se získá seřazením jednotlivých vlnových délek, tzn. od nejkratších po nejdelší. Parametry určující elektromagnetické vlnění jsou vlnová délka a frekvence. Vztah popisující elektromagnetické záření je tedy:

$$v = \frac{c}{\lambda} \quad (2.1)$$

λ vlnová délka

c rychlost šíření ve vakuu (rovná se rychlosti světla), $c = 299792458 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} \approx 3\cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

v frekvence

[8]

Rozdělení vlnění

1) **Rádiové vlny** - frekvenční nebo amplitudová modulace je používá k přenosu dat. Délka vln je od několika km do mm.

2) **Mikrovlny** - elektromagnetické vlny, které mohou být například využity pro bezdrátové propojení počítačů nebo k ohřevu pokrmů, atd. Délka vln je od 10^{-2} do 10^{-4} m.

3) **Infračervené záření** – teplota a velikost tělesa určuje množství vyzářeného záření. Souhrn teplot určující barvu záření:

500 °C slabě červená

900 °C oranžová

600 °C jasně červená

1000 °C žlutá

700 °C tmavě červená

1100 °C světle žlutá

800 °C červenooranžová

1200 °C bílá

4) **Viditelné světlo** – lidské oko je schopno toto vlnění rozpoznat. Délka vln je od 390 nm do 790 nm.

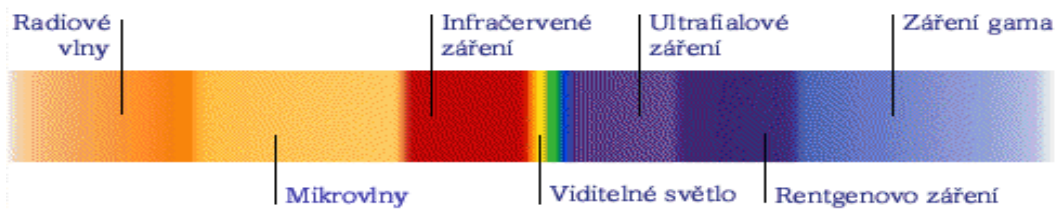
5) **UV záření** – rozděluje se na UVA (390 nm – 320 nm), UVB (320 nm – 280 nm), UVC (280 nm – 10 nm). Délka vln je od několika 400 nm do 10 nm. Zdrojem může být například slunce nebo výbojky plněné párami rtuti.

6) **Rentgenové záření** – záření je schopno pronikat skrz předměty, které mají neprůhlednou

strukturu. Dopad letících elektronů na kladně nabitou elektrodu způsobí, že vznikne rentgenové záření. Délka vln je od 10 nm do 1 pm.

7) **Gama záření** – záření má širokou oblast použití, například v medicíně (při léčení rakoviny), nebo v potravinářském průmyslu při zajišťování čerstvosti potravin.

[9,10]



Obr. 2.2 Elektromagnetické spektrum [11]

2.2.2 Využití infračerveného záření v průmyslu

Využití teplotních snímačů v průmyslu se objevuje v celé škále.

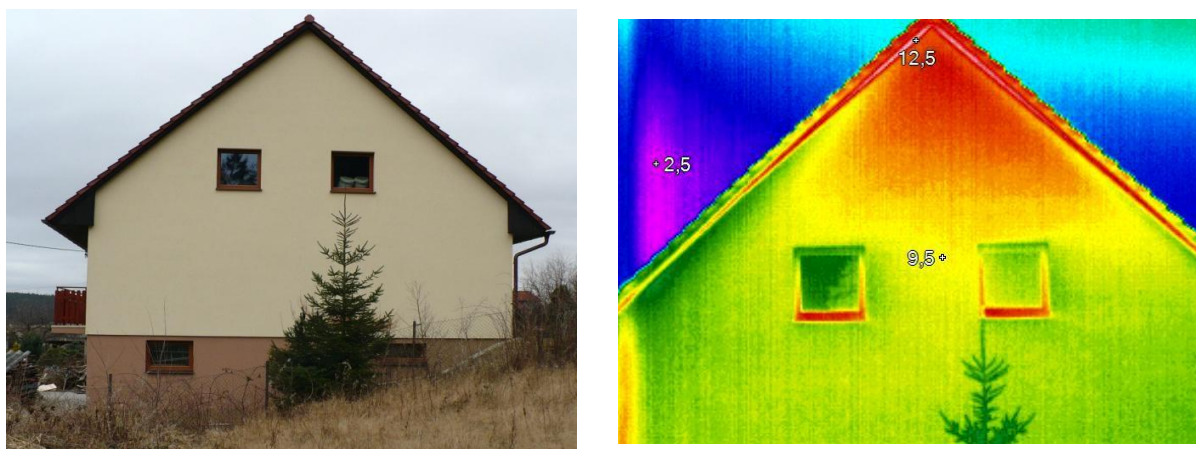
Využit se tedy dají pro:

- **Automobilový průmysl** – během tepelného formování částí exteriéru vozidel je kladen požadavek na dodržení požadované teploty. Při vytváření povrchu interiéru vozidla se hlídá teplota, která by se měla pohybovat kolem 120°C. Ruční teploměry se využijí při kontrole a rychlému zjištění vad automobilu při prohlídce.
- **Plastikářský průmysl** – pro zajištění stále stejně vysoké teploty se použijí termokamery při tepelném formování folií. Dále se dají infrakamery použít pro měření při výrobě výlisku. Forma, která se používá na výrobu výlisku, se musí zkontrolovat. Všude by měla mít stejné teploty. To znamená, že v rizikových místech nesmí mít vyšší či nižší teplotu. Jinak by nebyl výrobek správně vyroben. Další možné použití termokamery je při výrobě PET lahví.
- **Zdravotnický průmysl** – pro opatření kvality a přesnosti se použijí měřící pyrometry při výrobě injekčních stříkaček. Teplota se musí dodržet při formování ochran na ústa. Tyto chrániče používají například hokejisté, protože potřebují chránit si svůj chrup. Dalším

využitím pyrometrů je při sterilizaci skleněných lahví.

- **Metalurgický průmysl** – při válcování se použije rychlý a poměrový pyrometr kvůli dodržení požadavků kladených na výrobu. Další využití pyrometrů je u tváření. Kdy se kontroluje teplota po tvarování a před skladováním. Pro požadované složení při indukčním kalení se aplikuje pyrometr pro neustálou kontrolu procesu.
- **Papírenský a textilní průmysl** – záření se využije při kontrole sušení textilií, mikrovlnného sušení papíru.
- **Solární technika a polovodiče** – infrakamery se aplikují k monitoringu jakosti solárních panelů. Kladeny jsou požadavky na teplotu při letování na solárních panelech. Sleduje se povrch křemíku poblíž místa, kde probíhá letování. Při montáži plošných spojů se kontroluje účelnost pomocí bezkontaktního měření teploty.
- **Údržba** – preventivní kontrola může ochránit elektrická či mechanická zařízení před poškozením. Závady se odhalí pomocí infračervených teploměřů.
- **Stavebnictví** – ke zjištění úniků tepla se používají termokamery. Tepelné ztráty jsou viditelné pomocí termogramu. Termogram ukazuje rozložení teplot pomocí barevné škály a tedy ztráty objektu.

[12]

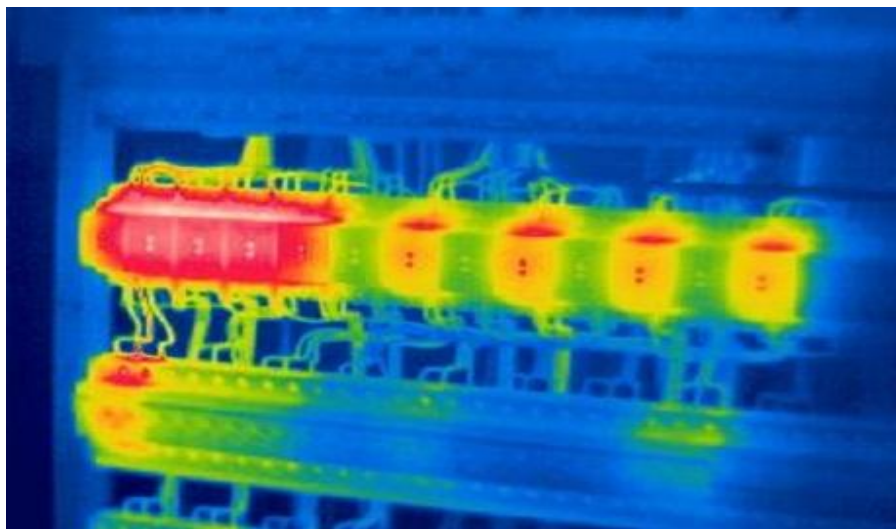


Obr. 2.3 Rodinný dům a infračervený snímek pořízený

- **Elektrotechnika** – termokamera slouží pro včasné zjištění závady, jedině tak se dá zajistit

dodávka elektřiny bez přerušení.

[12]



Obr. 2.4 Infračervený snímek jisticích prvků elektrického rozvaděče [13]

2.2.3 Využití infračerveného záření ve zdravotnictví

V lékařství se infračervené záření využívá v termografii. Patří mezi diagnostické metody. Termografie slouží například k nalezení zánětů či sledování hojení po úraze, které se projevují vyšší teplotou než zdravé tkáně. Přínosem je i pro obory endokrinologie (pro zjišťování nemocí štítné žlázy), stomatologie (zjištění zánětů dutiny ústní), plastické chirurgii (určení jak budou vypadat jizvy po zahojení popálenin), atd. Hlavní výhody metody jsou, že je bezbolestná, bezkontaktní a bezriziková. [14]

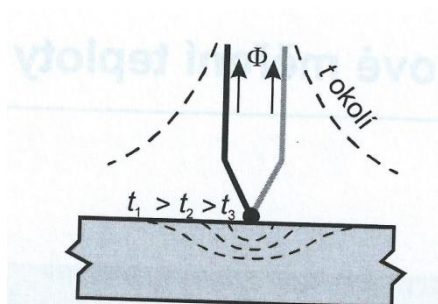
2.3 Princip bezkontaktního měření teploty

Princip bezkontaktního měření teploty spočívá v tom, že měřený objekt vysílá elektromagnetické záření. Senzor teploměru ho přijme a tak se zjistí teplota daného objektu.

Při výběru teploměru je důležité nezanedbat zorný úhel (závisí na vzdálenosti a průměru objektu), typ měřeného objektu, spektrální odezvu – pásmo, teplotní rozsah a montáž (provedení přenosné či pevné).

Rozdíl mezi dotykovým a bezdotykovým měřením je viditelný na obr. 2.5. Zářivý tok způsobí v místě styku měřeného tělesa deformaci izoterm. Zároveň vzniká teplotní rozdíl

mezi snímačem teploty a tělesem.



Obr. 2.5 Izotermy teploty v tělese a okolí při měření dotykovým snímačem

Výhody

- **Rychlost** – díky této výhodě se dá změřit více objektů
- **Měření teplot pohybujících se objektů** – příkladem mohou být dopravníky či rotující součásti
- **Měření teploty z bezpečné vzdálenosti** – měření probíhá v nebezpečných nebo nesnadno dostupných míst. Příkladem mohou být elektrická zařízení, součásti pod napětím, atd.
- **Měření velmi rychlých změn teplot**
- **Měření velmi vysokých teplot** – používají se u teplot překračujících 1300 °C.
- **Zanedbatelný vliv měřicí techniky na měřený objekt** – měření plastů a dřeva je přesné bez zkreslení.
- **Nehrozí kontaminace nebo mechanické účinky na povrch měřeného objektu** – této výhody lze využít při měření lakovaných nebo měkkých povrchů (v potravinářství)

Nevýhody

- Nutná znalost emisivity povrchu tělesa
- Nutná znalost správné hodnoty prostupnosti prostředí mezi čidlem a objektem
- Nutná znalost úprava odraženého záření z okolního prostředí na měřený objekt

Zásady pro správné změření hodnot

- **Optická viditelnost měřeného objektu pro bezdotykový teploměr** – přítomnost prachu či kouře při měření může ovlivnit přesnost měření. U některých těles může být změřena pouze povrchová teplota, nikoliv vnitřní.
- **Pozornost by se měla věnovat optice čidla** – ochrana před prachem a kondenzujícími kapalinami.

- **Nutnost změření pouze povrchové teploty** – pozornost by se měla věnovat různé emisivitě materiálů, která je odlišná.

[15,16]

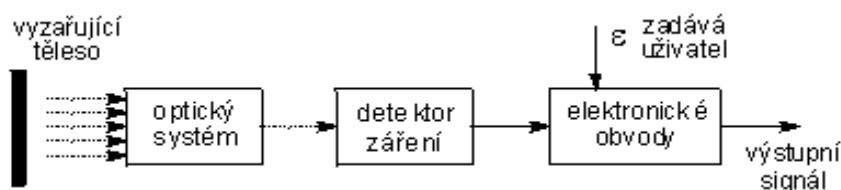
2.4 Infračervené teploměry

2.4.1 Konstrukční schéma IR teploměru

Měřený objekt vydává tepelné záření, které je zachyceno optickým systémem a centralizuje ho na čidlo. Optický systém je tvořen zrcadly a čočkami. Čidlem může být baterie termočlánků, bolometr (fóliový odporový teploměr) nebo termistor.

Infračervené záření, které dopadá na snímač je přeměněno na elektrický signál. Povrch čidla bývá začerněn. Předpoklad pro termočlánek a bolometr je nezávislost přijímače záření a optického systému na vlnové délce. Důležité při výběru optiky je měřicí rozsah. Rozsah se pohybuje nejčastěji mezi hodnotami (600 až 2 000) °C a (0 až 1 000) °C. Zrcadla s kovovým povrchem se používají u nižších teplot.

[17]



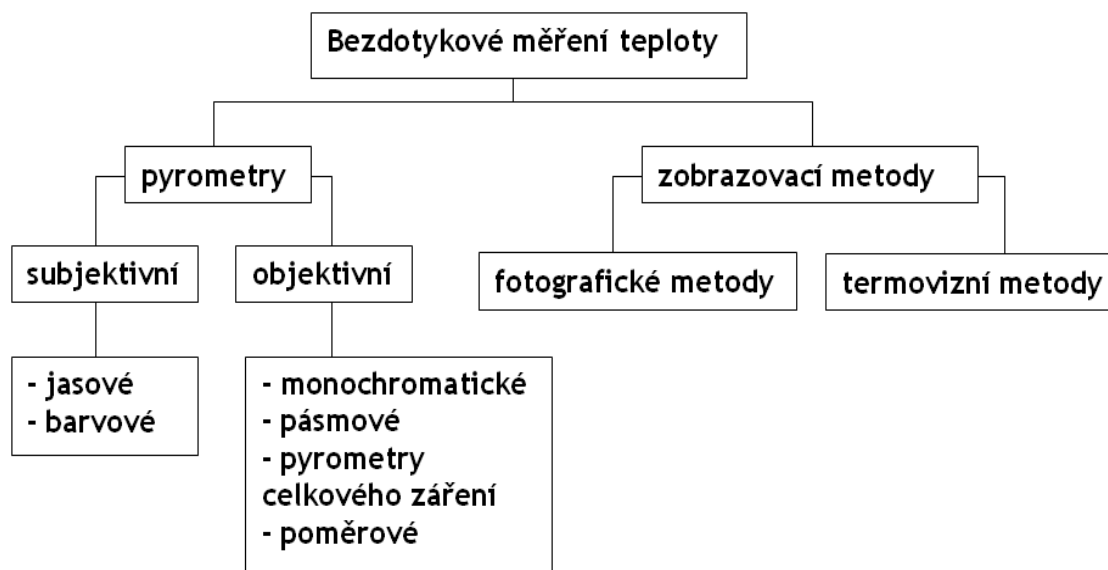
Obr. 2.6 Konstrukční schéma IR teploměru [16]

2.5 Rozdělení teploměrů pro bezdotykové měření teploty

Bezdotykové měření může být provedeno buď pomocí pyrometrů, nebo zobrazovacích systémů. Měření teplot s pyrometry může být prováděno od -50 do 3500 °C. Pyrometr obsahuje také optický systém a detektory infračerveného záření.

Pyrometry se dají rozdělit na subjektivní a objektivní. Tyto dvě skupiny se člení ještě na několik dalších podskupin.

Zobrazovací metody se dělí na fotografické a termovizní metody.



Obr. 2.7 Dělení bezdotykového měření teploty [18]

2.5.1 Pyrometry

▪ Subjektivní (optické) pyrometry

Dříve se používaly velmi často, nyní je nahradily objektivní pyrometry. Teplota se zjistí tak, že se záření porovná se srovnávacím zářením. Srovnání se provádí lidským okem.

a) Jasové – měřené těleso vydává záření a to se porovná se zářením umělého zdroje.

Pyrometry jsou schopny pracovat na jedné vlnové délce $0,65 \mu\text{m}$ – odpovídá červené barvě světla. Jsou schopny měřit teplotu do $1500 \text{ }^\circ\text{C}$. Pokud se měří vyšší teploty, přidává se šedý filtr. Použití jasových pyrometrů se dá uplatnit při měření například taveniny v peci.

b) Barvové – na rozdíl od jasových pyrometrů využívají barvové nejčastěji vlnové délky zelené a červené barvy. Dříve než projde záření měřeným tělesem, tak projde dvěma barevnými klíny. Pokud se posune klín, tak se změní jeho intenzita. Se změnou intenzity se mění i teplota.

▪ Objektivní pyrometry

Součástí pyrometrů jsou detektory, které určí záření.

a) Monochromatické – jsou téměř stejné jako jasové, ale vyhodnocení se neprovádí okem,

ale elektronickým detektorem. Jejich nevýhoda je že pokud má být provedeno s nimi měření, tak se musí provést v úzkém rozsahu vlnových délek. Má-li být provedeno měření s použitím kratších vlnových délek, změří se vyšší teploty. Naopak při měření s použitím delších vlnových délek změří pyrometry nižší teploty. Vlnové délky jsou ovlivněny spektrální propustností filtru, optiky a také záleží na citlivosti čidla.

b) Pásmové – výhoda je v tom, že pracují v širších vlnových délkách. Šířka oblasti závisí na tom, jaký optický systém a detektor je součástí pyrometru. Tepelné záření je přeměněno na elektrický signál detektorem. Na obrazovce pyrometru se zobrazí data z měření.

c) Pyrometry celkového záření (radiační) – funkce optiky je taková že tepelné záření pošle na detektor. Termočlánek nebo bolometr tvoří detektor. Mikroprocesorem řízené obvody mají za úkol vyhodnotit výsledky měření. Pyrometry mohou být využity například pro měření teploty peci.

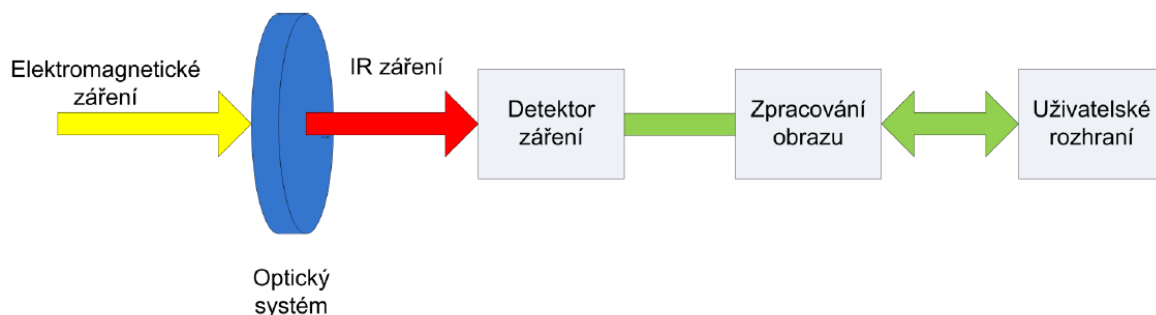
d) Poměrové pyrometry – skládají se z filtru, optického systému a detektoru záření. Těleso vyzařuje záření. Optický systém propustí záření na filtr, kde se záření rozloží. Filtrem pak prochází dvě složky záření - červené a zelené. Detektor záření přemění tyto dvě barevné složky na hodnoty výstupní elektrické veličiny. Závěrem je vztah těchto dvou výstupních hodnot.

2.5.2 Zobrazovací metody

Zobrazovací metody obsahují stejné detektory a optické systémy jako pyrometry. Přístroje se využijí například ke zjištění možných tepelných ztrát u pece (měří se obvodový plášť a její vyzdívka). Výhodná je aplikace na nepříznivém místě, kde by jiné metody selhaly.

- **Fotometrie** – princip spočívá v tom, že se fotoaparát umístí před objekt, který se bude měřit. Dříve než záření projde fotoaparátem, musí projít infračerveným filtrem. Filtr zajistí oddělení viditelného záření. Výsledek spočívá v tom, že fotografický materiál se použije pro určení infračerveného záření. Teplota je úměrná zčernání materiálu. Z toho vyplývá, že čím je teplota vyšší, tím je zčernání materiálu větší.

- **Termovizní metody** – elektromagnetické záření vysílané tělesem přemění optický systém na infračervené záření. Detektor ho zachytí a následně se zpracuje. Pak se zobrazí na obrazovce výsledek - tedy snímek (termogram.)



Obr. 2.8 Konstrukce infračervené kamery [6]

rozdělení

- kamery s mechanickým rozkladem obrazu
- kamery s elektronickým rozkladem obrazu

2.6 Další možné dělení infračervených teploměrů

- Ruční přenosné infračervené teploměry
- Kapesní infračervené teploměry
- Infračervené termočlánky
- Infračervené termočlánky/převodníky s pevnou montáží
- Dvoubarevné teploměry

[6]

2.7 Základní typy teploměrů

V této kapitole jsou uvedeny různé druhy teploměrů, které se liší v několika hlediscích jako princip, rozsah, typ. Pro přehlednost jsou teploměry zaznamenány v tabulce.

- **Dotykové** – teplota se měří pomocí přiložení teploměru k měřenému tělesu. Možnosti použití jsou k měření teploty povrchu zdí, kontrola teplot povrchu potrubních rozvodů, snímání teplot povrchů při výrobě například technologických strojů apod.

- **Dilatační** – teplota ovlivňuje délku nebo objem měřeného tělesa.
- **Elektrické** – používají se v průmyslu (automatizační technice) z toho důvodu, aby nedošlo ke zničení nebo částečnému poškození dané výroby.
- **Speciální** – používají se k měření teplot na povrchu těles, pro jednorázová měření, nevhodné je použití teploměrů jako čidel v řídicích obvodech.

[3,19]

Tab. 2.1 Tabulka typu teploměrů [20]

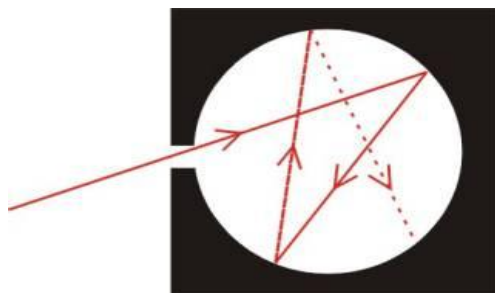
Skupina teploměrů	Typ teploměru	Fyzikální princip	Teplotní rozsah [°C]
Dilatační teploměry	plynový tenzní kapalinový kovový	změna tlaku změna tenze par změna objemu délková roztažnost	-5 +500 -40 +400 -200 +750 0 +900
Elektrické teploměry	termoelektrické odporové kovové odporové polovodičové diodové	termoelektrické jev změna elektrického odporu změna prahového napětí	-200 +1 700 -250 +1 000 -200 +400
Speciální teploměry	teploměrná tělíska teploměrné barvy kapalně krystaly	bod tání změna barvy změna orientace	+100 +1 300 +20 +1 000 0 +300

2.7.1 Absolutně černé těleso

Vlastnosti absolutně černého tělesa jsou dokonalá pohltivost při různém úhlu a vyzařování při maximálním dopadu záření jakéhokoliv materiálu.

Pro jednoduchou názornost si lze těleso představit jako dutou kostku. Stěny uvnitř jsou černé a matné. Z toho vyplývá, že záření projde skrz dutinu dovnitř, ale nevyjde zpět.

[21]



Obr. 2.9 Absolutně černé těleso [21]

2.7.2 Kalibrace infračervených teploměrů

Výrobce provádí kalibraci z důvodu přesnosti u nových infračervených teploměrů.

Dále se kalibrace provádí i během užívání teploměru, aby hodnoty získané z měření teploměru byly přesné. V průmyslu se dá kalibrovat třemi způsoby.

První způsob je kalibrace pomocí absolutně černého tělesa s danou emisivitou. Materiál využit k výrobě dutiny tělesa je z kovu. Tvar dutiny může být válcový, kuželový a kulový. Kovový povrch uvnitř je potřen černou barvou. Emisivita dutiny se pohybuje mezi hodnotami 0,98 až 0,95. Regulátor teploty zajišťuje teplotní požadavky kladené na dutinu. Kalibrace se provádí, tak že se teploměr zaměří na dutinu tělesa a počká se na ustálení údajů. Termočlánek je použit jako teplotní reference.

Druhý způsob kalibrace je použití kalibrovaných wolframových lamp pro přesnější měření. Lamy pracují na vyšších teplotách (800°C – 2300 °C) než jsou schopny pracovat dutiny absolutně černého tělesa.

Poslední způsob kalibrace spočívá v použití referenčního pyrometru. Pyrometr je přesně kalibrován, dle něj se tedy kalibruje i daný přístroj. Kalibruje se tak dlouho, dokud není výstup přístroje totožný s výstupem pyrometru.

Na základě kalibrace obdrží teploměr certifikát. Kalibraci mohou provádět jen odborná pracoviště.



Obr. 2.10 Kalibrace bezdotykového teploměru [22]

2.7.3 Emisivita

Definice emisivity je: Emisivita je mírou schopnosti daného předmětu vyzařovat infračervenou energii. Je to poměr vyzářené energie daným objektem při určité teplotě k energii, kterou vyzáří černé těleso při stejné teplotě. Emisivita černého tělesa je 1,0. U materiálu s vyšší emisivitou není problém s měřením, lze tak získat přesný výsledek měření pomocí infračervených teploměrů. U lesklých materiálů nemusí být měření přesné, protože je ovlivněno reflexí v infračervené zóně. Příkladem takovýchto materiálů může být hliník.

$$\varepsilon = \frac{H_m(T)}{H_c(T)} \quad (2.2)$$

ε emisivita

$H_m(T)$ energie vyzařovaná měřeným objektem o teplotě T

$H_c(T)$ energie vyzařovaná černým tělesem o teplotě T

Emisivita povrchu záleží na:

- druhu materiálu
- stupni oxidace povrchu materiálu
- opracovanosti a drsnosti povrchu
- efektivní vlnové délce pyrometru
- teplotě materiálu

Určení emisivity

Postup pro určení emisivity je vyhledání hodnot v tabulkách materiálů (materiálu přísluší určité vlnové délky, dle nich se volí odpovídající měřicí přístroj). Materiály s lesklým povrchem mohou změnit hodnoty emisivity.

- Materiál, který má být změřen, se ohřeje na požadovanou teplotu. Teplota musí mít takový rozsah, aby mohla být změřena infračerveným teploměrem. Velikost emisivity musí být shodná s naměřenou teplotou.
- Na vzorek se připevní zvláštní plastová samolepka. Pak se na objekt zamíří IR a změří se jeho teplota před a po umístění nálepky. Pokud se měří teplota mimo samolepku, musí se emisivita nastavovat, dokud není shodná teplota s naměřenou. Lze aplikovat na všechna měření tohoto typu.
- Vyrobí se objekt z materiálu, kde se bude provádět měření. Do objektu se udělá díra. Nastaví se emisivita a změří se teplota uvnitř černého tělesa. Měření mimo vzorek probíhá tak, že dle teploty se nastavuje emisivita. Nyní lze hodnoty emisivity využít v podobném měření.

- Změří se teplota tělesa. To se pak natře černou barvou, jejíž emisivita se pohybuje kolem hodnoty 0,95. Pak se porovnají hodnoty a upraví se to tak, aby se údaj z teploměru shodoval.

[23]

2.8 Zákony záření

• Planckův zákon

Definuje spektrální hustotu zářivého toku dokonalého zářiče. Spektrální hustota zářivého toku dokonalého zářiče roste s teplotou.

$$M_{0\lambda} = 2\pi hc^2 \lambda^{-5} \left(e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)^{-1} = c_1 \lambda^{-5} \left(e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1 \right)^{-1} \quad (2.3)$$

Popř. pro kosinový zářič

$$L_{0\lambda} = \frac{1}{\pi \Omega_0} 2\pi hc^2 \lambda^{-5} \left(e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)^{-1} = \frac{1}{\pi \Omega_0} c_1 \lambda^{-5} \left(e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1 \right)^{-1} \quad (2.4)$$

$M_{0\lambda}$ spektrální hustota vyzařování černého tělesa

$L_{0\lambda}$ spektrální hustota záře černého tělesa

c rychlost světla

k Boltzmannova konstanta

h Planckova konstanta

c_1 první vyzařovací konstanta

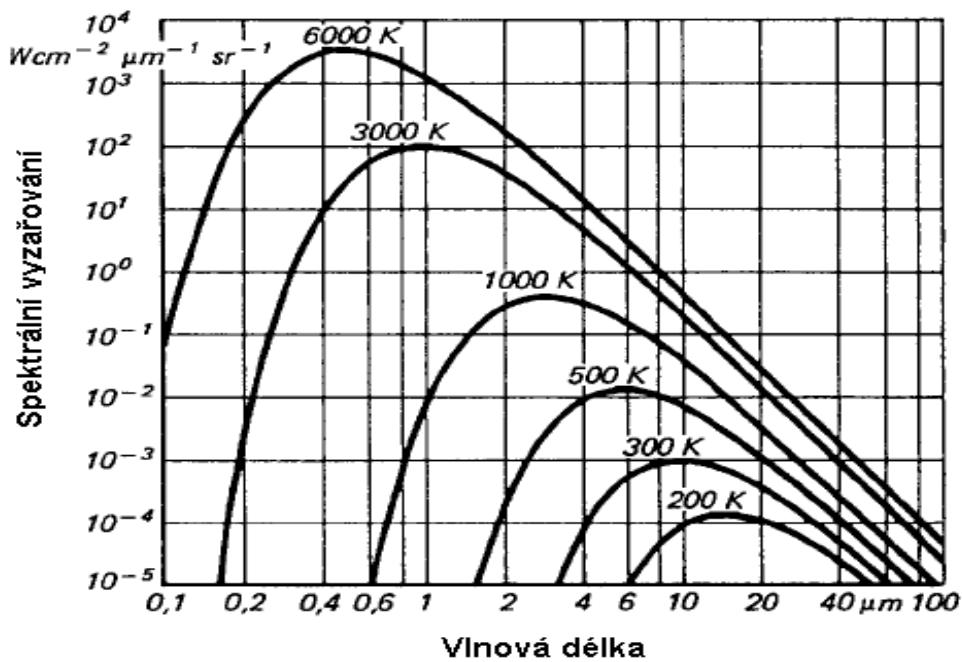
c_2 druhá vyzařovací konstanta

λ vlnová délka záření

T termodynamická teplota černého tělesa (K) $\Omega = 1sr$

Vyzařovací charakteristika

Z grafu vyplývá, že maximální intenzitě vyzařování přísluší delší vlnová délka. Toto platí pro nízké teploty. Naopak při zvýšení teploty, intenzita vyzařování patří ke krátké vlnové délce.



Obr. 2.11 Závislost vlnové délky na termodynamické teplotě černého tělesa

- **Planckův zákon vyjádřený jako tok fotonů**

Ve skutečnosti je měřen tok fotonů, ne intenzita vyzařování.

$$Q(\lambda, T) = 2\pi c \lambda^{-4} \left(e^{\frac{hc}{\lambda T}} - 1 \right)^{-1} \quad (2.5)$$

Q (foton \cdot cm $^{-2}$ \cdot s $^{-1}$) spektrální měrný tok fotonů

Přepočít na spektrální hustotu vyzařování

$$M(\lambda, T) = \frac{hc}{\lambda} Q(\lambda, T) \quad (2.6)$$

- **Wienův zákon**

Pro rozsah teplot platí $T < 3000^\circ\text{C}$ je splněno:

$$e^{\frac{c_2}{\lambda T}} \gg 1 \text{ resp. } \lambda T < 0.1 \cdot c_2 \quad (2.7)$$

- **Wienův zákon posuvu**

Změní-li se povrchová teplota objektu, tak se změní i spektrální rozložení vyzařovaného výkonu a intenzita vyzařování.

$$\lambda_{max}T = 2898\mu m \cdot K \quad (2.8)$$

- **Planckův zákon vyjádřený jako tok fotonů**

$$Q(\lambda, T) = 2\pi c \lambda^{-4} \left(e^{\frac{hc}{\lambda T}} - 1 \right)^{-1} \quad (2.9)$$

Q (foton $\cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$) spektrální měrný tok fotonů

Přepočít na spektrální hustotu vyzařování

$$M(\lambda, T) = \frac{hc}{\lambda} Q(\lambda, T) \quad (2.10)$$

- **Stefan-Boltzmannův zákon**

Vyjadřuje intenzitu vyzařování pro danou teplotu v daném rozsahu vlnových délek. Elektromagnetické záření vyzařují všechny objekty, jejichž teplota je vyšší než absolutní nula.

$$M_0 = \int_0^\infty M_{0\lambda} d\lambda = \sigma T^4 \quad (2.11)$$

Popř. pro kosinový zářič

$$L_0 = \frac{1}{\Omega_0 \pi} \sigma^4 T \quad (2.12)$$

$$\Omega = (5,670551 \pm 0,00019) \cdot 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$$

- **Lambertův zákon**

$$L_\varphi = \frac{I_n}{\Delta S} = \frac{I_\varphi}{\Delta S \cos \varphi} = \frac{I_\varphi}{\Delta S_n} = konst. \quad (2.13)$$

$$L_\varphi = I_n \cos \varphi \quad (2.14)$$

Pro kosinový zářič vyzařující do poloprostoru platí:

$$L_{0\lambda} = \frac{1}{\Omega_0 \pi} M_{0\lambda} \quad (2.15)$$

I_n maximální hodnota zářivosti ve směru kolmice

- **Kirrhofův zákon**

Platí závislost záření černého tělesa na termodynamické teplotě. Toto platí i pro spektrální hustoty veličin.

$$M = f(T) \text{ resp. } L = f(T) \quad (2.16)$$

$$\frac{M_\lambda}{\alpha_\lambda} = \frac{M_{0\lambda}}{\alpha_{0\lambda}} = M_{0\lambda} = f(T, \lambda) \quad (2.17)$$

Resp.

$$\frac{L_\lambda}{\alpha_\lambda} = \frac{L_{0\lambda}}{\alpha_{0\lambda}} = L_{0\lambda} = f(T, \lambda) \quad (2.18)$$

Kirchhoffův zákon pro černé těleso:

Jestliže těleso bude nepropustné. Neprojde skrz něj záření a nastane teplotní rovnováha. To znamená, že dopadající záření se bude rovnat vyzařovanému záření. Z Kirchhoffova zákona bude platit následující vztah.

$$\varepsilon = \alpha \quad \text{resp} \quad \varepsilon_\lambda = \alpha_\lambda \quad (2.19)$$

[16]

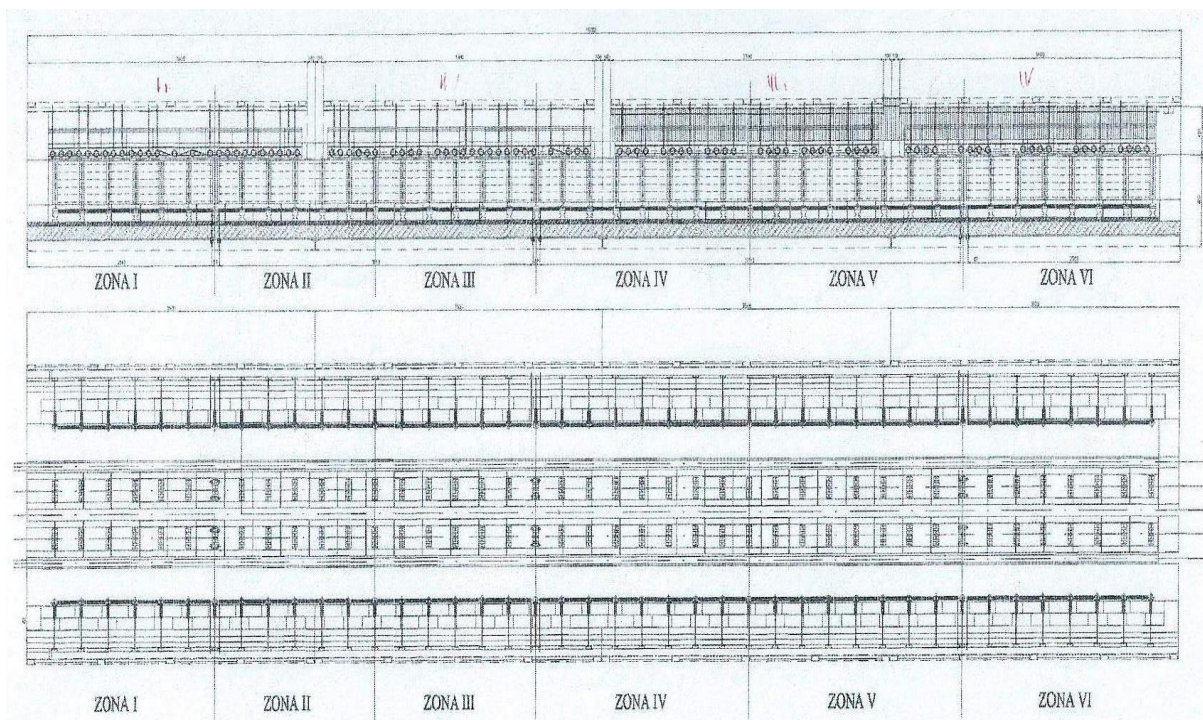
3 Výpočet tepelných ztrát na daném průmyslovém objektu

Jako průmyslový objekt byla zvolena elektrická odporová kroková pec pro ohřev ingotů před válcováním.

3.1 Parametry pece

Hlavní účel pece je ohřát ingoty na požadovanou teplotu pro další zpracování. Provozní teplota po ustálení je 1200 °C. Tento kovový hutní polotovár má váhu kolem 350 kg. V peci lze takto ohřát až 40 kusů ingotů najednou. Nejčastěji využívaný materiál ingotů je železo-niklová či měděná slitina. Po zahřátí se ingoty vyndají a přesunou. Dále se z nich vyrobí jazyky. Takto vyrobené polotovary jsou určeny pro zpracování mimo jiné v elektrotechnice, telekomunikaci, automatizaci, strojírenství nebo ve vakuové technice. Zákazníci využívají služby z výše uvedených oborů v tuzemsku i v zahraničí (EU, USA, Rusko, Taiwan, Korea, atd.).

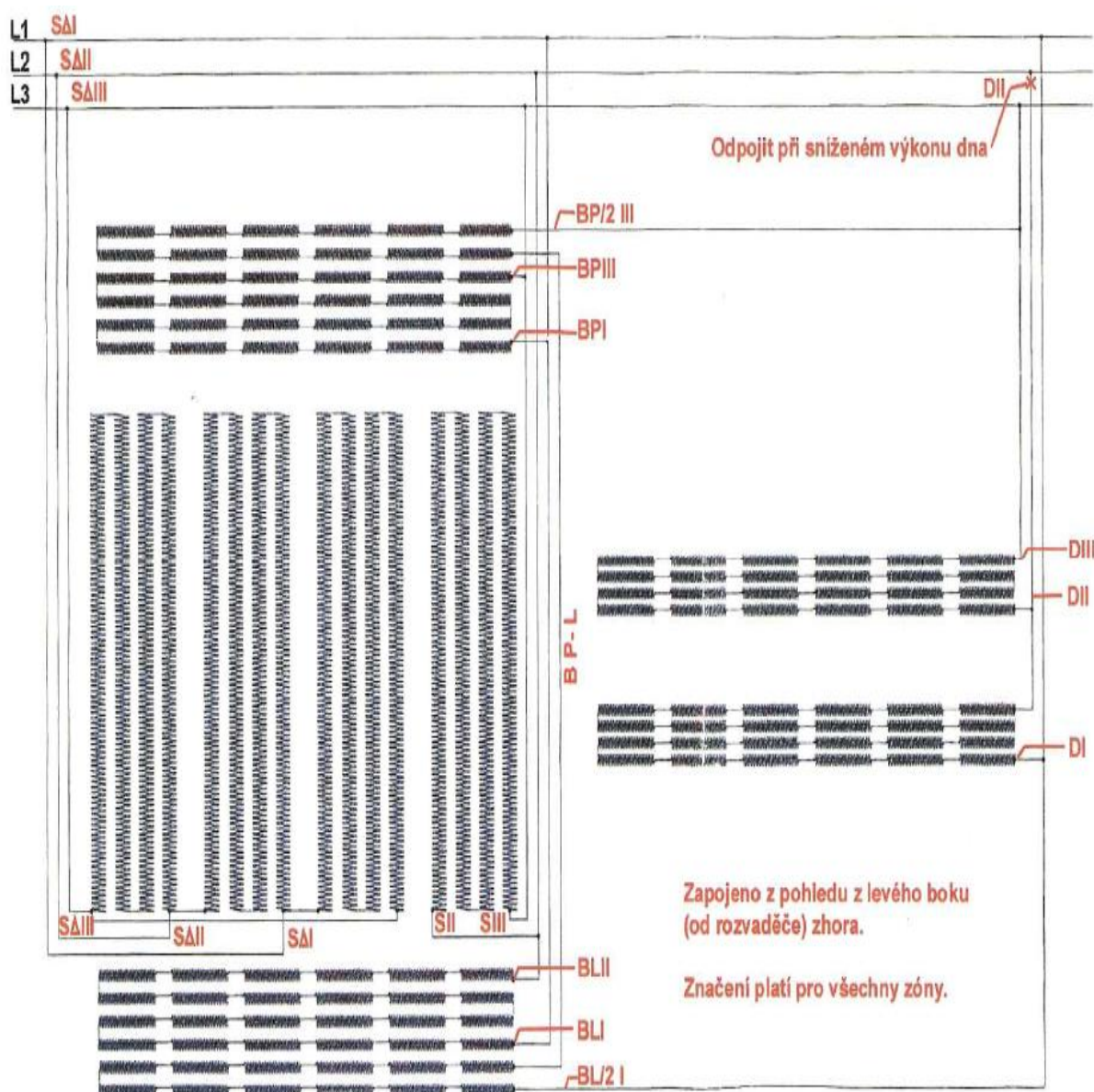
Pec se stává z několika částí. Čtyři jsou elektrické a šest je jich konstrukčních. Dva rozvaděče o celkovém příkonu 800 kW zajišťují její napájení. Odporové topné články Kanthal (průměr drátu je 4,15 mm) slouží k ohřátí ingotů na požadovanou teplotu. Články mají příkon 14,6 kW při napětí 400 V. Spodní topné články představují napájení levého a pravého boku. Tedy každá z obou stran má k dispozici polovinu příkonu, tzn. příkon 7,3 kW při 200 V.



Obr. 3.1 Rozdělení pece na zóny

3.1.1 Zapojení pece

Topné články šesti elektrických úseků jsou zapojeny do trojúhelníku. Velikost příkonu každého z nich činí 44 kW. Značení svorek pro první trojúhelník je ΔI , ΔII a ΔIII . Druhý trojúhelník má svorky článku pojmenovány jako BLI, BLII, BPI, BPIII, SII a SIII. Značení svorek pro třetí je BL/2 I, B P – L, BP/2 III, dále DI, DII a DIII. První až pátá oblast je provozována tak, že je odpojena druhá fáze na svorku DII. Příčina odpojení je z důvodu, přehřívání topných článků dna. Na šestou zónu nejsou kladeny žádné speciální požadavky, jen při otevření dveří je z hlediska požadavků kladených na bezpečnost vždy celá odpojena. Na obrázku 3.2 je uvedeno schéma se zapojením svorek.



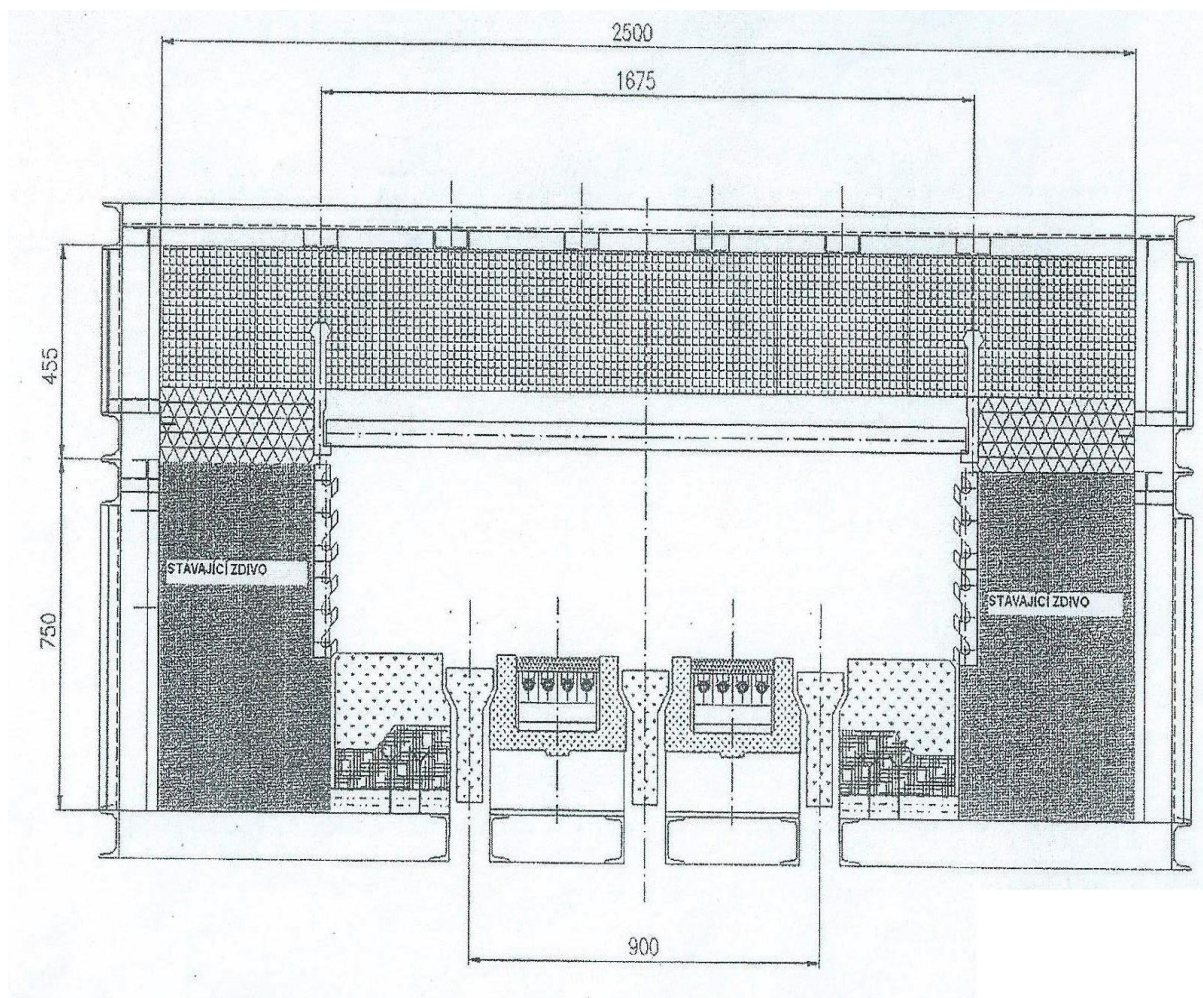
Obr. 3.2 Elektrické zapojení jednoho celku pece

3.1.2 Skladba materiálů

Délka pece je 14, 5 metru, z toho 14 metru je vnitřní délka a 250 mm tvoří dveře na vstupu a výstupu. Délka jedné zóny je 4,5 metru. V tabulce 3.1 jsou uvedeny materiály použité na konstrukci pece.

Tab. 3.1 Tabulka materiálů

konstrukce	tloušťka [mm]	materiál
strop	300	AlsitraMOD 1400/200
izolace (netěsnosti u zdiva a stropu)	-	vláknitá rohož AlsitraMod 1300/128
boční stěny (horní část)	298	Alsitra MOD 1400/200
	100	rohož z kamenné vlny
	130	vzduchová mezera
		ocelová konstrukce
boční stěny (spodní část)	40	ALSITRA MOD 1400/200
	120	šamotové cihly
	70	ALSITRA Mat 1300/128 (vláknitá rohož)
	100	P 750/120
	130	vzduchová mezera
		ocelová konstrukce
dno	150	žárovbetonů Carath 1450 – LC
	135	žárovbeton Carath FL – 1250
	50	kalciumsilikátové desky CAS 1000
tvárovka kroku		žárovbeton Carath 1450 – LC
topné články v topné části dna podloženy	30	materiál Lancast 145 – BT
tvárovky, články překryty	40(zespondu), 60 (boku)	tvárovka KVF 121
vyzdívka (pod tvárovky)	125	cihly Porrath FL 24 – 10
pod vyzdívkou	10	materiál KPS081/900



Obr. 3.3 Elektrické zapojení jednoho celku pece

[24]

3.2 Použité měřicí přístroje, popis provedeného měření

Měření bylo provedeno dne 13.3.2014 termokamerou „FLIR B series“. Měřily se rizikové části, které byly změřeny předtím optickými pyrometry. Teplota okolí byla 20°C.

Výhodou termokamery FLIR je, že může měřit rozložení teploty po celém povrchu a nejen na jednom místě, má jednoduché ovládání. Součástí kamery je vhodný software, který slouží k vyhodnocení a následnému zobrazení změřených výsledků. Před samotným měřením je potřeba si ujasnit, které vlivy mohou ovlivnit měření.

Měření by mohlo být ovlivněno:

- Tepelnou vodivostí – mohly by vzniknout nesrovnalosti při měření materiálů dvou neshodných tepelných roztažností. Například při zahřívání kovu, který je zahřát rychleji

než izolant.

- Emisivitou – u termokamery FLIR možné emisivitou nastavit pro široké spektrum materiálů.
- Odrazem – je dobré si zvolit úhel, pod kterým má být měření provedeno. Jinak by mohlo dojít k chybě vlivem odrazu. Termokamera obsahuje funkci kompenzaci odražené teploty.
- Povětrnostní podmínky – současně s větrem a sluncem mají špatný vliv na zkreslení hodnot i teploty okolí. Vysoké teploty okolí, mohou zabránit zjištění míst, kde je teplota vysoká. Naopak nízké teploty okolí chladí horké povrchy na teplotu pod kritickou mez.
- Systémy vytápění a větrání – mohou zkreslit naměřené hodnoty povrchové teploty.

[25]

3.3 Materiály potřebné k výpočtu ztrát

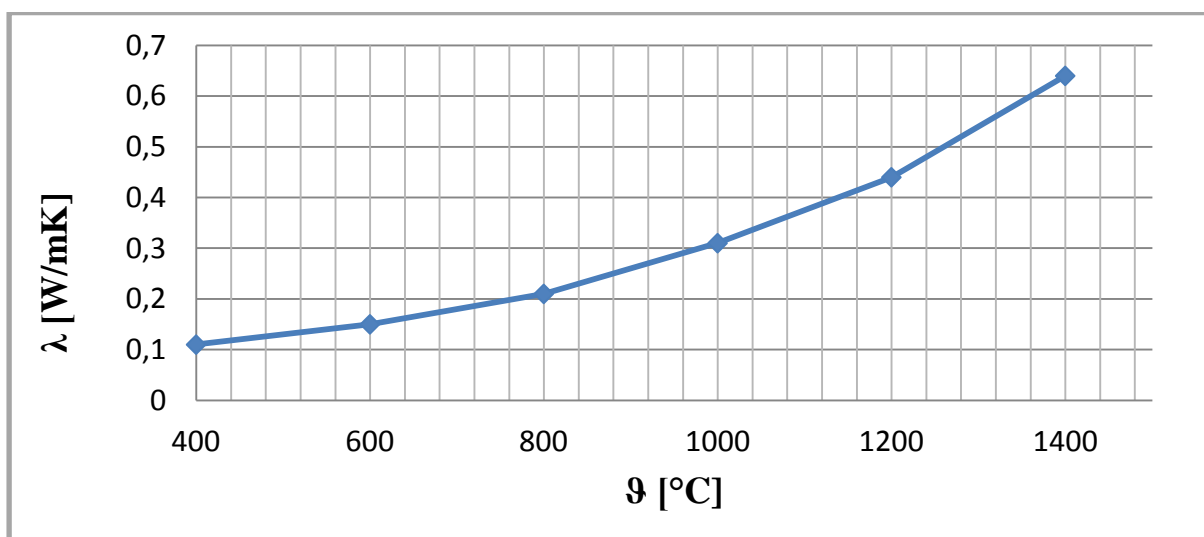
Před samotným výpočtem bylo nutné zjistit některé údaje k výpočtu. Byly využity parametry materiálu z katalogových listů RATH žárotechnika s.r.o. Údaje byly pro přehlednost zapsány do tabulky a pro odečet hodnot byly sestaveny grafy. Z grafů je patrná závislost na teplotě.

3.3.1 AlsitraMOD 1400/200

V katalogu nebyl nalezen materiál AlsitraMOD 1400/200, proto jsem vzala v úvahu podobné hodnoty pro materiál AlsitraMat 1400/128. Materiál je vyroben z rohože, která se následovně stlačí.

Tab. 3.2 Tabulka údajů o materiálu AlsitraMOD 1400/200

ϑ [°C]	λ [W/mK]	Ostatní hodnoty materiálu	
400	0,11	1400	Klasifikační teplota [°C]
600	0,15		
800	0,21	1250	Provozní teplota [°C]
1000	0,31		
1200	0,44	200	Měrná hustota [kg/m ³]
1400	0,64		

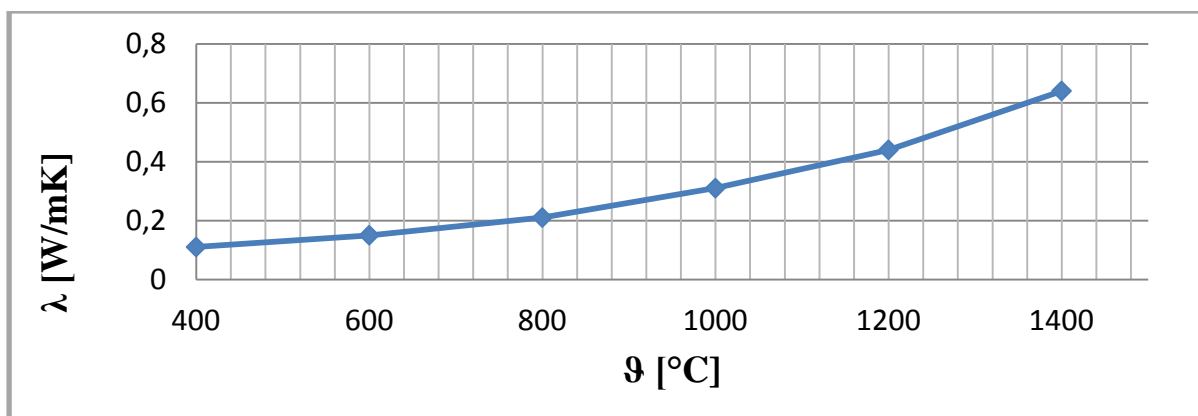


Obr. 3.4 Závislost tepelné vodivosti materiálu AlsitraMOD 1400/200 na teplotě

3.3.2 Materiál AlsitraMat 1300/128

Tab. 3.3 Tabulka údajů o materiálu AlsitraMat 1300/128

ϑ [°C]	λ [W/mK]	Ostatní hodnoty materiálu	
400	0,11	1300	Klasifikační teplota [°C]
600	0,15		
800	0,21	1150	Provozní teplota [°C]
1000	0,31		
1200	0,44	128	Měrná hustota [kg/m ³]
1400	0,64		

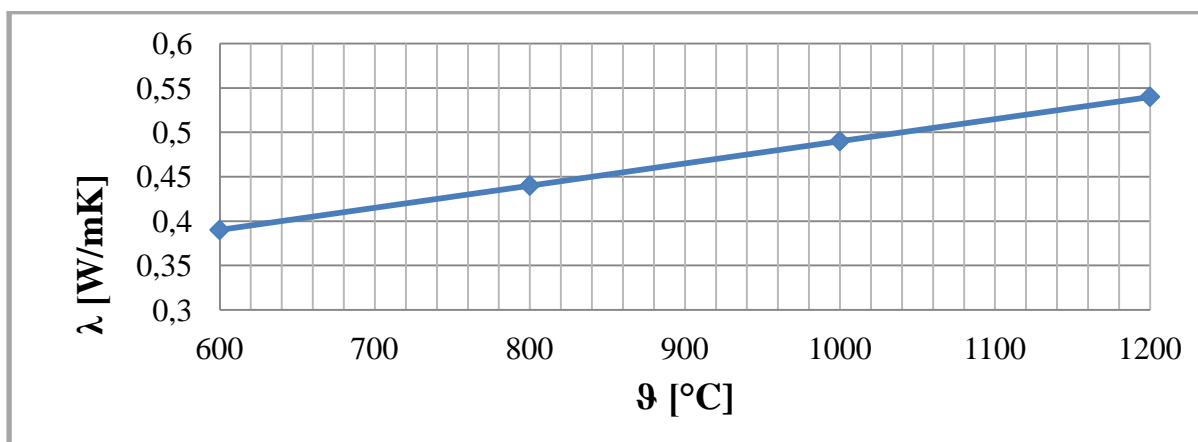


Obr. 3.5 Závislost tepelné vodivosti materiálu AlsitraMat 1300/128 na teplotě

3.3.3 Cihly Porrath FL 24-10

Tab. 3.4 Tabulka údajů o materiálu Porrath FL 24-10

ϑ [°C]	λ [W/mK]	Ostatní hodnoty materiálu	
600	0,39	1350	Klasifikační teplota [°C]
800	0,44		
1000	0,49	1000	Měrná hustota [kg/m ³]
1200	0,54		

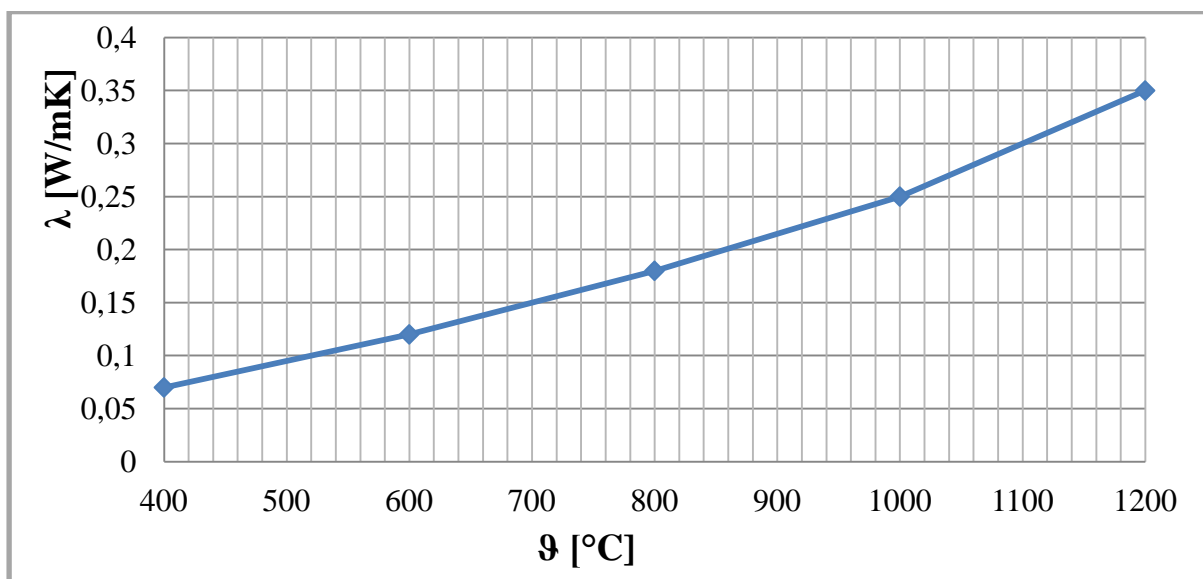


Obr. 3.6 Závislost tepelné vodivosti materiálu Porrath FL 24-10 na teplotě

3.3.4 Materiál Kerform KVF 121

Tab. 3.5 Tabulka údajů o materiálu Kerform KVF 121

ϑ [°C]	λ [W/mK]	Ostatní hodnoty materiálu	
400	0,07	1250	Klasifik.teplota [°C]
600	0,12		
800	0,18	1150	Provozní teplota [°C]
1000	0,25		
1200	0,35	160	Měrná hustota [kg/m ³]

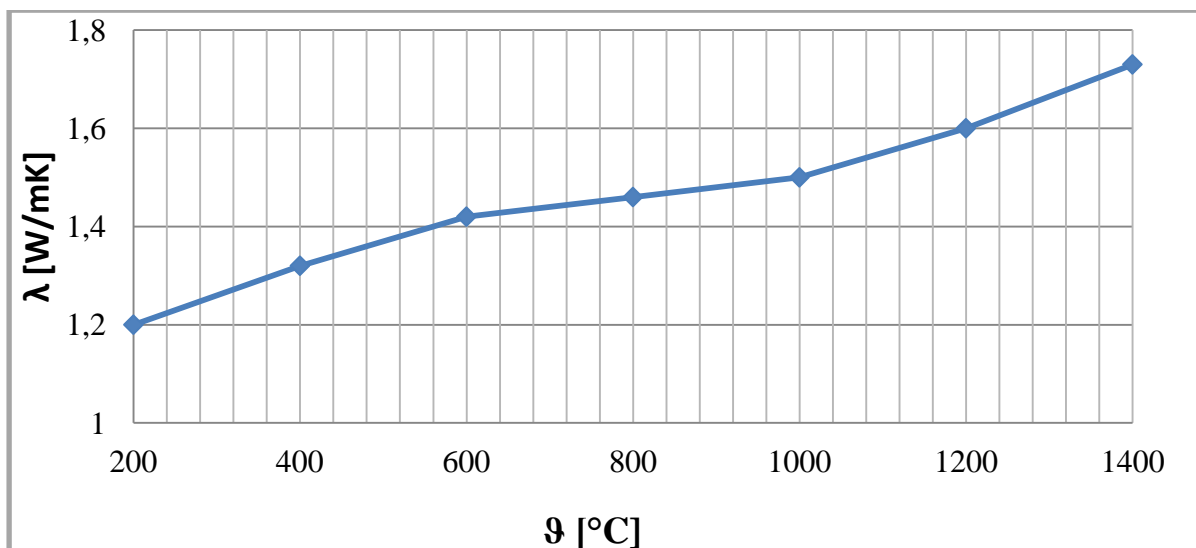


Obr. 3.7 Závislost tepelné vodivosti materiálu Kerform KVF 121 na teplotě

3.3.5 Nízkocementový beton CARATH 1450 – LC

Tab. 3.6 Tabulka údajů o betonu CARATH 1450 - LC

ϑ [°C]	λ [W/mK]	Ostatní hodnoty materiálu	
200	1,2	1400	Klasifikační teplota [°C]
400	1,32		
600	1,42		
800	1,46	1250	Provozní teplota [°C]
1000	1,5		
1200	1,6	200	Měrná hustota [kg/m ³]
1400	1,73		

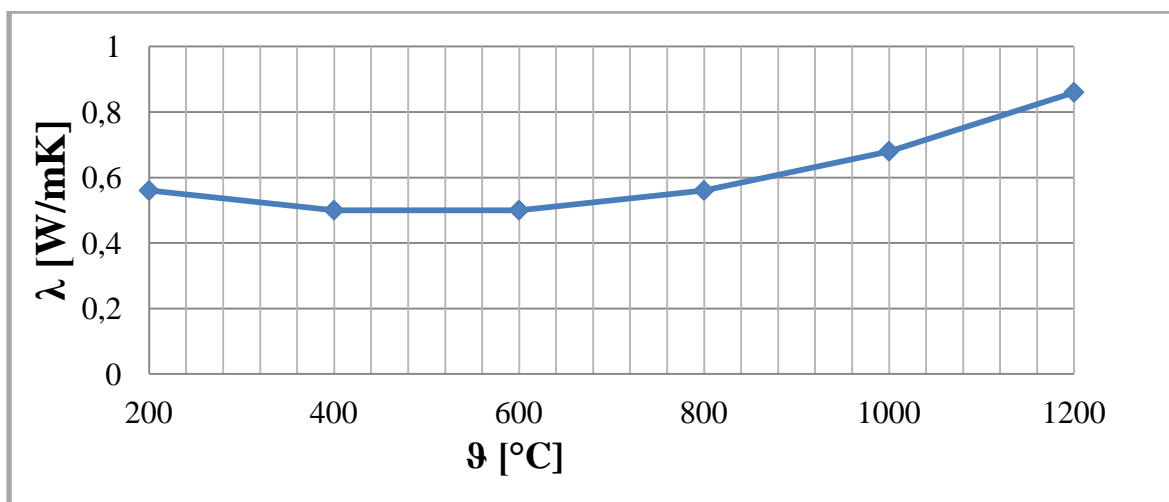


Obr. 3.8 Závislost tepelné vodivosti materiálu CARATH 1450 - LC na teplotě

3.3.6 Izolační beton CARATH FL – 1250

Tab. 3.7 Tabulka údajů o materiálu CARATH FL - 1250

θ [°C]	λ [W/mK]	Ostatní hodnoty materiálu	
200	0,56	1250	Klasifikační teplota [°C]
400	0,5		
600	0,5		
800	0,56	1620	Měrná hustota [kg/m ³]
1000	0,68		
1200	0,86		

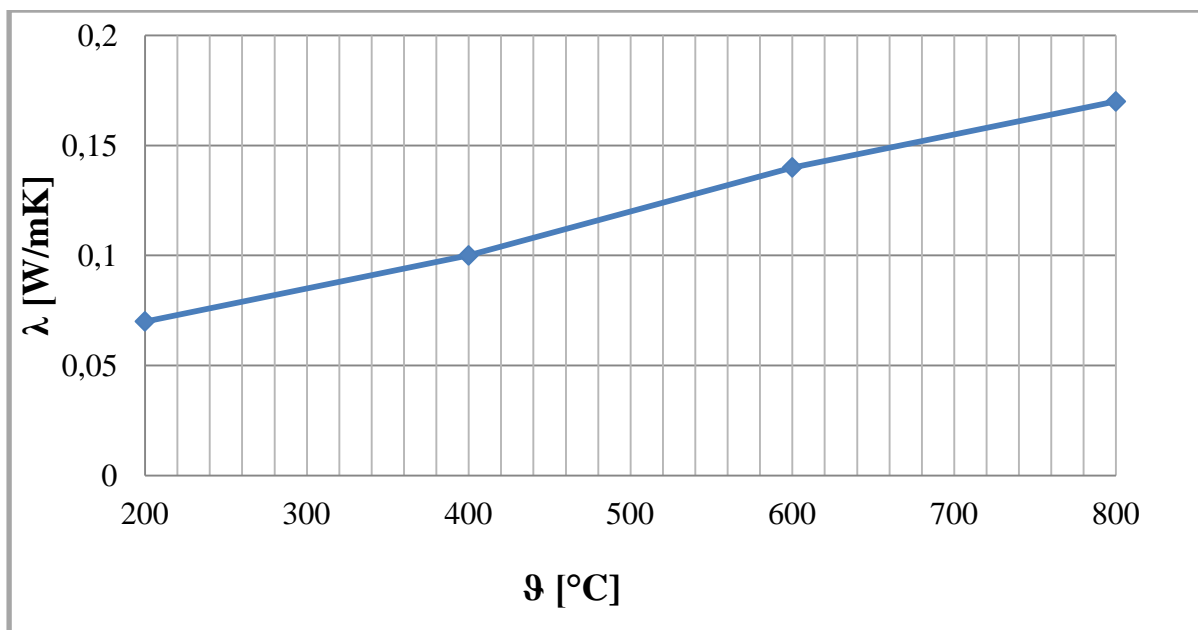


Obr. 3.9 Závislost tepelné vodivosti materiálu CARATH FL - 1250 na teplotě

3.3.7 Kalciumsilikátové desky CAS 1000

Tab. 3.8 Tabulka údajů o kalciumsilikátových deskách CAS 1000

ϑ [°C]	λ [W/mK]	Ostatní hodnoty materiálu	
200	0,07	1000	Klasifikační teplota [°C]
400	0,1		
600	0,14	240	Měrná hustota [kg/m ³]
800	0,17		

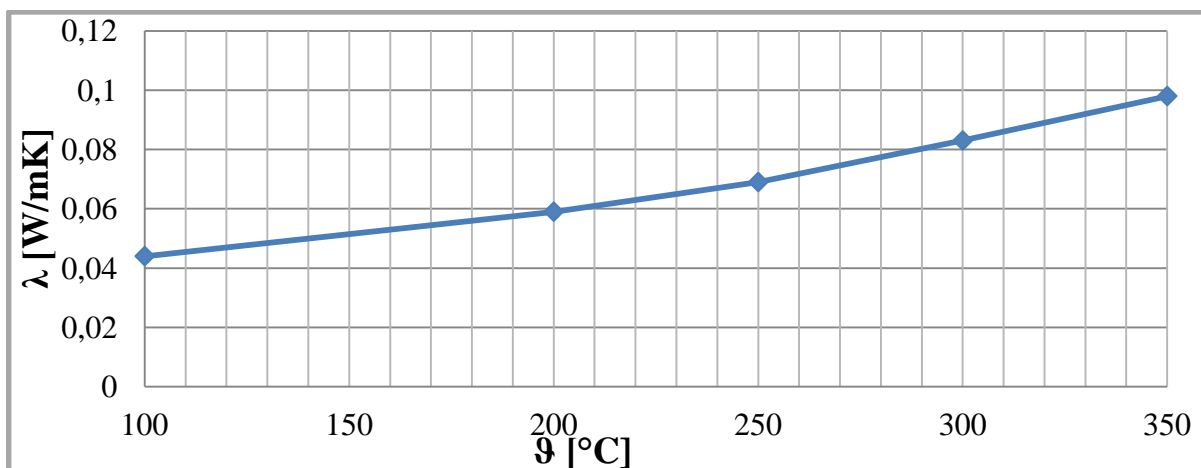


Obr. 3.10 Závislost tepelné vodivosti kalciumsilikátových desek CAS 1000 na teplotě

3.3.8 Desky z minerální vlny P 750-120

Tab. 3.9 Tabulka údajů o deskách z minerální vlny P 750 - 120

ϑ [°C]	λ [W/mK]	Ostatní hodnoty materiálu	
100	0,044	750	Klasifikační teplota [°C]
200	0,059	>1000	Provozní teplota [°C]
250	0,069		
300	0,083	120	Měrná hustota [kg/m ³]
350	0,098		

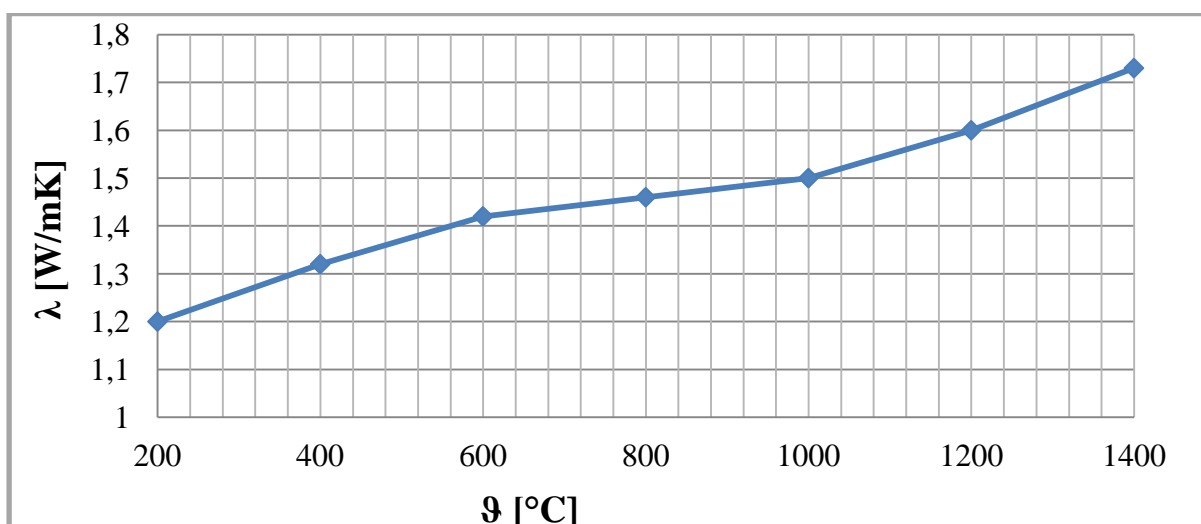


Obr. 3.11 Závislost tepelné vodivosti desek z minerální vlny P 750 - 120 na teplotě

3.3.9 Tvarovka ze žárobetonu Lancast 145 – BT

Tab. 3.10 Tabulka údajů o tvarovkách ze žárobetonu 145 - BT

θ [°C]	λ [W/mK]	Ostatní hodnoty materiálu	
200	1,2	1450	Klasifikační teplota [°C]
400	1,32		
600	1,42		
800	1,46		
1000	1,5	2300	Měrná hustota [kg/m ³]
1200	1,6		
1400	1,73		

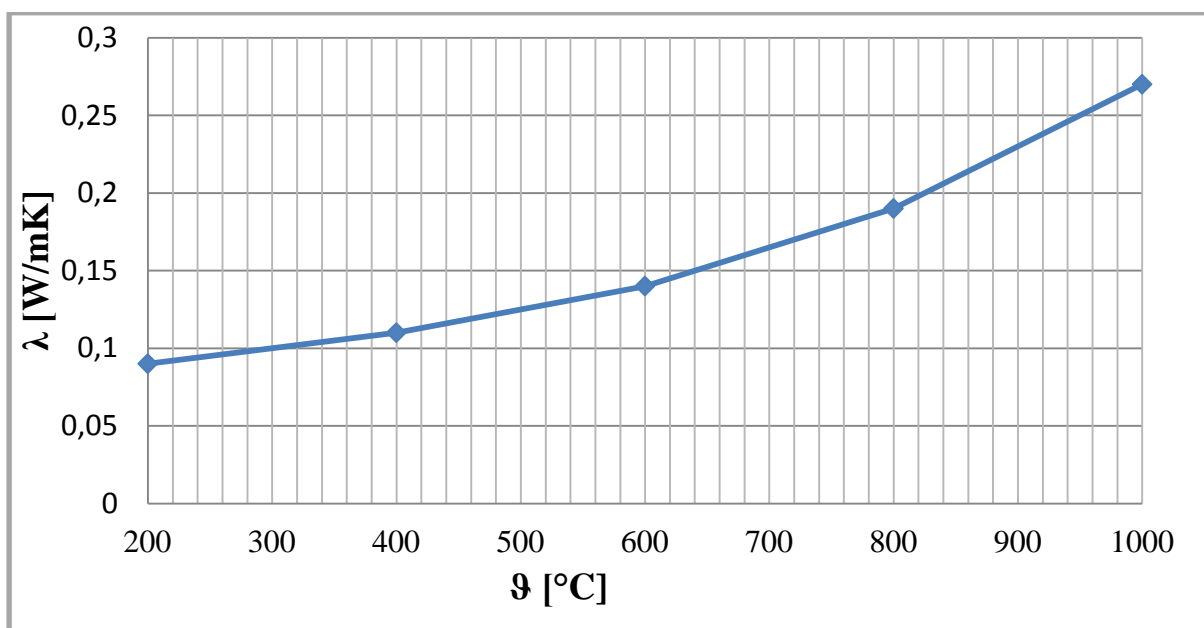


Obr. 3.11 Závislost tepelné vodivosti tvarovek ze žárobetonu 145 - BT na teplotě

3.3.10 Materiál KPS081/900

Tab. 3.11 Tabulka údajů o materiálu KPS081/900

ϑ [°C]	λ [W/mK]	Ostatní hodnoty materiálu	
200	0,09	1000	Klasifikační teplota [°C]
400	0,11		
600	0,14	900	Provozní teplota [°C]
800	0,19		
1000	0,27	300	Měrná hustota [kg/m ³]



Obr. 3.12 Závislost tepelné vodivosti materiálu KPS81/900 na teplotě

3.3.11 Šamotové cihly

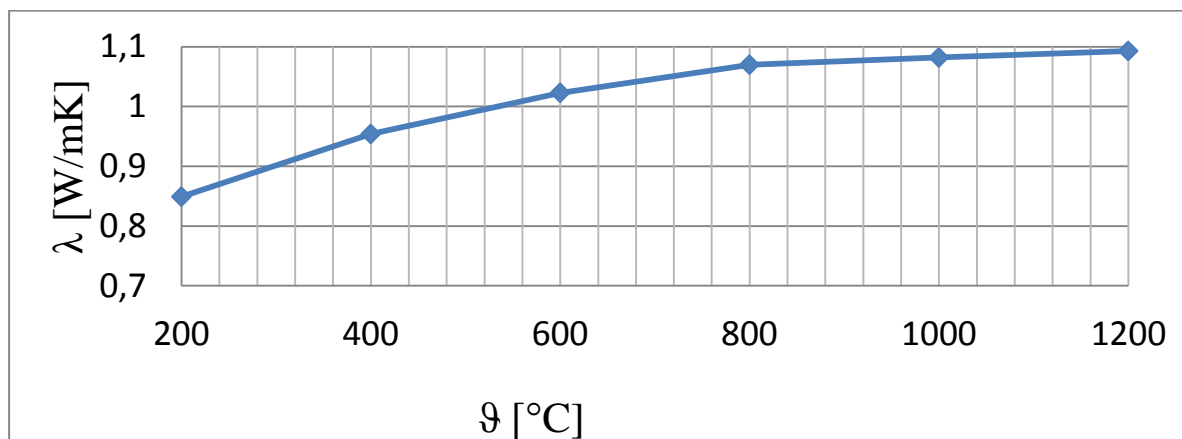
Šamotové cihly tvoří zdivo pece. Pro výpočet se vybraly hodnoty pro běžně používaný šamot.

Tab. 3.12 Tabulka údajů o šamotových cihlách (začátek)

ϑ [°C]	λ [W/mK]	λ [kcal/mh°C]	Ostatní hodnoty materiálu	
200	0,849	0,73	1730	Klasifikační teplota [°C]
400	0,954	0,82		
600	1,023	0,88	1410	Provozní teplota [°C]

Tab. 3.12 Tabulka údajů o šamotových cihlách (konec)

ϑ [°C]	λ [W/mK]	λ [kcal/mh°C]	Ostatní hodnoty materiálu	
800	1,07	0,92	1410	Provozní teplota [°C]
1000	1,082	0,93	2000	Měrná hustota [kg/m ³]
1200	1,093	0,94		



Obr. 3.13 Závislost tepelné vodivosti šamotových cihel na teplotě

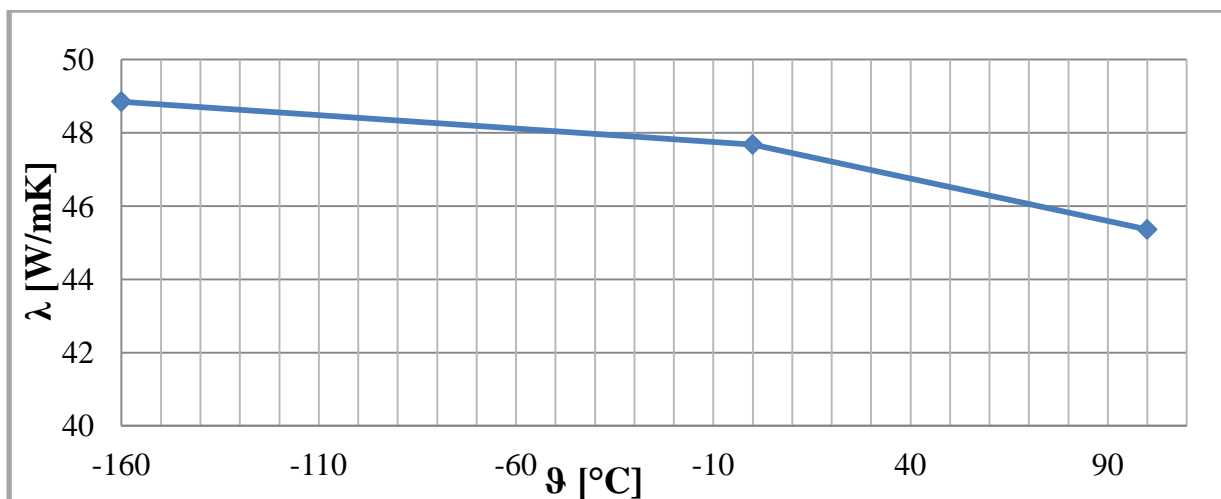
Když je uvedena tepelná vodivost v jednotkách kcal/mh°C, musí se převést na W/mk a to tak, že se hodnota vynásobí 1,163.

3.3.12 Konstrukční ocel

Zahrnuta je do výpočtu z důvodu, že se bude počítat tepelné vodivosti uzavřené vzduchové mezery. Ta je obklopena ocelovou konstrukcí pece.

Tab. 3.13 Tabulka údajů o konstrukční oceli

ϑ [°C]	λ [W/mK]	λ [kcal/mh°C]	Ostatní hodnoty materiálu	
-160	48,85	42	7850	Měrná hustota [kg/m ³]
0	47,68	41		
100	45,36	39		

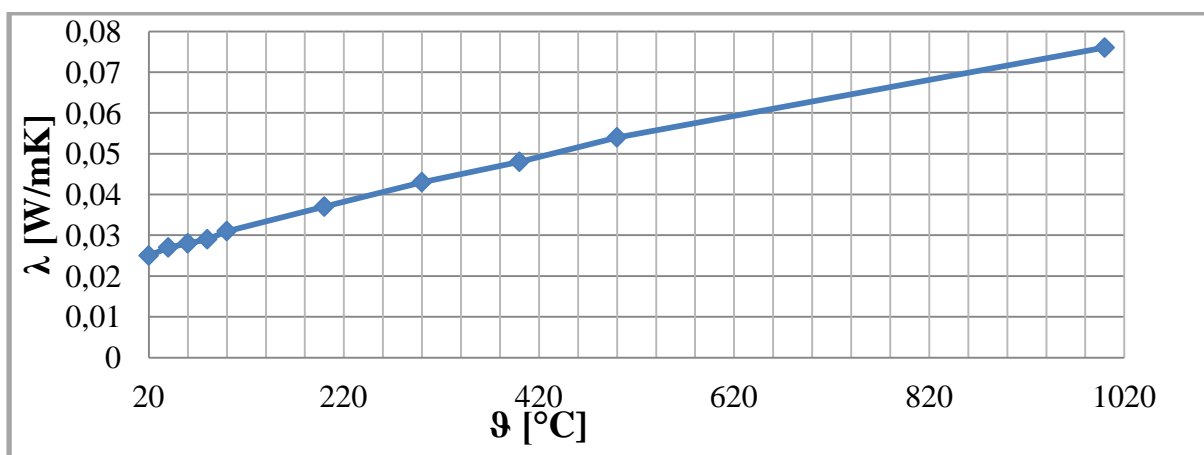


Obr. 3.14 Závislost tepelné vodivosti konstrukční oceli na teplotě

3.3.13 Vzduch

Tab. 3.14 Tabulka údajů o vzduchu

θ [°C]	λ [W/mK]	λ [kcal/mh°C]
20	0,025	0,022
40	0,027	0,023
60	0,028	0,024
80	0,029	0,025
100	0,031	0,026
200	0,037	0,032
300	0,043	0,037
400	0,048	0,042
500	0,054	0,0464
1000	0,076	0,066



Obr. 3.15 Závislost tepelné vodivosti vzduchu na teplotě

[26]

3.4 Výpočet tepelných ztrát pece

Na základě naměřených povrchových teplot jsem provedla výpočty tepelných ztrát. Pro přehlednost byly hodnoty měření zapsány pro jednotlivé úseky do tabulky. Pro představu je uveden výpočet pro 1 m² plochy, výsledek se pak vynásobil plochou dané části pece. Nejsou uvedeny jednotlivé kroky pro všechny úseky, ale vždy pro první úsek z důvodu opakování vzorců. Veškeré vypočtené údaje se pro přehlednost zapsaly do tabulek.

Odhad teplot pro ukázkou bude proveden pro levou boční stěnu horní část. Nejprve se provede výpočet ztrát tepla. Následuje odhad teplot, který vychází z rozdílů provozní teploty a teploty okolí. Dále jsou do výpočtu zahrnuty tloušťky materiálu a jim příslušné tepelné vodivosti. Odhady teplot jsou v podstatě stejné i pro ostatní části. Rozdíly jsou v tom, že jednotlivé části jsou složeny z různých materiálů (a z nich vyplývajících tepelných vodivostí) o různých tloušťkách.

Tab. 3.15 Tabulka vnějšího pláště průmyslového objektu

rozměry	levý bok		pravý bok		strop	dveře vstupní	dveře výstupní
	horní	spodní	horní	spodní			
výška [m]	0,35	0,64	0,35	0,64	2,5	1,15	1,15
délka[m]	3,5	3,5	3,5	3,5	14	1,8	1,8
plocha [m ²]	1,225	2,24	1,225	2,24	35	2,07	2,07
celkem [m ²]	4,93	8,96	4,93	8,96	35	2,07	2,07

3.4.1 Strop

Hodnoty tepelných vodivostí materiálů jsou shodné pro AlsitraMOD 1400/200 a Alsitra 1300/120. Proto se celková tloušťka stropu bere, jako stěna z materiálu AlsitraMOD 1400/200 o tloušťce 300 mm.

a) Obecný postup

- Střední hodnota povrchových teplot

$$\vartheta_{postř1} = \frac{\text{suma hodnot teplot pro úsek 1}}{\text{celkový počet hodnot pro úsek 1}} [^{\circ}\text{C}] \quad (3.1)$$

- Střední hodnota teploty mezi střední hodnotou povrchových hodnot teplot a vnitřní teplotou pece:

Střední hodnoty uvažují podle vztahu $\lambda = f(\vartheta)$. Diference jsou patrné mezi měřenými teplotami na vnějším a vnitřním povrchu pece.

$$\vartheta_{S1} = \frac{\vartheta_p + \vartheta_{postř1}}{2} [^{\circ}\text{C}] \quad (3.2)$$

kde:

ϑ_p [$^{\circ}\text{C}$] provozní teplota pece

$\vartheta_{postř1}$ [$^{\circ}\text{C}$] střední hodnota povrchových teplot

Z hodnoty ϑ_{S1} jsem zjistila hodnotu tepelné vodivosti a to tak, že se odečetla z grafu 3.4.

- Sdílení tepla konvekcí vzhůru pro vodorovnou stěnu

$$\alpha_{k1} = 3,26 \sqrt[4]{(\vartheta_{postř1} - \vartheta_{ok})} [\text{W}/\text{m}^2\text{K}] \quad (3.3)$$

kde:

$\vartheta_{postř1}$ [$^{\circ}\text{C}$] střední hodnota povrchových teplot

ϑ_{ok} [$^{\circ}\text{C}$] teplota okolí pece

- Součinitel prostupu tepla radiací na 1 m^2

$$\alpha_{r1} = \frac{\varepsilon \cdot \sigma_{\check{c}} \cdot \left[\left(\frac{\vartheta_{postř1}}{100} \right)^4 - \left(\frac{\vartheta_{ok}}{100} \right)^4 \right]}{\vartheta_{postř1} - \vartheta_{ok}} [\text{W}/\text{m}^2\text{K}] \quad (3.4)$$

kde:

ε [-] součinitel emisivity tělesa

$\sigma_{\check{c}}$ [-] Stefanovo-Boltzmannova konstanta

$\vartheta_{postř1}$ [K] termodynamická teplota středních povrchových hodnot teploty

ϑ_{ok} [K] termodynamická teplota okolí pece

- Součinitel prostupu tepla radiací i konvekcí

$$\alpha_1 = \alpha_{k1} + \alpha_{r1} [\text{W}/\text{m}^2\text{K}] \quad (3.5)$$

kde

α_{k1} [W/m²K] sdílení tepla konvekcí vzhůru pro vodorovnou stěnu

α_{r1} [W/m²K] součinitel prostupu tepla radiací na 1 m²

- Výpočet ztrát tepla konvekcí, vedením a radiací na 1 m²

$$q_{st1} = \frac{\vartheta_p - \vartheta_{ok}}{\frac{d}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_1}} \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (3.6)$$

kde:

ϑ_p [°C] provozní teplota pece

ϑ_{ok} [°C] teplota okolí pece

d [m] tloušťka materiálu

λ [W/mK] tepelná vodivost materiálu

α_1 [W/m²K] součinitel prostupu tepla konvekcí a radiací

b) Dosazení do rovnic – první úsek

Tab. 3.16 Hodnoty teplot stropu pece

úsek 1 [°C]				úsek 2 [°C]				úsek 3 [°C]				úsek 4 [°C]			
60,1	59,7	70,2	68	75	77,3	78,2	66,1	57,4	68,5	62,6	59,1	61,5	68	69,9	63,2
51	64,2	59,7	63,3	73,6	76,8	71,1	69,3	59,2	69,2	63,3	58,9	63,5	67,3	70,5	64

- Střední hodnota povrchových teplot

$$\vartheta_{postř1} = \frac{\text{suma hodnot teplot pro úsek 1}}{\text{celkový počet hodnot pro úsek 1}} = \frac{60,1+59,7+70,2+68+51+64,2+59,7+63,3}{8} = 62,03 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3.1)$$

- Střední hodnota teploty mezi střední hodnotou povrchových hodnot teplot a vnitřní teplotou peci:

$$\vartheta_{S1} = \frac{\vartheta_p + \vartheta_{postř1}}{2} = \frac{1200 + 62,03}{2} = 631,01 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3.2)$$

$$\vartheta_{S1} \rightarrow \lambda_1 = 0,171 \text{ [W/mK]}$$

- Sdílení tepla konvekcí vzhůru pro vodorovnou stěnu

$$\alpha_{k1} = 3,26^4 \sqrt{(\vartheta_{postř1} - \vartheta_{ok})} = 3,26^4 \sqrt{(62,03 - 21,5)} = 8,3 \text{ [W/m}^2\text{K]} \quad (3.3)$$

- Součinitel prostupu tepla radiací na 1 m²

$$\alpha_{r1} = \frac{\varepsilon \cdot \sigma_c \cdot \left[\left(\frac{\vartheta_{postř1}}{100} \right)^4 - \left(\frac{\vartheta_{ok}}{100} \right)^4 \right]}{\vartheta_{postř1} - \vartheta_{ok}} = \frac{0,85 \cdot 5,6697 \cdot \left[\left(\frac{62,03+273,15}{100} \right)^4 - \left(\frac{21,5+273,15}{100} \right)^4 \right]}{62,03 - 21,5} =$$

$$= 6,045 \text{ [W/m}^2\text{K]} \quad (3.4)$$

- Součinitel prostupu tepla radiací i konvekcí

$$\alpha_1 = \alpha_{k1} + \alpha_{r1} = 8,3 + 6,045 = 14,35 \text{ [W/m}^2\text{K]} \quad (3.5)$$

- Výpočet ztrát tepla konvekcí, vedením a radiací na 1 m²

$$q_{st1} = \frac{\vartheta_p - \vartheta_{ok}}{\frac{d}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_1}} = \frac{1200 - 21,5}{\frac{0,3}{0,171} + \frac{1}{14,35}} = 646,9 \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (3.6)$$

Tab. 3.17 Výsledky výpočtů ztrát stropu

	úsek 1	úsek 2	úsek 3	úsek 4
$\vartheta_{postř}$ [°C]	62,03	73,43	62,36	65,99
ϑ_s [°C]	631,01	636,71	631,18	632,99
λ [W/mK]	0,171	0,174	0,171	0,173
α_k [W/m ² K]	8,30	8,81	8,32	8,49
α_r [W/m ² K]	6,045	6,395	6,055	6,165
α [W/m ² K]	14,35	15,21	14,37	14,65
q_{st} [W/m ² K]	646,90	659,26	646,94	654,70

3.4.2 Boční stěny

Tab. 3.18 Skladba horních vrstev bočních stěn

Číslo vrstvy	Materiál	Tloušťka [m]
1	AlsitraMOD 1400/200	0,298
2	P 270-120	0,1
3	Vzduchová mezera + ocel	0,13

Pro výpočet třetí vrstvy se musí brát v úvahu, že ocelová konstrukce se opírá o druhou vrstvu materiálu a zároveň je paralelně ke vzduchové mezeře. Jinak by nebylo možné provést výpočet pomocí ekvivalentní vodivosti třetí vrstvy

Tab. 3.19 Skladba spodních vrstev bočních stěn

Číslo vrstvy	Materiál	Tloušťka [m]
1	AlsitraMOD 1400/200	0,04
2	Šamotové cihly	0,12
3	AlsitraMOD 1300/128	0,07
4	P 750 - 120	0,1
5	Vzduchová mezera + ocel	0,13

Tab. 3.20 Naměřené teploty na levé boční stěně

	úsek 1 [°C]				úsek 2 [°C]				úsek 3 [°C]				úsek 4 [°C]			
horní část	20,5	23,6	27,0	28,3	23,1	22,6	22,9	24,6	23,5	24,8	22,5	25,1	25	25,9	28,6	26,9
spodní část	25,6	24,9	29,4	31,3	22,6	28,2	31,2	24,9	29,3	28,7	25,0	26,6	23,9	23,6	24,7	24,1

Tab. 3.21 Střední hodnoty povrchových teplot levé boční stěny

	úsek 1	úsek 2	úsek 3	úsek 4
$\vartheta_{\text{po stř horní}} [^{\circ}\text{C}]$	24,85	23,30	23,97	26,60
$\vartheta_{\text{po stř spodní}} [^{\circ}\text{C}]$	22,80	26,70	27,40	24,07

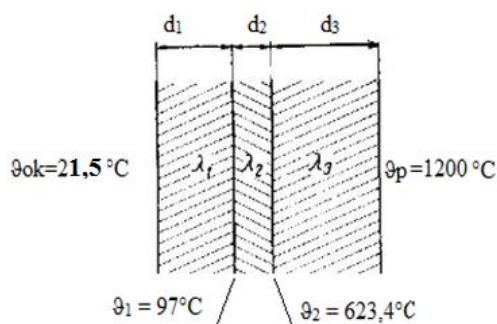
3.4.3 Levá boční stěna

3.4.3.1 Horní úsek levé boční stěny

a) Obecný postup

- Odhad teplot na rozhraní dvou materiálů (pro veškeré úseky se použije společný odhad).

Nejprve se spočítají ztráty pomocí vzorce 3.8. Ten obsahuje rozdíl provozní teploty pece a teploty okolí pece. Dále se do vzorce dosadí tloušťky jednotlivých materiálů, které se podělí příslušnými tepelnými vodivostmi a součinitel přestupu tepla. Následuje výpočet teplot dle vzorců 3.9 a 3.10.



Obr. 3.17 Složení boční levé stěny - horní část

$$\alpha = 2,56 \cdot \sqrt[4]{\Delta T} \quad (3.7)$$

$$q_1 = \frac{\vartheta_{\text{p}} - \vartheta_{\text{ok}}}{\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_1}} \quad [\text{W/m}^2] \quad (3.8)$$

$$\vartheta_1 = \vartheta_p - q_1 \cdot \left(\frac{d_1}{\lambda_1}\right) [^{\circ}\text{C}] \quad (3.9)$$

$$\vartheta_2 = \vartheta_p - q_1 \cdot \left(\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2}\right) [^{\circ}\text{C}] \quad (3.10)$$

- Střední hodnota povrchových teplot

$$\vartheta_{\text{povstř1}} = \frac{\text{suma hodnot teplot pro úsek 1}}{\text{celkový počet hodnot pro úsek 1}} [^{\circ}\text{C}] \quad (3.11)$$

- Střední hodnoty uvnitř materiálu a tepelné vodivosti materiálu

$$\vartheta_{S11} = \frac{\vartheta_p + \vartheta_1}{2} [^{\circ}\text{C}] \quad (3.12)$$

$$\vartheta_{S12} = \frac{\vartheta_1 + \vartheta_2}{2} [^{\circ}\text{C}] \quad (3.13)$$

$$\vartheta_{S13} = \frac{\vartheta_2 + \vartheta_{\text{povstř1}}}{2} [^{\circ}\text{C}] \quad (3.14)$$

kde:

ϑ_p [$^{\circ}\text{C}$] provozní teplota pece

ϑ_1, ϑ_2 [$^{\circ}\text{C}$] odhad teplot na rozhraní materiálu

$\vartheta_{\text{povstř1}}$ [$^{\circ}\text{C}$] střední hodnota povrchových teplot

- Ekvivalentní vodivost vrstvy

$$\lambda_{\text{ekv1}} = \frac{d}{F} \cdot \left(\frac{F_1}{\lambda_1} + \frac{F_2}{\lambda_2}\right) = \frac{1}{F} \cdot (F_1 \cdot \lambda_3 + F_2 \cdot \lambda_4) [\text{W/mK}] \quad (3.15)$$

kde:

d [m] tloušťka materiálu

F, F_1, F_2 [m^2] plocha

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ [W/mK] součinitele tepelné vodivosti

Výška činí 0,35 m, ocelová konstrukce o výšce 0,03 m vytváří podporu pro strop. Plocha pod, kterou je vzduch je 0,32 m. Proto se $F=0,35 \text{ m}^2$, $F_1=0,32 \text{ m}^2$, $F_2=0,03 \text{ m}^2$.

- Přestup tepla prouděním pro svislou stěnu

$$\alpha_{k1} = 2,56 \sqrt[4]{(\vartheta_{\text{povstř1}} - \vartheta_{\text{ok}})} [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (3.16)$$

kde:

$\vartheta_{p_{ostř1}}$ [°C] střední hodnota povrchových teplot

ϑ_{ok} [°C] teplota okolí pece

- Součinitel prostupu tepla radiací na 1 m²

$$\alpha_{r1} = \frac{\varepsilon \cdot \sigma_{\check{c}} \cdot \left[\left(\frac{\vartheta_{p_{ostř1}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{\vartheta_{ok}}{100} \right)^4 \right]}{\vartheta_{stř1} - \vartheta_{ok}} \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (3.17)$$

kde:

ε [-] součinitel emisivity tělesa

$\sigma_{\check{c}}$ [-] Stefanovo-Boltzmannova konstanta

$\vartheta_{p_{ostř1}}$ [K] termodynamická teplota středních povrchových hodnot teploty

ϑ_{ok} [K] termodynamická teplota okolí pece

- Součinitel přestupu tepla radiací i konvekcí

$$\alpha_1 = \alpha_{k1} + \alpha_{r1} \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (3.18)$$

kde

α_{k1} [W/m²K] sdílení tepla konvekcí vzhůru pro vodorovnou stěnu

α_{r1} [W/m²K] součinitel prostupu tepla radiací na 1 m²

- Výpočet ztrát tepla konvekcí, vedením a radiací na 1 m²

$$q_{stl1} = \frac{\vartheta_p - \vartheta_{ok}}{\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_{ekv}} + \frac{1}{\alpha_1}} \quad [\text{W/m}^2] \quad (3.19)$$

kde:

ϑ_p [°C] provozní teplota pece

ϑ_{ok} [°C] teplota okolí pece

d_1, d_2, d_3 [m] tloušťky jednotlivých materiálů

λ_1, λ_2 [W/mK] součinitele tepelné vodivosti

λ_{ekv} [W/mK] ekvivalentní vodivost vrstvy

α_1 [W/mK] součinitel přestupu tepla radiací a konvekcí

- Kontrola odhadu teplot na rozhraní jednotlivých materiálů

$$\vartheta_{11} = \vartheta_p - q_1 \cdot \left(\frac{d_1}{\lambda_1} \right) \quad [^\circ\text{C}] \quad (3.20)$$

$$\vartheta_{12} = \vartheta_p - q_1 \cdot \left(\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} \right) [^{\circ}\text{C}] \quad (3.21)$$

kde:

ϑ_p [$^{\circ}\text{C}$] provozní teplota pece

q_1 [$^{\circ}\text{C}$] ztráty tepla konvekcí, vedením a radiací na 1 m^2

d_1, d_2 [m] tloušťky jednotlivých materiálů

λ_1, λ_2 [W/mK] tepelné vodivosti jednotlivých materiálů

Z hodnoty ϑ_{S1} se zjistila hodnota tepelné vodivosti a to tak, že se odečetla z grafu 3.4. Stejně tak se zjistily tepelné vodivosti pro λ_2 z teploty ϑ_{S2} a λ_3 z teploty ϑ_{S3} odečtením z příslušných grafů.

b) Dosazení do rovnic – první úsek

- Odhad teplot na rozhraní dvou materiálů (pro veškeré úseky se použije společný odhad)

$$\alpha = 2,56 \cdot \sqrt[4]{\Delta T} = 2,56 \cdot \sqrt[4]{(1200 - 21,5)} = 15 \text{ [W/m}^2\text{K]} \quad (3.7)$$

$$q_1 = \frac{\vartheta_p - \vartheta_{ok}}{\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_1}} = \frac{1200 - 21,5}{\frac{0,298}{0,44} + \frac{0,1}{0,071} + \frac{0,13}{0,3} + \frac{1}{15}} = 885,9 \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (3.8)$$

$$\vartheta_1 = \vartheta_p - q_1 \cdot \left(\frac{d_1}{\lambda_1} \right) = 1200 - 885,9 \cdot \left(\frac{0,298}{0,44} \right) = 600 \text{ [}^{\circ}\text{C]} \quad (3.9)$$

$$\vartheta_2 = \vartheta_p - q_1 \cdot \left(\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} \right) = 1200 - 885,9 \cdot \left(\frac{0,298}{0,44} + \frac{0,1}{0,071} \right) = 97,2 \text{ [}^{\circ}\text{C]} \quad (3.10)$$

- Střední hodnota povrchových teplot

$$\vartheta_{postř1} = \frac{\text{suma hodnot teplot pro úsek 1}}{\text{celkový počet hodnot pro úsek 1}} = \frac{20,5 + 23,6 + 27 + 28,3}{4} = 24,85 \text{ [}^{\circ}\text{C]} \quad (3.11)$$

- Střední hodnoty uvnitř materiálu a tepelné vodivosti materiálu

$$\vartheta_{S11} = \frac{\vartheta_p + \vartheta_1}{2} = \frac{1200 + 600}{2} = 900 \text{ [}^{\circ}\text{C]} \quad (3.12)$$

$$\vartheta_{S12} = \frac{\vartheta_1 + \vartheta_2}{2} = \frac{600 + 97,2}{2} = 348,6 \text{ [}^{\circ}\text{C]} \quad (3.13)$$

$$\vartheta_{S13} = \frac{\vartheta_2 + \vartheta_{postř1}}{2} = \frac{97,2 + 24,85}{2} = 61,025 \text{ [}^{\circ}\text{C]} \quad (3.14)$$

$$\lambda_1 = 0,24 \text{ [W/mK]}, \lambda_2 = 0,95 \text{ [W/mK]}, \lambda_3 = 0,028 \text{ [W/mK]}, \lambda_4 = 46,1 \text{ [W/mK]}$$

- Ekvivalentní vodivost vrstvy

$$\lambda_{ekv1} = \frac{d}{F} \cdot \left(\frac{F_1}{d} + \frac{F_2}{d} \right) = \frac{1}{F} \cdot (F_1 \cdot \lambda_3 + F_2 \cdot \lambda_4) = \frac{1}{0,35} \cdot (0,32 \cdot 0,028 + 0,03 \cdot 46,1) =$$

$$3,97 \text{ [W/mK]} \quad (3.15)$$

- Přestup tepla prouděním pro svislou stěnu

$$\alpha_{k1} = 2,56 \sqrt[4]{(\vartheta_{p_{ostř1}} - \vartheta_{ok})} = 2,56 \sqrt[4]{(1200 - 21,5)} = 3,463 \text{ [W/m}^2\text{K]} \quad (3.16)$$

- Součinitel prostupu tepla radiací na 1 m²

$$\alpha_{r1} = \frac{\varepsilon \cdot \sigma_c \cdot \left[\left(\frac{\vartheta_{p_{ostř1}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{\vartheta_{ok}}{100} \right)^4 \right]}{\vartheta_{stř1} - \vartheta_{ok}} = \frac{0,85 \cdot 5,6697 \cdot \left[\left(\frac{24,85}{100} \right)^4 - \left(\frac{21,5}{100} \right)^4 \right]}{24,85 - 21,5} = 5,016 \text{ [W/m}^2\text{K]} \quad (3.17)$$

- Součinitel přestupu tepla radiací i konvekcí

$$\alpha_1 = \alpha_{k1} + \alpha_{r1} = 3,463 + 5,016 = 8,479 \text{ [W/m}^2\text{K]} \quad (3.18)$$

- Výpočet ztrát tepla konvekcí, vedením a radiací na 1 m²

$$q_{sthl1} = \frac{\vartheta_p - \vartheta_{ok}}{\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_{ekv}} + \frac{1}{\alpha_1}} = \frac{1200 - 21,5}{\frac{0,298}{0,24} + \frac{0,1}{0,95} + \frac{0,13}{3,977} + \frac{1}{8,479}} = 787 \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (3.19)$$

- Kontrola odhadu teplot na rozhraní jednotlivých materiálů

$$\vartheta_{11} = \vartheta_p - q_1 \cdot \left(\frac{d_1}{\lambda_1} \right) = 1200 - 787 \cdot \left(\frac{0,298}{0,24} \right) = 222,87 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3.20)$$

$$\vartheta_{12} = \vartheta_p - q_1 \cdot \left(\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} \right) = 1200 - 787 \cdot \left(\frac{0,298}{0,24} + \frac{0,1}{0,95} \right) = 140,03 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3.21)$$

Tab. 3.22 Výsledky pro horní část levé boční stěny

	úsek 1	úsek 2	úsek 3	úsek 4
ϑ_p [°C]	1200	1200	1200	1200
odhad ϑ_1 [°C]	600	600	600	600
odhad ϑ_2 [°C]	97,2	97,2	97,2	97,2
$\vartheta_{po\ stř}$ [°C]	24,85	23,3	23,975	26,6
ϑ_{s11} [°C]	900	900	900	900
ϑ_{s2} [°C]	348,6	348,6	348,6	348,6
ϑ_{s3} [°C]	61,025	60,25	60,5875	61,9
λ_1 [W/mK]	0,24	0,24	0,24	0,24
λ_2 [W/mK]	0,95	0,95	0,95	0,95
λ_3 [W/mK]	0,028	0,028	0,028	0,028
λ_4 [W/mK]	46,1	46,1	46,1	46,1

Tab. 3.22 Výsledky pro horní část levé boční stěny (konec)

	úsek 1	úsek 2	úsek 3	úsek 4
λ_{ekv} [W/mK]	3,977	3,977	3,977	3,977
α_k [W/m ² K]	3,463	2,965	3,211	3,847
α_r [W/m ² K]	5,016	4,977	4,994	5,061
α [W/m ² K]	8,479	7,942	8,205	8,908
q_{slh} [W/m ²]	787,0	782,8	784,9	789,9
kontrola ϑ_1 [°C]	222,87	228,05	225,44	219,15
kontrola ϑ_2 [°C]	140,03	145,65	142,82	136,00

3.4.3.2 Dolní úsek levé boční stěny

a) Obecný postup

- Odhad teplot na rozhraní dvou materiálů (pro veškeré úseky se použije společný odhad)

- Střední hodnota povrchových teplot

$$\vartheta_{\text{postř1}} = \frac{\text{suma hodnot teplot pro úsek 1}}{\text{celkový počet hodnot pro úsek 1}} \text{ [°C]} \quad (3.22)$$

- Střední hodnoty teplot uvnitř materiálu a tepelné vodivosti materiálu

$$\vartheta_{S11} = \frac{\vartheta_p + \vartheta_1}{2} \text{ [°C]} \quad (3.23)$$

$$\vartheta_{S12} = \frac{\vartheta_1 + \vartheta_2}{2} \text{ [°C]} \quad (3.24)$$

$$\vartheta_{S13} = \frac{\vartheta_2 + \vartheta_3}{2} \text{ [°C]} \quad (3.25)$$

$$\vartheta_{S14} = \frac{\vartheta_3 + \vartheta_4}{2} \text{ [°C]} \quad (3.26)$$

$$\vartheta_{S15} = \frac{\vartheta_4 + \vartheta_5}{2} \text{ [°C]} \quad (3.27)$$

kde:

ϑ_p [°C] provozní teplota pece

$\vartheta_1, \vartheta_2, \vartheta_3, \vartheta_4, \vartheta_5$ [°C] odhad teplot na rozhraní materiálu

- Ekvivalentní vodivost vrstvy

$$\lambda_{ekv1} = \frac{d}{F} \cdot \left(\frac{F_1}{d} + \frac{F_2}{d} \right) = \frac{1}{F} \cdot (F_1 \cdot \lambda_5 + F_2 \cdot \lambda_6) \text{ [W/mK]} \quad (3.28)$$

d [m] tloušťka materiálu

F, F_1, F_2 [m²] plocha

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_5, \lambda_6$ [W/mK] tepelná vodivost různých materiálů

Plocha o výšce 0,64 m je podpírána ocelovou konstrukcí, která je vysoká 0,03 m. Plocha se tedy navýší na velikost 0,75 m. Hodnoty ploch budou $F=0,75 \text{ m}^2$, $F_1=0,72 \text{ m}^2$, $F_2=0,03 \text{ m}^2$.

- Přestup tepla prouděním pro svislou stěnu

$$\alpha_{k1} = 2,56 \sqrt[4]{(\vartheta_{postř1} - \vartheta_{ok})} \text{ [W/m}^2\text{K]} \quad (3.29)$$

kde:

$\vartheta_{postř1}$ [°C] střední hodnota povrchových teplot

ϑ_{ok} [°C] teplota okolí pece

- Součinitel prostupu tepla radiací na 1 m²

$$\alpha_{r1} = \frac{\varepsilon \cdot \sigma_{\check{c}} \cdot \left[\left(\frac{\vartheta_{postř1}}{100} \right)^4 - \left(\frac{\vartheta_{ok}}{100} \right)^4 \right]}{\vartheta_{stř1} - \vartheta_{ok}} \text{ [W/m}^2\text{K]} \quad (3.30)$$

kde:

ε [-] součinitel emisivity tělesa

$\sigma_{\check{c}}$ [-] Stefanovo-Boltzmannova konstanta

$\vartheta_{postř1}$ [K] termodynamická teplota středních povrchových hodnot teploty

ϑ_{ok} [K] termodynamická teplota okolí pece

- Součinitel přestupu tepla radiací i konvekcí

$$\alpha_1 = \alpha_{k1} + \alpha_{r1} \text{ [W/m}^2\text{K]} \quad (3.31)$$

kde

α_{k1} [W/m²K] sdílení tepla konvekcí vzhůru pro vodorovnou stěnu

α_{r1} [W/m²K] Součinitel prostupu tepla radiací na 1 m²

- Výpočet ztrát tepla konvekcí, vedením a radiací na 1 m²

$$q_{s1s1} = \frac{\vartheta_p - \vartheta_{ok}}{\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3} + \frac{d_4}{\lambda_4} + \frac{d_5}{\lambda_{ekv}} + \frac{1}{\alpha_1}} \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (3.32)$$

kde:

ϑ_p [°C] provozní teplota pece

ϑ_{ok} [°C] teplota okolí pece

d_1, d_2, d_3, d_4 [m] tloušťky jednotlivých materiálu

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ [W/mK] tepelná vodivost různých materiálů

λ_{ekv} [W/mK] ekvivalentní vodivost vrstvy

α_1 [W/mK] součinitel přestupu tepla radiací a konvekcí

- Kontrola odhadu teplot na rozhraní jednotlivých materiálů

$$\vartheta_{11} = \vartheta_p - q_1 \cdot \left(\frac{d_1}{\lambda_1}\right) \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3.33)$$

$$\vartheta_{12} = \vartheta_p - q_1 \cdot \left(\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2}\right) \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3.34)$$

$$\vartheta_{13} = \vartheta_p - q_1 \cdot \left(\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3}\right) \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3.35)$$

$$\vartheta_{14} = \vartheta_p - q_1 \cdot \left(\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3} + \frac{d_4}{\lambda_4}\right) \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3.36)$$

kde:

ϑ_p [°C] provozní teplota pece

q_1 [°C] ztráty tepla konvekcí, vedením a radiací na 1 m²

d_1, d_2, d_3, d_4 [m] tloušťky jednotlivých materiálu

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ [W/mK] tepelná vodivost

Z hodnoty ϑ_{s1} se zjistila hodnota tepelné vodivosti a to tak, že se odečetla z grafu 3.4. Stejně tak se zjistily ostatní tepelné vodivosti odečtením z příslušných grafů.

b) Dosazení do rovnic – první úsek

Odhad teplot na rozhraní dvou materiálů (pro veškeré úseky se použije společný odhad)

$\vartheta_1=1090$ [°C], $\vartheta_2=990$ [°C], $\vartheta_3=720$ [°C], $\vartheta_4=140$ [°C]

$$\vartheta_{postř1} = \frac{\text{suma hodnot teplot pro úsek 1}}{\text{celkový počet hodnot pro úsek 1}} = \frac{25,6+24,9+29,4+31,3}{4} = 27,8 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3.22)$$

$$\vartheta_{S11} = \frac{\vartheta_p + \vartheta_1}{2} = \frac{1200 + 1090}{2} = 1145 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3.23)$$

$$\vartheta_{S12} = \frac{\vartheta_1 + \vartheta_2}{2} = \frac{1090 + 990}{2} = 1040 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3.24)$$

$$\vartheta_{S13} = \frac{\vartheta_2 + \vartheta_3}{2} = \frac{990 + 720}{2} = 855 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3.25)$$

$$\vartheta_{S14} = \frac{\vartheta_1 + \vartheta_4}{2} = \frac{720 + 140}{2} = 430 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3.26)$$

$$\vartheta_{S15} = \frac{\vartheta_4 + \vartheta_5}{2} = \frac{140 + 22,24}{2} = 81,12 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3.27)$$

$$\lambda_1 = 0,4 \text{ [W/mK]}, \lambda_2 = 1,079 \text{ [W/mK]}, \lambda_3 = 0,23 \text{ [W/mK]}, \lambda_4 = 0,12 \text{ [W/mK]}$$

$$\lambda_5 = 0,029 \text{ [W/mK]}, \lambda_6 = 36,7 \text{ [W/mK]}$$

$$\lambda_{ekv1} = \frac{d}{F} \cdot \left(\frac{F_1}{\frac{d}{\lambda_1}} + \frac{F_2}{\frac{d}{\lambda_2}} \right) = \frac{1}{F} \cdot (F_1 \cdot \lambda_5 + F_2 \cdot \lambda_6) = \frac{1}{0,75} \cdot (0,72 \cdot 0,029 + 0,03 \cdot 36,7) =$$

$$= 1,49 \text{ [W/mK]} \quad (3.28)$$

- Přestup tepla prouděním pro svislou stěnu

$$\alpha_{k1} = 2,56^4 \sqrt{(\vartheta_{postř1} - \vartheta_{ok})} = 2,56^4 \sqrt{(27,8 - 21,5)} = 4,06 \text{ [W/m}^2\text{K]} \quad (3.29)$$

- Součinitel prostupu tepla radiací na 1 m²

$$\alpha_{r1} = \frac{\varepsilon \cdot \sigma \cdot \left[\left(\frac{\vartheta_{postř1}}{100} \right)^4 - \left(\frac{\vartheta_{ok}}{100} \right)^4 \right]}{\vartheta_{stř1} - \vartheta_{ok}} = \frac{0,85 \cdot 5,6697 \cdot \left[\left(\frac{27,8}{100} \right)^4 - \left(\frac{21,5}{100} \right)^4 \right]}{27,8 - 21,5} = 4,79 \text{ [W/m}^2\text{K]} \quad (3.30)$$

- Součinitel přestupu tepla radiací i konvekcí

$$\alpha_1 = \alpha_{k1} + \alpha_{r1} = 4,06 + 4,79 = 8,85 \text{ [W/m}^2\text{K]} \quad (3.31)$$

- Výpočet ztrát tepla konvekcí, vedením a radiací na 1 m²

$$q_{sls1} = \frac{\vartheta_p - \vartheta_{ok}}{\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3} + \frac{d_4}{\lambda_4} + \frac{d_5}{\lambda_{ekv}} + \frac{1}{\alpha_1}} = \frac{1200 - 21,5}{\frac{0,04}{0,4} + \frac{0,12}{1,079} + \frac{0,07}{0,23} + \frac{0,1}{0,12} + \frac{0,13}{1,49} + \frac{1}{8,85}} = 760,9 \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (3.32)$$

- Kontrola odhadu teplot na rozhraní jednotlivých materiálů

$$\vartheta_{11} = \vartheta_p - q_1 \cdot \left(\frac{d_1}{\lambda_1} \right) = 1200 - 787,29 \cdot \left(\frac{0,04}{0,4} \right) = 1123,91 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3.33)$$

$$\vartheta_{12} = \vartheta_p - q_1 \cdot \left(\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} \right) = 1200 - 760,9 \cdot \left(\frac{0,04}{0,4} + \frac{0,12}{1,079} \right) = 1039,29 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3.34)$$

$$\vartheta_{13} = \vartheta_p - q_1 \cdot \left(\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3} \right) = 1200 - 760,9 \cdot \left(\frac{0,04}{0,4} + \frac{0,12}{1,079} + \frac{0,07}{0,23} \right) =$$

$$= 807,71 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3.35)$$

$$\vartheta_{14} = \vartheta_p - q_1 \cdot \left(\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3} + \frac{d_4}{\lambda_4} \right) = 1200 - 760,9 \cdot \left(\frac{0,04}{0,4} + \frac{0,12}{1,079} + \frac{0,07}{0,23} + \frac{0,1}{0,12} \right) = 173,63 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3.36)$$

Tab. 3.23 Výsledky pro spodní část levé boční stěny

	úsek 1	úsek 2	úsek 3	úsek 4
ϑ_p [°C]	1200	1200	1200	1200
odhad ϑ_1 [°C]	1090	1090	1090	1090
odhad ϑ_2 [°C]	990	990	990	990
odhad ϑ_3 [°C]	720	720	720	720
odhad ϑ_4 [°C]	140	140	140	140
$\vartheta_{po\ st\bar{r}}$ [°C]	27,8	26,7	27,4	24,07
ϑ_{S1} [°C]	1145	1145	1145	1145
ϑ_{S2} [°C]	1040	1040	1040	1040
ϑ_{S3} [°C]	855	855	855	855
ϑ_{S4} [°C]	430	430	430	430
ϑ_{S5} [°C]	83,9	83,35	83,7	82,04
λ_1 [W/mK]	0,4	0,4	0,4	0,4
λ_2 [W/mK]	1,079	1,079	1,079	1,079
λ_3 [W/mK]	0,23	0,23	0,23	0,23
λ_4 [W/mK]	0,12	0,12	0,12	0,12
λ_5 [W/mK]	0,029	0,029	0,029	0,029
λ_6 [W/mK]	36,7	36,7	36,7	36,7
λ_{ekv} [W/mK]	1,49	1,49	1,49	1,49
α_k [W/m ² K]	4,06	3,87	3,99	3,64
α_r [W/m ² K]	4,79	4,77	4,78	4,7
α [W/m ² K]	8,85	8,63	8,77	8,34
q_{sls} [W/m ²]	760,9	759,51	760,42	757,53
kontrola ϑ_1 [°C]	1123,91	1124,05	1123,96	1124,25
kontrola ϑ_2 [°C]	1039,29	1039,58	1039,39	1040,00
kontrola ϑ_3 [°C]	807,71	808,43	807,96	809,45
kontrola ϑ_4 [°C]	173,63	175,5	174,27	178,17

3.4.4 Pravá boční stěna

Tab. 3.24 Naměřené teploty na pravé boční stěně

	úsek 1 [°C]				úsek 2 [°C]				úsek 3 [°C]				úsek 4 [°C]			
horní část	28,5	24,8	26,6	24,7	24,6	21,2	28	24,9	36,6	35,9	35,7	36,8	36,0	35,1	35,5	34,4
spodní část	21,6	24,4	26,9	28,8	25,7	23,9	28,7	24,6	37,4	34,3	34,6	33,5	35,3	32,6	37,5	33,0

Tab. 3.25 Střední hodnoty povrchových teplot levé boční stěny

	úsek 1	úsek 2	úsek 3	úsek 4
$\vartheta_{po\ st\ horn\ i}$ [°C]	26,15	24,67	36,25	35,25
$\vartheta_{po\ st\ spodn\ i}$ [°C]	25,43	20,58	27,96	27,68

3.4.4.1 Horní úsek pravé boční stěny

Tab. 3.26 Výsledky pro horní část pravé boční stěny (začátek)

	úsek 1	úsek 2	úsek 3	úsek 4
ϑ_p [°C]	1200	1200	1200	1200
odhad ϑ_1 [°C]	590	590	590	590
odhad ϑ_2 [°C]	80	80	80	80
$\vartheta_{po\ st\ i}$ [°C]	26,15	24,675	36,25	35,25
ϑ_{s1} [°C]	895	895	895	895
ϑ_{s2} [°C]	335	335	335	335
ϑ_{s3} [°C]	53,07	52,33	58,12	57,62
λ_1 [W/mK]	0,24	0,24	0,24	0,24
λ_2 [W/mK]	0,098	0,098	0,098	0,098
λ_3 [W/mK]	0,027	0,027	0,027	0,027
λ_4 [W/mK]	45	45	45	45
λ_{ekv} [W/mK]	3,88	3,88	3,88	3,88
α_k [W/m ² K]	4,03	3,76	5,14	5,06
α_r [W/m ² K]	5,05	5,01	5,31	5,29
α [W/m ² K]	9,08	8,78	10,45	10,35

Tab. 3.26 Výsledky pro horní část pravé boční stěny (konec)

	úsek 1	úsek 2	úsek 3	úsek 4
q_{slh} [W/m ²]	489,88	489,10	492,85	492,64
kontrola ϑ_1 [°C]	591,73	592,70	588,05	588,31
kontrola ϑ_2 [°C]	91,85	93,61	85,15	85,61

Tab. 3.27 Výsledky pro dolní část pravé boční stěny (začátek)

	úsek 1	úsek 2	úsek 3	úsek 4
ϑ_p [°C]	1200	1200	1200	1200
odhad ϑ_1 [°C]	1100	1100	1100	1100
odhad ϑ_2 [°C]	1110	1110	1110	1110
odhad ϑ_3 [°C]	720	720	720	720
odhad ϑ_4 [°C]	160	160	160	160
$\vartheta_{po\ st\bar{r}}$ [°C]	25,425	25,72	34,95	34,6
ϑ_{s1} [°C]	1150	1150	1150	1150
ϑ_{s2} [°C]	1105	1105	1105	1105
ϑ_{s3} [°C]	915	915	915	915
ϑ_{s4} [°C]	440	440	440	440
ϑ_{s5} [°C]	92,7	92,9	97,5	97,3
λ_1 [W/mK]	0,38	0,38	0,38	0,38
λ_2 [W/mK]	1,087	1,087	1,087	1,087
λ_3 [W/mK]	0,24	0,24	0,24	0,24
λ_4 [W/mK]	0,15	0,15	0,15	0,15
λ_5 [W/mK]	0,03	0,03	0,03	0,03
λ_6 [W/mK]	44	44	44	44
λ_{ekv} [W/mK]	1,789	1,789	1,789	1,789
α_k [W/m ² K]	3,907	3,960	5,034	5,004
α_r [W/m ² K]	4,993	4,871	5,058	5,051
α [W/m ² K]	8,900	7,105	9,358	9,312
q_{slh} [W/m ²]	867,2	867,6	876,9	876,6

Tab. 3.27 Výsledky pro dolní část pravé boční stěny (konec)

	úsek 1	úsek 2	úsek 3	úsek 4
kontrola ϑ_1 [°C]	1109	1109	1108	1108
kontrola ϑ_2 [°C]	1012,99	1012,88	1010,90	1010,95
kontrola ϑ_3 [°C]	760,07	759,82	755,14	755,27
kontrola ϑ_4 [°C]	181,96	181,39	170,57	170,85

3.4.5 Dno

Dno je asi na výpočet nejsložitější částí, z tohoto důvodu se pro zjednodušení bude potřebovat náhradní tepelná vodivost. Při výpočtu, že se plocha jednotlivých částí podělí součtem podílu tloušťek a teplených vodivostí. Teplota mezi vnitřkem a venkovní částí dna byla odhadnuta na 280 °C.

Tab. 3.28 Skladba jednotlivých vrstev dna

Plocha $F_1=0,6 \text{ m}^2$			
Vrstva	Materiál	Tloušťka	λ [W/mK]
F ₁₁	Carath 1450-LC	0,15	1,42
F ₁₂	Carath FL-1250	0,135	0,54
F ₁₃	CAS 1000	0,05	0,11
Plocha $F_2=0,195 \text{ m}^2$			
Vrstva	Materiál	Tloušťka	λ [W/mK]
F ₂₁	Carath 1450-LC-BT	0,275	1,48
Plocha $F_3=0,12 \text{ m}^2$			
Vrstva	Materiál	Tloušťka	λ [W/mK]
F ₃₁	Vzduch	0,275	0,04
Plocha $F_4=0,42 \text{ m}^2$			
Vrstva	Materiál	Tloušťka	λ [W/mK]
F ₄₁	Lancast 145-BT	0,03	1,24
F ₄₂	KVF-121	0,04	0,14
F ₄₃	Porrrath FL 24-10	0,125	0,12
F ₄₄	KPS081/900	0,01	0,096
Plocha $F_4=0,25 \text{ m}^2$			
Vrstva	Materiál	Tloušťka	λ [W/mK]
F ₅₁	KVF-121	0,2	0,14
F ₅₂	Porrrath FL 24-10	0,125	0,12
F ₅₃	KPS081/900	0,01	0,096

a) Obecný postup

- Ekvivalentní vodivost celé vrstvy

$$\lambda_{ekv} = \frac{d}{F} \cdot \left(\frac{F_1}{\frac{d_{F11}+d_{F12}+d_{F13}}{\lambda_{F11}} + \frac{d_{F21}}{\lambda_{F21}} + \frac{d_{F31}}{\lambda_{31}} + \frac{F_4}{\frac{d_{F41}+d_{F42}+d_{F43}+d_{F44}}{\lambda_{F41}} + \frac{d_{F51}+d_{F52}+d_{F53}}{\lambda_{F51}} + \frac{d_{F52}+d_{F53}}{\lambda_{F52}} + \frac{d_{F53}}{\lambda_{F53}}} + \frac{F_2}{\lambda_{F21}} + \frac{F_3}{\lambda_{31}} + \frac{F_4}{\frac{d_{F41}+d_{F42}+d_{F43}+d_{F44}}{\lambda_{F41}} + \frac{d_{F51}+d_{F52}+d_{F53}}{\lambda_{F51}} + \frac{d_{F52}+d_{F53}}{\lambda_{F52}} + \frac{d_{F53}}{\lambda_{F53}}} + \frac{F_5}{\lambda_{F51}} \right) [\text{W/mK}] \quad (3.37)$$

kde:

d [m] tloušťka materiálu

$F, F_1, F_2, F_3, F_4, F_5$, [m²] plocha

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_6$, [W/mK] tepelná vodivost různých materiálů

- Sdílení tepla konvekcí pro vodorovnou stěnu směrem dolů

$$\alpha_{k1} = 1,31^4 \sqrt{(\vartheta_{po} - \vartheta_{podl})} [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (3.38)$$

kde:

ϑ_{po} [°C] odhadnutá teplota

θ_{podl} [K] termodynamická teplota podlahy

- Množství tepla vedením a prouděním

$$q_{dvp} = \frac{\vartheta_p - \vartheta_{ok}}{\frac{d}{\lambda_{ekv}} + \frac{1}{\alpha_{kd}}} [\text{W/m}^2] \quad (3.39)$$

kde:

ϑ_p [°C] provozní teplota pece

ϑ_{ok} [°C] teplota okolí pece

d [m] tloušťka materiálu

λ_{ekv} [W/mK] ekvivalentní vodivost vrstvy

α_{kd} [W/m²K] sdílení tepla konvekcí pro vodorovnou stěnu směrem dolů

- Radiace mezi pecí a podlahou (pod podpěrnou konstrukcí pece)

$$q_{dr} = \frac{\sigma_{\xi}}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \cdot \left[\left(\frac{\theta_{po}}{100} \right)^4 - \left(\frac{\theta_{podl}}{100} \right)^4 \right] [\text{W/m}^2] \quad (3.40)$$

kde:

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$ [-] součinitele emisivity tělesa

σ_{ξ} [-] Stefanovo-Boltzmannova konstanta

θ_{po} [K] termodynamická teplota podpěrné konstrukce

θ_{podl} [K] termodynamická teplota podlahy

- Celkové množství ztrát dna

$$q_d = q_{dvp} + q_{dr} \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (3.41)$$

kde:

q_{dvp} [W/m²] množství tepla vedením a prouděním

q_{dr} [W/m²] radiace mezi podpěrnou konstrukcí a podlahou

- Kontrola odhadu teploty vnějšího povrchu dna

$$\vartheta_{po} = \vartheta_p - q_d \cdot \frac{d}{\lambda_{ekv}} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (4.42)$$

kde:

ϑ_p [°C] provozní teplota pece

q_d celkové množství ztrát dna

d [m] tloušťka materiálu

λ_{ekv} [W/mK] ekvivalentní vodivost materiálu

- Tepelné ztráty radiací pro spáru dna

$$q_{sp} = F_{sp} \cdot \varepsilon \cdot \sigma_{\zeta} \left[\left(\frac{\theta_{po}}{100} \right)^4 - \left(\frac{\theta_{podl}}{100} \right)^4 \right] \text{ [kW]} \quad (4.43)$$

kde:

F_{sp} [m²] plocha spáry dna, ta se spočte jako $F_{sp} = \text{spára} \cdot \text{délka}$

ε [-] součinitel emisivity tělesa

σ_{ζ} [-] Stefanovo-Boltzmannova konstanta

θ_{po} [K] termodynamická teplota podpěrné konstrukce

θ_{podl} [K] termodynamická teplota podlahy

V úvahu se berou zábrany, které omezují spáru u krokového zařízení pece. Z toho vyplývá, že spára bude 0,04 m široká a dlouhá 14 m.

b) Dosazení do rovnic – první úsek

- Ekvivalentní vodivost celé vrstvy

$$\lambda_{ekv} = \frac{d}{F} \cdot \left(\frac{F_1}{\frac{d_{F11}+d_{F12}+d_{F13}}{\lambda_{F11}} + \frac{d_{F21}}{\lambda_{F21}} + \frac{d_{F31}}{\lambda_{F31}} + \frac{F_4}{\frac{d_{F41}+d_{F42}+d_{F43}+d_{F44}}{\lambda_{F41}} + \frac{d_{F51}+d_{F52}+d_{F53}}{\lambda_{F51}} + \frac{d_{F52}+d_{F53}}{\lambda_{F52}} + \frac{d_{F53}}{\lambda_{F53}}} + \frac{F_2}{\lambda_{F21}} + \frac{F_3}{\lambda_{F31}} + \frac{F_4}{\lambda_{F41}} + \frac{F_5}{\lambda_{F51}} \right) = \frac{0,335}{1,585} \cdot$$

$$\left(\frac{0,6}{\frac{0,15}{1,42} + \frac{0,135}{0,54} + \frac{0,05}{0,11}} + \frac{0,195}{1,48} + \frac{0,12}{0,275} + \frac{0,12}{\frac{0,03}{1,24} + \frac{0,04}{0,14} + \frac{0,125}{0,12} + \frac{0,01}{0,096}} + \frac{0,25}{\frac{0,2}{0,14} + \frac{0,125}{0,12} + \frac{0,01}{0,096}} \right) = 0,464 \text{ [W/mK]} \quad (3.37)$$

- Sdílení tepla konvekcí pro vodorovnou stěnu směrem dolů

$$\alpha_{k1} = 1,31^4 \sqrt{(\vartheta_{po} - \vartheta_{podl})} = 1,31^4 \sqrt{(120 - 75)} = 3,39 \text{ [W/m}^2\text{K]} \quad (3.38)$$

- Množství tepla vedením a prouděním

$$q_{dvp} = \frac{\vartheta_p - \vartheta_{ok}}{\frac{d}{\lambda_{ekv}} + \frac{1}{\alpha_{kd}}} = \frac{1200 - 75}{\frac{0,335}{0,464} + \frac{1}{3,39}} = 1105,7 \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (3.39)$$

- Radiace mezi pecí a podlahou (pod podpěrnou konstrukcí pece)

$$q_{dr} = \frac{\sigma_{\check{c}}}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \cdot \left[\left(\frac{\theta_{po}}{100} \right)^4 - \left(\frac{\theta_{podl}}{100} \right)^4 \right] = \frac{5,6697}{\frac{1}{0,85} + \frac{1}{0,85} - 1} \cdot \left[\left(\frac{120}{100} \right)^4 - \left(\frac{75}{100} \right)^4 \right] =$$

$$= 385,5 \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (3.40)$$

- Celkové množství ztrát dna

$$q_d = q_{dvp} + q_{dr} = 1105,7 + 385,5 = 1491 \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (3.41)$$

- Kontrola odhadu teploty vnějšího povrchu dna

$$\vartheta_{po} = \vartheta_p - q_d \cdot \frac{d}{\lambda_{ekv}} = 1220 - 1491 \cdot \frac{0,335}{0,464} = 122,26 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3.42)$$

- Tepelné ztráty radiací pro spáru dna

$$q_{sp} = F_{sp} \cdot \varepsilon \cdot \sigma_{\check{c}} \left[\left(\frac{\theta_{po}}{100} \right)^4 - \left(\frac{\theta_{podl}}{100} \right)^4 \right] = 0,56 \cdot 0,85 \cdot 5,6697 \cdot \left[\left(\frac{1200+273,15}{100} \right)^4 - \left(\frac{75+273,15}{100} \right)^4 \right] =$$

$$= 126,71 \text{ [kW]} \quad (3.43)$$

Tab. 3.29 Skladba jednotlivých vrstev dna

λ_{ekv} [W/mK]	0,464
α_k [W/m ² K]	3,393
q_{dvp} [W/m ² K]	1 105,706
q_{dr} [W/m ² K]	385,517
q_d [W/m ²]	1491,2
kontrola ϑ_{po} [°C]	122,2658

3.4.6 Dveře

a) Obecný postup

Zavřené dveře

- Tepelné ztráty radiací dveří

$$q_{zd} = F_{zd} \cdot \varepsilon \cdot \sigma_{\check{c}} \cdot \left(\frac{\theta_{po}}{100}\right)^4 \text{ [kW]} \quad (3.44)$$

kde:

F_{zd} [m²] plocha dveřního otvoru

ε [-] součinitel emisivity tělesa

$\sigma_{\check{c}}$ [-] Stefanovo-Boltzmannova konstanta

θ_{po} [K] termodynamická teplota podpěrné konstrukce

Otevřené dveře

Tab. 3.30 Hodnoty teplot dveří

Vstupní dveře		
290	463	390
Výstupní dveře		
59	110	65

- Střední hodnota povrchových teplot

$$\vartheta_{postř1} = \frac{\text{suma hodnot teplot pro úsek 1}}{\text{celkový počet hodnot pro úsek 1}} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3.45)$$

- Střední hodnota teploty mezi střední hodnotou povrchových hodnot teplot a vnitřní teplotou peci:

$$\vartheta_{s1} = \frac{\vartheta_p + \vartheta_{po.stř1}}{2} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3.46)$$

kde:

ϑ_p [°C] provozní teplota pece

$\vartheta_{po.stř1}$ [°C] střední hodnota povrchových teplot

- Přestup tepla prouděním pro svislou stěnu

$$\alpha_{k1} = 2,56 \sqrt{(\vartheta_{postř1} - \vartheta_{ok})} \text{ [W/m}^2\text{K]} \quad (3.47)$$

kde:

$\vartheta_{p_{ostř1}}$ [°C] střední hodnota povrchových teplot

ϑ_{ok} [°C] teplota okolí pece

- Součinitel prostupu tepla radiací na 1 m²

$$\alpha_{dr} = \frac{\varepsilon \cdot \sigma_{\zeta} \cdot \left[\left(\frac{\vartheta_{p_{ostř1}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{\vartheta_{ok}}{100} \right)^4 \right]}{\vartheta_{p_{ostř1}} - \vartheta_{ok}} \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (3.48)$$

kde:

ε [-] součinitel emisivity tělesa

σ_{ζ} [-] Stefanovo-Boltzmannova konstanta

$\vartheta_{p_{ostř1}}$ [K] termodynamická teplota středních povrchových hodnot teploty

ϑ_{ok} [K] termodynamická teplota okolí pece

- Součinitel přestupu tepla radiací i konvekcí

$$\alpha_1 = \alpha_{k1} + \alpha_{r1} \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (3.49)$$

kde

α_{k1} [W/m²K] sdílení tepla konvekcí vzhůru pro vodorovnou stěnu

α_{r1} [W/m²K] součinitel prostupu tepla radiací na 1 m²

- Výpočet ztrát tepla konvekcí, vedením a radiací na 1 m²

$$q_{odvs} = \frac{\vartheta_p - \vartheta_{ok}}{\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{1}{\alpha_1}} \quad [\text{W/m}^2] \quad (3.50)$$

kde:

ϑ_p [°C] provozní teplota pece

ϑ_{ok} [°C] teplota okolí pece

d_1, d_2, d_3 [m] tloušťky jednotlivých materiálů

λ_1, λ_2 [W/mK] tepelná vodivost

λ_{ekv} [W/mK] ekvivalentní vodivost vrstvy

α_1 [W/mK] součinitel přestupu tepla radiací a konvekcí

b) Dosažení do rovnic – první úsekZavřené dveře

- Tepelné ztráty radiací dveří

$$q_{zd} = F_z \cdot \varepsilon \cdot \sigma_{\check{c}} \cdot \left(\frac{\theta_{po}}{100}\right)^4 = 0,7055 \cdot 0,85 \cdot 5,6697 \cdot \left(\frac{1200+273,15}{100}\right)^4 = 159,198 \text{ [kW]}$$

$$F_z = 0,415 \cdot 1,7 = 0,7055 \text{ m}^2 \quad (3.44)$$

Otevřené dveře

- Střední hodnota povrchových teplot

$$\vartheta_{postř1} = \frac{\text{suma hodnot teplot pro úsek 1}}{\text{celkový počet hodnot pro úsek 1}} = \frac{290+463+390}{3} = 381 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3.45)$$

- Střední hodnota teploty mezi střední hodnotou povrchových hodnot teplot a vnitřní teplotou peci:

$$\vartheta_{S1} = \frac{\vartheta_p + \vartheta_{postř1}}{2} = \frac{1200+381}{2} = 790,5 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3.46)$$

- Přestup tepla prouděním pro svislou stěnu

$$\alpha_{k1} = 2,56 \sqrt[4]{(\vartheta_{postř1} - \vartheta_{ok})} = 2,56 \sqrt[4]{(381 - 21,5)} = 11,15 \text{ [W/m}^2\text{K]} \quad (3.47)$$

- Součinitel prostupu tepla radiací na 1 m²

$$\alpha_{dr} = \frac{\varepsilon \cdot \sigma_{\check{c}} \cdot \left[\left(\frac{\theta_{po}}{100}\right)^4 - \left(\frac{\theta_{podl}}{100}\right)^4\right]}{\vartheta_{postř1} - \vartheta_{ok}} = \frac{0,85 \cdot 5,6697 \cdot \left[\left(\frac{381}{100}\right)^4 - \left(\frac{21,5}{100}\right)^4\right]}{1200 - 21,5} = 23,54 \text{ [W/m}^2\text{K]} \quad (3.48)$$

- Součinitel přestupu tepla radiací i konvekcí

$$\alpha_1 = \alpha_{k1} + \alpha_{r1} = 11,15 + 23,54 = 34,68 \text{ [W/m}^2\text{K]} \quad (3.49)$$

- Výpočet ztrát tepla konvekcí, vedením a radiací na 1 m²

$$q_{odvs} = \frac{\vartheta_p - \vartheta_{ok}}{\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{1}{\alpha_1}} = \frac{1200 - 21,5}{\frac{0,25}{0,21} + \frac{1}{34,8}} = 966,53 \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (3.50)$$

Tab. 3.31 Spočítané teploty u otevřených dveří

	Vstupní dveře	Výstupní dveře
$\vartheta_{postř} \text{ [}^\circ\text{C]}$	381,0	78,0
$\vartheta_s \text{ [}^\circ\text{C]}$	790,5	639
$\lambda \text{ [W/mK]}$	0,21	0,21
$\alpha_k \text{ [W/m}^2\text{K]}$	11,15	7,02
$\alpha_r \text{ [W/m}^2\text{K]}$	23,54	6,54
$\alpha \text{ [W/m}^2\text{K]}$	34,68	13,56
$q_{od} \text{ [W/m}^2\text{K]}$	966,53	932,19

3.5 Celkové ztráty pece

Postup výpočtu byl takový, že se nejprve se počítaly střední hodnoty daných úseků. Hodnoty jsou vypočteny na 1 m² plochy. Ty se pak vynásobily danými plochami. Rozměry a plochy jsou zapsány v tabulce 3.31, ve které jsou součástí i místa poblíž pece.

Tab. 3.32 Rozměry pece (obsahují i místa poblíž)

	levý bok		pravý bok		strop	dno	dveře vstupní	dveře výstupní
	horní	spodní	horní	spodní				
výška [m]	0,455	0,75	0,455	0,75	2,5	1,585	1,15	1,15
délka [m]	14	14	14	14	14	14	1,8	1,8
plocha F[m ²]	6,37	10,5	6,37	10,5	35	22,19	2,07	2,07

a) Obecný postup

- Celkové ztráty - strop

$$q_{st\ celk} = q_{st\ stř} \cdot F_{st} \text{ [W]} \quad (3.51)$$

kde:

$q_{st\ stř}$ [W/m²] střední hodnota tepelných ztrát stropu

F_{st} [m²] plocha stropu

- Tepelné ztráty sáláním skrze neměřitelné spáry v materiálu AlsitraMOD 1400/200 (z důvodu vyrovnání ztrát se k celkovým ztrátám přičte 20% ztrát navíc)

kde:

$$q_{st\ celk} = q_{st\ c} \cdot 1,2 \text{ [W]} \quad (3.52)$$

$q_{st\ c}$ [W] celkové ztráty - strop

- Celkové ztráty-levá stěna (horní úsek)

$$q_{slh\ celk} = q_{slh\ stř} \cdot F_{slh} \text{ [W]} \quad (3.53)$$

kde:

$q_{slh\ stř}$ [W/m²] střední hodnota tepelných ztrát levé stěny (horní úsek)

F_{slh} [m²] plocha levé stěny (horní úsek)

- Celkové ztráty -levá stěna (spodní úsek)

$$q_{sls\ celk} = q_{sls\ stř} \cdot F_{sls} \text{ [W]} \quad (3.54)$$

kde:

$q_{sls\ stř}$ [W/m²] střední hodnota tepelných ztrát levé stěny (spodní úsek)

F_{sls} [m²] plocha levé stěny (spodní úsek)

- Celkové ztráty-pravý horní úsek

$$q_{sph\ celk} = q_{sph\ stř} \cdot F_{sph} \text{ [W]} \quad (3.55)$$

kde:

$q_{sph\ stř}$ [W/m²] střední hodnota tepelných ztrát (pravý horní úsek)

F_{sph} [m²] plocha pravé stěny (horní úsek)

- Celkové ztráty-pravý dolní úsek

$$q_{sps\ celk} = q_{sps\ stř} \cdot F_{sps} \text{ [W]} \quad (3.56)$$

kde:

$q_{sps\ stř}$ [W/m²] střední hodnota tepelných ztrát (pravý horní úsek)

F_{sps} [m²] plocha pravé stěny (horní úsek)

Dno

- Ztráty stěny dna

$$q_{sps\ celk} = q_d \cdot F_d \text{ [W]} \quad (3.57)$$

kde:

q_d [W/m²] střední hodnota tepelných ztrát dna

F_d [m²] plocha dna

- Celkové ztráty- dno

$$q_d\ celk = q_d\ ved + q_{sp} \text{ [W]} \quad (3.58)$$

kde:

$q_d\ ved$ [W/m²] ztráty stěny dna

q_{sp} [W/m²] ztráty radiací spárami v krokovém mechanismu pece

Dveře

- Celkové ztráty sáláním-dveří (zavřených)

$$q_{zd\ c} = q_{zd} \cdot 2 \text{ [W]} \quad (3.59)$$

kde:

q [W] celkové ztráty sáláním

- Přičtení ztrát 20 % vzniklých tím, že dveře nedoléhají při uzavření.

kde:

$$q_{zd\ celk} = q_{zd\ c} \cdot 1,2 \text{ [W]} \quad (3.60)$$

$q_{zd\ c}$ [W] celkové ztráty (zavřených dveří)

- Celkové ztráty-vstupní dveře (otevřené)

$$q_{odvs\ c} = q_{odvs} \cdot F_{odvs} \text{ [W]} \quad (3.61)$$

kde:

q_{odvs} [W/m²] tepelné ztráty otevřených vstupních dveří

F_{odvs} [m²] plocha otevřených vstupních dveří

- Celkové ztráty-výstupní dveře (otevřené)

$$q_{odvys\ c} = q_{odvys} \cdot F_{odvys} \text{ [W]} \quad (3.62)$$

kde:

q_{odvys} [W/m²] tepelné ztráty otevřených výstupních dveří

F_{odvys} [m²] plocha otevřených výstupních dveří

- Celkové ztráty-otevřených dveří

$$q_{od\ c} = q_{odvs\ c} + q_{odvys\ c} \text{ [W]} \quad (3.63)$$

kde:

$q_{odvs\ c}$ [W/m²] tepelné ztráty otevřených výstupních dveří

$q_{odvys\ c}$ [m²] plocha otevřených výstupních dveří

- **Konečné tepelné ztráty pece**

$$q_{celk\ z} = q_{st\ celk} + q_{slh\ celk} + q_{sls\ celk} + q_{sph\ celk} + q_{sps\ celk} + q_{d\ celk} + q_{zd\ celk} \quad (3.64)$$

b) Dosazení do rovnic – první úsek

- Celkové ztráty - strop

$$q_{st\ celk} = q_{st\ st\check{r}} \cdot F_{st} = 651,95 \cdot 35 = 22\,817,2 \text{ [kW]} \quad (3.51)$$

- Celkové ztráty – strop po přičtení 20 procent

$$q_{st\ celk} = q_{st\ c} \cdot 1,2 = 22\,817,2 \cdot 1,2 = 27,38 \text{ [kW]} \quad (3.52)$$

- Celkové ztráty-levá stěna (horní úsek)

$$q_{slh\ celk} = q_{slh\ stř} \cdot F_{slh} = 786,14 \cdot 6,37 = 5,01 \text{ [kW]} \quad (3.53)$$

- Celkové ztráty -levá stěna (spodní úsek)

$$q_{sls\ celk} = q_{sls\ stř} \cdot F_{sls} = 759,59 \cdot 10,5 = 7,98 \text{ [kW]} \quad (3.54)$$

- Celkové ztráty-pravý horní úsek

$$q_{sph\ celk} = q_{sph\ stř} \cdot F_{sph} = 491,12 \cdot 6,37 = 3,13 \text{ [kW]} \quad (3.55)$$

- Celkové ztráty-pravý dolní úsek

$$q_{sps\ celk} = q_{sps\ stř} \cdot F_{sps} = 872,07 \cdot 10,5 = 9,16 \text{ [kW]} \quad (3.56)$$

- Ztráty stěny dna

$$q_{sps\ celk} = q_d \cdot F_d = 1491,2 \cdot 22,19 = 33,09 \text{ [kW]} \quad (3.57)$$

- Celkové ztráty - dno

$$q_d\ celk = q_d\ ved + q_{sp} = 33,09 + 126,71 = 159,80 \text{ [kW]} \quad (3.58)$$

- Celkové ztráty sáláním-dveří (zavřených)

$$q_{zd\ celk} = q \cdot 2 = 159,19 \cdot 2 = 0,318 \text{ [kW]} \quad (3.59)$$

- Přičtení ztrát 20 % vzniklých tím, že dveře nedoléhají při uzavření.

kde:

$$q_{zd\ celk} = q_{zd\ c} \cdot 1,2 = 3,93 \cdot 1,2 = 4,72 \text{ [kW]} \quad (3.60)$$

- Celkové ztráty-vstupní dveře (otevřených)

$$q_{odvs\ c} = q_{odvs} \cdot F_{odvs} = 966,53 \cdot 2,07 = 2,0 \text{ [kW]} \quad (3.61)$$

- Celkové ztráty-výstupní dveře (otevřených)

$$q_{odvys\ c} = q_{odvys} \cdot F_{odvys} = 932,19 \cdot 2,07 = 1,92 \text{ [kW]} \quad (3.62)$$

- Celkové ztráty-otevřených dveří

$$q_{od\ c} = q_{odvs\ c} + q_{odvys\ c} = 2,00 + 1,929 = 3,93 \text{ [kW]} \quad (3.63)$$

- **Konečné tepelné ztráty pece**

$$q_{celk\ z} = q_{st\ celk} + q_{slh\ celk} + q_{sls\ celk} + q_{sph\ celk} + q_{sps\ celk} + q_d\ celk + q_{zd\ celk} = \\ 27,38 + 5,01 + 7,98 + 3,13 + 9,16 + 159,80 + 3,93 = 216,39 \text{ [kW]} \quad (3.64)$$

Všechny výpočty použité pro zjištění tepelných ztrát pece byly použity z literatury [27], tzn. kapitola 3.4.

Tab. 3.32 Celkové ztráty dílčích konstrukcí pece

Strop					
	Úsek 1	Úsek 2	Úsek 3	Úsek 4	Střední hodnota
q_{slh} [W]	646,90	659,26	646,94	654,70	651,95
Ztráty celkem [kW]	27,38				
Levá stěna horní úsek					
	Úsek 1	Úsek 2	Úsek 3	Úsek 4	Střední hodnota
q_{sls} [W]	786,952	782,779	784,882	789,944	786,14
Ztráty celkem [kW]	5,01				
Levá stěna spodní úsek					
	Úsek 1	Úsek 2	Úsek 3	Úsek 4	Střední hodnota
q_{sph} [W]	760,90	759,51	760,42	757,53	759,59
Ztráty celkem [kW]	7,98				
Pravá stěna horní úsek					
	Úsek 1	Úsek 2	Úsek 3	Úsek 4	Střední hodnota
q_{sps} [W]	489,9	489,1	492,8	492,6	491,118
Ztráty celkem [kW]	3,13				
Pravá stěna dolní úsek					
	Úsek 1	Úsek 2	Úsek 3	Úsek 4	Střední hodnota
q_{sps} [W]	867,2	867,6	876,9	876,6	872,07
Ztráty celkem [kW]	9,16				
Dno					
q_{sps} [kW]	33,09				
Mechanismus pece					
q_{sps} [kW]	126,71				
dno+mechanismus [kW]	159,80				
Dveře					
zavřené [W]	0,32				
otevřené (vstup) [W]	2,00				
otevřené (výstup) [W]	1,93				
celkem (vstup+výstup)	3,93				
celkem dveře+20%	4,716				
celkem ztráty [kW]	216,4				

4 Porovnání výsledků měření termokamerou s výsledky měření optickými pyrometry

Nejprve se spočítaly ztráty pro termokameru. Dále byly vypočteny ztráty pro teploty naměřené oběma pyrometry. Výpočet není uveden podrobněji z důvodu, že by postup byl shodný s postupy kapitoly 3.4 Pak bylo provedeno porovnání ztrát. Jediné v čem se ztráty lišily, byly změřené hodnoty teplot.

Tab. 4.1 Naměřené teploty na peci na daných částech pyrometrem Voltcraft

Strop																
	úsek 1 [°C]				úsek 2 [°C]				úsek 3 [°C]				úsek 4 [°C]			
horní část	59,0	59,0	69,0	67,0	74,0	76,5	79,0	66,3	57,7	65,5	62,6	57,8	60,0	67,7	70,0	65,9
spodní část	49,0	63,9	61,8	62,9	74,5	75,3	72,4	68,8	59,4	66,1	64,1	57,9	64,7	68,2	71,3	69,0
Levá boční stěna																
	úsek 1 [°C]				úsek 2 [°C]				úsek 3 [°C]				úsek 4 [°C]			
horní část	21,2	23,9	26,9	25,6	24,2	23,8	24,2	25,1	24,0	24,1	23,7	24,8	26,0	25,1	28,1	27,2
spodní část	20,3	23,8	23,5	21,8	24,5	23,0	21,9	22,4	24,3	24,5	25,0	24,9	23,3	23,5	24,9	24,2
Pravá boční stěna																
	úsek 1 [°C]				úsek 2 [°C]				úsek 3 [°C]				úsek 4 [°C]			
horní část	23,7	24,9	26,3	24,5	24,5	24,2	25,3	24,8	24,2	23,8	24,7	24,8	25,3	25,6	25,5	25,1
spodní část	22,5	23,4	24,6	24,4	25,4	24,0	25,6	24,5	25,3	23,2	23,1	23,5	24,2	24,0	26,1	22,8

Tab. 4.2 Spočtené ztráty ze změřených hodnot pyrometru Voltcraft (začátek)

Strop					
	Úsek 1	Úsek 2	Úsek 3	Úsek 4	Střední hodnota
q_{slh} [W]	646,82	659,25	646,81	654,85	651,93
Ztráty celkem [kW]	27,38				
Levá stěna horní úsek					
	Úsek 1	Úsek 2	Úsek 3	Úsek 4	Střední hodnota
q_{sls} [W]	785,95	782,78	785,34	789,94	786,66
Ztráty celkem [kW]	5,01				

Tab. 4.2 Spočtené ztráty ze změřených hodnot pyrometru Voltcraft (konec)

Levá stěna spodní úsek					
	Úsek 1	Úsek 2	Úsek 3	Úsek 4	Střední hodnota
q_{sph} [W]	784,94	766,63	768,59	757,36	775,63
Ztráty celkem [kW]	7,98				
Pravá stěna horní úsek					
	Úsek 1	Úsek 2	Úsek 3	Úsek 4	Střední hodnota
q_{sps} [W]	489,2	466,1	488,9	489,5	489,19
Ztráty celkem [kW]	3,13				
Pravá stěna dolní úsek					
	Úsek 1	Úsek 2	Úsek 3	Úsek 4	Střední hodnota
q_{sps} [W]	489,2	466,1	488,9	489,5	489,15
Ztráty celkem [kW]	9,08				
Dno					
q_{sps} [kW]	31,58				
Mechanismus pece					
q_{sps} [kW]	126,71				
dno+mechanismus [kW]	158,29				
Dveře					
otevřené [W]	0,32				
zavřené (vstup) [W]	2,00				
zavřené (výstup) [W]	1,94				
celkem (vstup+výstup)	3,93				
celkem dveře+20%	4,72				
celkem ztráty [kW]	214,95				

Tab. 4.3 Naměřené teploty na peci na daných částech pomocí Optrix LaserSight

Strop																
	úsek 1 [°C]				úsek 2 [°C]				úsek 3 [°C]				úsek 4 [°C]			
horní část	59,3	58,7	60,0	66,4	74,2	75,9	78,4	62,2	58,2	68,3	66,9	56,3	61,0	68,7	70,6	65,6
spodní část	51,0	64,5	60,9	63,2	73,5	75,2	71,6	68,2	56,4	68,2	57,2	65,6	65,6	63,2	70,8	68,0
Levá boční stěna horní část																
	úsek 1 [°C]				úsek 2 [°C]				úsek 3 [°C]				úsek 4 [°C]			
horní část	22,9	25,0	24,7	23,2	22,4	23,7	24,5	23,4	23,5	23,7	23,6	24,1	25,2	24,9	24,7	26,3
spodní část	23,2	22,8	21,8	24,5	23,2	21,2	21,3	21,8	22,0	23,5	24,9	24,6	24,6	23,4	24,9	23,9
Levá boční stěna dolní část																
	úsek 1 [°C]				úsek 2 [°C]				úsek 3 [°C]				úsek 4 [°C]			
horní část	23,7	24,9	26,3	24,5	24,5	24,2	25,3	24,8	24,2	23,8	24,7	24,8	25,3	25,6	25,5	25,1
spodní část	22,5	23,4	24,6	24,4	25,4	24,0	25,6	24,5	25,3	23,2	23,1	23,5	24,2	24,0	26,1	22,8

Tab. 4.4 Spočtené ztráty ze změřených hodnot pyrometru Optrix LaserSight

Strop					
	Úsek 1	Úsek 2	Úsek 3	Úsek 4	Střední hodnota
q_{slh} [W]	646,68	659,14	646,86	654,79	651,87
Ztráty celkem [kW]	27,38				
Levá stěna horní úsek					
	Úsek 1	Úsek 2	Úsek 3	Úsek 4	Střední hodnota
q_{sls} [W]	784,81	783,47	784,17	7897,78	786,06
Ztráty celkem [kW]	5,00				
Levá stěna spodní úsek					
	Úsek 1	Úsek 2	Úsek 3	Úsek 4	Střední hodnota
q_{sph} [W]	787,2975	811,9212	796,834	771,8527278	791,98
Ztráty celkem [kW]	8,32				
Pravá stěna horní úsek					
	Úsek 1	Úsek 2	Úsek 3	Úsek 4	Střední hodnota
q_{sps} [W]	489,4	488,8	489,0	489,0	489,04
Ztráty celkem [kW]	3,12				
Pravá stěna dolní úsek					
	Úsek 1	Úsek 2	Úsek 3	Úsek 4	Střední hodnota
q_{sps} [W]	862,0	864,3	863,7	861,7	862,94
Ztráty celkem [kW]	9,08				
Dno					
q_{sps} [kW]	31,25				
Mechanismus pece					
q_{sps} [kW]	126,64				
dno+mechanismus [kW]	157,89				
Dveře					
zavřené [W]	0,32				
otevřené (vstup) [W]	2,00				
otevřené (výstup) [W]	1,94				
celkem (vstup+výstup)	3,93				
celkem dveře+20%	4,70				
celkem ztráty [kW]	214,56				

5 Závěry pro praxi

Po ustálení se provozní teplota pohybuje kolem 1200 °C. Pec slouží k ohřevu ingotů, hutních polotovarů, které se pak dále zpracují. Kapacita pece je až na ohřátí 40 kusů ingotů najednou. Válcují se pásy jako polotovar o tloušťce 8 mm mimo kovohutě.

Čtyři celky jsou elektrické a šest je jich konstrukčních. Dodávka elektrické energie je realizována pomocí dva rozvaděčů. Topné články zajišťují ohřev ingotu na požadovanou teplotu.

Měření proběhlo dne 13. 3. 2014. Nejprve bylo měřeno pyrometry, poté termokamerou. Měření probíhalo dle předpokladu

Postup výpočtu byl takový, že musel být proveden odhad teplot na jednotlivých vrstvách na daných částech. Byl proveden na základě znalosti provozní teploty pece a teploty okolí. Z odhadu pomocí odečtu z tabulky se našly součinitele tepelné vodivosti. Hodnoty ztrát byly vypočteny na 1 m² plochy. Pak se vynásobily danými plochami. Výsledky byly víceméně u měření pyrometry a termokamerou shodné.

Závěrem pro praxi je tedy, že výsledky se lišily velmi málo a to z důvodu rozdílných hodnot teploty. Velikost ztrát je závislá na tom, zdali jsou otevřené nebo zavřené dveře. U bočních stěn byly velké teploty, které mohou negativně ovlivnit funkci materiálu a tím i zkrátit životnost. Kompozice jednotlivých materiálů použitých na vyzdívku je zapsána. Faktor, který by mohl ovlivnit vypočtené ztráty je špatný odečet hodnot příslušné tepelné vodivosti.

Přílohy

Příloha A – vstup do pece



Příloha B – výstup do pece



Příloha C – pohled na pec



Příloha D – pohled na strop



Seznam použité literatury

- [1] Způsoby měření teploty. [online]. [cit. 2013-10-28]. Dostupné z: <http://oko.yin.cz/35/zpusoby-mereni-teploty/>
- [2] Přehled teplotních stupnic. [online]. [cit. 2013-10-28]. Dostupné z: <http://www.prevod.cz/popis.php?str=220&parent=y>
- [3] Automa. [online]. 2005, č. 1 [cit. 2013-10-28]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=30252
- [4] Šíření tepla. [online]. [cit. 2013-11-29]. Dostupné z: <http://www.animfyzika.wz.cz/sirenitepla.html>
- [5] Sálání tepla. [online]. [cit. 2014-02-06]. Dostupné z: http://people.fsv.cvut.cz/www/wald/Pozarni_odolnost/e-text/specialiste/1/1-4_Salani_tepla.pdf
- [6] Zpravodaj: bezdotykové měření teploty. [online]. [cit. 2014-02-06]. Dostupné z: http://www.omegaeng.cz/literature/PDF/techinfo_1.pdf
- [7] Základy práce s infračervenou kamerou. [online]. [cit. 2014-02-06]. Dostupné z: kps.fsv.cvut.cz/file_download.php?fid=3354
- [8] Elektromagnetické spektrum: Co to je a jak se chová infračervené záření. [online]. [cit. 2014-02-02]. Dostupné z: <http://www.paladix.cz/clanky/co-to-je-a-jak-se-chova-infracervene-zareni.html>
- [9] Teplo. [online]. [cit. 2014-02-02]. Dostupné z: http://www.zsondrejov.cz/Vyuka/F_8/Teplo_08.pdf
- [10] Elektromagnetické vlnění. [online]. [cit. 2014-02-02]. Dostupné z: http://www.gymkren.cz/text_old/Fyzika/f24.pdf
- [11] Spektrum. [online]. [cit. 2014-02-02]. Dostupné z: <http://astronomia.zcu.cz/objekty/nase/2301-spektrum>
- [12] *Využití produktů Optris v průmyslu* [online]. [cit. 2013-11-30]. Dostupné z: 1.1 <http://www.hotset.cz/vyuziti-produktu-optris-v-prumyslu/>
- [13] Termogram jističe. [online]. [cit. 2014-02-02]. Dostupné z: <http://www.termogram.cz/img/galery/termovize%20jistence.jpg>
- [14] Termografie. [online]. [cit. 2014-02-02]. Dostupné z: <http://www.fsps.muni.cz/~novotny/Termografie.htm>
- [15] Princip bezdotykového měření teploty: výhody a nevýhody bezdotykového měření teploty
- [16] KREIDL, Marcel. *Měření teploty: senzory a měřicí obvody*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 239 s. Senzory neelektrických veličin, 1. díl. ISBN 80-730-

- 0145-4.
- [17] *Měření teploty a druhy teploměrů* [online]. [cit. 2013-11-30]. Dostupné z: http://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/predn/txt-Mgr/FTOP08_Teplota.pdf
- [18] *Bezdotykové měření teploty*. [online]. [cit. 2014-02-06]. Dostupné z: www.isste.cz/digit/files_dum/VY_32_INOVACE_15_2_04.doc
- [19] *Infrateploměr. Omega* [online]. [cit. 2013-10-28]. Dostupné z: <http://www.omegaeng.cz/prodinfo/infraredthermometer.html>
- [20] *Měření teploty* [online]. [cit. 2013-11-30]. Dostupné z: http://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/predn/txt-Mgr/FTOP08_Teplota.pdf
- [21] *Záření absolutně černého tělesa* [online]. [cit. 2013-11-30]. Dostupné z: http://www.gymhol.cz/projekt/fyzika/13_act/13_act.htm
- [22] *Infrateploměr. Omega* [online]. [cit. 2013-10-28]. Dostupné z: <http://www.omegaeng.cz/prodinfo/infraredthermometer.html>
- [23] *Základy bezdotykového měření teploty pásmovým radiačním pyrometrem: Závislost chyby měření na emisivitě* [online]. [cit. 2013-11-30]. Dostupné z: <http://pyrometrie.sweb.cz/Zaklady.htm>
- [24] Podniková dokumentace provozovatele zařízení
- [25] Příručka k termokameře FLIR
- [26] Katalogové listy podniku RATH žárotechnika s r.o
- [27] Kuna L.: *Tepelné izolácie a meranie tepelných strát*, SNTL, Bratislava 1963