

Vysoká škola: strojní a textilní

Katedra: sklářských strojů
a technologie skla

Fakulta: strojní

Školní rok: 1967/68

DIPLOMNÍ ÚKOL

pro T i c h á č k a Jaroslava

odbor 04-1-04 zaměření na sklářské stroje a zařízení

Protože jste splnil požadavky učebního plánu, zadává Vám vedoucí katedry ve smyslu směrnic ministerstva školství a kultury o státních závěrečných zkouškách tento diplomní úkol:

Název tématu: Kalibrační píčka pro radiační pyrometr

Pokyny pro vypracování:

V současné době se cejchování radiačních pyrometrů provádí pro záření absolutně černého tělesa. Vliv emisního faktoru se eliminuje jednoduchými zkouškami, při čemž vzniká celá řada chyb.

Úkolem Vaší diplomní práce je navrhnout, postavit a odzkoušet cejchovací píčku umožňující cejchování radiačního pyrometru. Radiační pyrometr je nutné cejchovat v rozmezí teplot 600 - 1200°C pro různé druhy sklovin.

Autorské právo se řídí směrnicemi MSK pro státní závěrečné zkoušky č. j. 31 727/62-III/2 ze dne 13. července 1962 - Vestník MSK XVIII, číslo 24 ze dne 31. 8. 1962 § 19 autorského zákona č. 115/53 Sb.

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ
Ústřední knihovna
MBEREC 1, STUDENTSKÁ 8

✓ 125/1968

Rozsah grafických laboratorních prací:

Rozsah průvodní zprávy: cca 40 stran textu

Seznam odborné literatury:

Vedoucí diplomní práce: Prof. Ing. Dr. F. Kotěšmíd - VŠST

Konsultanti: Josef Vrána - ved. chem. laboratoře VÚSAB Jablonec
Ing. Pavel Brouček - VŠST

Datum zahájení diplomní práce: 15. prosince 1967

Datum odevzdání diplomní práce: 17. června 1968



Prof. Ing. Dr. F. Kotěšmíd
Vedoucí katedry

Prof. Ing. C. Höschl
Děkan

v Liberci dne 14. prosince

1967

VŠST Liberec

Kalibrační píčka pro
radiační pyrometr

Katedra SS

Fakulta strojní

DP -SS-41-68-1

DIPLOMNÍ PRÁCE

DP- SS- 41- 68

Vedoucí diplomní práce: Prof.Ing.Dr. F.Kotšmíd - VŠST

Konsultanti:

Ing. Pavel Brouček - VŠST

Josef Vrána - ved.chem.laboratoře
VÚSAB Jablonec

Místo předdiplomní praxe: VŠST Liberec

VÚSAB Jablonec

Dne 17. června 1968

Jaroslav Ticháček

Obsah

1. Používané jednotky	str. 3
2. Úvod	str. 4
3. Teoretická část	str. 6
4. Praktická část	str.21
5. Zařízení k roztavení skloviny	str.21
6. Zařízení k snímání záření a jeho cejchování	str.28
7. Výsledky měření	str.39
8. Použitá literatura	str.45
9. Závěr	str.44
10. Příloha	str.46

VŠST Liberec	Kalibrační píčka pro radiační pyrometr	Katedra SS
Fakulta strojní		DP - 33-41-68-3

Seznam použitých označení a zkratk

λ - délka vlny	μ
c - rychlost ve vakuu	m/sec
ν - kmitočet	1/sec
E_0 - sálavost černého tělesa	kcal/m ² h
C_0 - součinitel sálání čer.tělesa	kcal/m ² h°K ⁴
T - absolutní teplota	°K
h - Planckova konstanta	erg.s
k - Boltzmanova konstanta	erg/°K
E - sálavost tělesa	kcal/m ² h
C - součinitel sálání šedého tělesa	kcal/m ² h°K ⁴
I_0 - intenzita záření vstupující	kcal/h
I - intenzita záření vystupující	kcal/h
k / λ / - absorpční součinitel	cm ⁻¹
λ_s - sálavá vodivost	kcal/mh°C
N - výkon	kVA
J - proud	A
U - napětí	V

VŠST Liberec	Kalibrační píčka pro radiační pyrometr	Katedra SS
Fakulta strojní		DP DP-SS-41-68-4

I. Ú v o d

Technologie tvarování skel je z celé technologie skla nejméně objasněným procesem z výroby sklařských výrobků. Představuje dohromady velmi složitý proces, provázený komplexem jevů, z nichž jevy teplotní a mechanické zaujímají přední místo. Pro tvarování skel za vysokých teplot se považuje z celé řady fyzikálních a chemických vlastností skel za nejdůležitější viskozita, povrchové napětí a krystalizační schopnost skla. Pro některé způsoby tvarování jsou důležité i další vlastnosti skel, jako např. tepelná propustnost, tepelná vodivost, specifické teplo, hustota apod. Všechny tyto vlastnosti jsou závislé na chemickém složení skloviny a jsou ovlivňovány funkcí teploty skla.

Při měření teploty skla pomocí rychle reagujících radiačních pyrometrů je nejdůležitějším činitelem ^{1/253h} teploty. Měření teploty skla nám dává lepší představu o tvarování skla. Toto měření se používá u předmětů, které se pohybují a není možno se jich dotýkat. Proto jsou rychle reagující radiační pyrometry nepostradatelné.

Měřením a zaznamenáváním podmínek za jakých výroba probíhá, zaznamenáváme následující:

- a/ rychlejší způsob přesného ustavení parametrů, které mohou být snadněji udržovány
- b/ zjišťování a oprava poruch velmi zjednodušena
- c/ měřicí a kontrolní pracovníci mají možnost vyšetřovat, zda podmínky jsou zapisovány spolehlivě pro příští automatizaci

Měření teploty, jehož výsledků je použito jakožto výrobního nástroje musí vyhovovat následujícím požadavkům:

- a/ nesmí se křížit s výrobou
- b/ nesmí mít rušivý účinek
- c/ vzhledem k rychlému chodu práce musí být rychlé

VŠST Liberec	Kalibrační pícka pro	Katedra SS
Fakulta strojní	radiační pyrometr	DP DP-SS-41-68-5
d/ vzhledem k velkým teplotním gradientům, které mohou nastat při jeho nízké tepelné vodivosti, musí být možno měřit malé cíle e/ přesnost a spolehlivost musí být naprosto uspokojující A právě těmto požadavkům vyhovují radiační pyrometry. Mým úkolem bylo postavit cejchovní pícku umožňující cejchování radiačních pyrometrů v rozmezí 600-1200° C.		

VŠST Liberec	Kalibrační píčka pro radiační pyrometr	Katedra SS
Fakulta strojní		DP-SS-41-68-6

II. Teoretická část

(problémy radiační pyrometrie)

1. Základní pojmy sálání

Sálání je zvláštní způsob sdílení tepla, při kterém nastává přeměna tepelné energie v sálavou či zářivou energii. Od ostatních způsobů se liší tím, že nepotřebuje zprostředkující látky. Zářivá energie závisí na teplotě tělesa. Zářivá energie se přenáší elektromagnetickým vlněním různé délky vlny od zlomku mikromů až do mnoha kilometrů. Podstatou tohoto záření je fyzikální děj, který má dvojí povahu, a to vlnovou a částicovou. První jsou elektromagnetické vlny, tvořené kmity intenzity elektrického pole a intenzity magnetického pole, přičemž kmity obou těchto vektorů probíhají v rovinách k sobě kolmých a ve stejné fázi. Všechna záření jsou tedy tvořena elektromagnetickými vlnami, složenými z příčných a navzájem kolmých elektrických a magnetických vln, a šíří se proto ve vakuu stejnou rychlostí $c = 3 \cdot 10^8$ m/s. Jednotlivé druhy záření se od sebe liší pouze vlnovou délkou λ . Elektromagnetické záření má však vesle vlnového charakteru též charakter částicový, představujeme si je jako proud jednotlivých částic fotonů. Záření je charakterizováno buď vlnovou délkou ve vakuu λ , nebo kmitočtem, přičemž mezi oběma platí známý vztah $\lambda = \frac{c}{\nu}$.

Podle délky vlny rozeznáváme tato záření: kosmické, roentgenovo, ultrafialové, viditelné, infračervené, radarové a rozhlasové vlny. U skla se projevuje hlavně oblast infračerveného záření, které dělíme:

blízký infračervený obor 0,75 až 2,5 μ

střední infračervený obor 2,5 až 25 μ

vzdálený infračervený obor nad 25 μ

Viditelný obor záření je 0,4 do 0,75 μ tj. od fialového konce viditelného spektra k jeho tmavěčervenému konci.

Záření při všech vlnových délkách můžeme označit jako základní vlastnost hmotných těles. Každé těleso nepřetržitě vyzařuje zářivou energii. Tato energie se při dopadu na jiné těleso z části odráží, z části tělesem pro-

VŠST Liberec	Kalibrační píčka pro radiční pyrometr	Katedra SS
Fakulta strojní		DP-SS-41-68-7

chází a z části se jím pohlcuje. Energie, která byla tělesem odražena nebo jím prošla, dopadá na okolní tělesa, až je posléze jimi také pohlcena. Tímto způsobem se celá energie vyzářená určitým tělesem sdílí okolním tělesům. Každé těleso tedy nejen nepřetržitě vyzařuje, ale také nepřetržitě pohlcuje, odráží a propouští zářivou energii. Celý proces má za následek sdílení tepla mezi jednotlivými tělesy. Označujeme ho jako sdílení tepla sáláním.

Dopadá-li na těleso zářivý tok, pak se obecně rozdělí na tři části. Část dopadajícího zářivého toku se na tělese odráží, zbytek vnikne do tělesa, kde se část zářivého toku pohltí a část zářivého toku tělesem vystoupí. Z principu zachování energie platí rovnice:

$$A + R + D = 1$$

A - poměrná tepelná pohltivost tělesa

R - poměrná tepelná odraznost

D - poměrná průteplivost

Tyto veličiny jsou bezrozměrné a mění se v mezích od 0 do 1. Je-li $A=1$, pak $R=0$, $D=0$ a celá dopadající energie je pohlcena tělesem. Takové těleso nazýváme dokonale černým.

Je-li $R=1$, pak $A=0$ a $D=0$ a celá dopadající energie se odráží, přitom je-li odraz pravidelný (pravidelný je odraz, který sleduje zákony geometrické optiky), je takové těleso zrcadlové (leštěný kov), je-li odraz rozptýlený, difusní, je těleso dokonale bílé.

Je-li $D=1$, pak $A=0$, $R=0$ a celá dopadající energie prochází tělesem. Taková tělesa se nazývají dokonale průteplivá či diatermní. Plyny lze považovat v technické praxi takřka vždy za diatermní, jelikož se průchodem tepelných paprsků příliš neoteplí.

Dokonale černých, bílých a diatermních těles v přírodě není. Hodnoty poměrné pohltivosti, odraznosti a průteplivosti závisí na vlastnostech tělesa, jeho teplotě a délce vln, které těleso vysílá. Tuhá tělesa a kapaliny jsou prakticky neprůteplivé (alterní).

VŠST Liberec	Kalibrační píčka pro radiační pyrometr	Katedra SS
Fakulta strojní		DP-SS-41-68-8

2. Základní zákony záření černého tělesa

Absolutně černé těleso je jediným teplotním zdrojem, jehož zákony záření byly přesně matematicky formulovány. V dalším textu uvedu tři hlavní zákony:

a/ zákon Stefan - Boltzmannův

Intenzita vyzařování absolutně černého tělesa je podle tohoto zákona úměrná čtvrté mocnině jeho absolutní teploty a je tedy dána výrazem

$$E_0 = C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4$$

E_0 - sálavost tělesa (kcal/m²h)
 C_0 - součinitel sálání černého tělesa (kcal/m²h°K⁴)
 T - absolutní teplota černého tělesa (°K)

Hodnota součinitele C_0 pro dokonale černé těleso je 4,96.

b/ Wienův zákon posuvu

Podle tohoto zákona je vlnová délka λ_{max} maximálního monochromatického vyzařování absolutně černého tělesa nepřímo úměrná jeho absolutní teplotě. Matematicky lze tento zákon psát ve tvaru

$$T \cdot \lambda_{max} = b$$

b - konstanta s číselnou hodnotou (mm°K)
 λ_{max} - maximální monochromatická zářivost (μ)
 T - absolutní teplota (°K)

Velikost konstanty $b = 2,895 \text{ mm}^\circ\text{K}$. Podle tohoto zákona se maximum monochromatického vyzařování posouvá s rostoucí teplotou ke kratším vlnovým délkám.

c/ Vyzařovací zákon Planckův

Pro monochromatické vyzařování absolutně černého tělesa odvodil Max Planck výraz

$$E_{0\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)}$$

c_1, c_2 - konstanty, jež závisí na univerzálních fyzikálních konstantách, a to vztahy

$$c_1 = 2\pi h c^2$$

$$c_2 = \frac{h \cdot c}{k}$$

c - rychlost světla ve vakuu

h - Planckova konstanta

k - Boltzmannova konstanta

Číselné hodnoty konstant:

$$c_1 = 3,74127 \cdot 10^{-16} \quad (\text{Wm}^2)$$

$$c_2 = 1,43880 \cdot 10^{-2} \quad (\text{m}^{\circ}\text{K})$$

$$h = 6,624 \cdot 10^{-27} \quad (\text{erg} \cdot \text{s})$$

$$k = 138,05 \cdot 10^{-18} \quad (\text{erg}/^{\circ}\text{K})$$

K odvození použil své kvantové hypotézy, která tvrdí, že molekuly nevyzařují energii spojitě, nýbrž že vyzařování i pohlcování zářivé energie se děje jen po celistvých "kvantech" energie, která má velikost

$$e = h \cdot \nu = h \cdot \frac{c}{\lambda}$$

Tento zákon vyjadřuje monochromatickou zářivost dokonale černého tělesa při určité absolutní teplotě a pro určitou délku vlny. Planckův vyzařovací zákon byl potvrzen měřením v celém známém rozsahu teplot a vlnových délek záření. Nejdůležitější poznatek, který z něho vyplývá, je skutečnost, že vyzařování i pohlcování zářivé energie se může dít jen ve formě celistvých násobků elementárního kvanta. Tím se stal Planckův vyzařovací zákon východiskem fotonové teorie a přímo vedl k vypracování kvantové teorie, která tvoří základ moderní fyziky.

3. Základní zákony záření černého tělesa

a/ Zákon Kirchhoffův

$$\frac{E}{A} = E_0 = f(T)$$

VŠST Liberec	Kalibrační píčka pro radiační pyrometr	Katedra SS
Fakulta strojní		DP-SS-41-68-10

Tento zákon nám říká, že poměr úhrnné sálavosti k pohltivosti je pro všechna tělesa při téže teplotě stejný, rovná se úhrnné sálavosti dokonale černého tělesa a závisí tudíž jen na absolutní teplotě.

Kirchhoffův zákon platí také pro sálání o nekonečně malém rozsahu vlnových délek.

$$\frac{E_{\lambda}}{A_{\lambda}} = E_{\lambda 0} = f(T, \lambda)$$

čili: poměr monochromatické sálavosti k monochromatické pohltivosti je pro všechna tělesa při téže teplotě stejný, rovná se monochromatické sálavosti dokonale černého tělesa a závisí jen na absolutní teplotě a uvažované délce vlny.

b/ Zákon Stefan - Boltzmannův pro šedé zářiče

$$E = C \left(\frac{T}{100} \right)^4$$

Pro různá tělesa má součinitel sálání C různou hodnotu, která závisí na vlastnostech tělesa, stavu povrchu a teplotě. Součinitel C je vždy menší než C_0 a mění se v rozsahu od $C=0$ až $C=4,96$.

Porovnáním energie záření šedého tělesa s energií záření černého tělesa při téže teplotě dostáváme charakteristickou veličinu tělesa, kterou nazýváme poměrnou pohltivostí, nebo také poměrnou sálavostí (emisním součinitelem)

$$\epsilon = \frac{E}{E_0} = \frac{C \left(\frac{T}{100} \right)^4}{C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4} = \frac{C}{C_0}$$

Hodnota ϵ se mění v rozmezí od 0 do 1. Známe-li ϵ , stanovíme hodnotu E ze vzorce

$$E = \epsilon \cdot E_0 = \epsilon \cdot C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4 = \epsilon \cdot 4,96 \cdot \left(\frac{T}{100} \right)^4$$

Poměrná sálavost (poměrná pohltivost) vyjadřuje tedy poměr sálavosti 1 m^2 povrchu libovolného tělesa a sálavosti 1 m^2 povrchu dokonale černého tělesa při stejné vlnové délce a

stejně teplotě.

Kirchhoffův zákon udává pro libovolná tělesa poměr
sálavosti k pohltivosti tělesa

$$\frac{E}{A} = \frac{E_0}{A_0} = E_0$$

kde podle dřívějšího A - poměrná tepelná pohltivost, která
se pohybuje v rozmezí od 0 do 1

A_0 - poměrná pohltivost černého tělesa

$$A_0 = 1$$

Dosaďme-li dle vztahu

$$E = C \left(\frac{T}{100} \right)^4 ; \quad E_0 = C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4$$

dostaneme

$$\frac{C}{A} = C_0 \Rightarrow E = \frac{C}{C_0} = A$$

Z těchto výpočtů plyne, že pohltivost A a poměrná pohltivost
(poměrná sálavost) E jsou číselně stejné. Pro černé těleso
je $E = 1$, takže $C = C_0 = 4,96$.

Pro šedé těleso je

$$C = E \cdot C_0 = 4,96 \cdot E$$

Součinitel sálání C_0 černého tělesa je tedy roven plošnému
obsahu Planckovy křivky dělenému čtvrtou mocninou příslušné
absolutní teploty vyjádřenému v tepelných jednotkách.

c/ Zákon Lambertův

Stefan - Boltzmannův zákon vyjadřuje úhrnnou zářivost
 E_0 , kterou jednotka povrchu dokonale černého tělesa o te-
plotě T vyzařuje za jednotku času všemi směry do prostoru.
Chceme-li zjistit množství vyzařené energie v určitém směru
k tomu použijeme zákon Lambertův též zvaný jako zákon
kosinový, neb záření v určitém směru je závislé na $\cos$ úhlu.
Množství energie

$$dQ = E_0 \cdot dF \cdot \cos \varphi \cdot dt \quad (\text{kcal/hod})$$

VŠST Liberec	Kalibrační píčka pro radiační pyrometr	Katedra ES
Fakulta strojní		DP-SS-41-68-12

E_{on} - příslušná část úhrnné zářivosti E_0
 du - prostorový úhel
 dF_1 - vyzařující ploška
 $\cos \varphi$ - směr záření

Je zřejmé, že pro $\varphi = 0$, tj. ve směru normály zářící plošce dF_1 je množství sdílené energie maximální

$$(dQ_r)_{max} = E_{on} \cdot dF_1 \cdot du$$

Naopak ve směru rovnoběžném se zářící ploškou dF_1 , se žádná zářivá energie nesdílí tj.

$$(dQ_r)_{min} = 0$$

Pro černé těleso platí: množství vyzářené energie v určitém směru

$$dQ_r = \frac{1}{\pi} \cdot C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4 \cdot \cos \varphi \cdot dF_1 \cdot du$$

analogicky pro šedá tělesa platí

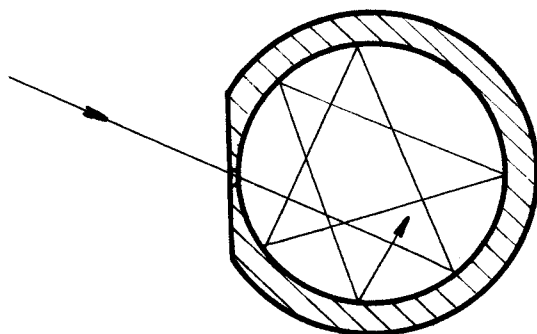
$$dQ_r = \frac{\epsilon}{\pi} \cdot C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4 \cdot \cos \varphi \cdot dF_1 \cdot du$$

Poslední rovnice platí jen přibližně pro úhel φ , nepřesahující 60° .

4. Absolutně černé těleso

Pozorujeme-li různá osvětlená tělesa, jež sama světlo nevydávají, pak tělesa, jejichž povrch odráží světlo méně, se nám jeví tmavší. Odrážejí-li tato tělesa pouze několik procent dopadajícího světla, jeví se nám černá. Nejlepší černě odráží pouze asi 1% světla. Dovedeme však realizovat tělesa, která odrážejí jen libovolně malý zlomek světla na ně dopadajícího, a jeví se proto ještě černější, než nejlepší černé. Takovými tělesy jsou malé otvory v uzavřené dutině (obrázek 1). Z obrázku je patrné, že světelný paprsek vstupující do dutiny musí vykonat veliký počet odrazů "n" na stěnách dutiny, než náhodně vystoupí otvorem ven. Je-li odrazivost stěn malá, např. $r = 0,01$, pak odra-

zřivost R vstupního otvoru bude $R=r^n$ a tedy zanedbatelně malá.



Obr.1. Realizace absolutně černého tělesa s uzavřenou dutinou s malým otvorem

Takto realizované těleso (otvor dutiny) nazýváme proto tělesem absolutně černým a klademe jeho odrazivost v mezním případě $R=0$. Absolutně černé těleso pohlcuje veškeré záření na ně dopadající, a proto jeho poměrná spektrální pohltivost $A_\lambda=1$ (a tedy také $A=1$).

Absolutně černé těleso, lze realizovat s libovolnou přesností. Vystupující záření se bude tím více blížit záření absolutně černého tělesa, čím menší bude plocha otvoru vůči ploše povrchu dutiny, čím menší bude odrazivost stěn dutiny (opatřují se proto vrstvou černě) a čím více odrazů bude muset vykonat paprsek vstupující do dutiny otvorem na jejích stěnách, než opět vystoupí tímto otvorem dutiny. Tyto tři požadavky, současně s požadavkem přesně stejné teploty stěn dutiny, představují všeobecné směrnice pro konstrukci absolutně černých těles.

Důležitou společnou součástí všech tepelných přijímačů je vrstva "černě", která absorbuje záření na ni dopadající a přeměňuje je v teplo. Podmínky jež má ideální čern splňovat:

- a/ vrstvička musí absorbovat všechno dopadající záření
- b/ její tepelná kapacita musí být nepatrná
- c/ její tepelná vodivost musí být velká
- d/ technika jejího nanášení musí být taková, aby se nepoško-

VŠST Liberec	Kalibrační píčka pro radiační pyrometr	Katedra SS
Fakulta strojní		DP-SS-41-68-14
zovaly ostatní součásti tepelného přijímače. Dříve se používalo jako "černě" sazí z plamene svíčky, kafru nebo acetylénu, dále černě platinové, nanášené elektrolyticky. Tyto vrstvy absorbují sice dostatečně krátkovlnné infračervené záření v oboru přibližně jednoho mikrometru, avšak se vzrůstající vlnovou délkou roste jejich propustnost. Pro větší vlnové délky se proto používalo přídatku křemičitanu sodného a někdy i koloidního grafitu. Z předešlého je patrné, že nevhodná černě nejen zmenšuje citlivost tepelných přijímačů, ale může u nich vyvolat též značnou selektivitu. Dalším typem "černí" jsou černě kovové, vyrobené vypařováním kovů, např. Bi, Au, Ag, Cu, Zn, Cd, Te, Se, ve vzduchu nebo v netečném plynu za tlaku řádově 1 mm Hg. Dalším typem jsou "černě" tvořené ryze kovovými vrstvičkami. Roste-li tloušťka těchto kovových vrstviček, jejich propustnost klesá, kdežto jejich odrazivost a absorpce rostou. Optimální tloušťka vrstvičky je ta, pro kterou je absorpce 50%. Tyto vrstvičky vykazují velmi malou tepelnou kapacitu a jsou ideálně "šedé", tj. jejich absorpce bude v dlouhovlnném oboru téměř nezávislá na vlnové délce dopadajícího záření. Až dosud jsme považovali za ideální tu černě, která absorbuje neselektivně záření měřeného vlnového oboru, aniž bychom jí předpisovali nějaké vlastnosti ostatních oborů spektra. Nyní doplníme toto požadavkem, aby zmíněná černě ve vlnovém oboru jiném než měřeném měla co nejmenší absorpci, a tím i ztrátivost, neboť pak se tepelné ztráty zářením přijímače v tomto vlnovém oboru zmenší. Současně se tím vyloučí vliv rušivých záření jiných vlnových oborů, než je obor měřený. <u>5. Problémy radiační pyrometrie u skla</u> Stupnice radiačních pyrometrů je vyznačena na černém tělese (černém zařídí). Sálavá energie černého tělesa závisí jediné na teplotě.		

Radiační pyrometry jsou užívány k měření teploty nečerných těles (šedých). U šedých těles sálavá energie nezávisí jen na teplotě ale také na materiálu, na tvaru a povrchu předmětu. Měřená teplota u skla je zdánlivou teplotou. Sálavá energie skla může být vyjádřena jako zlomek (část) ϵ sálavé energie černého tělesa při téže teplotě. Následkem toho zdánlivá teplota je vždy nižší než skutečná teplota. Rozdíl je nazván emisní odchylkou. Nejen, že emise reálných předmětů je menší než 1, ale je velmi rušivá, že tyto emisní faktory jsou dosti nestálé a výsledky měření jsou nespolehlivé.

Proto musí být zkoumáno:

- a/ jaké omyly vyplývají z odchylek od sálání černého tělesa
- b/ zda je možno se těmito odchylkám vyhnout, nebo jakým způsobem je možno omezit na nejmenší míru
- c/ jak dalece mohou být tyto odchylky konstantní

Provedení výpočtu emisní odchylky:

šedé těleso

$$E_{\lambda T} = c_{\lambda T} \cdot c_1 \cdot \lambda^{-5} \cdot e^{-\frac{c_2}{\lambda T}}$$

rovnice č.1

černé těleso

$$E_{\lambda T} = c_2 \cdot \lambda^{-5} \cdot e^{-\frac{c_2}{\lambda T}}$$

rovnice č.2

$E_{\lambda T}$ - vysílané sálání o délce vlny λ a teplotě T

$\epsilon_{\lambda T}$ - emisní součinitel o délce vlny λ a teplotě T

c_1, c_2 - konstanty sálání

e - základ přirozených logaritmů

T_2 - zdánlivá teplota

Odchylku sálání vypočteme z těchto dvou rovnic (č.1 a č.2).

$$\frac{\epsilon \cdot c_1}{\lambda^5 (e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1)} = \frac{c_1}{\lambda^5 (e^{\frac{c_2}{\lambda T_2}} - 1)} \Rightarrow \frac{c_2}{\lambda T} - \frac{c_2}{\lambda T_2} = \ln \epsilon \Rightarrow \frac{1}{T} - \frac{1}{T_2} = \frac{\lambda}{c_2} \cdot \ln \epsilon$$

$$\Delta T = T - T_2 = \frac{\lambda}{c_2} \cdot T \cdot T_2 \cdot \ln \epsilon$$

VŠST Liberec	Kalibrační píčka pro radiační pyrometr	Katedra SS
Fakulta strojní		DP-SS-41-68-16

U horkého skla je sálání vyzařováno z povrchu i z vnitřku. Pyrometr na celkové záření nám snímá signál, který je tvořen z povrchového sálání a vnitřního sálání. Prostupnost skla závisí na délce vlny. Pro radiaci o délce vln menší než $2,5\mu$ je tabule 1 mm silná vysoce propustná. Při delších vlnách prostupnost postupně klesá. Radiace o délce vln nad $4,6\mu$ je úplně absorbována.

Souhrn absorpčního faktoru, transmisního faktoru tvoří jednotku

$$A + D + R = 1$$

Při teplotní rovnováze je emise rovna absorpčnímu faktoru.

$$\mathcal{E} + D + R = 1$$

Odrazový faktor je funkcí indexu lomu skla. Index lomu závisí nejen na vlnové délce světla, ale i na chemickém složení skla, na teplotě při které je prováděno měření. Ve srovnání s výkyvy propustnosti jsou výkyvy v odrazu velmi malé. Domníváme se, že odrazový faktor $R = \text{konst.}$ U skla je tento odrazový faktor $R = 0,04$ na rozhraní skla se vzduchem.

Pod $2,5\mu$ je jen velmi malá absorpce. Tedy v tomto úseku je emise prakticky nula ($\mathcal{E} = A = 0$). Nad $4,6\mu$ je transmisní faktor $D = 0$. Emise v tomto úseku je velká.

$$\mathcal{E} = 1 - D - R = 0,96$$

Čili je možno říci, že v tomto úseku se sklo chová jako černé těleso. Úsek nad $4,6\mu$ je vhodný pro měření povrchu skla. Dlouhovlnná radiace je vyzařována jen z povrchu a z vnitřku je plně absorbována. Nad $4,6\mu$ je $\mathcal{E} = 0,96$.

Pro každou délku vln je reflexní faktor $R = \text{konst.}$ Jen transmisní faktor D se zmenšuje jak se zvětšuje tloušťka tabule, což je zjevné ze srovnání z této rovnice

$$A + D + R = 1$$

Jelikož tato rovnice stále platí, musí být pokles transmisního faktoru D provázen vzrůstem absorpčního faktoru při konstantním odrazovém faktoru R .

VŠST Liberec	Kalibrační píčka pro radiační pyrometr	Katedra SS
Fakulta strojní		DP-SS-41-68-17

Má-li sklo dostatečnou tloušťku vyzařuje jako černé těleso, takže může být měřeno kterýmkoliv druhem pyrometru. Jaká je dostatečná tloušťka skla?

$$\varepsilon = (1 - R) (1 - K^d)$$

$$K = \frac{D}{1 - R}$$

ε - emisní faktor

R - reflexní faktor

K - část radiace, která prochází vrstvou

D - transmisní faktor

Známe-li charakteristiku spektrálního prostupu pro jednotlivé tloušťky, můžeme vypočítat pro každou délku vlny, při jaké tloušťce d faktor $(1 - K^d)$ se blíží jednotce s přesností asi 1%.

$$K^d = 0,01$$

$$d \cdot \log K = - 2$$

$$d \cdot \log \frac{D}{1-R} = - 2$$

$$d \cdot \log \frac{D}{0,96} = - 2$$

Má-li transmisní faktor D následující hodnoty pro jednotku tloušťky e, nalezneme čísla pro jednotku tloušťky. Tedy víme, je-li nebo není-li měřicí signál ovlivněn tloušťkou skla.

Sklo je podle chemického složení, zvláště podle obsahu železa, více či méně propustné pro sálání tepla. Tepelná propustnost skla (průteplivost) vysvětluje skutečnost, že při vysokých teplotách je teplo ve skle sdíleno sáláním.

Množství propuštěné tepelné energie stěnou o tloušťce d je rovno podle absorpčního zákona

$$I = I_0 \cdot e^{-k(\lambda)d}$$

I_0 - intenzita monochromatického sálání o délce vlny vstupující do skla

I - intenzita po průchodu vrstvou o tloušťce d (cm)

$k(\lambda)$ - absorpční součinitel (cm^{-1})

VŠST Liberec	Kalibrační píčka pro radiační pyrometr	Katedra SS
Fakulta strojní		DESS-41-68-18

Z nauky o sdílení tepla je známo, že při sdílení tepla sáláním tepelný tok v určitém místě závisí pouze na rozdílu sálavých proudů ve vrstvách před tímto místem a za ním, proto při výpočtech sálání tepla ve sklech má význam tloušťka vrstvy skla.

Je-li vrstva skla silná, zavádí se pojem sálavá vodivost H_s , analogicky tepelné vodivosti

$$H_s = \frac{A_s}{F \cdot \frac{dt}{dx}} \quad (\text{kcal/m hod } ^\circ\text{C})$$

Sálavou vodivost je možno při stacionárním, jednorozměrném sdílení určit ze vztahu

$$H_s = \frac{16}{3} \cdot \sigma \cdot n^2 \cdot T^3 \cdot F$$

σ - konstanta sálání dokonale černého tělesa

n - index lomu skla

T - teplota

F - střední volná dráha sálavých kvant, je závislá na teplotě a chemickém složení

V některých případech se zavádí pojem "efektivní součinitel tepelné vodivosti" H , zahrnující při sdílení tepla vliv vedení a sálání. Tepelný tok je pak vyjádřen

$$Q = H \cdot \frac{dt}{dx}$$

Tato rovnice nemá všeobecnou platnost, její použití musí být pečlivě zváženo. U velmi slabých vrstev sdílení tepla sáláním ustupuje a uplatňuje se hlavně sdílení tepla vedením, takže efektivní tepelná vodivost se blíží tepelné vodivosti skla. Se zvětšující se tloušťkou vrstvy roste vliv sálání.

6. Chyby při měření radiální pyrometry

Vysoký stupeň přesnosti je zásadou ve sklářské pyrometrii, získání této přesnosti je však obtížné. Malé teplotní změny ve skle způsobují velké změny ve viskozitě

VŠST Liberec	Kalibrační píčka pro radiační pyrometry	Katedra SS
Fakulta strojní		DP-SS-41-68-19

a poměrně malé tepelné spády během chlazení způsobují značná vnitřní pnutí v ukončeném předmětu. Výrobce skla vyžaduje přesnost cejchování pyrometru s takovou přesností, která je téměř tak vysoká jako u platinového termočlánku. To znamená, že zdroj černého tělesa, používaný k cejchování pyrometru musí být skoro dokonalý.

Stručný přehled běžně se vyskytujících zdrojů chyb:

a/ chyby v měření způsobené mezilehlým médiem

Hodnoty sklářského pyrometru se mění s atmosferickou vlhkostí nebo jsou-li v peci spaliny obsahující kysličník uhličitý, které absorbují část záření, pak se ze všech těchto příčin síla záření oslabuje a pyrometry ukazují příliš nízkou teplotu.

b/ chyby v měření způsobené rozdílnou teplotou stěn

Jestliže je teplota pece vyšší než teplota zahřívání materiálu bude teplota zahřívání materiálu jen tehdy správně vykazována, jestliže, je její vyzařování $\epsilon = 1$. Při nižším vyzařování $\epsilon < 1$ a nižší teplotě zahřívání materiálu dostává radiační pyrometr záření od zahřívání materiálu avšak navíc tam přichází odrazem od zahřívání materiálu část vyzařování z pecních stěn. Pyrometrem vykazovaná teplota je tudíž oproti teplotě zahřívání materiálu vyšší.

Jestliže je naopak pecní stěna chladnější než zahřívání materiál může zahřívání materiál odevzdávat část záření pecní stěně. Pyrometrem vykazovaná teplota je tudíž oproti teplotě zahřívání materiálu nižší.

c/ chyby v měření způsobené nerovnoměrnou povrchovou teplotou

Hodnota, o kterou je vykazováno méně, je samozřejmě závislá na podílu plochy povrchu s nižší hodnotou záření.

d/ chyby v měření způsobené povrchovým meniskem

Zlepšení je možno dosáhnout pouze zvětšením kelímku a z toho plyne zvětšení pece. Meniskus působí na paprsek

VŠST Liberec	Kalibrační píčka pro	Katedra SS
Fakulta strojní	radiační pyrometr	DP-SS-41-68-20

světla odražený na rovinném zrcadle jako rozptylová čočka.
e/ chyby v měření způsobené reflexí na povrchu skla
Tato chyba je početně zjistitelná. Změnou tloušťky vrstvy
ji nelze odstranit.

V této části byly teoreticky probrány základy potřebné
k vlastní práci, tj. postavení kalibrační píčky a k zaří-
zení potřebnému k měření záření pomocí pyrometrů na celko-
vé záření.

VŠST Liberec	Kalibrační pícka pro radiační pyrometr	Katedra SS
Fakulta strojní		DP -SS-41-68-21

III. Praktická část.

Mým úkolem je postavení kalibrační pícky umožňující cejchování radiačních pyrometrů podle dříve probraných zákonů v teoretické části.

A. Zařízení potřebné k roztavení skloviny.

1. Stavba pece

Rám pece je proveden z profilu L45 x 45 mm. Vyzdívka je provedena z žáruvzdorného materiálu. K posouzení vhodnosti žáruvzdorného materiálu pro určité případy jeho použití je nutno znát provozní podmínky, kterým je žáruvzdorný materiál vystaven, z hlediska teploty, změny teploty, chemických vlivů, mechanických vlivů, odvádění tepla stavivem, těsnosti vyzdívky se zřetelem k šířce spáry a provedení práce a hospodárnosti zařízení.

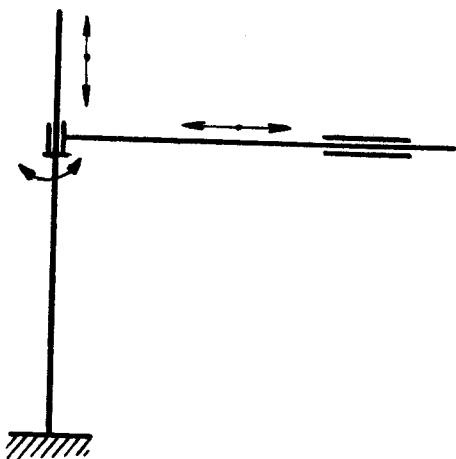
Kromě znalostí prostředí v němž bude žáruvzdorný materiál použit je nutno znát i údaje o vlastnostech jednotlivých druhů staviv, které jsou získány normalizovanými zkušebními postupy.

Žáruvzdorná staviva jsou určena k vyzdívání nebo obezdívání těch prostorů sklářských tavicích agregátů, jejichž zdivo je vystaveno působením vysokých teplot. Rozdělení žáruvzdorných materiálu podle stupně žáruvzdornosti:

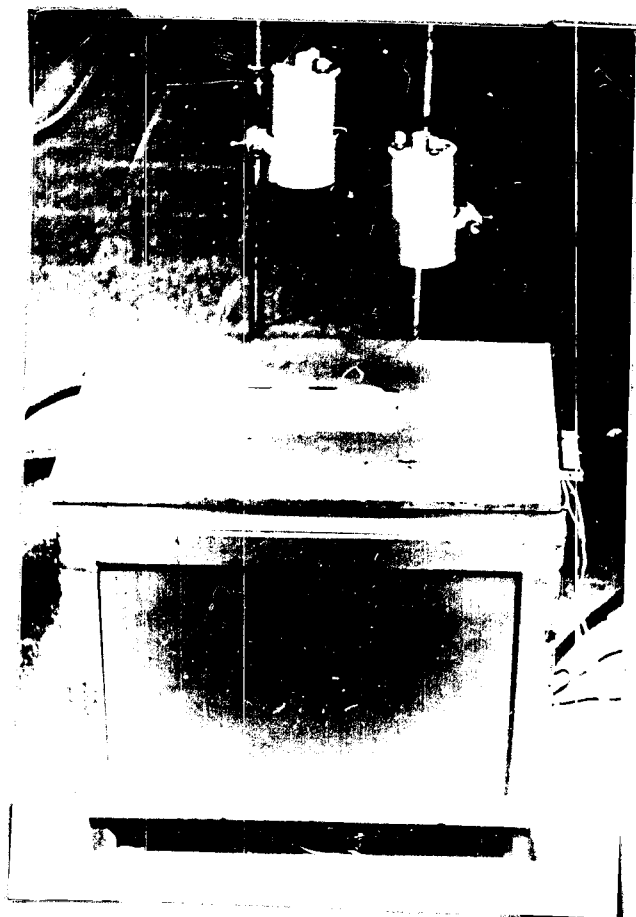
- | | |
|----------------------------|----------------|
| a/ žárovzdorná | 1580 - 1770 °C |
| b/ vysoce žárovzdorná | 1770 - 2000 °C |
| c/ nejvyšší žárovzdornosti | 2000°C a výše |

Při stavbě pece jsem použil šamotové vyzdívky obecné SI ČSN 726106. Podíl hlavní složky váhově v % SiO_2 je 50 - 75. Měrná váha je $1,75 \text{ kp/dm}^3$. Tepelná vodivost λ je $0,72 + 50 \times 10^{-5}$. t. Teplota použití 1410 - 1520 °C. Malta k vyzdění pece se skládá z šamotu, korundu a vodního skla a vody. Korund Al_2O_3 obsahuje 93 - 97 % tohoto kyslíčnicku. Měrná váha je $2,7 - 2,9 \text{ kp/dm}^3$. Tepelná vodivost λ je $1,9 - 20 \cdot 10^{-5}$. t. Teplota použití korundu je nad 1850°C.

Na rámu pece je umístěn držák viz obr.2, který má 3^0 volnosti, pro přesné nastavení pyrometrů nad sklem. Držáky pyrometrů viz obr.č.3.



Obr.2 držák pyrometru /schéma/



Obr.3 celkové provedení pece / viz výkres DP-SS-41-68-1/

VŠST Liberec	Kalibrační pícka pro radiační pyrometr	Katedra SS
Fakulta strojní		DP -SS-41-68-23

2. Vytápění pece.

Pro vytápění, při teplotách vyšších než 1350°C se nehodí slitiny Cr-Ni jednak proto, že jsou za vyšších teplot málo pevné, jednak mají krátký život. Materiál vlivem přísad Fe, Al rychle koroduje a krystalizací křehne. Lépe vyhovují nekovové oděry na bázi karbosi-
litové, kryolithové, tuhové apod. Na vysoké teploty jsou to dnes jediné technicky použitelné hmoty, i když jejich výroba, provoz a údržování jsou dosti složité a choulostivé. Jejich život je 500 - 2000 hodin i více, podle zatížení a teploty.

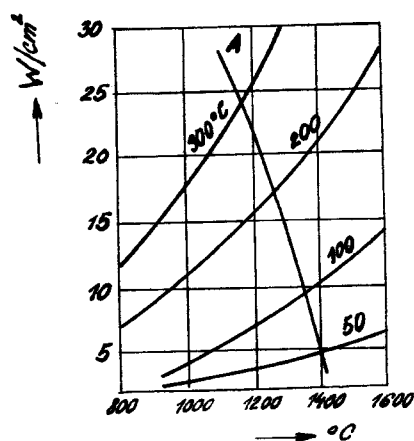
K vytápění pece jsem použil "quarzilit" je to v podstatě siliciumkarbid, který je vhodný do 1450°C a dodává se buď v tyčích s tlustšími konci, nebo s konci z materiálu elektricky vodivějšího, aby přívody nebyly příliš horké a tvořily dobré kontakty. Tyto tyče jsou v délce 25 mm pro připojení svorek postříbřeny viz výkres DP-SS-41-68-11. Tyče jsou při provozních teplotách dostatečně pevné, tedy samonosné, jsou však křehké a neunesou namáhání na ohyb. Podle zatížení vydrží 1000 - 10000 hodin.

Vytápění pece je provedeno 6 tyčemi. Rozměry tyče:

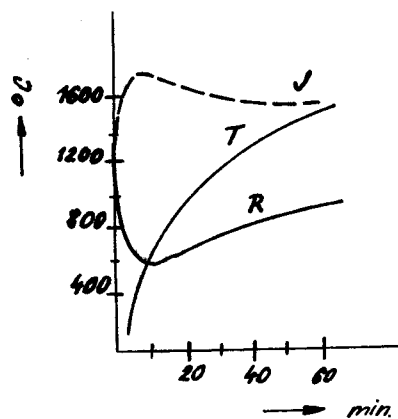
délka topné části	100 mm
průměr topné části	8 mm
délka netopné části	130 mm
průměr netopné části	14 mm
celková délka tyče	360 mm

Při teplotě 1100°C bývá povrchové zatížení 22 W/cm^2 , při vyšší teplotě viz obrázek 4, musí být menší. Při 1450°C je měrný odpor 1100 - 1500 $\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$. Časový průběh teploty, odporu a proudu je na obr.5.

$\text{CO}, \text{H}_2\text{O}, \text{H}_2$ tento materiál skoro nenapadají, CO_2 jej napadá až při velmi vysoké teplotě. Kyslík / vzduch / způsobuje oxydaci a tím stárnutí již při 800°C . Velmi podstatně rozrušují siliciumkarbid sloučeniny C, S, B, alkálie, kysličníky / zejména kovů / a některé roztavené kovy. Stárnutím se odpor tyčí zvětšuje, proto musí mít transformátor přiměřený počet odboček.



Obr.4 zatižitelnost tyčí. Závislost provozní teploty na přehřátí tyče a na jejím povrchovém zatížení / A čára mechanických hodnot /.



Obr.5 časový průběh teploty, odporu v tyči při stálém napětí.

Při použití těchto tyčí nutno zejména vyřešit dobré a trvalé elektrické připojení na vývody z pece. Je též důležité sladit tyto požadavky: zamezuje-li dobře tepelně izolovaný vývod tepelné ztráty, zvyšuje zároveň teplotu konců a tím zhoršuje dobré elektrické připojení. Naproti tomu přílišné odvádění tepla / umělým chlazením / na koncích nekovových článků zhoršuje hospodárnost pece, umožňuje však dobré elektrické připojení topných tyčí. Toto intenzivní chlazení umožní dobré utěsnění průchodu tyčí,

VŠST Liberec	Kalibrační píčka pro radiační pyrometr	Katedra SS
Fakulta strojní		DP - SS-41-68-25

aniž se přehřejí konce topných článků. Tyče jsou uchyceny tak, aby mohly osově dilatovat při dobrém elektrickém spojení s přívody. Poněvadž nekovové články jsou poměrně křehké, nesmějí se tyče namáhat na chyb nesprávným uložením konců, které by při dilataci vyvinuly ohybový moment. Někdy je třeba při vzdúchovém chlazení konců tyčí udělat ve stěnách kuželové jamky, aby měl vzduch lepší přístup. Toto je provedeno u spodních konců tyčí. Vrchní konce tyčí jsou chlazeny stlačeným vzduchem.

3. Regulace teploty a elektrické zapojení.

Regulace teploty se provádí jednofázovými transformátory typu RA10.

Jednofázový transformátor RA10:

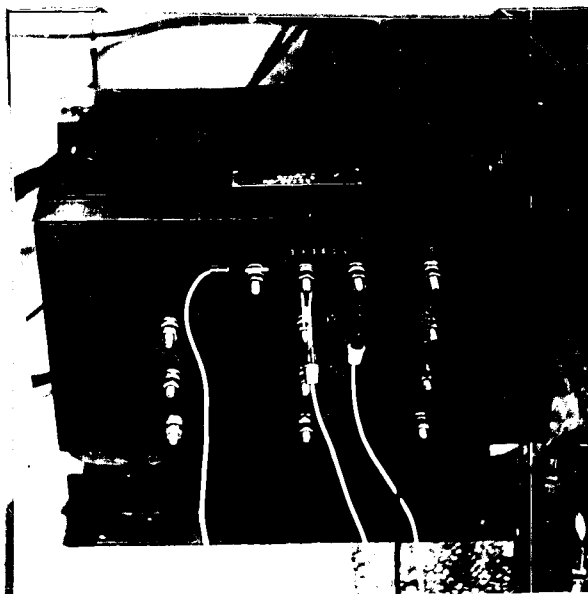
PRIM.- 120 - 220V

SEK. - 0 - 250 V

Výkon - 2,5 kVA

Kmitočet 50 - 60 Hz

Pomocí těchto jednofázových transformátorů se provádí regulace na třífázovém transformátoru viz obr.6.



Obr. 6 třífázový transformátor

Třífázový transformátor je typu 3F1R:

PRIM. 3 x 380

SEK. - 40 - 50 - 60V

72 - 58 - 48A

Výkon - 5 kVA

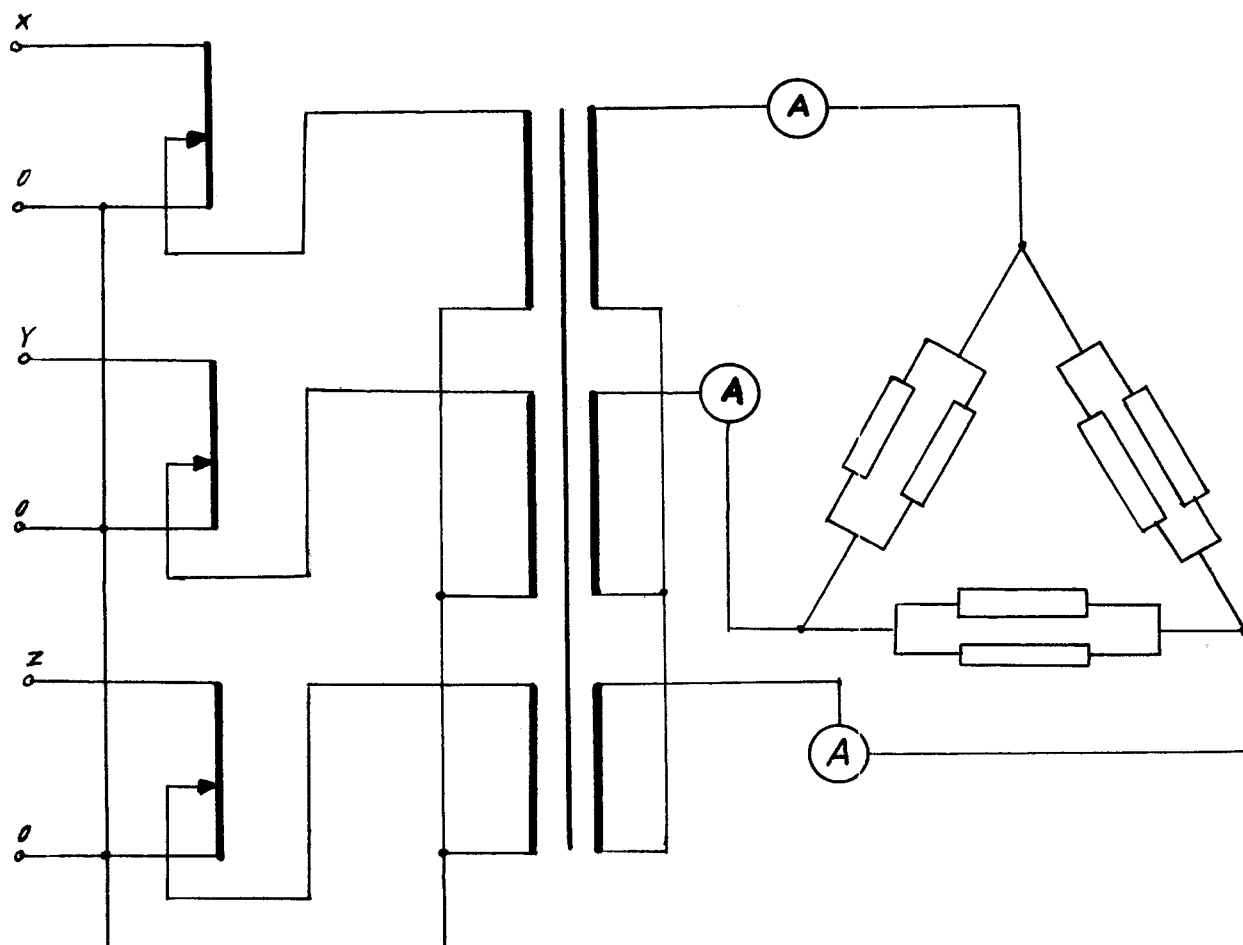
Na primáru jsou provedeny tři odbočky, proti kolísání napětí v síti:

a/ 3% přírážka na napětí v síti

b/ 6% přírážka na napětí v síti

c/ 9% přírážka na napětí v síti

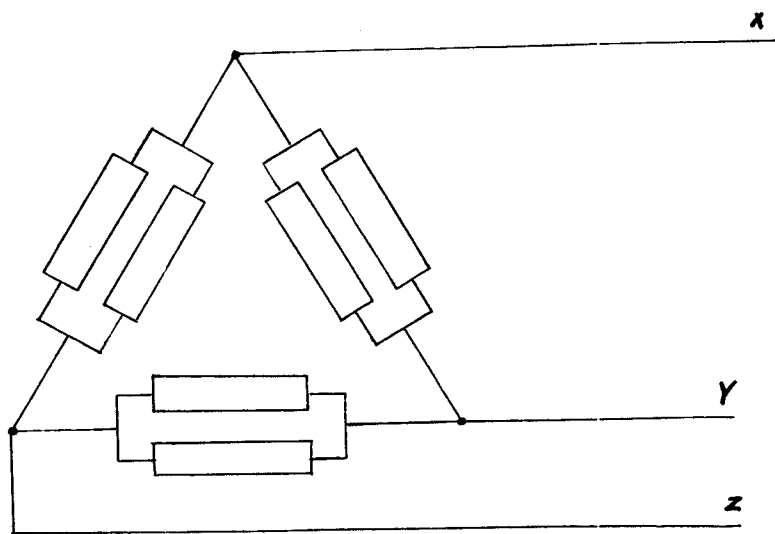
Zapojení jednofázových, třífázového transformátoru a siliciunkarbidových tyčí je provedeno na obr.7.



Obr.7 zapojení jednofázových a třífázového transformátoru s topnými tyčemi.

4. Výpočet transformátoru.

Topné tyče jsou zapojeny do trojúhelníka a to vždy dvě paralelně viz obr.8.



Obr.8 schéma zapojení topných tyčí do trojúhelníka.

Proud, který nám prochází silitovými tyčemi je měřen měřicím kufr " Metra Blansko ", na tomto kufru měříme též napětí mezi fázemi a výkon.

Výpočet třífázového transformátoru.

Napětí $U = 50V$

Maximální proud $J = 20A$

Teoretický výkon $N = 3 \cdot U \cdot J = 3 \cdot 50 \cdot 20$

$N = 3000 \text{ VA} = 3 \text{ kVA}$

Skutečný výkon $N_1 = N \cdot \eta$

Účinnost transformátoru $\eta = 80 \%$

Skutečný výkon $N_1 = 3750 \text{ VA} = 3,75 \text{ kVA}$

Volen transformátor o výkonu 5 kVA.

VŠST Liberec	Kalibrační pícka pro radiační pyrometr	Katedra SS
Fakulta strojní		DP - SS-41-68-28

B. Zařízení k snímání záření a jeho cejchování.

1. Termočlánky

Pomocí termočlánků provádíme cejchování radiačních pyrometrů v rozsahu teplot 600 - 1200°C. Rozeznáváme tyto druhy termočlánků:

článek	rozsah teploty °C	krátkodobý rozsah teploty
Cu - Ko	- 200 až + 400	+ 600
Fe - Ko	- 200 až + 600	+ 900
NiCr - Ni	- 200 až + 900	+ 1100
PtRh - Pt	0 až + 1300	+ 1600

Termoelektrický článek tvoří dva vodiče z různých materiálů, na jednom konci spolu vodivě spojených, které dávají termoelektrické napětí, jestliže na měrný konec působí teplota odlišná od teploty působící na srovnávací konce. Termoelektrické napětí je funkcí rozdílu teplot T_1 , T_2 , obou míst a platí tedy vztah

$$u = f / T_1 - T_2 /$$

Vznikající termoelektrické napětí se měří milivoltmetrem a závisí nejen na rozdílu teplot, ale i na druhu kovů použitých pro termoelektrický článek. Měřením bylo zjištěno, že závislost termoelektrického napětí obvodu na rozdílu teplot je možno vyjádřit přibližně vztahem

$$u = \alpha / T_1 - T_2 / + A / T_1 - T_2 /^2$$

kde α a A jsou konstanty závislé na druhu použitých kovů a na teplotě měřeného intervalu, T_1 je absolutní teplota měrného konce, T_2 je absolutní teplota srovnávacího konce. Z uvedeného stavu vyplývá, že napětí termoelektrického článku se mění s teplotou podle kvadratické paraboly.

Při správném použití musí termočlánek splňovat několik požadavků:

- snést maximální teplotu, kterou chceme měřit
- odolávat beze změny vlastností prostředí, jehož teplota se měří nebo v němž článek je
- mít požadovanou přesnost, s níž chceme v daném rozsahu teplot měřit

d/ mít předpokládanou životnost s ohledem na náklady při výměně a zabudování

Pro měření v rozsahu teplot 600 -1200°C se používají termočlánky z ušlechtilých kovů při výrobě těchto termočlánků musíme dodržovat vysokou čistotu výchozích materiálů a zároveň neustále pečlivě kontrolovat výrobu a zpracování. Nejvíce a také nejdéle jsou používány články PtRh-Pt přičemž procentový obsah rhodia v kladné větvi bývá různý. Při svém měření jsem použil článek PtRh10-Pt, tento článek je nazýván článkem Le Chatelierovým, který první určil jeho složení. Zatím žádná jiná dvojice nepředčila tento článek ve významu a rozsahu použití jsou velmi ceněny jeho schopnosti tažení až do tenkých drátů a odolnost vůči chemickým vlivům. Cejchovní řada tohoto článku je uvedena v tabulce 1.

Teplota °C	PtRh10-Pt
0	0
100	0,643
200	1,436
300	2,316
400	3,251
500	4,221
600	5,224
700	6,260
800	7,329
900	8,432
1000	9,570
1100	10,741
1200	11,935

Tab.č.1

Odolnost tohoto článku proti oxidačním plynům je dobrá, přes 1200°C nutná ochrana plynotěsná. Odolnost proti redukčním plynům je velmi špatná, též je velmi špatná proti výparům křemíku a fosforu a proti výparům z kovů při vyšších teplotách. Tento článek stárne při delším tepelném namáhání. Při použití přes 1200°C se projevuje odpařování platiny.

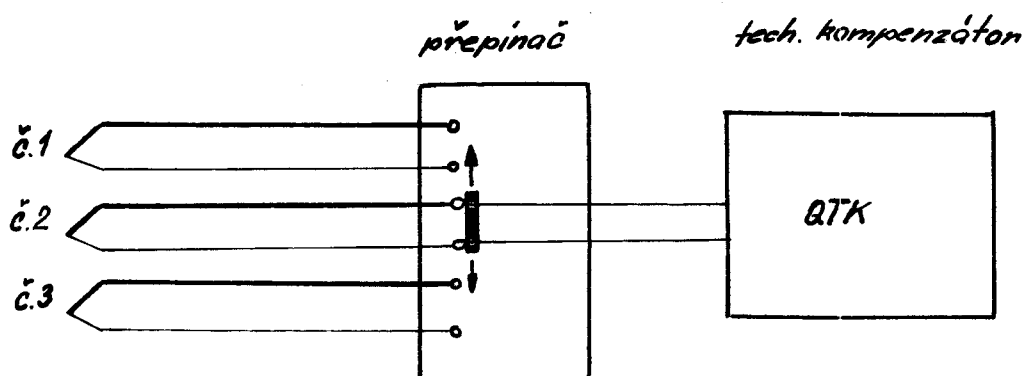
VŠST Liberec	Kalibrační píčka pro radiální pyrometr	Katedra DS
Fakulta strojní		DP -SS-41-68-30

Druhy izolace termočlánku:

- a/ trubky z taveného křemene
- b/ trubky z tvrdého porcelanu
- c/ trubky z keramické hmoty
- d/ Banotové trubky
- e/ silicitové a karborundové a grafitové trubky

1. Uspořádání vlastního měření

Použito termočlánků Pt.Rh10-Pt, izolace z keramické hmoty, uspořádání vyplývá z obrázku č.9.



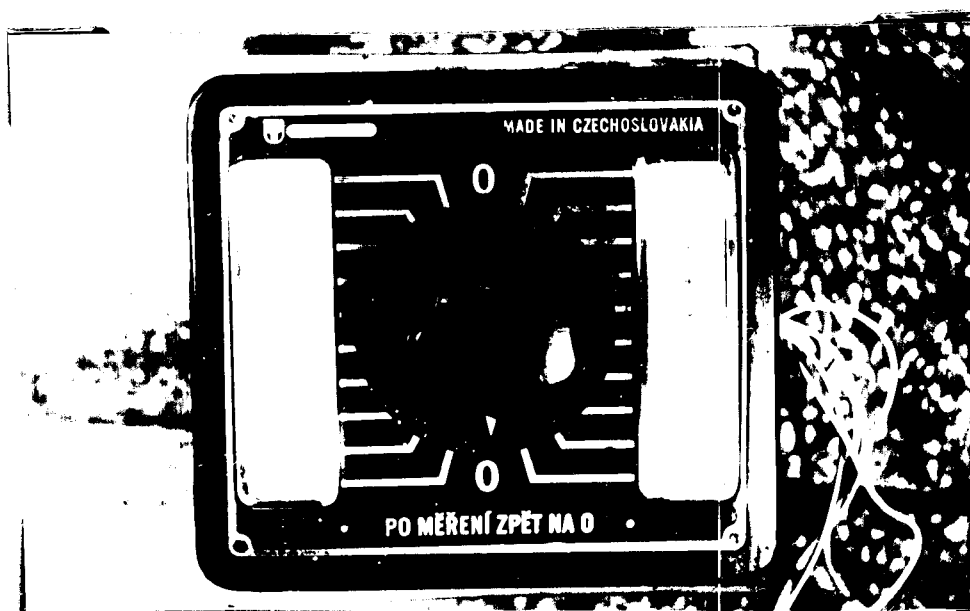
Obr. č.9 schematické uspořádání měření teploty pomocí termočlánků.

Termočlánek č.1 je zabudován v černém tělese a termočlánek č.2 měří ovzdušnou teplotu kila, termočlánky jsou vyvedeny na přepínač viz obr.č.10, v přepínači je ercovnávací konec, jehož teplota je konstantní a to 20°C. Kompenzace vedení je kompenzována pomocí technického kompenzátoru typu QTK.

Technický kompenzátor typu QTK měří stejnosměrné napětí od 10 μ V do 600 V, z toho až do 1,5 V bez proudového zatížení měřeného zdroje. Je vhodný zejména pro měření termočlánků, DS zdrojů, kontrolu a seřizování měřících přístrojů, měření odporu pomocí odporových normálů. Přístroj je proveden jako přenosný a očitelným

VŠST Liberec	Kalibrační píčka pro radiační pyrometr	Katedra SS
Fakulta strojní		DP - SS-41-68-31

víkem. Váha 7,50 kg. Přesnost cejkování je 1% z jmenovité hodnoty.



Obr.č.10 přepínač termočlánků.

2. Radiační pyrometry

Rozeznáváme tyto pyrometry:

- a/ jasové + 600 až + 3500°C
- b/ barvové + 1000 až + 3500°C
- c/ termoelektrické + 50 až + 3500°C
- d/ fotoelektrické + 300 až + 4000°C

Bezkontaktní teploměry využívají měření teploty tepelného záření, a to jak viditelného, tak neviditelného. V oblasti viditelného záření se pohybuje rozsah měření od 600 - 3400°C / 5000°C /, v oblasti neviditelného záření se posouvá dolní mez měření až k teplotě - 40°C.

Podle principu měření lze rozdělit pyrometry do tří následujících skupin:

- a/ pyrometry radiační - k měření teploty využívají záření všech vlnových délek, tedy záření celkového

VŠST Liberec	Kalibrační píčka pro radiační pyrometr	Katedra SS
Fakulta strojní		DP-SS-41-68-32
b/ pyrometry spektrální - k měření teploty využívají záření pouze určité vlnové délky / tzv. jasové nebo optické pyrometry / c/ pyrometry barvové - k měření teploty využívají barvy tepelného záření Radiační pyrometry lze zásadně rozdělit do dvou skupin. Do první patří radiační pyrometry, u nichž se tepelné záření soustřeďuje soustavou čoček nebo zrcadel na přijímač, který se tím zahřívá. Oteplení přijímače je úměrné úhrnnému tepelnému záření, které je podle Stefanova - Bolzmanova zákona úměrné čtvrté mocnině absolutní teploty zářiče, to jest vyšetřovaného tělesa. Oteplení přijímače se měří nejčastěji termoelektrickými, odporovými nebo bimetalovými teploměry. Do druhé skupiny patří radiační pyrometry, u nichž funkci přijímačů zastávají fotočlánky, které reagují na dopadající tepelné záření. Označovat radiační pyrometry jako pyrometry na celkové záření není zcela správné, protože jak optické systémy /čočky a zrcadla/, tak přijímače mají omezenou spektrální pohltivost. U radiačních pyrometrů je vzdálenost od zářiče omezena podmínkou, že zářič je dostatečně velký a při průhledu okulárem přístroje kryje obraz přijímače. Intenzity tepelného zářivého toku ubývá s druhou mocninou vzdálenosti, avšak optický systém přístroje vytíná na zářiči plochu, která naopak roste s druhou mocninou vzdálenosti. Výhodou radiačních pyrometrů je jejich samočinná funkce, možnost přenášení údajů na dálku, připojení zapisovacích přístrojů a využití k regulačním účelům. Radiační pyrometry lze rozdělit podle použitých přijímačů záření na termočláňkové, bimetalové, fotoelektrické a bolometrické. Radiační pyrometry s termoelektrickými články. Přijímači pyrometru je zabudován termoelektrický článek, na který dopadá tepelné záření se zářičem. Termoelektrický článek se dopadajícím zářením zahřívá a vyrábí termoelek-		

VŠST Liberec	Kalibrační píčka pro radiační pyrometr	Katedra SS
Fakulta strojní		DP -SS-41-68-33

trické napětí, jehož velikost je dána vztahem

$$U = \alpha_r \cdot Br \cdot E_0 = \alpha_r \cdot Br \cdot C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4$$

α_r - empiricky zjištěný teplotně závislý součinitel vyjadřující vztah mezi zářivou energií a termoelektrickým napětím článku

Br - je teplotně závislý součinitel vyjadřující vliv pohltivosti a odrazivosti optického systému na tepelné záření

E_0 - celková zářivá energie černého tělesa o teplotě T a se součinitelem záření C_0

4. Uspořádání měření radiačními pyrometry

Měření teploty skla jsem prováděl termoelektrickým pyrometrem RPT4. Je vhodný tam, kde je žádaná krátká doba náběhu, např. pro měření teploty ve sklárnách, v závodech strojírenského sektoru, v chemickém průmyslu apod.

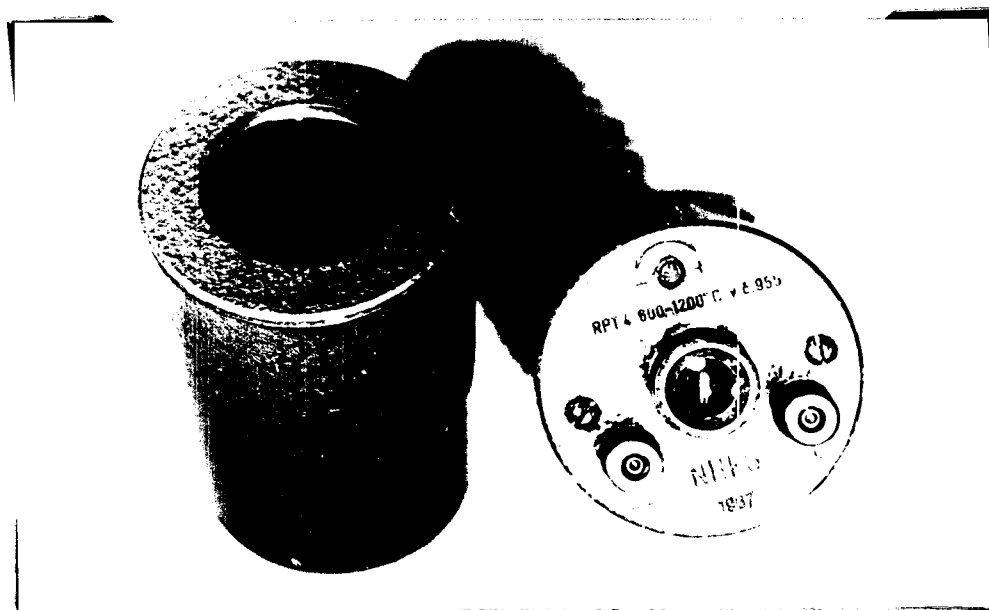
Záření vysílané měřeným tělesem je čočkou soustřeďováno na termobaterii tvořenou dvánácti termočlánky, zapojenými v sérii. Dopadající energii se měrné konce baterie ohřívají, vyvíjí se elektromotorická síla úměrná dopadající energii a tím i teplotě měřeného tělesa. Pro správnou funkci je nutné, aby vyzařovací plocha měřeného tělesa vyplňovala celý zorný úhel pyrometru. Správnost zaměření se kontroluje okulárem. Provedení pyrometru viz obr.č.11.

Radiační pyrometr je zaostřený na vzdálenost jednoho metru. Vzdálenostní poměr je 1 : 16. Vzdálenostní poměr udává poměr mezi minimálním průměrem plochy měřeného tělesa a vzdáleností měřeného tělesa od objektivu pyrometru. Na přední straně je objektiv, v zadním víku je okulár umožňující zaměření pyrometru na těleso.

Měřicí rozsah 600 - 1200°C. Rychlost reakce na skokové změny teploty. Doba náběhu na 99 % konečné hodnoty měřené teploty je kratší než 0,6 sec. Je-li pyrometr RPT4 seřazen při teplotě okolí 20 - 25°C, pak při vzrůstu teploty těleso pyrometru při měření v provozu do + 90°C bude chyba v měření menší než 0,5 % z měřicího rozsahu. Maximální chyba měření "černé" teploty je $\pm 1\%$, nepřekročí-li teplota

hodnotu $+ 200^{\circ}\text{C}$ bude-li pyrometr vlně zaměřen a v pro-

středí bez kouře a prachu.



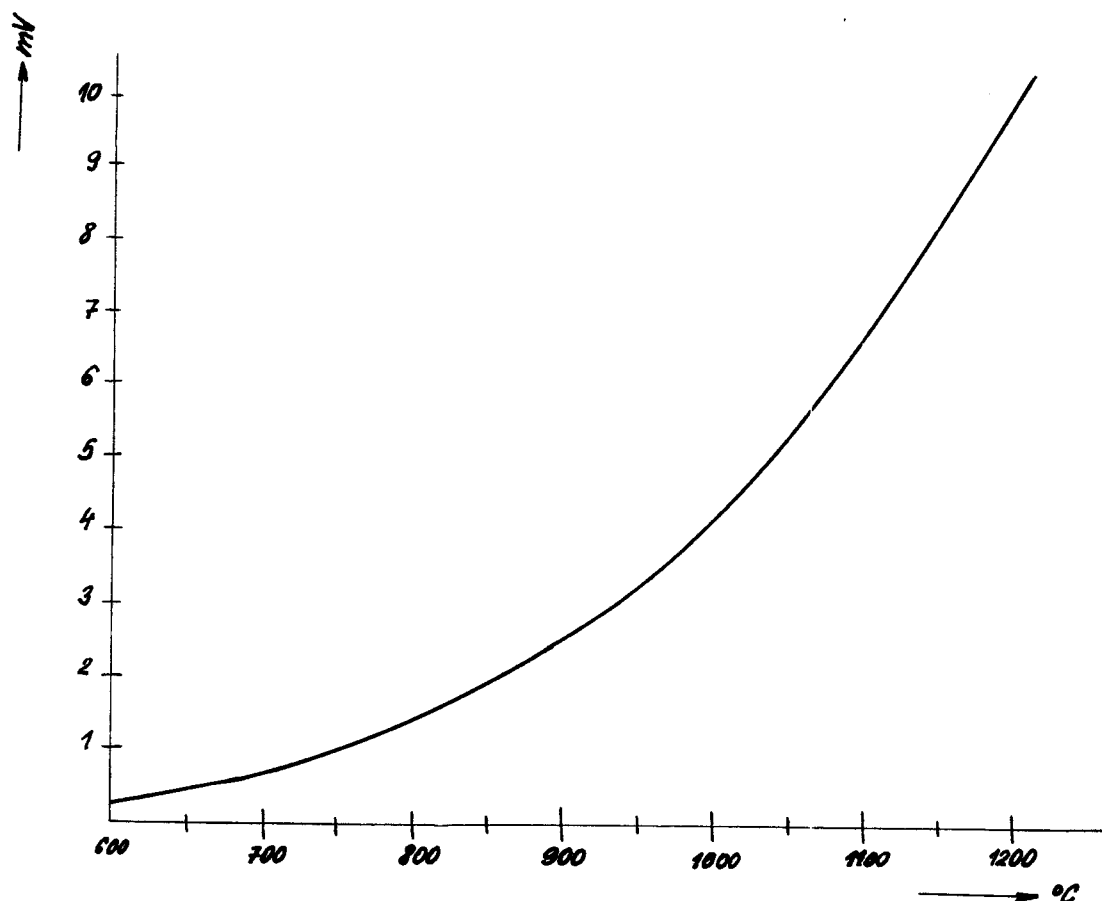
Obr. 8.11 snímače zařízení, radiační pyrometry RPT4

Čejchovní hodnoty pyrometru RPT4 pro rozsah 600 - 1200 $^{\circ}\text{C}$ jsou v tabulce 8.2.

teplota $^{\circ}\text{C}$

napětí mV

Calibrovací křivka pyrometru R 24

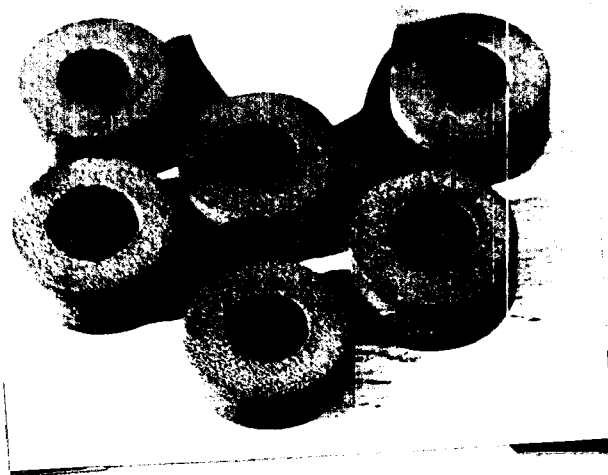


5. Uspořádání měření

Pyrometr zapojujeme za sklo a na černý zářič viz obr. 5.12, který je vyroben z korundu a vnitřní plochy natřeny kysličníkem železitým. Pyrometr nám zachytává záření, které nám zehřívá termočlánky, tím nám vzniká napětí, které přivádíme na technický kompenzátor QTK, u kterého je místo vnitřního galvanometru zapojen vnější galvanometr typu DG-20.

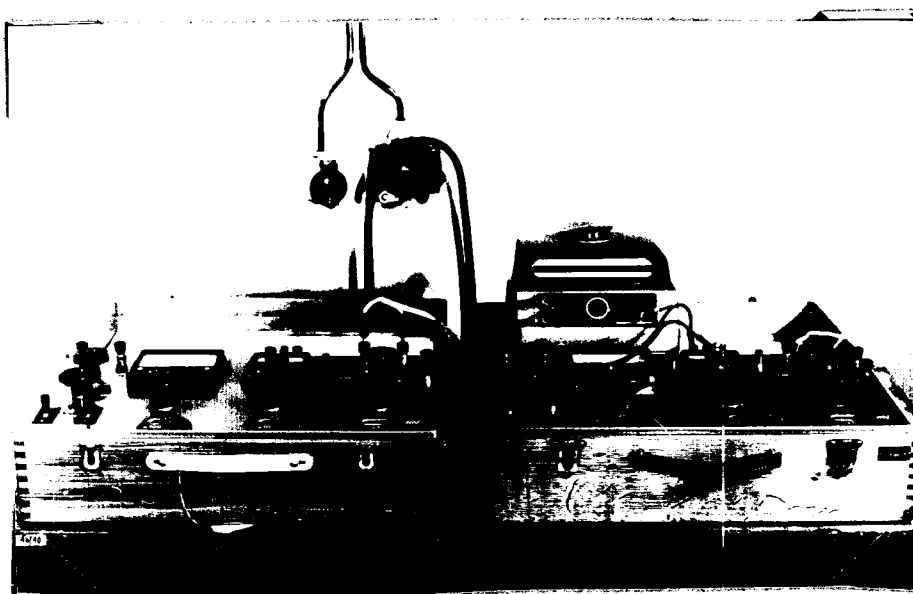
Galvanometr se světelnou značkou typ DG-20 má vnitřní odpor na základních rozsazích 1 : 1 asi 100 Ω . Doba na stavení je asi 2,5 sec. Váha přístroje je 7 kg. Uspořádání technického kompenzátoru a galvanometru je na obr. 5.13.

VŠST Liberec	Kalibrační píčka pro radiační pyrometr	Katedra SS
Fakulta strojní		DP-SS-41-68-36



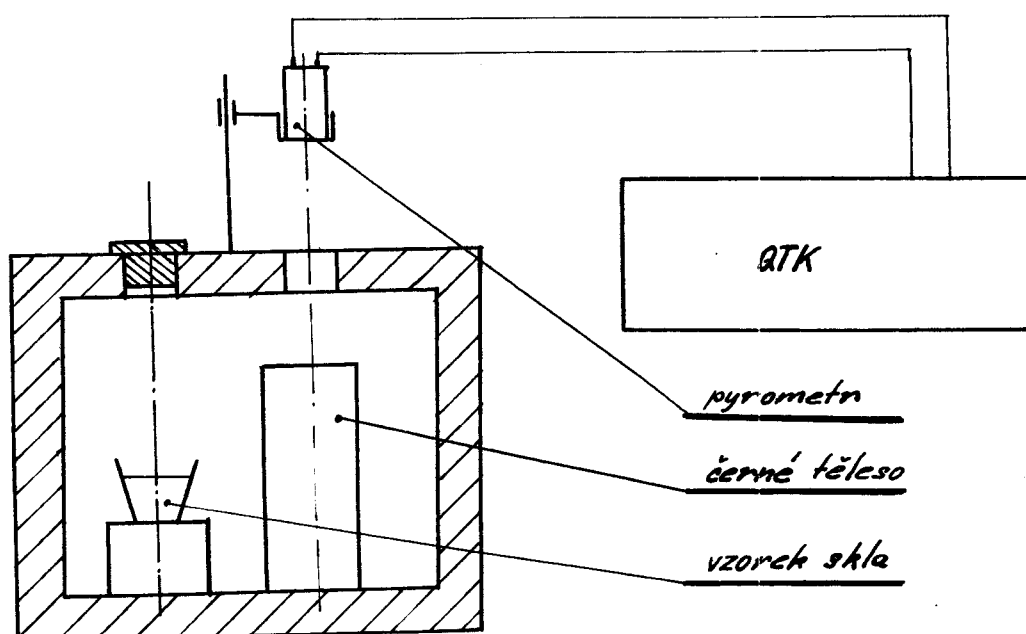
Obr.č.12 černé těleso / rozložené / viz výkres DP-SS-41-68-2/

Měření teploty nečerných těles radiačními pyrometry. Údaj radiačního pyrometru souhlasí s teplotou měřeného tělesa pouze tehdy, jde-li o černý zářič. Vlastnost zářiče, to jest jeho odlišnost od černého zářiče, udává emisní součinitel ϵ . Určení emisního součinitele pro celkové záření je však velmi obtížné a není známo pro všechny materiály, protože se celkový emisní součinitel mění s teplotou. Proto také je obtížné určit celkový emisní pyrometru. Tělesa s velmi malým emisním součinitelem nemohou být radiačním pyrometrem téměř měřena vzhledem k malé vysílané celkové zářivé energii. Přes uvedené potíže se v provozu hojně používá radiačních pyrometrů, a to zvláště tam, kde se měří teplota zářiče blízkého se černému tělesu, to jest zářiče s emisním součinitelem blízkým se jedné.



Obr. 8.13 vlevo kompensátor měřící teploty termočlánků
vpravo kompensátor měřící teploty od pyrometru
na pravém kompensátoru je umístěn galvanoměr

Schématické znázornění měření viz obr. 14.



Obr. 8.14 schématické měření teploty skla a černého zářiče.

VŠST Liberec

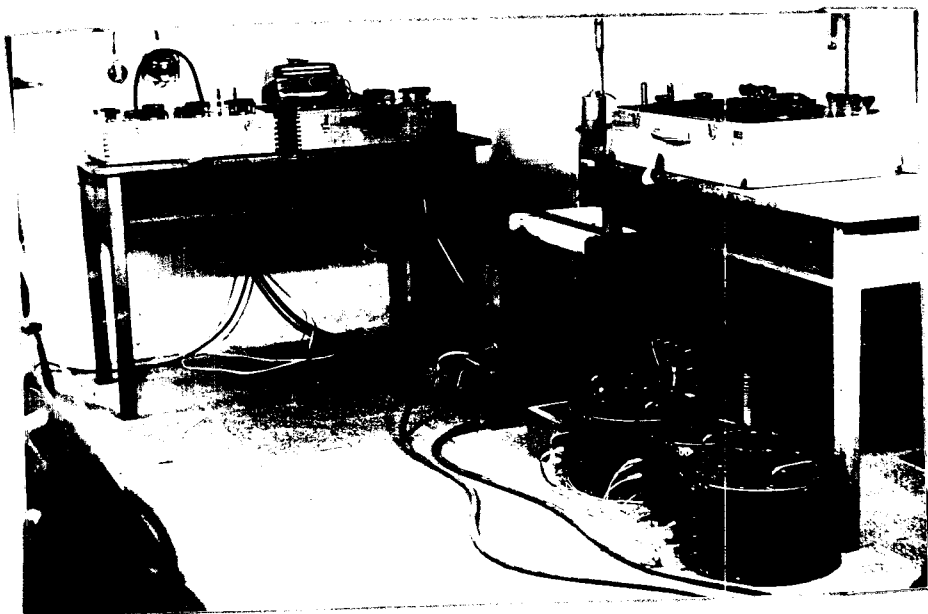
Fakulta strojní

Kalibrační pístek pro
radiační pyrometr

Katedra SS

DP-SS-41-68-38

Celkové uspořádání zařízení vyplývá z obrázku č.15.



Obr.č.15 celkové uspořádání zařízení

VŠST Liberec	Kalibrační pícha pro radiační pyrometr	Katedra SS
Fakulta strojní		DP - SS-41-68-39

V. Výsledky měření

Měření jsem prováděl na skle 154. Měření tohoto skla:

SiO_2 - 59,72%
 Na_2O - 7,32%
 K_2O - 8,10%
 PbO - 21,09%
 CaO - 3,29%
 Pb_2O_3 - 0,49%
 Měrná váha 2,851kp/dm³
 Index lomu 1,5495
 Disperze 0,01236
 Povrchové napětí 243 dyn/cm²
 Viskozita: 10^4 - 915°C
 10^5 - 800°C
 10^6 - 700°C
 10^7 - 635°C
 $10^{7,65}$ - 600°C
 10^8 - 580°C
 10^9 - 540°C

Měření jsem prováděl pro tři tloušťky skloviny:

a/ tloušťka skloviny 3 cm
 b/ tloušťka skloviny 2 cm
 c/ tloušťka skloviny 1 cm

Každé měření jednotlivých tloušek skloviny jsem prováděl čtyřikrát a bral průměrné hodnoty jednotlivých měření.

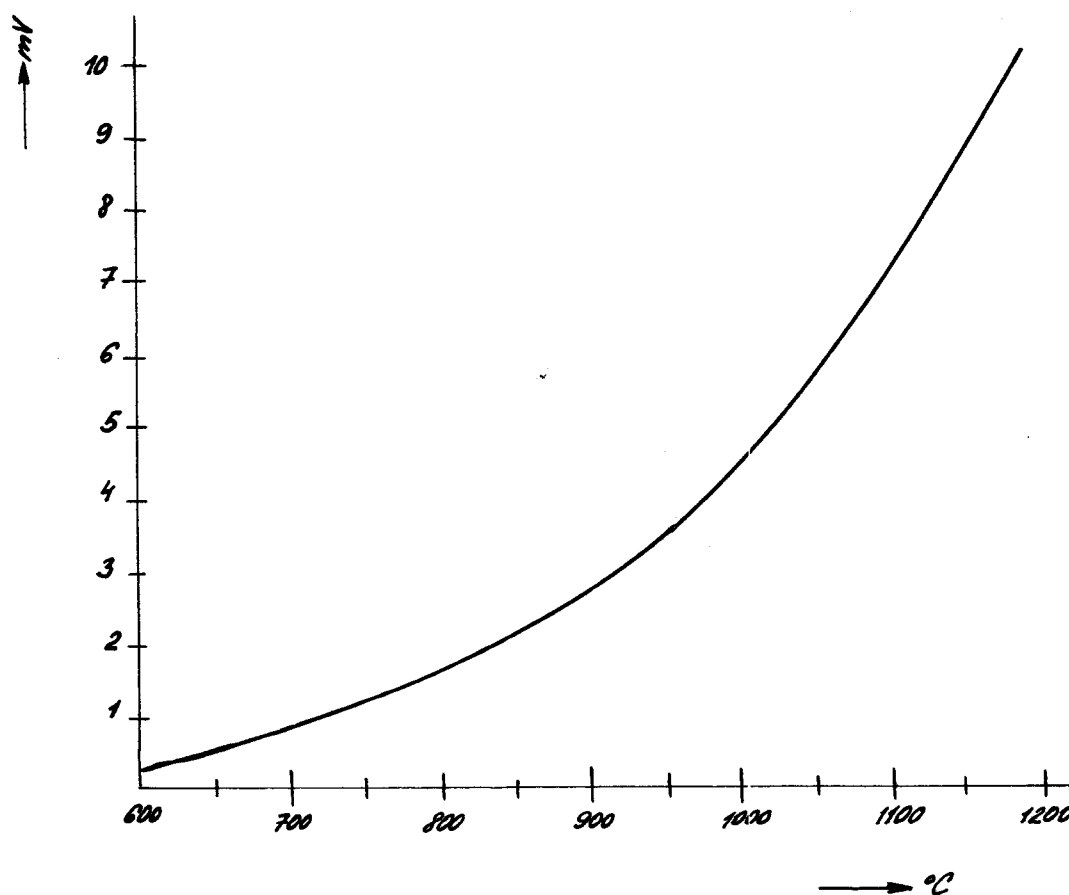
1. Tloušťka skloviny 3 cm

Při této tloušce se projevuje vliv vnitřního vyzařování a proto toto sklo, jehož záření se skládá z povrchového a vnitřního záření září více než černé těleso, které jen povrchově vyzařuje. Vliv dna kelímku je zanedbatelný. Naměřené hodnoty pyrometrem RPT4 pro tloušku skloviny 3 cm jsou zaneseny v tabulce číslo 3. Pro tuto tabulku je vytvořena cejchová křivka / závislost napětí na teplotě /.

Teplota °C	Napětí mV
600	0,47
650	0,61
700	0,85
750	1,19
800	1,59
850	2,12
900	2,75
950	3,53
1000	4,51
1050	5,63
1100	6,95
1150	8,50

Tab.čís.3

Sejchovní křivka pyrometru LIT4 pro tloušťku skloviny
3 cm.



2. Tloušťka skloviny 2 cm

Při této tloušťce se již tak velice vliv vnitřního vyzařování neprojevuje. Záření z dna kelínku je zanedbatelné. Naměřené hodnoty pyrometrem IPT4 pro tloušťku skloviny 2 cm jsou zaneseny v tabulce čís.4. Pro tuto tabulku je vytvořena cejchovní křivka.

Teplota °C	Napětí mV
600	0,42
650	0,55
700	0,78
750	1,11
800	1,50
850	2,03
900	2,66
950	3,43
1000	4,40
1050	5,50
1100	6,69
1150	8,24

Tab.čís.4

2. Tloušťka skloviny 1 cm

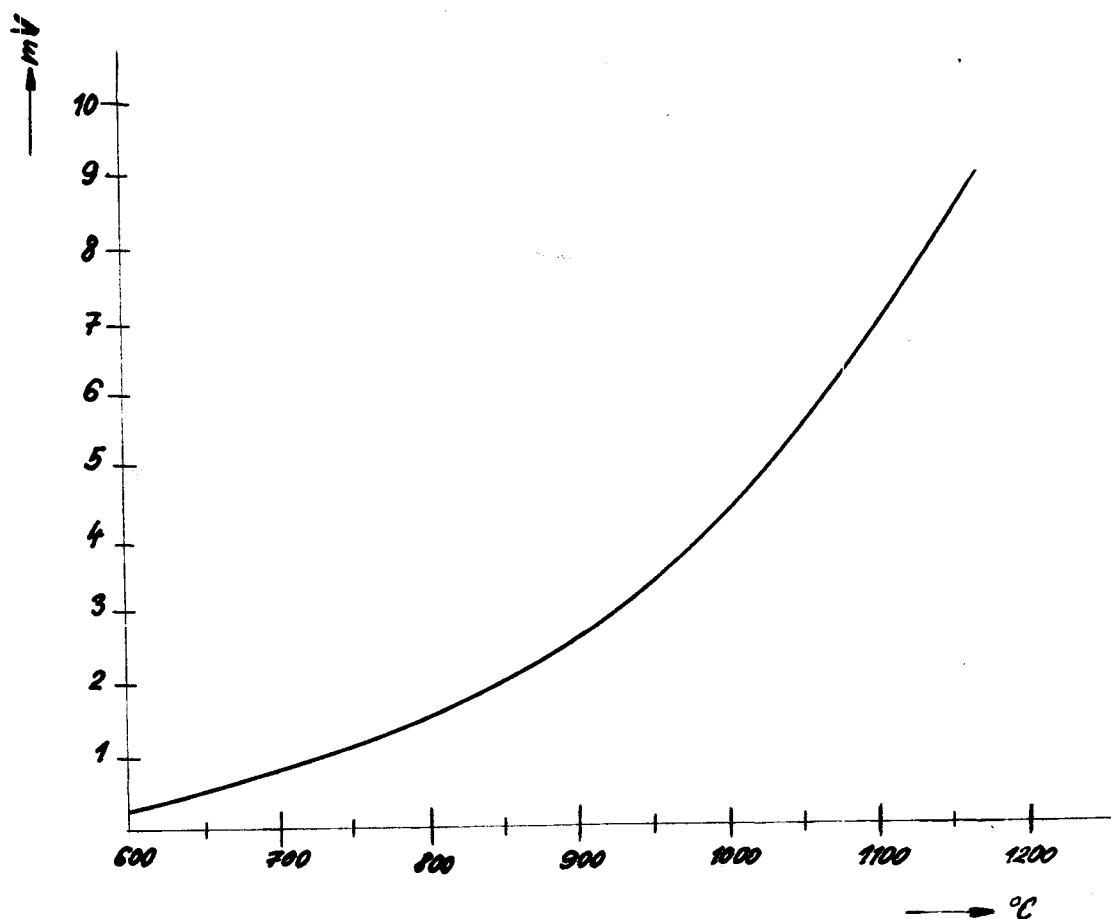
Při této tloušťce není vnitřní vyzařování veliké, ale projevuje se vliv dna platinového kelínku. Pyrometr nám zachytává záření, které prochází sklovinou ode dna. Naměřené hodnoty pyrometrem pro tloušťku skloviny 1 cm jsou v tabulce čís.5. Pro tuto tabulku je vytvořena cejchovní křivka.

Teplota °C	Napětí mV
600	0,40
650	0,52
700	0,76
750	1,09
800	1,49
850	2,01
900	2,66
950	3,41

1000	4,38
1050	5,47
1100	6,65
1150	8,21

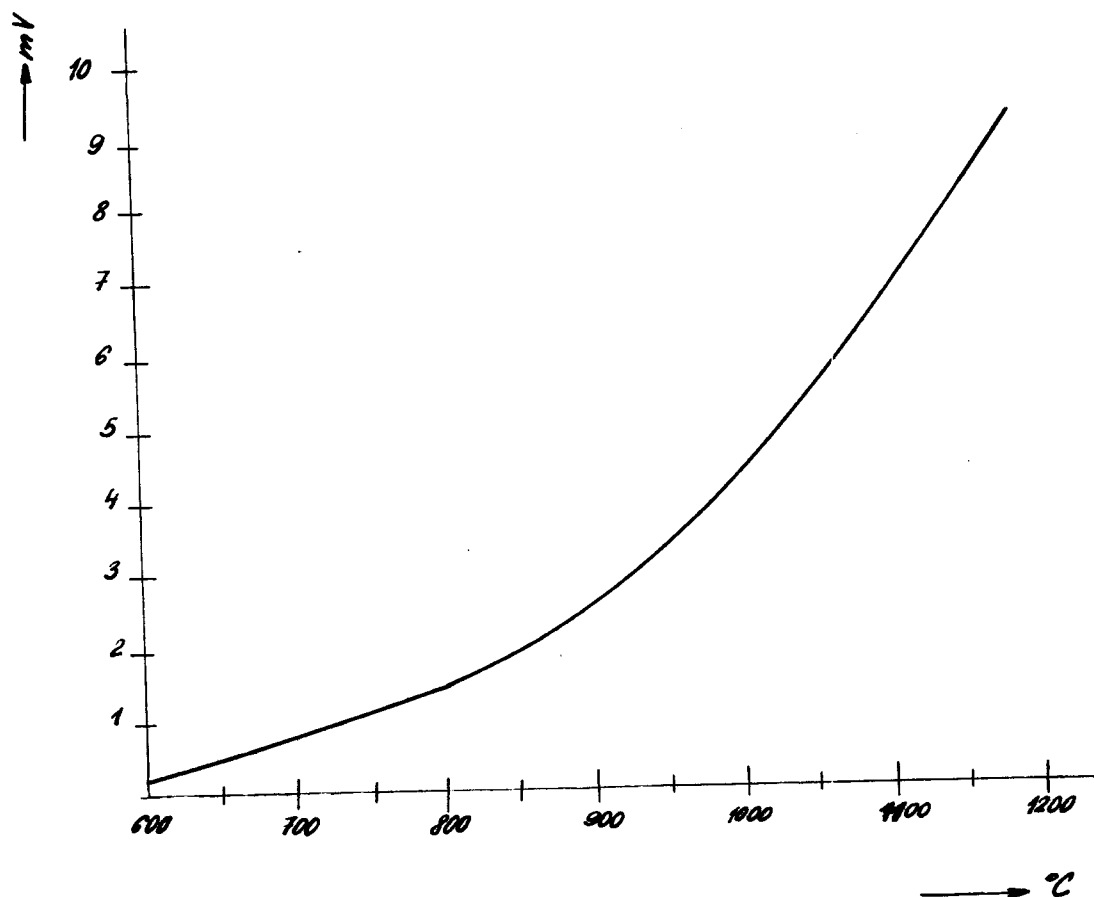
Tab.čís.5

Čechovací křivka pyrometru R 24 pro tloušťku skloviny 2 cm.



Tyto hodnoty vyznačte na pyrometru R 24, které jsou zaneseny v tabulkách čísl. 3, 4, 5 a v čechovacích křivkách pro jednotlivé tloušťky 3 cm, 2 cm, 1 cm, platí pro pyrometr zaměřený ze vzdálenosti 40 cm.

Čejchovní křivka pyrometru RPT4 pro tloušťku skloviny 1 cm.



VŠST Liberec	Kalibrační píčka pro	Katedra SS
Fakulta strojní	radiační pyrometr	DP -SS-41-68-44

Závěr

Měření pomocí radiačních pyrometrů obsahuje mnoho technických problémů, které musíme řešit teoreticky nebo experimentálně. Bez těchto měřících přístrojů se nemůžeme v praxi obejít.

Pomocí postavené cejchovní píčky jsem provedl ocejchování pyrometru. Toto ocejchování nám umožňuje snadné a přesné měření teploty. Udané hodnoty pro daný typ skla jsou zaneseny v křivkách a tabulkách.

Dokladné zkoumání odhaluje problémy a mohou být vypracovány postupy, při nichž se odtíže zmenší, nebo se jim můžeme vůbec vyhnout.

Abychom došli ke správnému výkladu a přesnosti údajů měřících signalů, obzvláštní pozornost musí být věnována těm bodům, kde skutečná radiace se odchyluje od radiace černého tělesa.

Při práci na tomto zadání mi pomohli a radou přispěli prof.dr.techn.Ing. František Kotěmíd a Ing. Pavel Brouček z VŠST Liberec a Ing. Miroslav Patka a pan Josef Vrána z VÚSABu Jablonec nad Nisou, za což bych jim chtěl poděkovati.

Dne 17.června 1968

Jaroslav Truhlář

VŠST Liberec	Kalibrační píčka pro radiační pyrometr	Katedra SS
Fakulta strojní		DP - SS-41-68-45
<u>Použitá literatura</u> Prof.dr.techn.Ing. František Kotšmíd: Základy technologie skla Ing. Antonín Vaško: Infračervené zařízení a jeho užití Prof.dr.Ing. Karel Sýkora: Základy sdílení tepla Dr.techn.věd Vladimír List a kolektiv: Elektrické teplo Prof.dr.Ing.Karel Sýkora: Technické měření ve strojnictví Doc.Ing.Josef Jenčík CSc, Ing. Vocetka: Měření tepelných veličin v automa- tizaci Ing.Vladimír Mainer: Sklářské pece Státní výzkumný ústav pro automatizaci skla: Mechanizace průmyslu skla T.Land: Pokroky v měření skloviny Fritz Lieneweg: Chyby při měření skloviny		

VŠST Liberec	Kalibrační píčka pro radiační pyrometr	Katedra SS
Fakulta strojní		DP - SS-41-68-46

Souhrn grafických prací /přílohy/

Příloha 1 - DP-SS-41-68-1
Příloha 2 - DP-SS-41-68-2
Příloha 3 - DP-SS-41-68-11
Příloha 4 - DP-SS-41-68-12
Příloha 5 - DP-SS-41-68-21