

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE

FAKULTA JADERNÁ A FYZIKÁLNĚ INŽENÝRSKÁ

KATEDRA FYZIKY



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vysokoteplotní vakuové zařízení

Autor: Michal Cihlář

Vedoucí práce: Mgr. Jozef Varju Ph.D.

Praha, 2017

1. ZADÁNÍ PRÁCE

Před svázáním místo této stránky **vložíte Zadání práce** s podpisem děkana.

Bude to jediný oboustranný list ve Vaší práci, přičemž v jednom z výtisků bude originál, v ostatních dvou budou (oboustranné) kopie.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v přiloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti použití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne

Michal Cihlář

Poděkování

Děkuji Mgr. Jozefu Varjuovi, Ph.D. za vedení mé bakalářské práce, za cenné rady a připomínky, které tuto práci obohatily.

Název práce: **Vysokoteplotní vakuové zařízení**

Autor: Michal Cihlář

Obor: Fyzikální technika

Druh práce: Bakalářská práce

Vedoucí práce: Mgr. Jozef Varju Ph.D.

Ústav Fyziky Plazmatu AV ČR, v.v.i.

Abstrakt: Tato bakalářská práce se zabývá studiem jevů, které doprovázejí dosahování vysokých teplot ve vakuu a návrhem jednoduché vakuové pece. Nejprve jsou popsány různé způsoby předávání tepla a jejich závislost na tlaku. Následně jsou uvedeny experimenty zaměřující se právě na studium způsobů předávání tepla. Na závěr práce máme návrh vakuové pece, která byla navržena pomocí znalostí nabytých ze všech provedených experimentů. Také je ke konci práce příklad experimentu, který využívá vakuovou pec. Jedná se o měření teplotní závislosti kovových Hallových senzorů a jejich odolnost při vyšších teplotách.

Klíčová slova: vakuum, vysoká teplota, vakuová pec, vypékání.

Title: **High temperature vacuum devices**

Author: Michal Cihlár

Abstract: This bachelor thesis deals with the study of phenomena that accompany the achievement of high temperatures in vacuum and the design of a simple vacuum furnace. First, various ways of transferring heat and their dependence on pressure are described. Consequently, experiments which are focused on the study of heat transfer methods are listed. At the end of the thesis, we have a design of a vacuum furnace, which was designed using the knowledge gained from all the experiments performed. Also, at the end of the work, there is an example of an experiment that uses a vacuum furnace. It is the measurement of the temperature dependence of metal Hall sensors and their tolerance to higher temperatures.

Key words: vacuum, high temperature, vacuum furnace, baking.

Obsah

1. Úvod	9
2. Základní pojmy a definice	10
2.1 Teorie šíření tepla.....	10
2.1.1 Přenos tepla vedením (kondukcí)	10
2.1.2 Přenos tepla prouděním (konvekci)	11
2.1.3 Přenos tepla zářením (radiací)	12
2.1.4 Tepelné izolace	12
2.1.5 Skládání emisivit a různých velikostí ploch	13
2.1.6 Závislost přenosu tepla vzduchem na jeho tlaku	16
2.1.7 Rovnovážná teplota	17
2.2 Teorie použitých součástí	18
2.2.1 Měření teploty.....	18
2.2.2 Měření tlaku.....	19
2.2.3 Generování vakua	21
3. Praktická část.....	24
3.1 Experimentální zařízení	24
3.1.1 Vyhřívání	25
3.1.2 Uložení vyhřívání	26
3.1.3 Izolace proti ztrátám tepla zářením.....	28
3.2 Závislost naměřené teploty na tlaku při daných hodnotách výkonů	29
3.3 Závislost dosažené teploty na tlaku při konstantním výkonu	31
3.4 Závislost dosažené teploty na konfiguraci při konstantním výkonu.....	33
3.5 Závislost ztrátového výkonu na tlaku při konstantní teplotě	34
3.6 Závislost ztrátového výkonu na izolaci a uložení při nižší teplotě	37

3.7	Závislost ztrátového výkonu na izolaci při vyšší teplotě	41
3.8	Měření průběhu ztrátového výkonu na teplotě (do 220 °C)	43
3.9	Měření průběhu ztrátového výkonu na teplotě (do 545 °C)	45
3.10	Měření kovových Hallových senzorů.....	46
3.11	Návrh vakuové pece	49
3.11.1	Izolace oproti ztrátám zářením.....	51
3.11.2	Potlačení ztrát vedením částí, které jsou v kontaktu.....	53
3.11.3	Měření teploty	53
3.11.4	Vyhřívání	54
3.11.5	Držák vytápěných těles	54
4.	Závěr	55
5.	Bibliografie	56
6.	Přílohy	58

1. Úvod

Možnost zkoumat a testovat chování různých materiálů a, nejen elektronických, součástek za vyšších teplot je velmi důležitá. Některé materiály při vyšších teplotách velmi radikálně mění své vlastnosti. Při znalosti těchto změn jich můžeme využívat v následných praktických aplikacích a také předcházet selháním způsobeným nečekaným ohřevem materiálu.

Aby jsme mohli zkoumat a testovat materiály a součástky za vyšších teplot, potřebujeme k tomu příslušnou aparaturu. Jednou z možností, jak zkoumat objekty při vyšších teplotách, jsou vakuové pece. Vakuové pece mají hned několik výhod. Vakuum samo o sobě funguje jako dobrá izolace, a tudíž je k dosažení stejné teploty nutno dodávat menší výkon, než bez vakua. Další výhoda zahřívání objektů ve vakuové peci je možnost ohřívat předměty a materiály, které při přístupu vzduchu degradují. Ve vakuu, bez přístupu kyslíku, nedochází k hoření ani pomalejší oxidaci materiálu.

V této práci se seznámím s jednotlivými jevy, které provázejí ohřívání předmětů ve vakuu a dále je prozkoumám. Pokusím se zjistit, které materiály jsou vhodné pro vyšší teploty a zároveň pro použití ve vakuu, a které nikoli. Vyzkouším, jaké teploměry, vakuové měrky, vytápění atd. je vhodné využívat.

Nakonec se pomocí nabytých znalostí a zkušeností, pokusím navrhnout malou vakuovou pec, která by mohla sloužit jako nástroj pro reálné experimenty. Při návrhu využiji vše, co se pomocí provedených experimentů dozvím. Jak o zahřívání vypékaných objektů a celé aparatury, tak i o chování aparatury a jejích částí za vysokých teplot a nízkého tlaku.

2. Základní pojmy a definice

Aby jsme v další, praktické, části práce mohli používat některé výrazy, a hlavně aby jsme mohli porovnávat získaná data s teoretickými předpověďmi, musíme ujasnit některé definice a uvést vzorce, na základě kterých budeme moci vytvářet teoretické předpovědi. Tak je také učiněno v této kapitole. Ve druhé polovině této kapitoly jsou ještě uvedeny jednoduché popisy a principy fungování nejdůležitějších částí použité aparatury.

2.1 Teorie šíření tepla

Tělesa teplejší se při kontaktu s tělesy studenějšími ochlazují. Teplejší těleso předává studenějšímu tělesu energii. Toto předávání trvá dokud se teploty těles nevyrovnají. V těchto případech se předávaná energie nazývá teplo. Přenos tepla se může dít vedením, prouděním nebo vyzařováním. (1)

2.1.1 Přenos tepla vedením (kondukcí)

Přenos tepla vedením nazýváme tehdy, pokud probíhá v látkovém prostředí, které z makroskopického hlediska zůstává v klidu. Jako například v pevných látkách. Nejjednodušším příkladem je jednosměrné vedení při kterém dochází pouze k přenosu tepla z místa o teplotě T_1 do místa o teplotě T_2 , která jsou od sebe vzdálena o délku l . Za předpokladu, že je prostředí homogenní, izotropní a dokonale izolované a teploty udržované konstantní, pak libovolným průřezem kolmým na směr šíření S projde za dobu t množství tepla Q , které můžeme vypočítat jako:

$$Q = \lambda S \frac{T_1 - T_2}{l} t, \quad \text{Rovnice 1}$$

kde λ [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$] je součinitel tepelné vodivosti.

Při prostupu tepla válcovou stěnou můžeme vypočítat množství tepla ze vzorce (2)

$$Q = 2\pi\lambda \frac{l}{\ln \frac{r_2}{r_1}} (T_1 - T_2)t, \quad \text{Rovnice 2}$$

kde λ je součinitel tepelné vodivosti, r_1 a r_2 jsou poloměry vnitřního a vnějšího válce, T_1 a T_2 jsou teploty vnitřního a vnějšího válce a l je výška válců.

Z předchozí rovnice můžeme vyvodit vzorec pro výpočet tepla při prostupu mezi malým a velkým válcem, tj.

$$Q = 2\pi\lambda \frac{b}{\ln \frac{r_2}{r_1} \ln \frac{ar_1 + b}{ar_2 + b}} (T_1 - T_2)t, \quad \text{Rovnice 3}$$

kde $a = \frac{l_2 - l_1}{r_2 - r_1}$ a $b = l_1 - \frac{l_2 - l_1}{r_2 - r_1} r_1$ jsou konstanty, λ je součinitel tepelné vodivosti, r_1 a r_2 jsou poloměry vnitřního a vnějšího válce, T_1 a T_2 jsou teploty vnitřního a vnějšího válce a l_1 a l_2 jsou výšky vnitřního a vnějšího válce. (1)

2.1.2 Přenos tepla prouděním (konvekci)

Na rozdíl od přenosu tepla vedením, které probíhá v látkovém prostředí, které je v klidu, probíhá přenos tepla prouděním v prostředí, které se může volně pohybovat. Nejčastějším příkladem takového prostředí jsou obecně tekutiny, tj. kapaliny a plyny. Teplo přenesené při proudění je

$$Q = \alpha(T_1 - T_2)S, \quad \text{Rovnice 4}$$

kde α [$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$] je součinitel přestupu tepla, T_1 místo s vyšší teplotou, T_2 místo s nižší teplotou a S je velikost povrchu, který předává teplo.

Součinitel přestupu tepla závisí na mnoha faktorech, např.: velikosti a tvaru teplejšího tělesa, druhu tekutiny, teplotě ochlazovaného tělesa i samotné tekutiny atd. Proto je jeho určení výpočtem velmi obtížné. Také velmi závisí na tom, zda se jedná o nucenou nebo samovolnou konvekci. Při nucené konvekci je proudění tekutiny vyvolané vnějšími činiteli, jako jsou větráky, čerpadla atd. Při samovolné konvekci je proudění vyvolané rozdílem teplot v různých částech objemu. (1)

2.1.3 Přenos tepla zářením (radiací)

Posledním způsobem přenosu tepla je přenos tepla zářením. Zářením se myslí spojitá emise energie z povrchu tělesa. K tomuto uvolňování energie dochází u každého tělesa. Energie se uvolňuje ve formě elektromagnetického záření. Množství vyzářené energie závisí na teplotě tělesa, velikosti tělesa a emisivitě povrchu tělesa. Tento vztah dává do souvislosti Stefanův-Boltzmannův zákon

$$P = \epsilon \sigma T^4, \quad \text{Rovnice 5}$$

kde P je množství vyzářené energie za jednotku času z jednotkové plochy, $\sigma = 5,67037 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ je Stefanova-Boltzmannova konstanta (3), T je teplota tělesa v Kelvinech a ϵ je emisivita charakterizující schopnost povrchu materiálu emitovat záření. Velikost emisivity se může pohybovat pouze v rozmezí $\epsilon \in (0; 1)$. (1) Hodnoty emisivit některých použitých materiálu jsou uvedeny v Tabulka 1. (4) Mezi emisivitou a reflektivitou materiálu R platí vztah

$$\epsilon = 1 - R \quad \text{Rovnice 6}$$

Tabulka 1: Použité hodnoty emisivit při teoretických výpočtech přenosu tepla zářením pro různé materiály. (4)

materiál	emisivita [-]
hliník (alobal)	0,05
nerezová ocel	0,11
oxid hlinitý	0,90
silikon	0,93
nikl	0,10
měď	0,15

2.1.4 Tepelné izolace

Účel tepelné izolace je snížit přenos tepla. Pro každý ze tří způsobů přenosu tepla uvedených v předchozích třech kapitolách fungují jako izolace různé materiály. Co mají obecně společné je to, že izolanty jsou materiály s malou hodnotou konstant příslušným k jednotlivým typům přenosu tepla. To znamená, že izolace proti přenosu tepla vedením mají co možná nejmenší hodnotu součinitele tepelné vodivosti λ , například se jedná o minerální vlny,

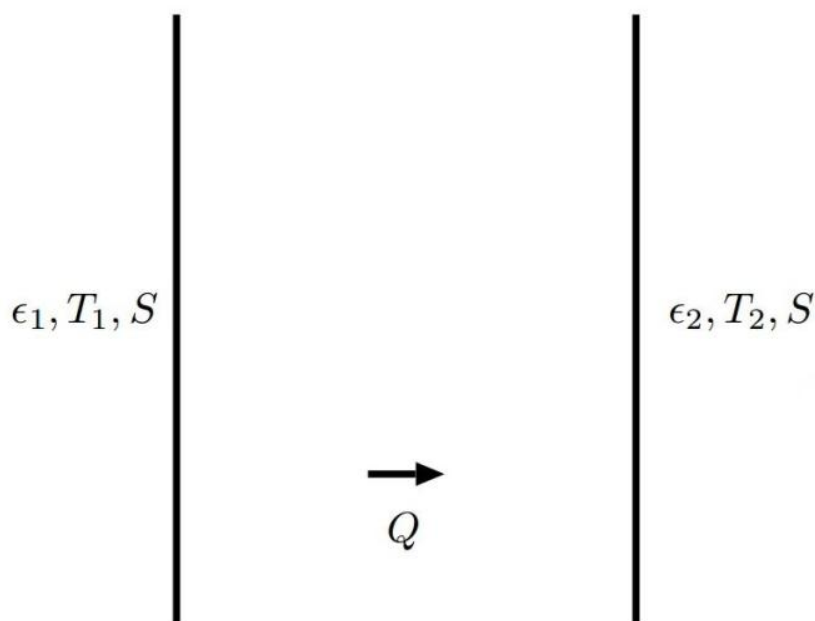
některé plasty a vakuum. U přenosu tepla prouděním se naopak používají materiály a tvary s malým součinitelem přestupu tepla α . Jako izolace proti přenosu tepla zářením se používají materiály s velmi malou emisivitou ϵ , jako jsou například hliník, měď, nikl, nerezová ocel či wolfram.

2.1.5 Skládání emisivit a různých velikostí ploch

V kapitole o přenosu tepla zářením jsme uvedli vzorec pro výpočet vyzařeného tepla. V reálných aplikacích ale dochází k vyzařování tepla tělesem do okolí, a zároveň přijímání tepla vyzařeným z okolí. Nejjednodušší případ současného vyzařování a přijímání tepla zářením jsou dvě nekonečně velké rovnoběžné desky, které jsou udržované na stálých teplotách. Pro dvě nekonečné rovnoběžné desky, lze vypočítat výkon tepelného přenosu na dané ploše ze vzorce (5)

$$P = \frac{\sigma S(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1}, \quad \text{Rovnice 7}$$

kde ϵ_1 je emisivita první desky, ϵ_2 je emisivita druhé desky, T_1 je teplota první desky, T_2 je teplota druhé desky, σ je Stefanova-Boltzmannova konstanta a S je plocha první, i druhé, desky, pro jednoduchost předpokládáme, že se rovnají. Za předpokladu, že teploty desek jsou konstantní. Nákres uspořádání je načrtnut na Obrázek 1. Q je teplo předávané mezi první a druhou deskou, ϵ_1 je emisivita první desky, ϵ_2 je emisivita druhé desky, T_1 je teplota první desky, T_2 je teplota druhé desky a S je plocha první, i druhé desky.

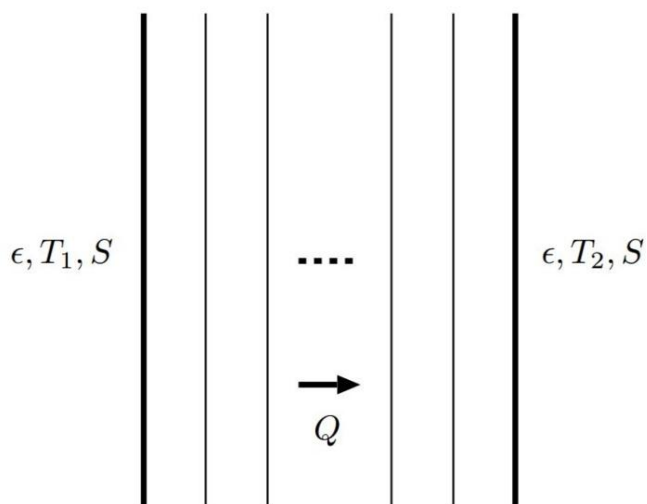


Obrázek 1: Schématické zobrazení přenosu tepla zářením mezi dvěma rovnoběžnými deskami. (5)

Mnohdy je teplo přenášené zářením mezi dvěma deskami ve vakuu větší než chceme. V tom případě se použije izolace. V případě přenosu tepla zářením se jako izolace používají vrstvy materiálu, který má velmi nízkou emisivitu. Pro dvě nekonečné rovnoběžné desky, mezi které je vložena izolace v podobě n vrstev stínění, lze vypočítat výkon ze vzorce (5)

$$P = \frac{1}{n+1} \frac{\sigma S (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{2}{\epsilon} - 1}, \quad \text{Rovnice 8}$$

kde ϵ je emisivita první desky, druhé desky i stínění, T_1 je teplota první desky, T_2 je teplota druhé desky, σ je Stefanova-Boltzmannova konstanta a S je plocha první i druhé desky i stínění, protože se rovnají. Za předpokladu, že teploty krajních desek jsou udržovány konstantní a teploty stínění jsou definovány pouze ustáleným přenosem tepla. Náskres uspořádání krajních a izolačních vrstev je načrtnut na Obrázek 2. Q je teplo předávané mezi první a poslední deskou, ϵ je emisivita první desky, poslední desky i izolací, T_1 je teplota první desky, T_2 je teplota poslední desky a S je plocha první desky, poslední desky i izolací.

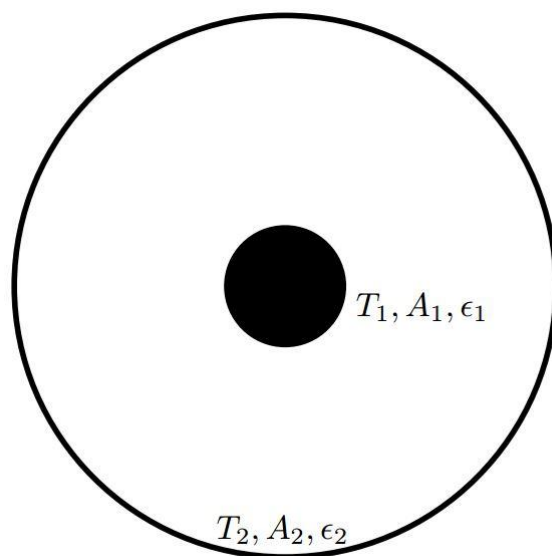


Obrázek 2: Schématické zobrazení přenosu tepla zářením mezi dvěma nekonečnými rovnoběžnými deskami s n vrstvami stínění jako izolace. (5)

Předchozí dva vzorce pro nekonečné desky a nekonečné desky s izolací jsou pouze zjednodušujícími příklady. Častěji nastává případ, kdy je jedno těleso zcela obklopeno druhým tělesem, tj. těleso dvě je obal tělesa jedna. Pak lze vypočítat výkon ze vzorce (5)

$$P = \frac{\sigma S_1 (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{S_1}{S_2} \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right)}, \quad \text{Rovnice 9}$$

kde ϵ_1 je emisivita první desky, ϵ_2 je emisivita druhé desky, T_1 je teplota první desky, T_2 je teplota druhé desky, σ je Stefanova-Boltzmannova konstanta, S_1 je plocha první desky a S_2 je plocha druhé desky. Za předpokladu, že teploty obou těles jsou udržovány konstantní. Schématické zobrazení tohoto příkladu je načrtnuto na Obrázek 3. ϵ_1 je emisivita vnitřního tělesa, ϵ_2 je emisivita vnějšího tělesa, T_1 je teplota vnitřního tělesa, T_2 je teplota vnějšího tělesa, A_1 je povrch vnitřního tělesa a A_2 je povrch vnějšího tělesa.



Obrázek 3: Schématické zobrazení přenosu tepla zářením v případě, že těleso 2 zcela obklopuje těleso 1. (5)

2.1.6 Závislost přenosu tepla vzduchem na jeho tlaku

Jak jsme uvedli v kapitolách o přenosu tepla vedením a prouděním, platí při přenosu tepla vzduchem, že součinitel tepelné vodivosti λ i součinitel přestupu tepla α jsou závislé na tlaku vzduchu, tedy $\lambda = \lambda(p)$ a $\alpha = \alpha(p)$. Pokud zůstávají ostatní podmínky konstantní, jako tvar obtékaného tělesa, teplota tělesa i vzduchu atd., lze vyjádřit součinitel přestupu tepla rovnicí

$$\alpha(p) = k\lambda(p), \quad \textbf{Rovnice 10}$$

kde k je konstanta. Tuto konstantu k lze při znalostech hodnot součinitele tepelné vodivosti a součinitele přestupu tepla například za atmosférického tlaku jednoduše vypočítat z rovnice

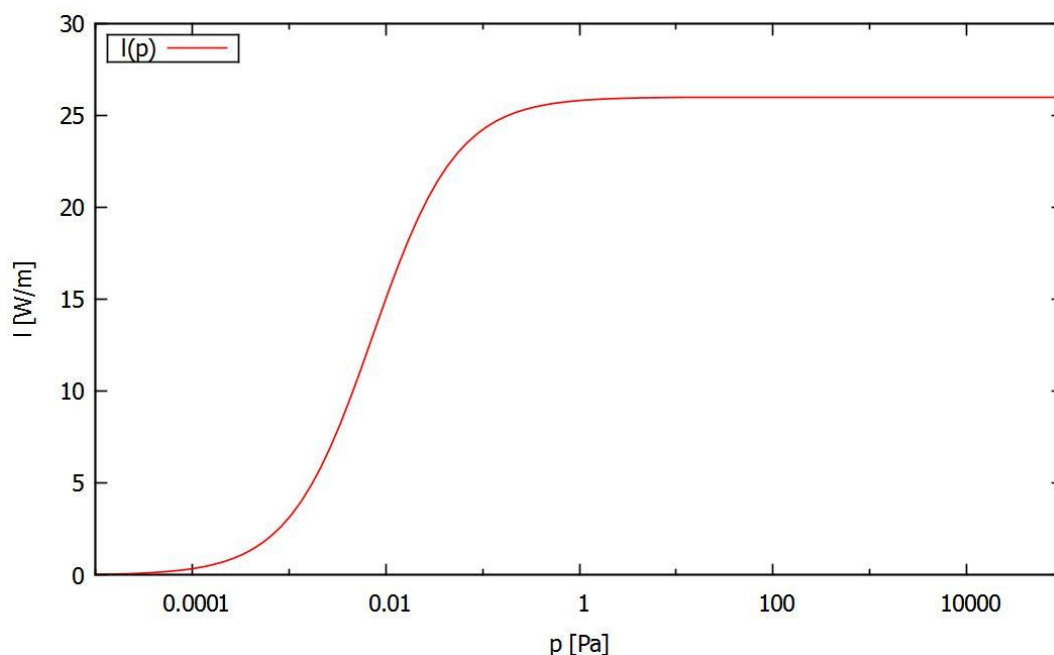
$$k = \frac{\alpha(p_{atm})}{\lambda(p_{atm})}. \quad \textbf{Rovnice 11}$$

Aby jsme mohli použít Rovnice 10, musíme znát závislost součinitele tepelné vodivosti na tlaku. Pro výpočet samotného součinitele tepelné vodivosti se vychází z kinetické teorie tepla. O kinetické teorii plynu se lze více dočíst (6) a (7). Při výpočtu součinitele tepelné vodivosti vzduchu můžeme vycházet z empirického vzorce (8)

$$\lambda(p, d, T) \lambda_0 \frac{1}{1 + \frac{7,6 \cdot 10^{-5}}{\frac{pd}{T}}},$$

Rovnice 12

kde $\lambda(p, d, T)$ je součinitel tepelné vodivosti při tlaku p , vzdálenosti desek d a absolutní teplotě T a λ_0 je součinitel tepelné vodivosti při atmosférickém tlaku a pokojové teplotě. Pro hodnoty vzdálenosti okrajů nádoby $d = 15$ cm, teplotě vzduchu $T = 110$ °C a součiniteli tepelné vodivosti při atmosférickém tlaku $\lambda_0 = 26$ W/m jsme vypočítali hodnoty součinitele tepelné vodivosti v závislosti na tlaku a vynesli je do grafu, který je uveden v Obrázek 4. Hodnoty použité v tomto příkladu jsou stejné hodnoty, které jsme používali při výpočtech v praktické části této práce. (9)



Obrázek 4: Graf závislosti součinitele tepelné vodivosti na tlaku při teplotě vzduchu 110 °C, vzdálenosti okrajů nádoby 15 cm a součiniteli tepelné vodivosti vzduchu při atmosférickém tlaku 26 W/m. Vypočítáno z Rovnice 12.

2.1.7 Rovnovážná teplota

Dalším velmi důležitým pojmem je rovnovážná teplota. Pokud dodáváme do systému teplo, systém se ohřívá. Pokud ale systém není dokonale izolován, růst teploty se zastaví.

Zastavení růstu teploty nastane ve chvíli, kdy dojde k vyrovnání příkonu (výkonu, který dodáváme do systému) a ztrátového výkonu, který uniká ze zahřívaného systému do okolí. Teplota, při které se právě vyrovná příkon a ztrátový výkon, se nazývá rovnovážná teplota. Dosažení rovnovážné teploty trvá teoreticky nekonečně dlouho. V praxi čekáme různě dlouho, dle vlastností aparatury a požadavků na přesnost.

2.2 Teorie použitých součástí

V této podkapitole si popíšeme princip fungování některých důležitých částí aparatury. Zaměříme se především na způsoby měření teploty a tlaku, tj. teploměry a vakuové měrky. Také se zmíním o čerpání plynu z aparatury pomocí vakuových vývěv.

2.2.1 Měření teploty

Protože cílem vakuových pecí je pracovat při vyšších teplotách, je nutná znalost teploty uvnitř pece. Studovat chování materiálů za zvýšených teplot, či součástek bez toho, aniž by nám byla známá jejich teplota nejde. V našem případě jsme potřebovali znát teploty na více místech pece, aby jsme byli schopni pozorovat různé procesy, které se odehrávají při zahřívání, udržování teploty a chladnutí. K měření teplot jsme používali dva druhy teploměrů.

2.2.1.1 Odporové teploměry

První druh teploměrů, který jsme používali k měření teploty, je odporový teploměr. Odporové teploměry využívají závislosti odporu vodiče na jeho teplotě. Existují dva hlavní typy odporových teploměrů, polovodičové a kovové. Jeden z často používaných odporových teploměrů je s odporovým elementem z Platiny. Výhodou odporového teploměru na bázi Platiny je téměř lineární závislost odporu na teplotě v rozmezí od $-250\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $700\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Měření se nejčastěji provádí přivedením známého proudu a současným měřením napětí na teploměru. Při měření je důležité, aby přívodní dráty měly co nejmenší odpor a neovlivňovaly tak samotné měření. Případně lze využít tzv. čtyřdrátového zapojení, kdy se dva dráty používají k přivedení proudu a dva k měření napětí. Aby bylo měření co nejméně ovlivněno, je důležité k měření napětí používat zařízení s co možná největší impedancí. (10), (11)

2.2.1.2 Termočláňkové teploměry

Další možností, jak jednoduše měřit teplotu, jsou termočláňkové teploměry. Termočláňkové teploměry využívají jednoduchého efektu. Jedná se o tzv. Peltier-Seebeckův

jev nebo také termoelektrický jev. Pokud je na dvou místech vodiče různá elektronová hustota, vznikne mezi těmito místy napětí. Tento rozdíl může vzniknout i ve vodiči z homogeního materiálu, např. při rozdílných teplotách. Pokud dokážeme změřit tento rozdíl, můžeme určit i teploty. Kdyby jsme se ale snažili měřit napětí na vodiči pomocí vodičů stejného materiálu, tak by se teplotou indukované napětí vykompenzovalo a měření by nebylo možné. Jelikož změna koncentrace elektronů v závislosti na teplotě je pro různé materiály různá, je možné změřit toto napětí při použití dvou různých materiálů. Proto jsou termočláňkové teploměry vždy ze dvou různých materiálů.

Nejběžněji používaný typ termočláňku je typ K. Je tvořen z chromelu (přibližně 90 % Nikl, 10 % Chrom) a alumelu (přibližně 95 % Nikl, 2 % Mangan, 2 % Hliník a 1 % Křemík). Nejčastěji může operovat při teplotách od -260 °C do 1250 °C. (10)

2.2.2 Měření tlaku

Druhým velmi důležitým parametrem, který je potřeba znát u vakuových pecí, je tlak plynu v peci. Pro některé aplikace je důležité znát tlak plynu velmi přesně, protože chování zkoumaného materiálu či součástky může záviset právě na tlaku plynu okolí. Znat, alespoň přibližně, tlak ve vakuové peci je velmi důležité i pro nás, aby jsme mohli zkoumat různé jevy nastávající při čerpání aparatury, udržování vakua, ale i třeba ohřívání atd. K měření tlaku plynu ve vakuové peci jsme používali dva typy vakuových měrek.

2.2.2.1 Ionizační vakuová měrka se studenou katodou

Pro měření tlaku vysokého a ultravysokého vakua se často používají ionizační měrky. Tu jsme zvolili i my. Ionizační měrky ionizují pomocí elektronů atomy a molekuly měřeného plynu a následně měřený ionizační proud je přímo úměrný koncentraci plynu. Ionizační měrky se dělí podle způsobu emitování elektronů na ionizační měrky s horkou katodou a se studenou katodou.

Ionizační měrku se studenou katodou vynalezl v roce 1937 F. M. Penning (1894-1953). Proto se ionizační měrka se studenou katodou nazývá Penningova měrka. V Penningově měrce jsou elektrony emitovány pomocí vysokonapětového výboje. Elektromagnetické pole měrky je uzpůsobeno tak, aby se emitované elektrony pohybovali po spirále a museli urazit co největší vzdálenost. Díky tomu je pravděpodobnost srážky, i samotné ionizace, s atomem plynu mnohem větší, než při přímém průletu. Penningovy vakuometry nejčastěji pracují v rozmezí od 1 Pa do 10^{-9} Pa. (10), (11), (12)

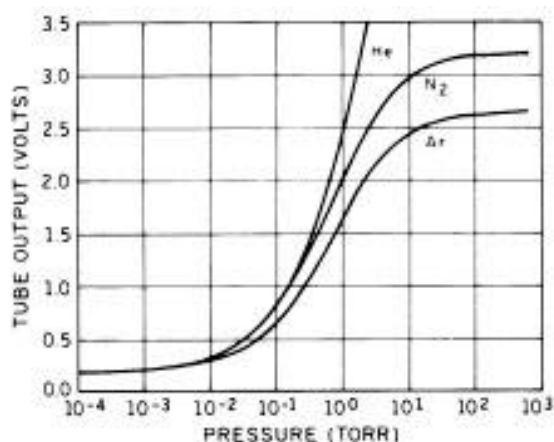
2.2.2.2 Piraniho vakuová měrka

Pro měření tlaku nízkého vakua jsme použili Piraniho měrku. Označení Piraniho vakuová měrka se používá pro každý manometr využívající závislosti tepelné vodivosti plynu na jeho tlaku, ve kterém tvoří žhavené vlákno jedno z ramen Wheatstonova odporového můstku.

Nejpřesnější mód, ve kterém může Piraniho měrka pracovat je měření za konstantní teploty. Při tomto pracovním módu se nejprve měrka zkalibruje při tlaku cca. 10^{-4} Pa. Následně se při zvyšujícím se tlaku u žhaveného vlákna zvýší tepelné ztráty a zároveň se sníží odpor žhaveného vlákna. Zvýšením napětí se na žhaveném vlákně zvýší výkon, který vede ke zvýšení teploty žhaveného vlákna a zvětšení jeho odporu. Tím se můstek znovu vybalancuje. Měřené napětí pak již odpovídá tlaku. Nevýhodou tohoto módu je nutnost kalibrace před každým měřením.

Častěji používané pracovní módy Piraniho měrky jsou za konstantního napětí či proudu. Nejčastěji se používá mód při konstantním napětí. Jeho velkou výhodou je možnost pracovat bez další regulace po první kalibraci za nízkého tlaku. V tomto módu se jednoduše měří proud, který protéká můstkem v nerovnovážném stavu. Proud je pak ocejchován na zobrazování tlaku. Piraniho měrky nejčastěji pracují v rozmezí od 10^4 do 0,1 Pa. (10), (11)

Naším cílem, v praktické části této práce, je, aby vakuová pec pracovala za tlaku při kterém bude součinitel tepelné vodivosti vzduchu zanedbatelný. Tzn., že chceme dosáhnout tlaků, při kterých Piraniho vakuová měrka přestává měřit skutečný tlak, protože tepelná vodivost plynu dále nezávisí na jeho tlaku. Jak vidíme z grafu na Obrázek 5, výstupní napětí je téměř nezávislé na tlaku při tlacích 10^{-3} Torr a nižších, což odpovídá přibližně tlakům 0,1 Pa a méně.



Obrázek 5: Závislost výstupního napětí Piraniho měrky na tlaku plynu. Graf zobrazuje závislosti pro helium, dusík a argon. Převzato z (12).

2.2.3 Generování vakua

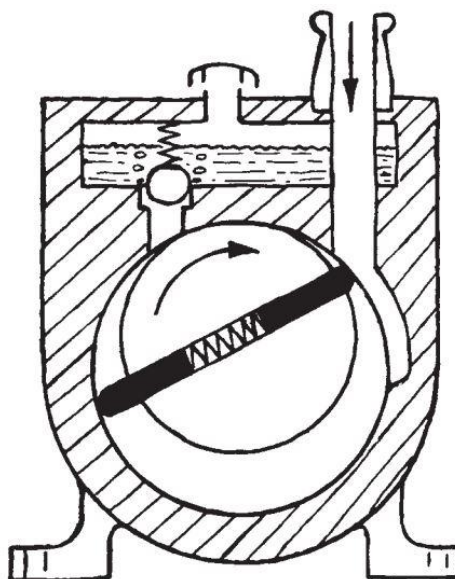
Aby jsme mohli pracovat při sníženém tlaku, musíme ho nejprve získat. Přístroje pro čerpání plynů a získávání vakua jsou vakuové vývěvy. Existuje mnoho druhů a typů vývěv. Různé typy vakuových vývěv mají mnoho různých výhod a nevýhod, proto se používají pro různé účely. Dále si popíšeme dva typy vývěv, které jsou použity v naší aparatuře.

2.2.3.1 Rotační olejová vývěva

Jednou z nejjednodušších vývěv pro získání nízkého vakua je rotační olejová vývěva. Schéma rotační vývěvy je na Obrázek 6. Základem vývěvy je válcový stator, ve kterém je vyosený válcový rotor. Vnitřek vývěvy je rozdělen na dva objemy pomocí pružinových lopatek připevněných k rotoru. Čerpaný plyn vstupuje do jednoho z těchto objemů. Rotací rotoru je stlačen a vytlačen ven skrze jednosměrný výstupní ventil. Olej slouží jako těsnění mezi rotorem a statorem a zároveň jako lubrikant pohyblivých částí. Olej se musí používat vysoce kvalitní rafinovaný minerální olej s nízkým tlakem nasycených par.

Rotační olejové vývěvy vydrží pracovat v kuse po dobu několika let. Standardně mají čerpací rychlosti mezi 1 l/s a 500 l/s. Jedno-stupňová rotační olejová vývěva dokáže dosáhnout mezního tlaku okolo jednotek Pa, dvou-stupňová okolo desetin Pa. Mezní tlak je z velké části ovlivněn tenzí nasycených par oleje použitého ve vývěvě. Výstupní tlak rotačních olejových vývěv může být atmosférický. (10), (11)

Největší nevýhodou rotačních olejových vývěv je jejich pracovní olej. V něm se mohou rozpouštět některé složky čerpaného plynu a pronikat zpět do čerpaného objemu. Také nelze dosáhnout lepšího tlaku než je tlak nasycených par použitého pracovního oleje. Pracovní olej může vnikat do čerpaného objemu a zanášet ho. Je nutné proto používat lapače olejových par, které jsou umístěny před vstupem do rotační olejové vývěvy. Také je nutné vždy při odstavení rotační olejové vývěvy zavřít ventil mezi vývěvou a čerpaným objemem. Jinak může dojít k nasátí oleje z vývěvy do čerpaného objemu.

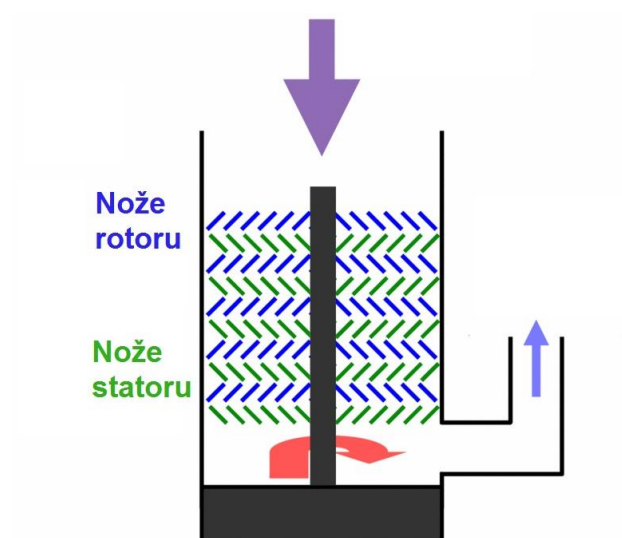


Obrázek 6: Schéma rotační olejové vývěvy. (10)

2.2.3.2 Turbomolekulární vývěva

Často používanými vývěvami pro dosažení vysoké vakua jsou turbomolekulární vývěvy. Turbomolekulární vývěva se používá pro čerpání v oblasti molekulárního chování plynu. Konstrukce turbomolekulární vývěvy je velmi podobná konstrukci axiálního kompresoru. Série střídajících se lopatek rotoru a statoru uděluje rychlost molekulám přilétajícím z čerpaného objemu ve směru k výstupu a zároveň zabráňují molekulám přilétávajícím z výstupu, aby proletěly do čerpaného objemu. Principiální schéma turbomolekulární vývěvy je na Obrázek 7.

Rychlost udělená ve směru čerpání musí mít podobnou velikost jako rychlost přilétající molekuly, aby se vektor rychlosti molekuly výrazně změnil. Proto se rotor turbomolekulární vývěvy nejčastěji otáčí rychlostí od 0,3 kHz do 1,5 kHz. Rychlost otáčení závisí na velikosti vývěvy. Lopatky větší vývěvy mají tečnou rychlost větší než lopatky menší vývěvy při stejných otáčkách. Kompresní poměr těchto vývěv je nejčastěji v rozmezí od 10 do 10^8 v závislosti na počtu vrstev rotoru a statoru. Výstupní tlak je pro většinu turbomolekulárních vývěv potřeba udržovat pod úrovní 10 Pa. Často se také objevují tzv. hybridní kde je turbomolekulární část s předřazenou tzv. molekulární částí. Ty dosahují ještě větších kompresních poměrů, řádově i 10^{12} , a to i při vyšším výstupním tlaku. Čerpací rychlost se nejčastěji pohybuje mezi 10 a 1000 l/s. (10), (11)



Obrázek 7: Principiální schéma turbomolekulární vývěvy.

3. Praktická část

Jak jsme uvedli v úvodu, naším konečným cílem je návrh malé vakuové pece použitelné pro reálné experimenty. Aby jsme toho mohli dosáhnout, je nutné se seznámit s mnoha jevy, které doprovázejí dosahování vyšších teplot ve vakuu. Pomocí následujících měření jsme se tyto jevy pokusili poznat.

Většina tabulek s naměřenými hodnotami je uvedena v příloze. Také část grafů, které jsou si velmi podobné, je uvedena v příloze.

3.1 Experimentální zařízení

Nejprve ale v této podkapitole popíšeme experimentální zařízení, pomocí kterého jsme prováděli naše měření. Jako hlavní část vakuové pece byla určena válcová komora o průměru 200 mm a výšce 250 mm s šesti malými porty o průměrech 36 mm a jedním větším o průměru 110 mm. Komora je vyrobena z nerezové oceli.

Pro měření teploty jsme zvolili termočlánky typu K a také odporové teploměry Pt100. Zpočátku jsme teplotu měřili pouze pomocí dvou termočlánků uvnitř komory a rovněž dvou termočlánků vně komory. Později jsme přidali dva odporové teploměry Pt100 pro měření teploty uvnitř komory. Jeden jsme zapojili pomocí tzv. čtyřdrátového zapojení pro zajištění co největší přesnosti. Druhý pouze pomocí dvou drátů pro přibližné měření. K zobrazení měřené teploty jsme používali jednoduché kontrolery CAL Controls #3200. Pomocí nich jsme zobrazovali teplotu, protože měly přednastavené módy pro různé typy termočlánků, odporových teploměrů atd. Tyto kontrolery jsme nepoužívali pro řízení teploty. Pouze pro zobrazování.

K měření tlaku v komoře jsme použili vakuovou měрку MPT 100 od firmy Pfeiffer vacuum. Ta v rozsahu od 10^5 Pa do 10^{-1} Pa používá k určení tlaku Piraniho element a při tlacích od 10^{-1} Pa níže používá ionizační vakuovou měрку se studenou katodou. Další měrkou, kterou jsme později používali z důvodu nefunkčnosti MPT 100 měrky při nižších tlacích, byla IKR 251 měрка od společnosti Pfeiffer vacuum. Ta dokáže měřit tlak 10^{-1} Pa a menší. Taktéž k tomu používá ionizační vakuovou měрку se studenou katodou.

Pro dosažení požadovaného tlaku jsme používali turbomolekulární vývěvu Leybold Turbovac 50 s čerpací rychlostí 30 l/s při tlaku 0,1 Pa a nejlepším dosažitelným tlakem méně

než $5 \cdot 10^{-6}$ Pa. Jako předstupeň jsme používali dvoustupňovou rotační olejovou vývěvu Edwards RV12 s čerpací rychlostí 3,9 l/s při tlaku 0,1 Pa a nejlepším dosažitelným tlakem 0,2 Pa.

K dodávání proudu topnému drátu při jeho ohřívání jsme používali laboratorní zdroj Diametral P130R51D s maximálním možným napětím 30 V a maximálním možným proudem 4 A.

V průběhu měření jsme použili a vyzkoušeli několik různých konfigurací pro uložení vyhřívání, samotné vyhřívání, uložení teploměrů, uložení izolací atd. Následuje výčet a popis všech použitých konfigurací.

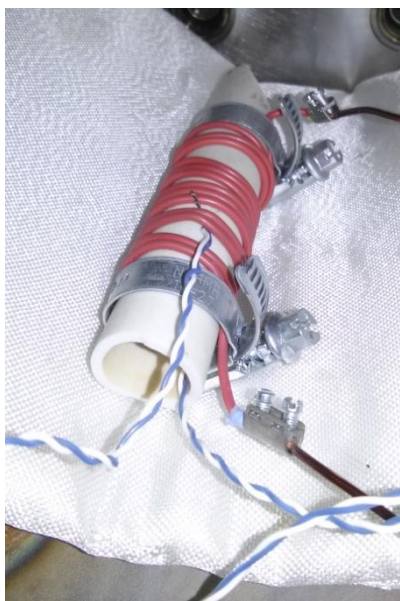
3.1.1 Vyhřívání

Pro vyhřívání jsme v průběhu všech experimentů použili celkem tři konfigurace. Jednotlivé konfigurace se liší ve velikosti trubičky, okolo které je namotán topný drát, a také jaký topný drát je použit.

První konfigurace vyhřívání je **dlouhá topná trubička**. Jedná se o trubičku z oxidu hlinitého, která je dlouhá 10 cm a její průměr je 1 cm. Trubička je dutá a má tloušťku stěny 1 mm. Okolo trubičky je omotán topný drát o odporu 9,5 Ω . Topný drát má izolaci ze silikonu. Tato konfigurace vyhřívání je zobrazena na Obrázek 8.

Druhá konfigurace vyhřívání je **krátká topná trubička pro nižší teploty**. V této konfiguraci je použita trubička z oxidu hlinitého o délce 4 cm a průměru 1 cm. Trubička je opět dutá a má tloušťku stěny 1 mm. Okolo trubičky je omotán topný drát o odporu 15 Ω . Topný drát má izolaci ze silikonu.

Třetí konfigurací vyhřívání je **krátká topná trubička pro vyšší teploty**. V této konfiguraci je použita trubička z oxidu hlinitého o délce 4 cm a průměru 1 cm. Trubička je opět dutá a má tloušťku stěny 1 mm. Okolo trubičky je omotán topný drát o odporu 3,7 Ω . Topný drát je bez izolace. Pro odizolování drátu od okolí a pro zabránění zkratu mezi jednotlivými závitů topného drátu jsme použili skelnou tkaninu. Fotografie této konfigurace vyhřívání při zapnutém vyhřívání je na Obrázek 9.



Obrázek 8: Dlouhá topná trubička z oxidu hlinitého o délce 10 cm, průměru 1 cm a tloušťce stěny 1 mm. Okolo trubičky je omotán topný drát o odporu $9,5 \Omega$ s izolací ze silikonu. Uložení topné trubičky je na izolaci ze skelné tkaniny.



Obrázek 9: Krátká topná trubička pro vyšší teploty o délce 4 cm, průměru 1 cm a tloušťce stěny 1 mm. Okolo trubičky je omotán topný drát bez izolace o odporu $3,7 \Omega$. Jako izolace je použita skelná tkanina. Tato fotografie je při zapnutém vyhřívání a velmi vysoké teplotě.

3.1.2 Uložení vyhřívání

Během měření jsme použili celkem pět různých způsobů uložení topných trubiček. Uložení jsme měnili hlavně proto, aby jsme porovnali ztráty vedením a zjistili co možná nejlepší a nejpraktičtější způsob uložení.

První konfigurací **uložení** vyhřívání je jednoduché položení topné trubičky **na izolaci ze skelné tkaniny**. Toto uložení je velmi jednoduché a praktické, co se manipulovatelnosti týče. Bohužel má velmi velké ztráty vedením. Uložení na izolaci ze skelné tkaniny je zobrazeno na Obrázek 8.

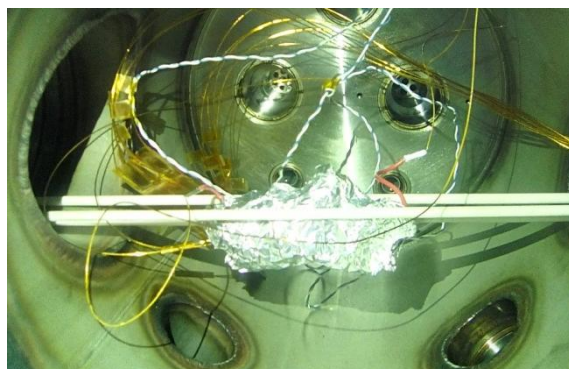
Druhou konfigurací **uložení** vyhřívání je položení topné trubičky **na destičku z oxidu hlinitého**. Toto uložení je trochu méně praktické, protože použitá destička byla kruhová, a tudíž nepříliš stabilní. I toto uložení má velké ztráty vedením.

Třetí konfigurací uložení vyhřívání je **zavěšení** topné trubičky **na závěsné tyčinky** z oxidu hlinitého. Délka závěsných tyčinek je 30 cm a jejich průměr 2 mm. Topná trubička zavěšená na tyčinkách velmi dobře držela na svém místě, ale byl k ní obtížnější přístup. Ztráty

vedením se zlepšily oproti uložení na izolaci ze skelné tkaniny či na destičku z oxidu hlinitého, avšak byly stále velké.



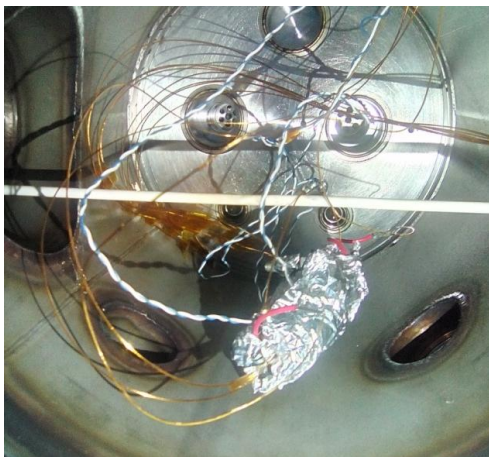
Obrázek 10: Uložení topné trubičky na destičce z oxidu hlinitého.



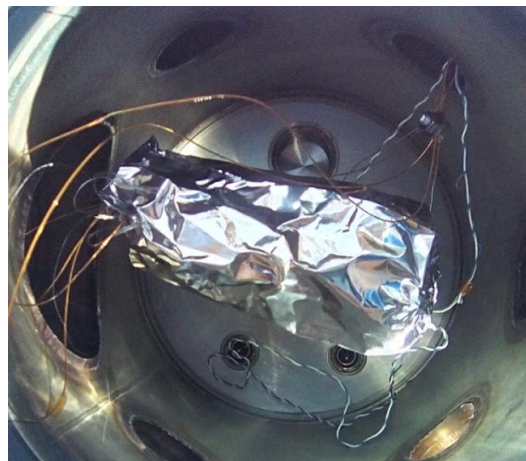
Obrázek 11: Topná trubička zavěšená na závěsné tyčince z oxidu hlinitého. Závěsná tyčinka je dlouhá 30 cm a má průměr 2 mm.

Čtvrtou konfigurací uložení vyhřívání je **zavěšení** topné trubičky **na krátké drátky**, které jsou zavěšeny na závěsných tyčinkách z oxidu hlinitého. Délka drátků je 5 cm a průměr 0,1 mm. Závěsné tyčinky jsou stejné jako při zavěšení přímo na závěsné tyčinky, tj. délka tyčinek je 30 cm a jejich průměr 2 mm. Při této konfiguraci již byly ztráty vedením velmi potlačeny. Praktičnost tohoto uložení však byla velmi nízká. Pod závěsnými tyčinkami z oxidu hlinitého již zbývalo málo místa a přístup k topné trubičce a teploměrům byl velmi obtížný. Zavěšení na krátkých drátkách je zobrazeno na Obrázek 12.

Pátou konfigurací uložení vyhřívání je **zavěšení** topné trubičky **na dlouhé drátky**, které jsou připevněny přímo na vakuové průchodky. Délka drátků je 15 cm a průměr 0,1 mm. Při této konfiguraci již byly ztráty vedením téměř zanedbatelné. Přístup k topné trubičce i teploměrům byl při tomto uložení vyhřívání velmi dobrý. Zavěšení na dlouhých drátkách je zobrazena na fotografii na Obrázek 13.



Obrázek 12: Zavěšení topné trubičky na krátké drátky. Drátky jsou dlouhé 5 cm a mají průměr 0,1 mm. Drátky jsou zavěšeny na závěsné tyčince z oxidu hlinitého o délce 30 cm a průměru 2 mm.



Obrázek 13: Zavěšení topné trubičky na dlouhé drátky. Délka drátků je 15 cm a průměr 0,1 mm. Fotografie topné trubičky s vnějšími radiačními štíty.

3.1.3 Izolace proti ztrátám tepla zářením

Pro omezení ztrát tepla zářením používáme několik materiálů. Ať už používáme jakýkoliv materiál na izolaci, vždy je v jedné ze dvou konfigurací, případně v obou dvou konfiguracích zároveň.

První konfigurace izolace proti ztrátám tepla zářením je **alobal těsně obalený** okolo topné trubičky. Pro těsné obalení topné trubičky jsme nikdy nepoužili jiný materiál než alobal. Alobal těsně obalený okolo topné trubičky jako štít proti ztrátám tepla zářením je na fotografii na Obrázek 14.

Druhá konfigurace izolace proti ztrátám tepla zářením je **vzdálený izolační štít**. Vzdálený izolační štít má vždy válcový tvar o délce 12 cm a průměru 6 cm. Materiál používaný na vzdálený izolační štít je alobal, měď nebo nikl. Vzdálený izolační štít je buď jednovrstvý nebo dvouvrstvý. Jednovrstvý izolační štít je prostý válec z materiálu izolace. Dvouvrstvý izolační štít je tvořen dvěma válci z izolačního materiálu, mezi kterými je vložena vrstva skelné tkaniny, tak aby se vnější a vnitřní izolační válec nedotýkaly. Vzdálený izolační štít je vždy zavěšen pomocí některého ze závěsů pro vyhřívání tak, aby se nikdy nedotýkal samotné topné trubičky či alobalového obalu umístěného přímo na topné trubičce. Ukázka vzdáleného izolačního štítu proti ztrátám tepla zářením je na Obrázek 15.



Obrázek 14: Štít proti ztrátám tepla zářením z alobalu těsně přitisknutého k topné trubičce



Obrázek 15: Vzdálený alobalový štít proti ztrátám tepla zářením. Rozměry štítu jsou: délka 12 cm a průměr 6 cm.

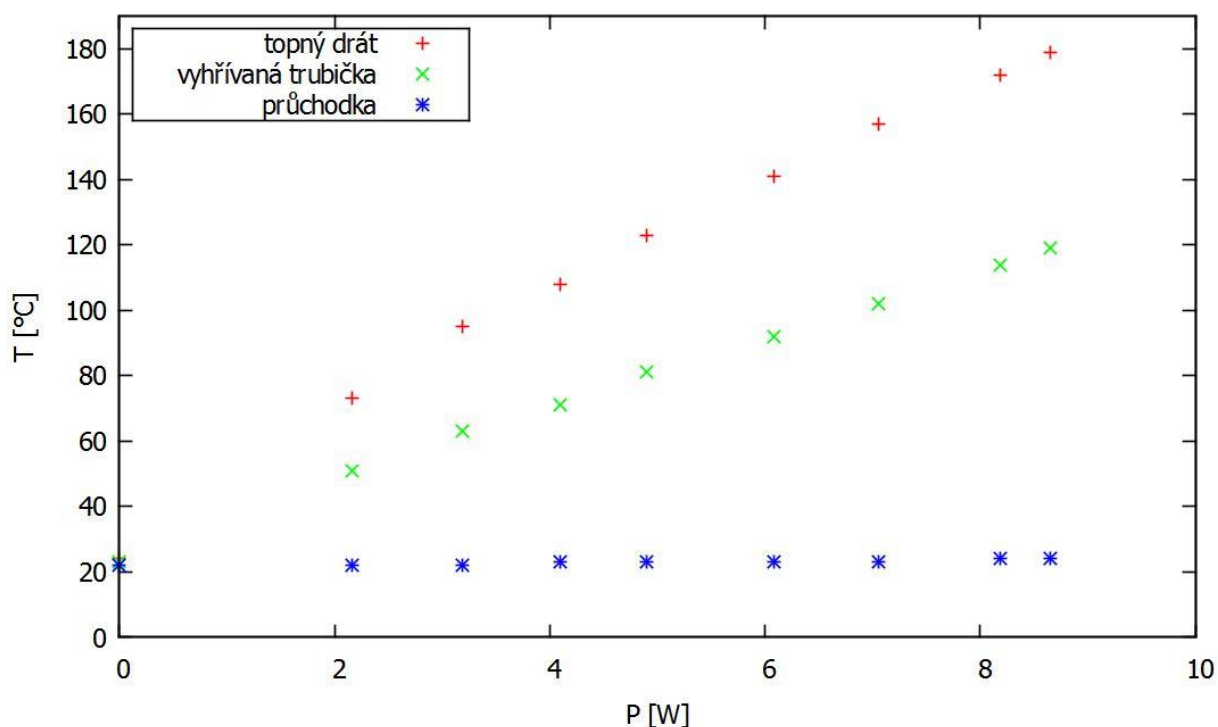
3.2 Závislost naměřené teploty na tlaku při daných hodnotách výkonů

V prvním měření jsme se zaměřili na závislost ztrátového výkonu na tlaku v komoře. Z měření vyplývá, že se opravdu snížil přenos tepla (tepelné ztráty) při snižování tlaku. Viz. graf Obrázek 17. Měření jsme provedli s dlouhou topnou trubičkou uloženou na izolaci ze skelné tkaniny bez jakýchkoliv izolací proti ztrátám tepla zářením.

Jako zdroj sloužil laboratorní zdroj s maximálním možným napětím 30 V a maximálním možným proudem 4 A. Keramická trubička byla položena na izolaci ze skelné tkaniny. Žádné další stínění a izolace nebyly použity. Naměřené hodnoty napětí a proudů jsou hodnoty nastavené na zdroji, nikoli znova měřeny dalšími multimetry. Teplotu jsme měřili pomocí trojice termočlánků, tlak pomocí měrky MPT 100.

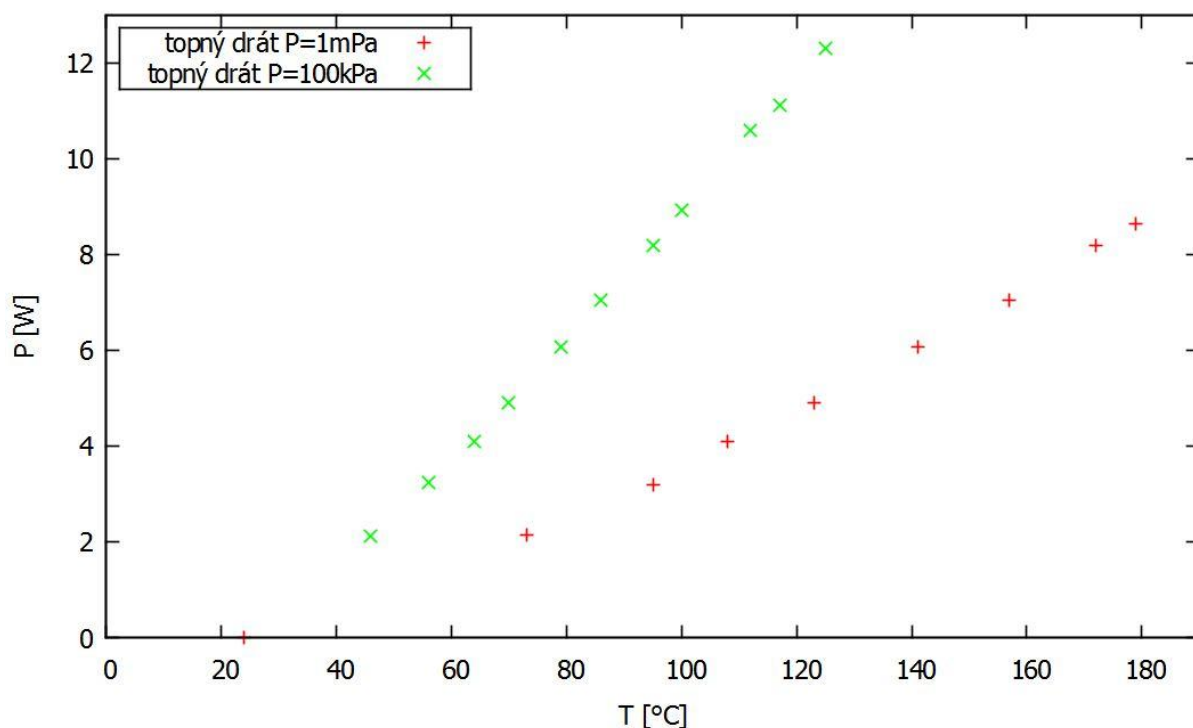
Provedli jsme dvě série měření. První měření probíhalo při atmosférickém tlaku. Během měření jsme měli pracovní komoru zavřenou, tak aby byly podmínky co nejpodobnější, jako při měření s nižším tlakem. Naměřené hodnoty z prvního měření jsou uvedeny v Tabulka 9. Při druhém měření jsme měli tlak přibližně 1 mPa. Naměřené hodnoty z druhého měření jsou uvedeny v Tabulka 10. Zaznamenané hodnoty teplot jsou změřeny při téměř rovnovážné teplotě, při které se její hodnota za daného výkonu nemění.

Z grafu Obrázek 16, ve kterém jsou vyneseny hodnoty teplot naměřených při tlaku přibližně 1 mPa, je vidět, že i při teplotě topného drátu téměř 180 °C nedochází k zahřívání vakuové průchodky. Graf teplot naměřených při atmosférickém tlaku je na Obrázek 31. Grafy Obrázek 16, Obrázek 31 jsou si velmi podobné, proto Obrázek 31 uvádíme pouze v příloze.



Obrázek 16: Graf závislosti teplot topného drátu, vyhřívané trubičky a průchodky na výkonu na topném drátu z měření závislosti teploty na tlaku při daných výkonech. Hodnoty naměřené při tlaku přibližně 1 mPa.

Na Obrázek 17 jsou vyneseny hodnoty výkonu nutného k dosažení daných teplot pro oba dva tlaky najednou. Z grafu je vidět, že výkon nutný k dosažení stejné teploty je při nižším tlaku nižší. Tzn., že se opravdu snížil součinitel tepelné vodivosti i součinitel přestupu tepla a tedy i přenos tepla vedením a prouděním vzduchu. Rozdíl je velmi výrazný. Například při výkonu přibližně 8 W jsme dosáhli teploty 95 °C při atmosférickém tlaku, ale 170 °C při tlaku přibližně 1 mPa.



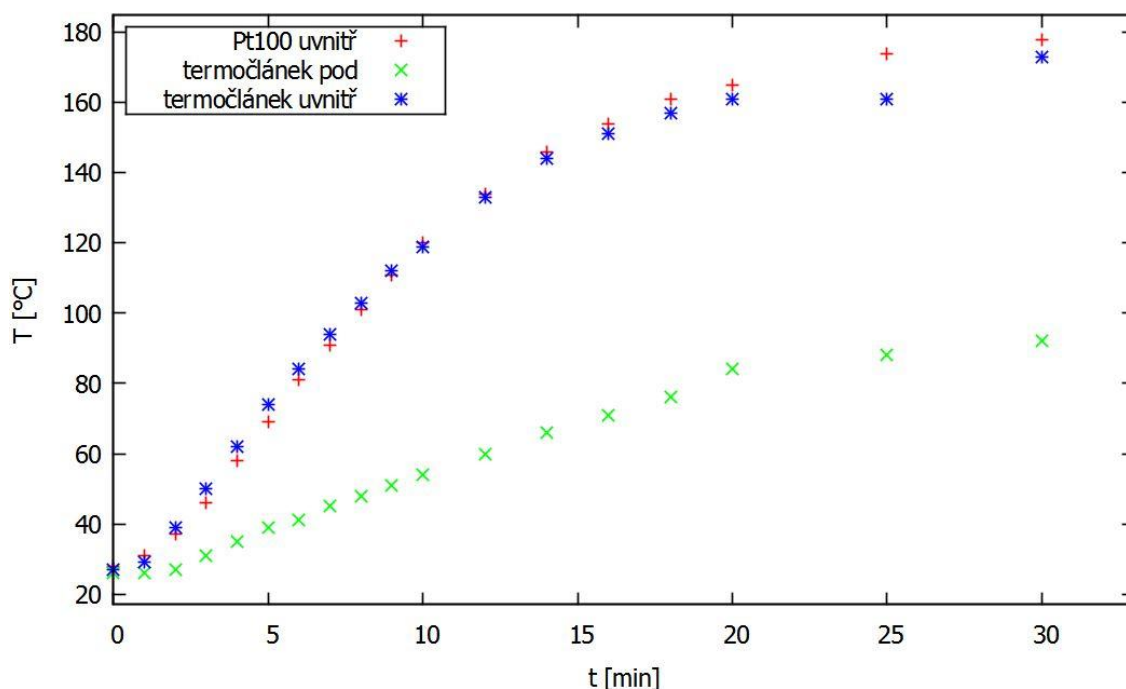
Obrázek 17: Závislost výkonu nutného k dosažení daných teplot topného drátu pro atmosférický tlak a tlak přibližně 1 mPa.

3.3 Závislost dosažené teploty na tlaku při konstantním výkonu

Dále jsme se další způsobem snažili ukázat, že vakuum je velmi dobrá izolace proti přenosu tepla vedením. Měřili jsme teplotu, které dosáhneme při konstantním výkonu 41 W za dané časy.

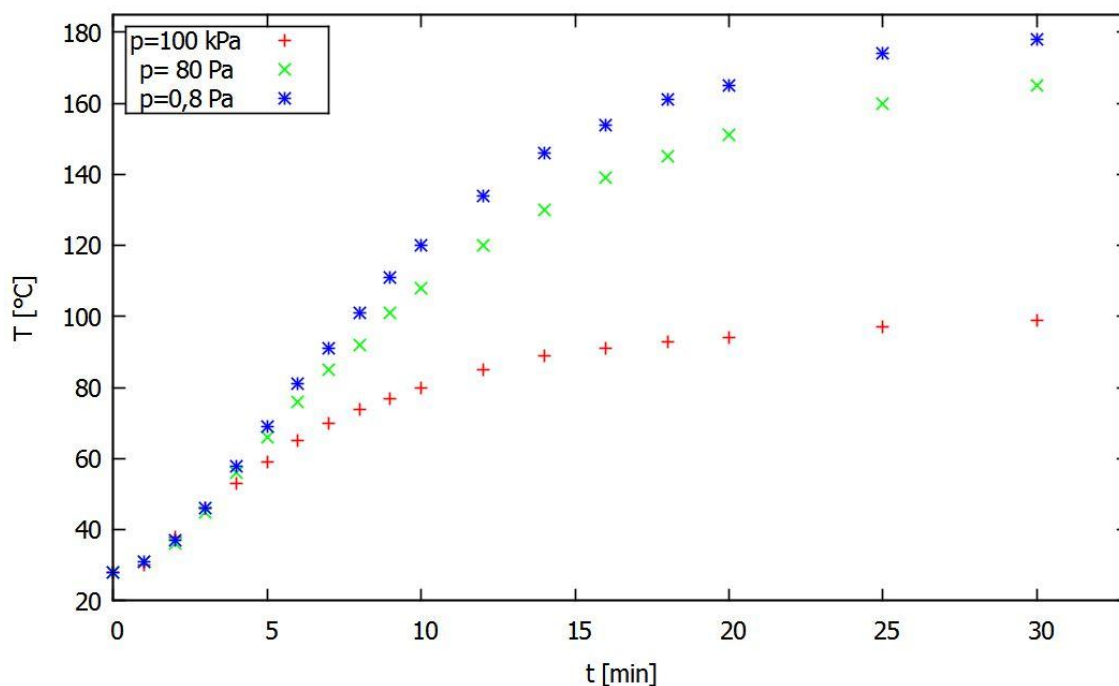
Měření jsme prováděli při zahřívání dlouhou topnou trubičkou umístěnou na destičce z oxidu hlinitého. Pod destičkou byl umístěn jeden termočlánekový teploměr. Uvnitř trubičky byl umístěn odporový teploměr a druhý termočlánekový teploměr. Při měření nebyla použita žádná izolace proti ztrátám tepla zářením.

Naměřené hodnoty jsou uvedeny v Tabulka 11, Tabulka 12 a Tabulka 13. Naměřené hodnoty pro tlak 0,8 Pa jsou vyneseny v grafu Obrázek 18. Vidíme, že na rozdíl od teploty průchodky z předcházejícího měření, zde se teplota mezi destičkou z oxidu hlinitého, na které ležela topná trubička, a komorou aparatury zvyšovala. Grafy Obrázek 32 a Obrázek 33 hodnot pro ostatní tlaky jsou velmi podobné grafu z Obrázek 18. Proto grafy Obrázek 32 a Obrázek 33 uvádíme pouze v příloze.



Obrázek 18: Graf závislosti měřené teploty na době ohřívání uvnitř trubičky pomocí odporového teploměru pt100 a termočlánek a teploty měřené pod destičkou pomocí termočlánek při tlaku okolo 0,8 Pa při měření závislosti dosažené teploty na tlaku. K ohřevu byl dodáván výkon 41 W.

Teplota uvnitř trubičky, měřená pomocí odporového teploměru, je pro všechny tři tlaky najednou vynesena v grafu na Obrázek 19. Z grafu vidíme, že při atmosférickém tlaku dosáhneme téměř rovnovážné teploty už kolem 20. minuty. Při nižších tlacích je vidět, že ani po 30 minutách se růst teploty nezastavil. Také je vidět, že snížení tlaku v komoře má velmi velký vliv na dosažitelnou teplotu.



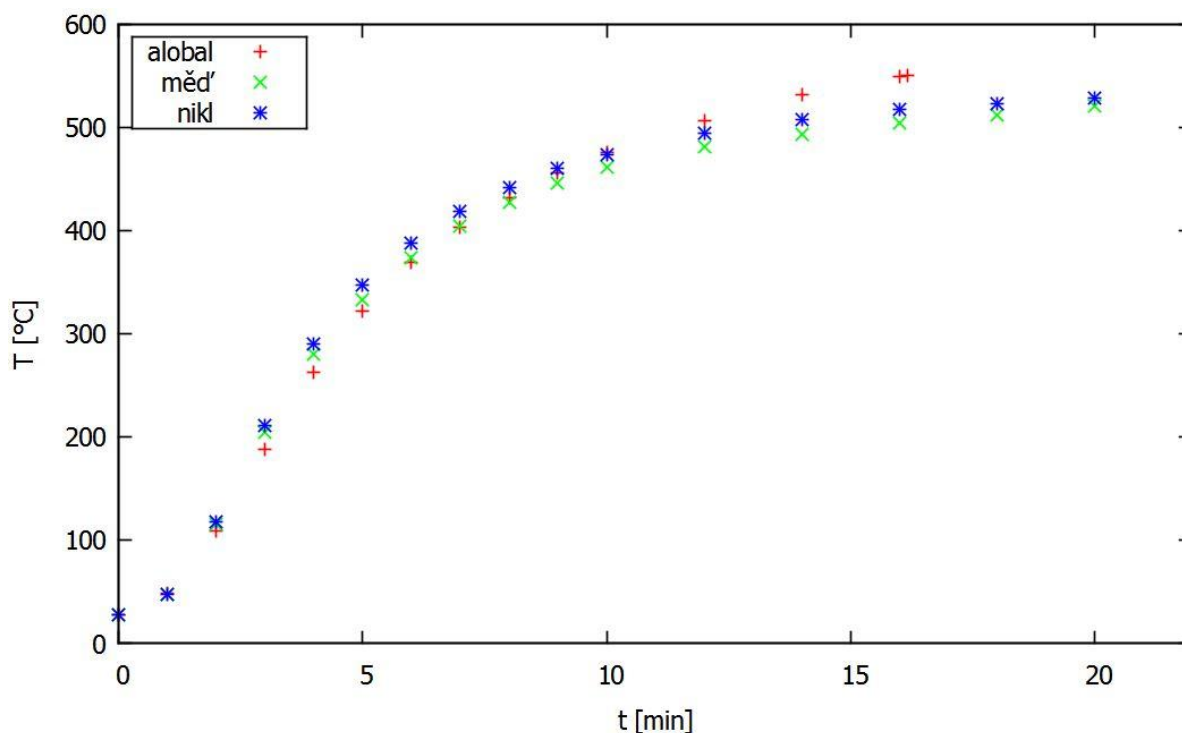
Obrázek 19: Graf závislosti teploty měřené uvnitř trubičky pomocí odporového teploměru pt100 při měření závislosti dosažené teploty na čase pro tři různé tlaky. K ohřevu byl dodáván výkon 41 W.

3.4 Závislost dosažené teploty na konfiguraci při konstantním výkonu

Rozdíl mezi materiály použitelnými k izolaci proti úniku tepla záření jsme se pokusili ukázat v tomto měření. Měření spočívalo v nastavení konstantního výkonu 21 W na zdroji a zaznamenávání teploty topného drátu v průběhu času.

Při tomto měření jsme použili krátkou topnou trubičku pro vyšší teploty zavěšenou na závěsu z dlouhých drátků. Jako izolaci proti ztrátám tepla zářením jsme používali dvouvrstvý vzdálený štít. Provedli jsme tři sady měření pro tři různé materiály tohoto vzdáleného odrazivého štítu. Těsný štít z alobalu natěsno obaleného okolo topné trubičky použit nebyl.

Naměřené hodnoty jsou uvedeny v Tabulka 21, Tabulka 22 a Tabulka 23 a společně vyneseny v grafu Obrázek 20. Z tohoto grafu rozdíly mezi jednotlivými materiály nejsou příliš znatelné. Přesto je jasně vidět, že emisivita hliníku je nejmenší a naopak emisivita mědi největší.



Obrázek 20: Graf závislosti teploty drátu měřené pomocí odporového teploměru pt100 při měření závislosti dosažené teploty na materiálu odrazivého štítu. K ohřevu byl dodáván výkon 21 W.

3.5 Závislost ztrátového výkonu na tlaku při konstantní teplotě

V kapitole 3.2 se ukázalo, že se snižujícím tlakem se snižují ztráty tepla vedením. Nedokázali jsme ale určit rozdíly ztrátových výkonů. Proto jsme přešli k měření výkonu nutného k dosažení konstantní teploty. Cílovou teplotu jsme stanovili na 190 °C.

Měření jsme provedli při pěti tlacích. Konfigurace při tomto měření byla následující. Použili jsme krátkou topnou trubičku pro nižší teploty zavěšenou na závěsných tyčinkách z oxidu hlinitého. Při tomto měření nebyl použit žádný štít jako izolace proti ztrátám tepla zářením. Pod topným drátem byly umístěny dva termočláňkové teploměry. Uvnitř trubičky byl umístěn odporový teploměr.

Před samotným měřením jsme vypočítali teoretické hodnoty ztrátových výkonů jednotlivými způsoby přenosu tepla. Pomocí Rovnice 1 jsme vypočítali ztráty vedením napájecími dráty, dráty teploměrů a tyčinkou pro závěs (Tabulka 2). Celkový ztrátový výkon vedením vyšel 6,00 W. Z Rovnice 9 jsme vypočítali ztráty zářením při měření bez izolací. Ztrátový výkon vyšel 3,32 W při teplotě topného tělesa 190°C, teplotě komory 30°C, velikostí

povrchu topného tělesa 17 cm^2 a velikostí povrchu komory 2198 cm^2 . Tyto ztrátové výkony nezávisely na tlaku.

Tabulka 2: Teoreticky vypočítané ztráty vedením při zahřívání topného tělesa na $190 \text{ }^\circ\text{C}$ při měření závislosti ztrátového výkonu na tlaku a izolacích. Teplota komory byla $30 \text{ }^\circ\text{C}$. n je počet drátů či závěsných tyčinek, kterými byly ztráty tepla vedením.

	n [-]	λ [W/Km]	l [cm]	d [mm]	S [mm ²]	$P\{1x\}$ [W]	$P\{c\}$ [W]
závěsná tyčinka	6	30	11	2	13	0,73	4,38
napájecí drát	2	360	40	0,1	0,3	0,12	0,24
drát odporového teploměru	2	360	40	0,1	0,3	0,12	0,24
1. termočlankový drát	2	360	40	0,2	1,3	0,40	0,80
2. termočlankový drát	2	360	100	0,2	1,3	0,16	0,32

Ztrátový výkon vedením vzduchu a prouděním jsme vypočítali z Rovnice 3 a Rovnice 4. Vypočítané hodnoty jsou uvedeny v Tabulka 3.

V Tabulka 3 jsou uvedeny všechny teoreticky vypočítané hodnoty ztrátových výkonů. Tj. součet všech ztrát vedením závěsnými tyčinkami, napájecími dráty a dráty pro měření teploty, ztráty zářením, ztráty vedením vzduchu a ztráty proudění vzduchu. V tabulce jsou také uvedeny naměřené hodnoty výkonu a rozdíl naměřených a teoreticky vypočítaných hodnot výkonů.

Tabulka 3: Tabulka teoreticky vypočítaných hodnot ztrátových výkonů vedením drátů a závěsnými tyčinkami, zářením, vedením vzduchem, prouděním vzduchu a jejich součtem pro různé tlaky. Pro porovnání jsou uvedeny naměřené hodnoty a rozdíl teoreticky vypočítaných hodnot a naměřených hodnot.

p [Pa]	$P\{\text{ved. drát}\}$	$P\{\text{záření}\}$	$P\{\text{ved. vzduch}\}$	$P\{\text{proudění}\}$	$P\{\Sigma \text{ teor.}\}$	$P\{\text{měř.}\}$	ΔP
100000	6,00	3,32	3,89	5,55	18,76	17,98	0,78
0,35	6,00	3,32	2,13	3,58	15,03	10,54	4,48
0,0053	6,00	3,32	0,07	0,149	9,54	9,44	0,10
0,0013	6,00	3,32	0,03	0,037	9,38	9,44	-0,06
0,001	6,00	3,32	0,02	0,03	9,36	9,44	-0,07

Naměřené hodnoty jsou uvedeny v Tabulka 4 a zobrazeny v grafu Obrázek 21. Z grafu naměřených hodnot je jasné vidět závislost ztrátového výkonu vedením vzduchu a prouděním, protože všechny ostatní ztrátové výkony jsou na tlaku vzduchu nezávislé.

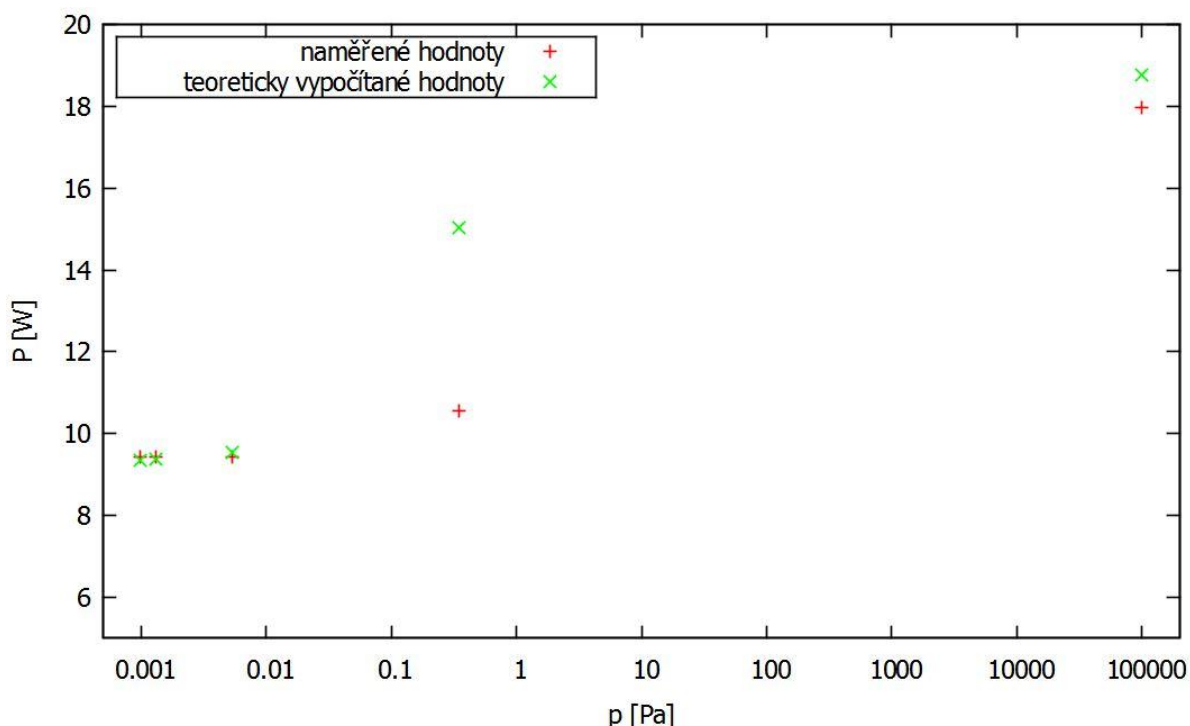
U tlaku 0,35 Pa vidíme velký rozdíl mezi teoreticky vypočítanou hodnotou a naměřenou hodnotou, než při ostatních tlacích. Rozdíl byl pravděpodobně způsoben špatným změřením

hodnoty tlaku. Skutečný tlak byl nejspíše i o řád nižší. Tato změna tlaku by měla za následek snížení ztrát tepla vedením a prouděním vzduchu v teoretických výpočtech, které by vysvětlovalo rozdíl mezi teoreticky vypočítanou hodnotou a naměřenou hodnotou.

Nejdůležitějším závěrem, který z grafu Obrázek 21 vyplývá, je snížení výkonu nutného k dosažení 190 °C při tlaku 5 mPa na polovinu oproti výkonu nutnému k dosažení 190 °C při atmosférickém tlaku.

Tabulka 4: Naměřené hodnoty proudu a napětí nastaveného na zdroji nutné k udržení teploty drátu při různých tlacích.

p [Pa]	T{drátu} [°C]	T{uvnitř} [°C]	I [A]	U [V]	P [W]
100000	190	188	1,07	16,8	18,0
0,35	190	187	0,83	12,7	10,5
0,0053	190	182	0,78	12,1	9,4
0,0013	190	182	0,78	12,1	9,4
0,001	190	182	0,78	12,1	9,4



Obrázek 21: Graf závislosti naměřených a teoreticky vypočítaných ztrátových výkonů v závislosti na tlaku v komoře při teplotě topného tělesa 190°C a teplotě komory 30°C.

3.6 Závislost ztrátového výkonu na izolaci a uložení při nižší teplotě

Zjistili jsme, že ztráty tepla vedením vzduchem a prouděním vzduchu jsou při tlacích menších než 5 mPa výrazně potlačeny. Jak snížit ztráty tepla vedením přes uložení topné trubičky a ztráty tepla zářením prozkoumáme v této kapitole.

Cílovou teplotu jsme stanovili opět na 190°C. Pod topným drátem byly umístěny dva termočláňkové teploměry. Uvnitř trubičky byl umístěn odporový teploměr.

Celkem jsme provedli osm měření při různých konfiguracích. Měnili jsme způsob upevnění trubičky v komoře, pro zjištění závislosti ztrátových výkonů vedením na různých konfiguracích uložení. Také jsme měnili počet alobalových vrstev jako izolace proti přenosu tepla zářením.

- 1) První uspořádání bylo s krátkou topnou trubičkou pro nižší teploty. Ta byla zavěšena na závěsnou tyčinku z oxidu hlinitého. Při tomto uspořádání nebyl použit žádný štít jako izolace proti ztrátám tepla zářením.
- 2) Při druhém uspořádání byla opět použita krátká topná trubička pro nižší teploty. Ta byla zavěšena na závěsnou tyčinku z oxidu hlinitého. Jako izolace proti ztrátám tepla zářením byl použit na těсно přitisknutý alobal okolo topné trubičky. Žádný další vzdálený štít proti ztrátám tepla zářením nebyl použit.
- 3) Při třetím uspořádání byla opět použita krátká topná trubička pro nižší teploty. Ta byla zavěšena na závěsnou tyčinku z oxidu hlinitého. Jako izolace proti ztrátám tepla zářením byl použit na těсно přitisknutý alobal okolo topné trubičky. Dále byl použit jednovrstvý vzdálený štít proti ztrátám tepla zářením z alobalu.
- 4) Při čtvrtém uspořádání byla použita krátká topná trubička pro nižší teploty. Ta byla zavěšena na krátkých závěsných drátkách. Při tomto uspořádání nebyl použit žádný štít jako izolace proti ztrátám tepla zářením.
- 5) Při pátém uspořádání byla použita krátká topná trubička pro nižší teploty. Ta byla zavěšena na krátkých závěsných drátkách. Jako izolace proti ztrátám tepla zářením byl použit na těсно přitisknutý alobal okolo topné trubičky. Dále byl použit jednovrstvý vzdálený štít proti ztrátám tepla zářením z alobalu.
- 6) Při šestém uspořádání byla použita krátká topná trubička pro nižší teploty. Ta byla zavěšena na dlouhých závěsných drátkách. Jako izolace proti ztrátám tepla zářením byl použit na těсно přitisknutý alobal okolo topné trubičky. Dále byl použit dvouvrstvý vzdálený štít proti ztrátám tepla zářením z alobalu.

- 7) Při sedmém uspořádání byla použita krátká topná trubička pro nižší teploty. Ta byla zavěšena na dlouhých závěsných drátkách. Jako izolace proti ztrátám tepla zářením byl použit na těсно přitisknutý alobal okolo topné trubičky. Dále byl použit jednovrstvý vzdálený štít proti ztrátám tepla zářením z alobalu.
- 8) Při osmém uspořádání byla použita krátká topná trubička pro nižší teploty. Ta byla zavěšena na dlouhých závěsných drátkách. Jako izolace proti ztrátám tepla zářením byl použit na těсно přitisknutý alobal okolo topné trubičky. Žádný další vzdálený štít proti ztrátám tepla zářením nebyl použit.

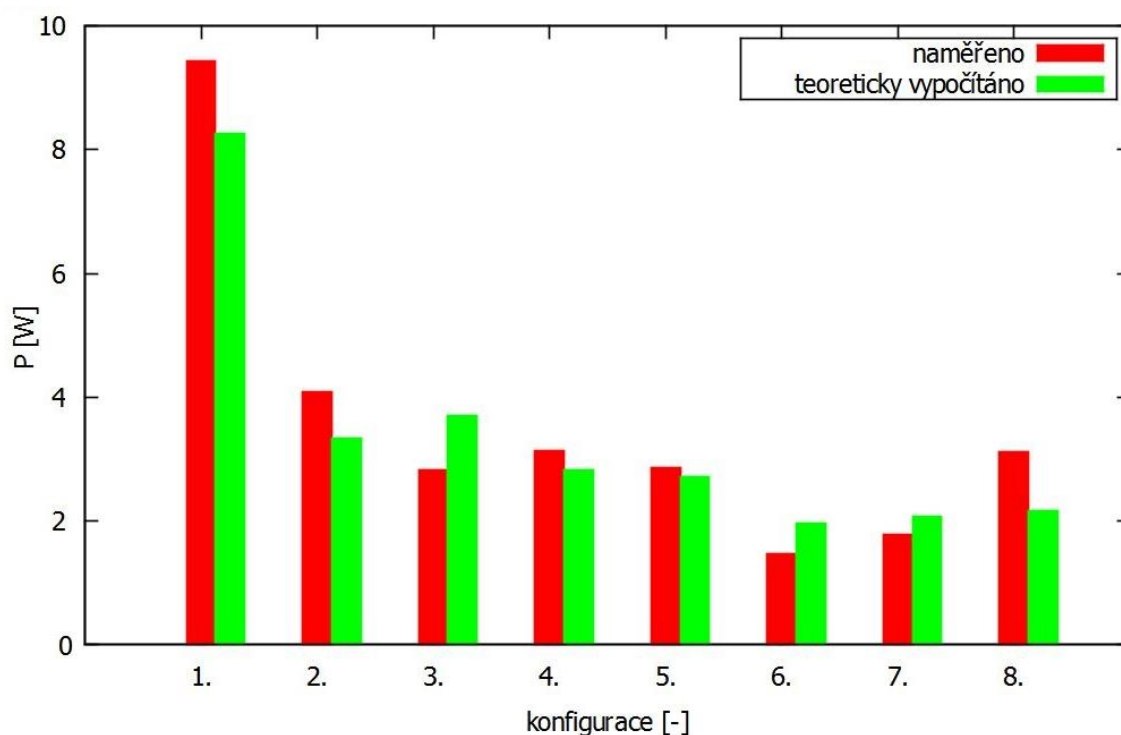
Naměřené hodnoty pro všechny konfigurace jsou uvedeny v Tabulka 5. Teoreticky vypočítané hodnoty ztrátových výkonů pro jednotlivé způsoby přenosu tepla a celkové ztrátové výkony teoretické i naměřené jsou uvedeny v Tabulka 6. Porovnání naměřených a teoreticky vypočítaných hodnot je v grafu Obrázek 22.

Tabulka 5: Naměřené hodnoty proudu a napětí nastaveného na zdroji nutné k udržení teploty drátu při různých uspořádáních měření. Měření prováděno pro teplotu 190 °C. Uvedeny jsou i časy nutné k ochlazení ze 190 °C na 140 °C při různých uspořádáních.

uspořádání	p [Pa]	T{drátu} [°C]	T{uvnitř} [°C]	I [A]	U [V]	P [W]	t{190 -> 140 °C} [min]
1	0,00098	190	178	0,78	12,1	9,4	2
2	0,0033	190	179	0,51	8,0	4,1	7
3	0,014	190	189	0,41	6,9	2,8	11
4	0,029	190	179	0,43	7,4	3,2	11
5	0,00092	190	169	0,42	6,8	2,9	12
6	0,0025	190	199	0,30	4,9	1,5	24
7	0,0017	190	198	0,33	5,4	1,8	18
8	0,0018	190	197	0,44	7,1	3,1	11

Tabulka 6: Tabulka teoreticky vypočítaných hodnot ztrátových výkonů vedením drátů a závěsem, zářením, vedením vzduchem, prouděním vzduchu a jejich součtem pro různá uspořádání měření. Pro porovnání jsou uvedeny naměřené hodnoty a rozdíl teoreticky vypočítaných hodnot a naměřených hodnot. Všechny hodnoty výkonů jsou uvedeny ve wattech. Měření prováděno při 190 °C.

uspořádání	P{ved. drát}	P{záření}	P{ved. vzduch}	P{proudění}	P{Σ teor.}	P{měř.}	ΔP
1	4,90	3,32	0,02	0,03	8,27	9,44	-1,17
2	2,71	0,47	0,07	0,09	3,34	4,08	-0,75
3	2,71	0,36	0,26	0,38	3,71	2,83	0,88
4	2,30	0,47	0,02	0,03	2,82	3,14	-0,32
5	2,30	0,36	0,02	0,03	2,71	2,86	-0,15
6	1,61	0,28	0,05	0,03	1,97	1,47	0,50
7	1,61	0,36	0,03	0,07	2,08	1,78	0,29
8	1,61	0,47	0,04	0,05	2,16	3,12	-0,96



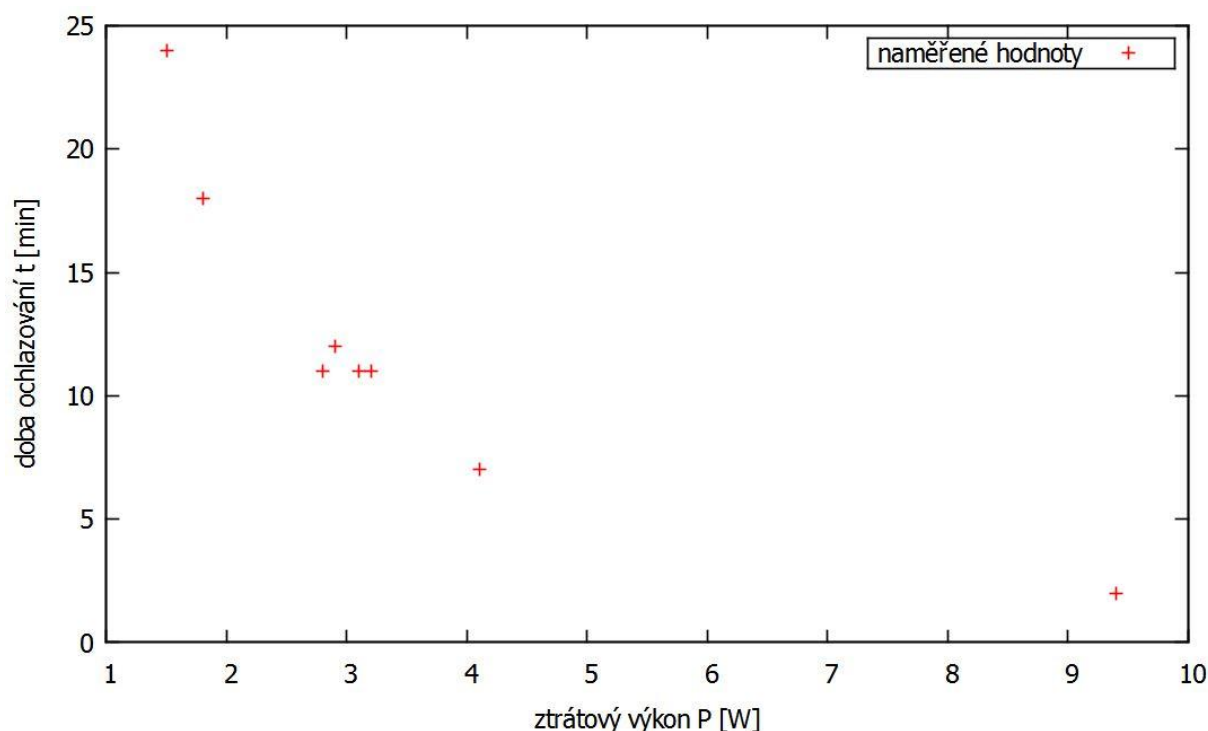
Obrázek 22: Graf závislosti naměřených a teoreticky vypočítaných ztrátových výkonů v závislosti na konfiguraci měření při teplotě topného tělesa 190 °C a teplotě komory 30 °C.

Z porovnání naměřených a teoretických hodnot pro ztrátové výkony z grafu Obrázek 22 vidíme, že nejlepší způsob uložení topné trubičky je pomocí dlouhých závěsných drátků. Z naměřených hodnot je také vidět, že největší vliv na ztráty tepla zářením má první štít v přímém kontaktu s topnou trubičkou.

Se štíty z alobalu proti ztrátám tepla zářením, jsme dosahovali ztrátových výkonů 4 W a méně (tj. všechny uspořádání krom uspořádání číslo jedna). Při šestém a sedmém uspořádání jsme dokonce snížili ztrátový výkon pod 2 W. A to díky závěsu na dlouhé závěsné drátky, díky kterému jsme výrazně snížili ztráty vedením a také více vrstvám alobalu, pro snížení ztrát zářením.

Při takto malých výkonech se mohou ztráty, které nám přišli zanedbatelné, začít opět projevovat. Navíc jsme při všech výpočtech uvažovali s ideálními případy. Například při všech výpočtech ztrát vedením vzduchu, proudění vzduchu i zářením jsme tvar komory aproximovali válcem. Ve skutečnosti se jedná o válec se 7 přírubami na plášti a dalšími třemi přírubami na velké koncové přírubě. Rovněž jsme zanedbávali nerovnosti povrchu izolačních štítů proti ztrátám tepla zářením i samotné topné trubičky.

Při všech osmi měřeních jsme také měřili čas potřebný k ochlazení ze 190 °C na 140 °C. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v Tabulka 5 a závislost doby chladnutí na ztrátovém výkonu je zobrazena v grafu Obrázek 17. Vidíme, že čím menší výkon byl nutný k dosažení 190 °C tím delší byl čas nutný k ochlazení.



Obrázek 23: Graf závislosti doby chladnutí ze 190 °C na 140 °C na ztrátovém výkonu při 190 °C.

3.7 Závislost ztrátového výkonu na izolaci při vyšší teplotě

Protože v předchozím měření jsme dosahovali ztrátových výkonů menších než 4 W, rozhodli jsme se provést obdobná měření pro vyšší teplotu, tak aby ztrátové výkony byly vyšší. Jako teplotu měření jsme si stanovili 400 °C. Aby jsme mohli bezpečně dosáhnout teploty 400 °C a vyšší, museli jsme pro vyhřívání používat krátkou topnou trubičku pro vyšší teploty.

Provedli jsme měření při sedmi různých konfiguracích. Rozdíly mezi konfiguracemi jsme volili tak, aby jsme změřili závislost na počtu vrstev a materiálech, které tvoří izolační štít proti ztrátám tepla zářením.

- 1) První uspořádání bylo s krátkou topnou trubičkou pro vyšší teploty. Ta byla zavěšena na dlouhých závěsných drátkách. Při tomto uspořádání nebyl použit žádný štít jako izolace proti ztrátám tepla zářením. Ani těsný ani vzdálený.
- 2) Druhé uspořádání bylo s krátkou topnou trubičkou pro vyšší teploty. Ta byla zavěšena na dlouhých závěsných drátkách. Jako izolace proti ztrátám tepla zářením byl použit na těсно přitisknutý alobal okolo topné trubičky. Žádný další vzdálený štít proti ztrátám tepla zářením nebyl použit.
- 3) Třetí uspořádání bylo s krátkou topnou trubičkou pro vyšší teploty. Ta byla zavěšena na dlouhých závěsných drátkách. Jako izolace proti ztrátám tepla zářením byl použit na těсно přitisknutý alobal okolo topné trubičky. Dále byl použit jednovrstvý vzdálený štít proti ztrátám tepla zářením z alobalu.
- 4) Čtvrté uspořádání bylo s krátkou topnou trubičkou pro vyšší teploty. Ta byla zavěšena na dlouhých závěsných drátkách. Jako izolace proti ztrátám tepla zářením byl použit na těсно přitisknutý alobal okolo topné trubičky. Dále byl použit dvouvrstvý vzdálený štít proti ztrátám tepla zářením z alobalu.
- 5) Páté uspořádání bylo s krátkou topnou trubičkou pro vyšší teploty. Ta byla zavěšena na dlouhých závěsných drátkách. Jako izolace proti ztrátám tepla zářením byl použit dvouvrstvý vzdálený štít proti ztrátám tepla zářením z mědi. Přímo na trubičce nebyl použit Alobal ani žádný jiný materiál.
- 6) Šesté uspořádání bylo s krátkou topnou trubičkou pro vyšší teploty. Ta byla zavěšena na dlouhých závěsných drátkách. Jako izolace proti ztrátám tepla zářením byl použit dvouvrstvý vzdálený štít proti ztrátám tepla zářením z niklu. Přímo na trubičce nebyl použit Alobal ani žádný jiný materiál.

- 7) Sedmé uspořádání bylo s krátkou topnou trubičkou pro vyšší teploty. Ta byla zavěšena na dlouhých závěsných drátkách. Jako izolace proti ztrátám tepla zářením byl použit dvouvrstvý vzdálený štít proti ztrátám tepla zářením z alobalu. Přímo na trubičce nebyl použit Alobal ani žádný jiný materiál.

Naměřené hodnoty jsou uvedeny v Tabulka 7. Teoreticky vypočítané hodnoty a jejich porovnání s naměřenými hodnotami jsou uvedeny v Tabulka 8. Porovnání teoreticky vypočítaných hodnot a naměřených hodnot je zobrazeno v grafu Obrázek 24.

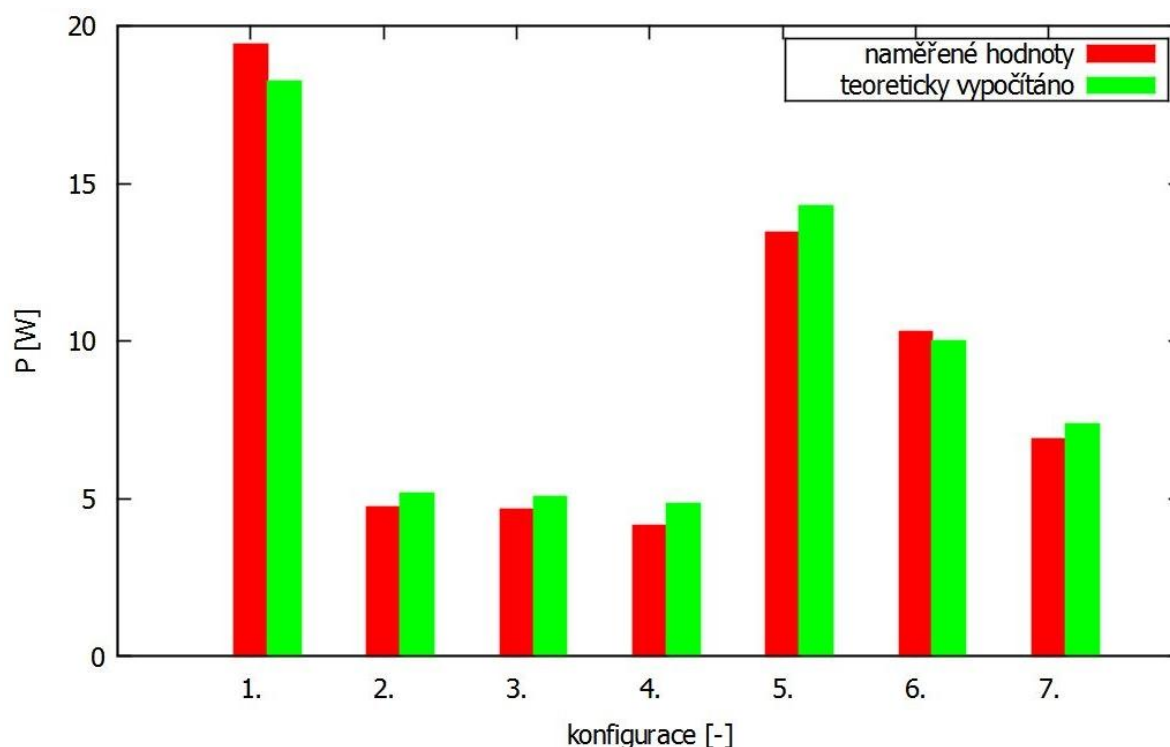
Ukázalo se, že největší vliv na omezení ztrát tepla zářením má přítomnost či nepřítomnost materiálu s velmi nízkou emisivitou přímo na topné trubičce. Jedna těsně přitisknutá vrstva alobalu má pětikrát menší ztráty tepla vedením, než dvouvrstvá vzdálená alobalová vrstva. Při aplikaci a návrhu bude tato skutečnost nevyužitelná. Odizolování topení od vyhřívaného předmětu by bylo kontraproduktivní, protože by jsme sice dosáhli vyšší teploty topení, ale ne vyšší teploty vyhřívaného předmětu. Z testovaných materiálů se jako nejlepší ukázal alobal. To je dáno tím, že z testovaných materiálů má nejnižší emisivitu a při použitých teplotách nevdí jeho nižší teplota tání v porovnání s ostatními materiály.

Tabulka 7: Naměřené hodnoty proudu a napětí nastaveného na zdroji nutné k udržení teploty drátu při různých uspořádáních měření. Měření prováděno pro teplotu 400 °C.

uspořádání	p [Pa]	T{drátu} [°C]	T{uvnitř} [°C]	I [A]	U [V]	P [W]
1	0,002	400	398	2,31	8,4	19,404
2	0,0019	400	401	1,13	4,2	4,746
3	0,0015	400	402	1,08	4,32	4,6656
4	0,0015	400	399	1,06	3,9	4,134
5	0,0026	400	400	1,92	7	13,44
6	0,008	400	397	1,69	6,1	10,309
7	0,0024	400	400	1,38	5	6,9

Tabulka 8: Tabulka teoreticky vypočítaných hodnot ztrátových výkonů vedením drátů a závěsem, zářením, vedením vzduchem, prouděním vzduchu a jejich součtem pro různá uspořádání měření. Pro porovnání jsou uvedeny naměřené hodnoty a rozdíl teoreticky vypočítaných hodnot a naměřených hodnot. Všechny hodnoty výkonů jsou uvedeny ve wattech. Měření prováděno při 400 °C.

#	p [mPa]	P{ved. drát}	P{záření}	P{ved. vzd.}	P{proud.}	P{Σ teor.}	P{měř.}	ΔP	Ps [W/cm ²]
1	2,0	3,88	14,18	0,07	0,10	18,23	19,40	-1,17	0,95
2	1,9	3,88	1,14	0,07	0,10	5,18	4,75	0,44	0,23
3	1,5	3,88	1,05	0,06	0,08	5,06	4,67	0,40	0,23
4	1,5	3,88	0,90	0,06	0,08	4,90	4,13	0,77	0,20
5	2,6	2,02	12,03	0,09	0,13	14,27	13,44	0,83	0,66
6	8,0	2,02	7,30	0,28	0,40	10,00	10,31	-0,31	0,51
7	2,4	2,02	5,15	0,09	0,12	7,38	6,90	0,48	0,34



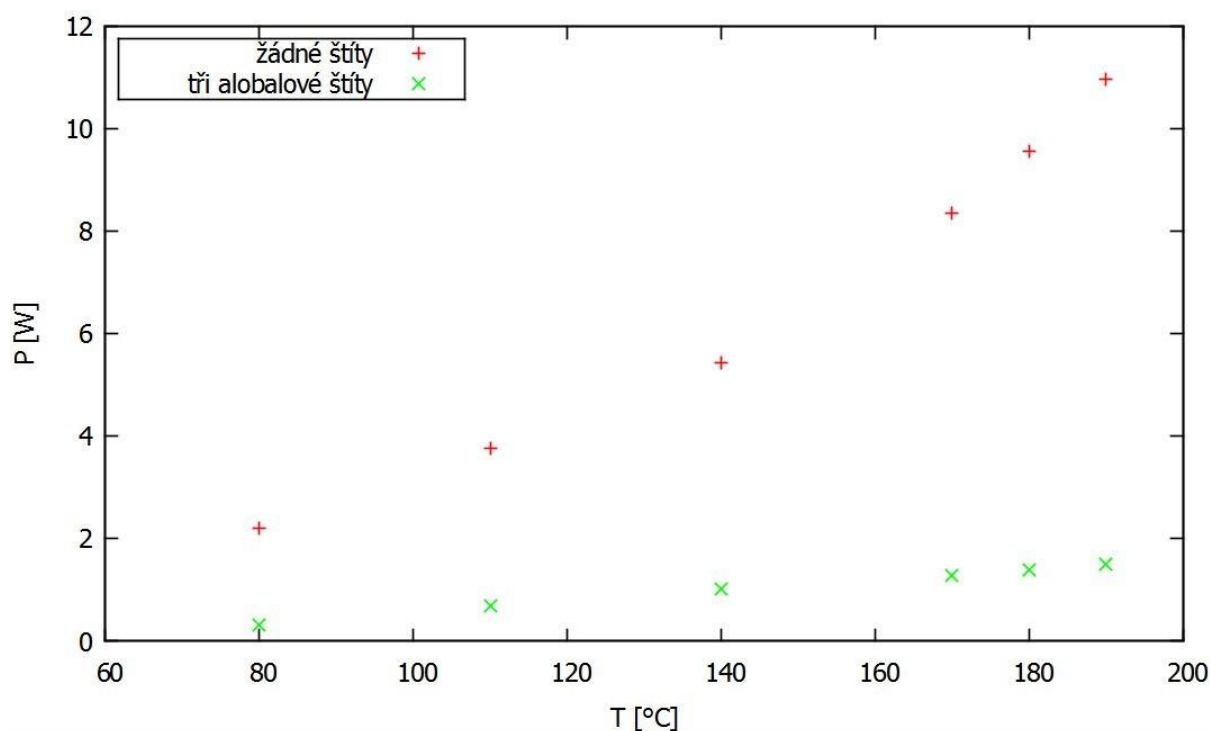
Obrázek 24: Graf závislosti naměřených a teoreticky vypočítaných ztrátových výkonů v závislosti na konfiguraci měření při teplotě topného tělesa 400 °C a teplotě komory 30°C.

3.8 Měření průběhu ztrátového výkonu na teplotě (do 220 °C)

Pro lepší porozumění chování ztrátových výkonů jsme se rozhodli proměřit závislost ztrátového výkonu zářením na teplotě.

- 1) První měření jsme provedli s krátkou topnou trubičkou pro nižší teploty zavěšenou na dlouhých závěsných drátkách. Při tomto uspořádání nebyl použit žádný štít jako izolace proti ztrátám tepla zářením. Ani těsný ani vzdálený.
- 2) Druhé měření jsme s krátkou topnou trubičkou pro nižší teploty zavěšenou na dlouhých závěsných drátkách. Jako izolace proti ztrátám tepla zářením byl použit na těsně přitisknutý alobal okolo topné trubičky. Dále byl použit dvouvrstvý vzdálený štít proti ztrátám tepla zářením z alobalu.

Naměřená data jsou uvedeny v Tabulka 14, Tabulka 15 a zobrazeny v grafech Obrázek 34 a Obrázek 35. Porovnání naměřených hodnot pro obě dvě konfigurace jsou zobrazeny v grafu na Obrázek 25.



Obrázek 25: Graf závislosti ztrátových výkonů na teplotě drátu při měření závislosti ztrátových výkonů na izolaci proti záření. Zelené body jsou z měření s alobalem těsně obaleným okolo trubičky s topnými drátem a dvěma alobalovými štíty, červené body jsou z měření bez jakýchkoliv alobalových štítů i bez alobalu těsně přitisknutého na trubičku s topným drátem. Měření prováděno při konfiguracích pro nižší teploty.

Z grafu Obrázek 25 je vidět, že závislost ztrátového výkonu na teplotě při konfiguraci bez jakýchkoliv štítů proti ztrátám tepla zářením je $P \sim T^4$, naopak závislost ztrátového výkonu na teplotě při konfiguraci se třemi alobalovými štíty proti ztrátám tepla zářením je $P \sim T$. To

znamená, že při konfiguraci bez jakýchkoliv štítů proti ztrátám tepla zářením převažují právě ztráty tepla zářením a zároveň, že při konfiguraci se třemi alobalovými štíty proti ztrátám tepla zářením převažují ztráty tepla vedením uložením topné trubičky, přívodních drátů a drátů teploměru.

3.9 Měření průběhu ztrátového výkonu na teplotě (do 545 °C)

V kapitole 3.8 jsme ukázali, že jsou štíty proti ztrátám tepla zářením velmi důležité i za nízkých teplot. Jaké materiály jsou ale nejlepší? A při jakých teplotách začne převažovat záření nad vedením? To zjistíme v této kapitole.

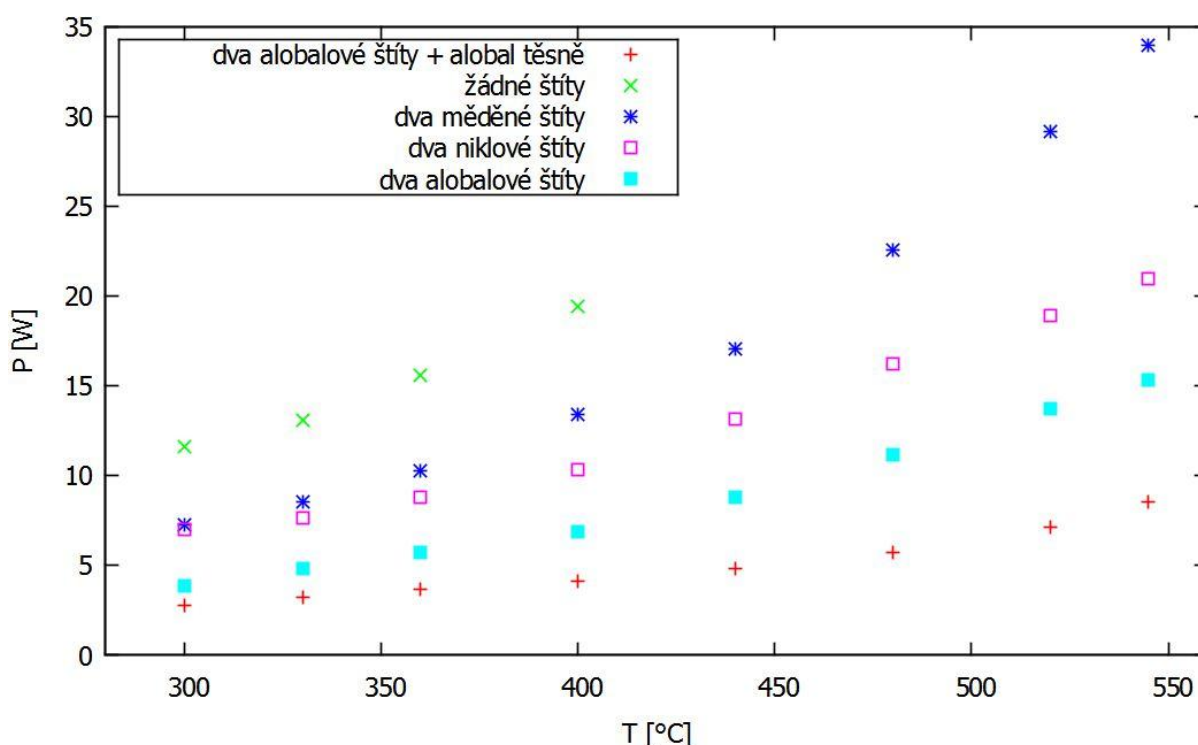
Měření jsme provedli pro sedm různých konfigurací izolačních štítů proti ztrátám tepla zářením. Konfigurace pro jednotlivé případy byly následující.

- 1) První uspořádání bylo s krátkou topnou trubičkou pro vyšší teploty zavěšenou na dlouhých závěsných drátkách. Při tomto uspořádání nebyl použit žádný štít jako izolace proti ztrátám tepla zářením. Ani těsný ani vzdálený.
- 2) Druhé uspořádání bylo s krátkou topnou trubičkou pro vyšší teploty zavěšenou na dlouhých závěsných drátkách. Jako izolace proti ztrátám tepla zářením byl použit dvouvrstvý vzdálený štít proti ztrátám tepla zářením z alobalu. Alobal ani žádný jiný materiál nebyl použit jako izolace těsně přitisknutá k topné trubičce.
- 3) Třetí uspořádání bylo s krátkou topnou trubičkou pro vyšší teploty zavěšenou na dlouhých závěsných drátkách. Jako izolace proti ztrátám tepla zářením byl použit dvouvrstvý vzdálený štít proti ztrátám tepla zářením z niklu. Alobal ani žádný jiný materiál nebyl použit jako izolace těsně přitisknutá k topné trubičce.
- 4) Čtvrté uspořádání bylo s krátkou topnou trubičkou pro vyšší teploty zavěšenou na dlouhých závěsných drátkách. Jako izolace proti ztrátám tepla zářením byl použit dvouvrstvý vzdálený štít proti ztrátám tepla zářením z mědi. Alobal ani žádný jiný materiál nebyl použit jako izolace těsně přitisknutá k topné trubičce.
- 5) Páté uspořádání bylo s krátkou topnou trubičkou pro vyšší teploty zavěšenou na dlouhých závěsných drátkách. Jako izolace proti ztrátám tepla zářením byl použit na těsně přitisknutý alobal okolo topné trubičky. Dále byl použit dvouvrstvý vzdálený štít proti ztrátám tepla zářením z alobalu.

Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulkách Tabulka 16, Tabulka 17, Tabulka 18, Tabulka 19 a Tabulka 20. Jednotlivé naměřené hodnoty jsou vyneseny v grafech Obrázek 36, Obrázek 37, Obrázek 38, Obrázek 39 a Obrázek 40. V těchto grafech jsou také uvedeny

rovnice křivek, které jsme získali proložení naměřených hodnot pomocí metody nejmenších čtverců.

Všechny naměřené hodnoty společně jsou vyneseny v grafu Obrázek 26. Z grafu je zřetelně vidět vliv štítů proti ztrátám zářením. Mezi hodnotami pro dvě vrstvy štítů různých materiálů jsou znatelné rozdíly, které odpovídají teoretickým hodnotám emisivit jednotlivých materiálů (Tabulka 1). Také je vidět téměř dvojnásobný rozdíl mezi použitím a nepoužitím alobalové vrstvy přímo přitisknuté k trubičce s topným drátem.



Obrázek 26: Graf závislosti ztrátových výkonů na teplotě drátu při měření závislosti ztrátových výkonů na izolaci proti záření. Měření prováděno při konfiguracích pro vyšší teploty.

3.10 Měření kovových Halloových senzorů

Jako jedno z prvních využití naší aparatury se ukázalo měření kovových Halloových senzorů. Odpor kovových Halloových senzorů se mění s hodnotou magnetického pole, kterému jsou vystaveny. Měřením protékajícího proud při konstantním napětí lze určit odpor senzoru a následně dopočítat hodnotu magnetického pole.

Odpor kovových Hallových senzorů se mění také s teplotou senzoru. Kovové Hallovy senzory jsou vyrobeny z bismutu. Při teplotách převyšujících 250 °C a přístupu kyslíku dochází k oxidaci materiálu. Proto je nutné ověřit, že ve vakuu k oxidaci či jiné degradaci nedochází, a provést teplotní kalibraci.

Pro přesnější měření teploty, které je nutné ke kalibraci senzorů, jsme před spuštění experimentu přidali odporový teploměr do vnitř vakuové komory. Jednalo se o teploměr Pt100, který jsme zapojili pomocí čtyřdrátového zapojení pro zajištění co největší přesnosti.

Teploměr připojený pomocí čtyřdrátového zapojení jsme vždy umísťovali co nejbližše měřenému senzoru, ideálně tak, aby se dotýkali. Tím by bylo zajištěno měření přesné teploty senzoru nutné k jeho kalibraci.

Při měření jsme zjistil, že při vyšších teplotách tj. 200 °C a více dochází k rozdílu mezi teplotou naměřenou pomocí odporových teploměrů a teplotami změřenými termočláňkovými teploměry, a to i mezi termočláňkovými teploměry navzájem. Předpokládali jsme, že problém by mohl být v napojení drátů na vakuové průchodce. Termočláňkové dráty byly na měděné tyčinky průchodky přišroubovány pomocí měděných spojek. Na těchto spojích vznikali parazitní termočláňkové přechody, a to kvůli zvýšené teplotě v místě přechodu.

Tomuto předpokladu odpovídal fakt, že se lišila teplota obou termočláňkových teploměrů. Délka drátů termočláňkových teploměrů se mezi měřicími body a průchodkou významně lišila. Delší dráty byly přibližně trojnásobkem kratších drátů. Nižší měřená teplota odpovídala termočláňku s kratšími dráty, tudíž vyšší teplotou průchodky, a tedy vyšším napětím na parazitních termočláňkových kontaktech na průchodce. Napětí na parazitních kontaktech se odečetlo od napětí na měřeném kontaktu a zobrazená teplota byla tedy nižší, než u termočláňku s delšími dráty.

Spojky jsme nahradil cínem a přiletovali. Nedosáhli jsme ale přílišného zlepšení. Ideálním řešením by bylo použití speciální termočláňkové vakuové průchodky, kde jsou dráty průchodky ze stejného materiálu jako samotný termočláňek. Díky tomu by nevznikaly parazitní termočláňkové přechody a měření by bylo opět přesné.

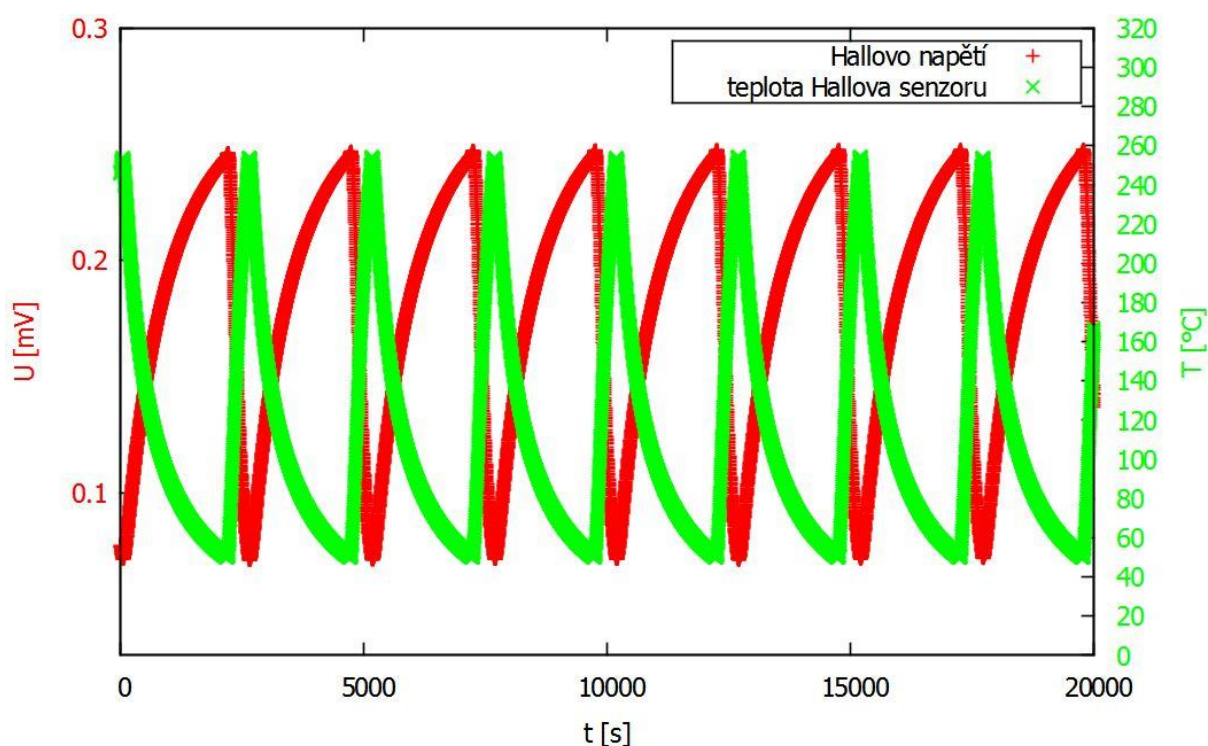
Použité termočláňky nebyly kalibrované a neznali jsme výrobce. V termočláňcích mohly být nečistoty, mohly být částečně zkorodované atd. Pro dosažení vyšší přesnosti by byla nutná kalibrace. Přesto dosahovaná přesnost byla pro náš účel dostatečná.

Měření míry degradace senzorů se provádělo opakováním přibližně hodinových teplotních cyklů v rozmezí od 50 do 260 °C. Původní konstrukční záměr vakuové pece byl ohřev daného tělesa na požadovanou teplotu a následné udržení teploty po dobu několika hodin či dní.

Zamýšlená radiační izolace vypékaného tělesa od stěn vakuové komory by tedy mohla být kontraproduktivní. Tepelné ztráty po dosažení teploty 260 °C by byly malé a ochlazování by bylo příliš pomalé. Jeden teplotní cyklus by se protáhl na více než hodinu a to by při požadovaných 500 teplotních cyklech bylo nežádoucí a znatelně by to prodloužilo dobu trvání experimentu. Proto jsme upustili od izolačních štítů tepla proti ztrátám záření v tomto experimentu.

Příklad naměřených hodnot je zobrazen v grafu Obrázek 27. Na tomto grafu lze vidět korelaci mezi teplotou Hallova senzoru a Hallovým napětím. Zobrazené hodnoty jsou pouze přibližně pěti hodinovým úsekem naměřených hodnot, přičemž toto konkrétní měření probíhalo přibližně 57 hodin.

Po celou dobu měření, nejen v úseku z grafu Obrázek 27, zůstávalo chování kovového Hallova senzoru stejné, jako na počátku měření. To znamená, že těchto přibližně 80 teplotních cyklů nemělo vliv na funkčnost měřeného kovového Hallova senzoru. Nedošlo k degradaci izolačního materiálu okolo citlivé části, ani k degradaci samotné citlivé části senzoru.



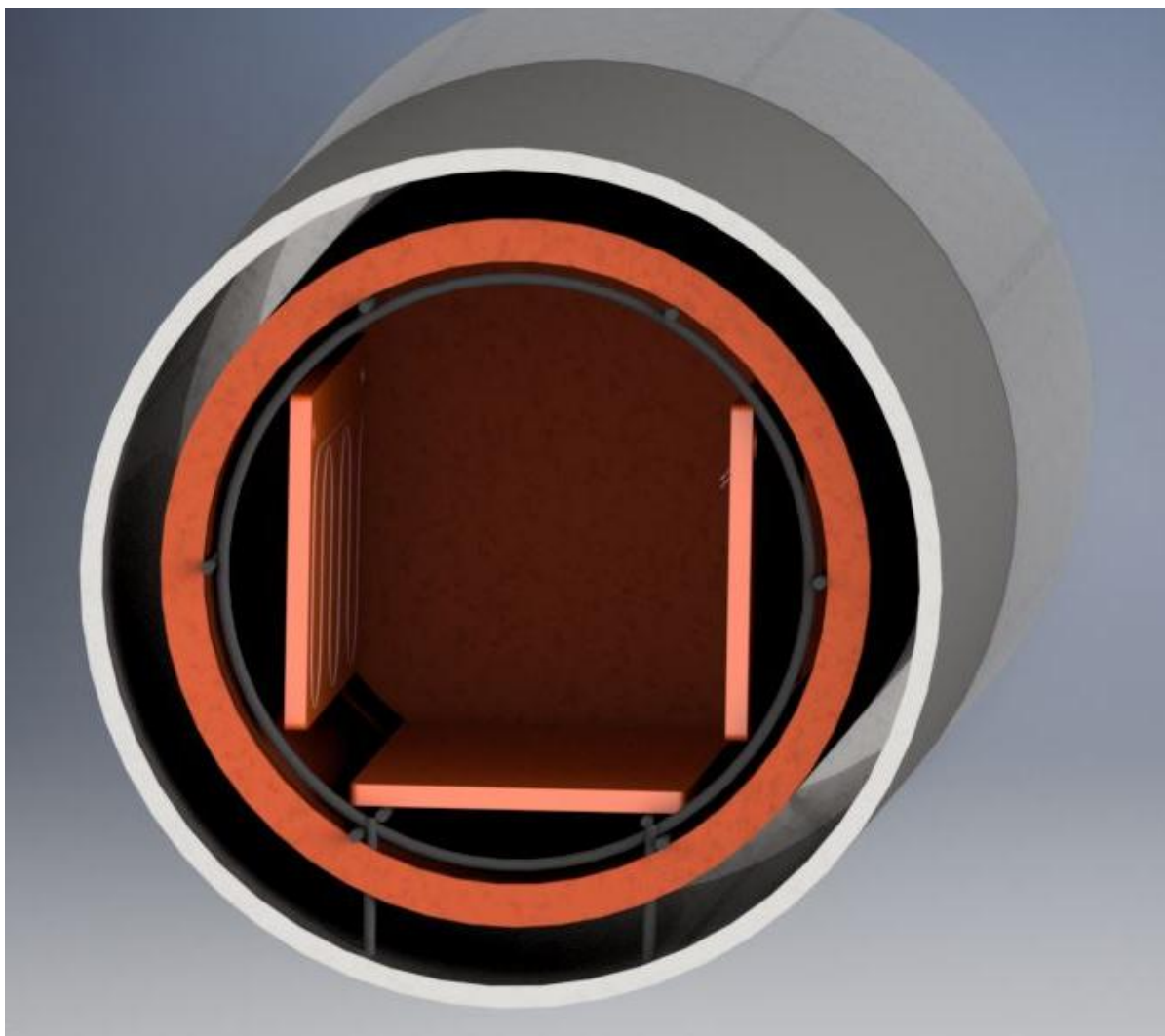
Obrázek 27: Graf závislosti Hallova napětí a teploty Hallova senzoru na čase. Zobrazený úsek odpovídá přibližně pěti a půl hodinám. Toto konkrétní měření probíhalo po dobu přibližně 57 hodin. Pro přehlednost grafu byl vybrán kratší časový úsek. Měření probíhalo při konstantním magnetickém poli.

3.11 Návrh vakuové pece

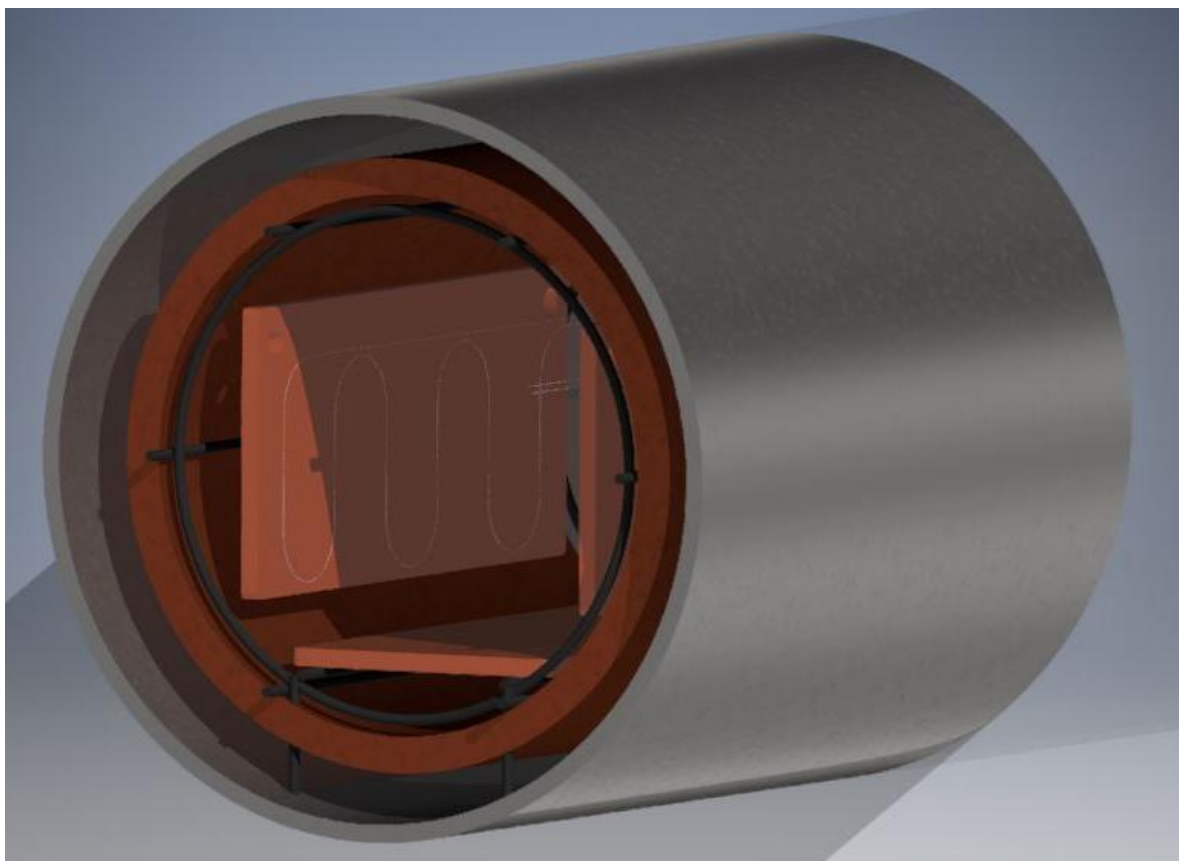
Provedli jsme několik měření, která nám pomohla pochopit problematiku dosahování vysokých teplot ve vakuu. Naším cílem, vzhledem k bezpečnosti provozu, bude maximální teplota komory 50 °C pro teplotu uvnitř komory 1400 °C a 35 °C pro teplotu uvnitř komory 600 °C.

Vizualizace návrhu vakuové pece jsou na Obrázek 28 a Obrázek 29. Největší šedý válec je vakuová komora, oranžový válec stínění proti ztrátám tepla zářením, černě konstrukce pro izolaci proti ztrátám tepla zářením a oranžové desky jsou nosné desky pro vypékané těleso a nosné desky pro topný drát.

Dosažením tlaku okolo 1 mPa a méně, se sníží ztráty tepla vedením vzduchem a prouděním vzduchu na minimum. Při cílové teplotě 600 °C klesnou ztráty tepla vedením vzduchem pod 1 W a prouděním vzduchu také pod 1 W při tlaku 1 mPa. Při cílové teplotě 1400 °C klesnou ztráty tepla vedením vzduchem pod 2 W a prouděním vzduchu pod 1 W při tlaku 0,1 mPa.



Obrázek 28: Vizualizace návrhu vakuové pece.



Obrázek 29: Vizualizace návrhu vakuové pece.

3.11.1 Izolace oproti ztrátám zářením

Dále je potřeba snížit ztráty tepla zářením. To by mohlo být provedeno pomocí několika odrazivých vrstev. Jako nejlepší materiál pro tento štít, se z našich měření, jeví alobal. Pokud by cílová teplota pícky byla do 600 °C, můžeme bez problému používat právě alobal, protože teplota tání hliníku je 660 °C. Pokud by cílová teplota pícky byla okolo 1400 °C, bylo by, z testovaných materiálů, ideální použít nikl.

Alobal, jako materiál štítů, má několik výhod. Nutná vlastnost je samozřejmě vysoká odrazivost. U hliníku jde i o 95 %. Mezi další pozitivní vlastnosti řadíme jednoduchou práci a manipulaci s alobalem, nízkou pořizovací cenu, všeobecnou dostupnost atd.

Stínění by bylo přichyceno na nosné konstrukci. Nosná konstrukce by byla z drátů o průměru 2 mm. Jednalo by se o dva kroužky o průměru 14 cm spojené šesti dráty dlouhými 24 cm. Dráty budou uspořádány do pravidelného šestiúhelníku a společně se dvěma kroužky vytvoří "válnovou" nosnou konstrukci. Konstrukce bude mít čtyři nožičky, na kterých bude celá stát. Průměr nožiček bude také 2 mm. Na tuto konstrukci bude uchyceno stínění, které

bude však tvořit pouze válcový plášť bez podstav. Stínění podstav válce bude na samostatných kroužcích, které se budou dát odejímat.

Stínění bude na konstrukci připevněno skelnou nití. Vrstvy stínění budou mezi sebou také sešity pomocí skelné nitě. Jednotlivé odrazivé vrstvy stínění budou od sebe odděleny skelnou tkaninou. Tak, aby ztráty tepla vedením mezi jednotlivými odrazivými vrstvami byly co nejmenší.

Pro samotné stínění by, při cílové teplotě 600 °C, bylo vhodné použít minimálně 2 alobalové vrstvy. V tom případě by se ztráty tepla zářením snížily pod 60 W. Při přidávání dalších vrstev sníží další hliníková vrstva ztráty tepla zářením přibližně o 10 W.

Při cílové teplotě 1400 °C a stínění z niklu by při 13 vrstvách byl ztrátový výkon tepla zářením menší než 200 W. Každá další vrstva sníží ztráty přibližně o 13 W. V tomto případě je potřeba použít velmi tenké vrstvy, aby je vůbec bylo možné umístit do komory. Lze koupit i folie o tloušťce 0,006 mm (např. (13)). Z materiálů, ke kterým jsme neměli přístup by bylo možné použít nerezovou ocel. Při cílové teplotě 1400 °C a stínění z niklu by při 17 vrstvách byl ztrátový výkon tepla zářením menší než 200 W. Každá další vrstva sníží ztráty přibližně o 10 W.



Obrázek 30: Vizualizace návrhu držáku pro izolaci proti ztrátám tepla zářením.

3.11.2 Potlačení ztrát vedením částí, které jsou v kontaktu

Poslední ztráty, které je nutné co nejvíce potlačit, jsou ztráty tepla vedením drátů. Tj. přívodní dráty k topné soustavě a dráty teploměrů. Tyto ztráty omezíme snížením počtem teploměrů na přijatelné minimum a hlavně prodloužením délky drátu na co největší. Přívodní dráty a dráty teploměrů je vhodné vést mezi odrazivými vrstvami tak, aby v tu chvíli teplota drátu byla maximálně teplota nejbližší odrazivé vrstvy stínění.

3.11.3 Měření teploty

Teploměry by bylo vhodné zvolit odporové platinové teploměry, které jsou relativně přesné, měří v širokém rozsahu teplot a mají malý vliv na samotné měření. Jeden teploměr by byl umístěn uvnitř stínění, připevněn na topné těleso, tak aby jsme znali jeho teplotu. Teplota topného tělesa by po ustálení měla být stejná jako teplota vytápěného tělesa a všech částí, které budou umístěny uvnitř odrazivého štítu. Další teploměr by byl volně uvnitř stínění připraven tak, aby se dal umístit na vypékané těleso atd., dle potřeby daného experimentu.

Jeden teploměr by měl být umístěn přímo u topného drátu a sloužit jako pojistka. Při překročení cílové teploty o danou hodnotu by automaticky vypnul vytápění. Tento teploměr by bylo možné nahradit omezením maximálního možného výkonu.

V případě, že by se jednalo o pec, která by měla sloužit k ověřování teoretických výpočtů ztrátových výkonů atd., by bylo vhodné použít i několik teploměrů mezi různými vrstvami stínění. Pomocí nich by bylo možné porovnávat teoretické teploty n -té izolační vrstvy a její naměřené hodnoty. Protože se ale jedná o pec, která by měla sloužit k vypékání, nejsou tyto teploměry nutné.

Další teploměr by měl být umístěn na komoře. Díky němu by bylo možné zjistit případnou poruchu, kvůli které by se začala komora nepřiměřeně zahřívat.

3.11.4 Vyhřívání

Vytápění bude prováděno pomocí topného drátu. Ten bude vsunut do drážky v keramické desce. Deska bude zavěšena na nosné konstrukci pro izolaci proti záření. Zavěšení bude provedeno pomocí kovových kroužků z 1 mm drátků. Nejlepší by bylo mít tyto desky dvě jednu na každé straně. Tato možnost vyhřívání je jedna z nejjednodušších. Pro její jednoduchost bych ji volil pro první konstrukci. Vyhřívání a jeho upevnění by ale bylo možné provést mnoha různými způsoby.

3.11.5 Držák vytápěných těles

Navrhuji, aby držák pro vytápění těles byl tvořen keramickou deskou na dvou vodorovných kovových tyčinkách stejných jaké byly použity k výrobě držáku stínění proti ztrátám zářením. Držák by byl položen právě na držáku stínění proti ztrátám zářením.

Jedna z jiných možných verzí bylo připevnění na kovové řetízky, které by byly zavěšeny na konstrukci pro uchycení štítu proti záření. V tu chvíli by mohl být držák na vytápění polohovací. To lze ale nahradit pouhým vypořádáním vypékaného tělesa při naší preferované konfiguraci. Oproti položení na držák pro stínění proti ztrátám tepla zářením by zavěšení na řetízky bylo i méně stabilní.

4. Závěr

V práci jsme prozkoumali jevy doprovázející dosahování vysokých teplot ve vakuu. Zjistili jsme, které materiály jsou vhodné jako izolace proti ztrátám tepla záření a také které způsoby uložení topení a vyhřívaných předmětů je optimální vzhledem ke ztrátám tepla vedením. Aparaturu jsme využili pro měření tepelné odolnosti kovových Halloových senzorů. Všechny znalosti, nabyté v experimentech, jsme využili k v návrhu vakuové pece.

V práci by bylo ideální pokračovat sestavením vakuové pece dle uvedeného návrhu. Po sestavení vakuové pece by bylo vhodné provést několik měření tepelných ztrát, průběhů teplot při ohřívání atd. Pomocí těchto měření by bylo možné přijít na další vylepšení návrhu vakuové pece. Navržená vakuová pec s vylepšeními by se mohla přiblížit komerčně dostupným vakuovým pecím, ale za nižší pořizovací cenu. Nižší cena navržené vakuové pece by byla díky použití součástí, které jsou již dostupné na ÚFP AV.

5. Bibliografie

1. **Maršák, Zlatěk.** *Termodynamika a statistická fyzika*, 3. vydání. Praha : ČVUT Praha, 1995.
2. **Maršák, Zlatěk and Eva, Havráňková.** *Sbírka řešených příkladů z fyziky: (termika a molekulová fyzika)*. Praha : ČVUT Praha, 2004. 80-01-02197-1.
3. **Taylor, Barry N.** Fundamental Physics Constants, Stefan-Boltzmann constant. *Physical Reference Data*. [Online] NIST. [Cited: květen 7, 2017.] http://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?sigma|search_for=stefan.
4. Hodnoty emisivity běžných materiálů. [Online] [Cited: Květen 16, 2017.] https://www.fbi.vsb.cz/export/sites/fbi/030/.content/sys-cs/resource/PDF/TechnickaMereni/5_EmisivitaBeznychMaterialu.pdf.
5. **Sakakibara, Yusuke.** *A Study of Thermal Radiation Shields for Cryogenic Gravitational Wave Detectors*. Tokyo : The University of Tokyo, 2012. 35-106033.
6. **Silin, V. P.** *Úvod do kinetické teorie plynů*. Praha : Academia, 1976.
7. **Jaňour, Zbyněk.** *Molekulární teorie proudění plynů: od kinetické teorie plynů k aerodynamice*. Praha : Academia, 1983.
8. **Lasance, Clemens J. M.** The Thermal Conductivity of Air at Reduced Pressure and Length Scales. *Electronic cooling*. [Online] listopad 1, 2002. [Cited: červen 27, 2017.] <https://www.electronics-cooling.com/2002/11/the-thermal-conductivity-of-air-at-reduced-pressures-and-length-scales/>.
9. **Sazima, Miroslav a kol.** *Sdílení tepla*. Praha : SNTL, 1993. 80-03-00675-9.
10. **Moore, John H., et al.** *Building Scientific Apparatus*. New York : Cambridge University Press, 2009. 978-0-511-58009-3.
11. **Scherz, Paul.** *Practical Electronics for Inventors*. New York : McGraw-Hill, Inc., 2006. 9780071452816.
12. **O'Hanlon, John F.** *A User's Guide to Vacuum Technology*. New Jersey : John Wiley & Sons, Inc., 2003. 0-471-27052-0.
13. **Umrath, Walter.** *Fundamentals of Vacuum Technology*. s.l. : Leybold Vacuum, 1998.

14. A closer look at gauge types. *Laboratory network*. [Online] VertMarkets, Inc. [Cited: červen 30, 2017.] <https://www.laboratorynetwork.com/doc/a-closer-look-at-gauge-types-0001>.

15. Sortiment nikl. *HOBERO spol. s.r.o.* [Online] CHRISTO GROUP, 2014. [Cited: červen 29, 2017.] <http://www.hobero.cz/sortiment/nikl>.

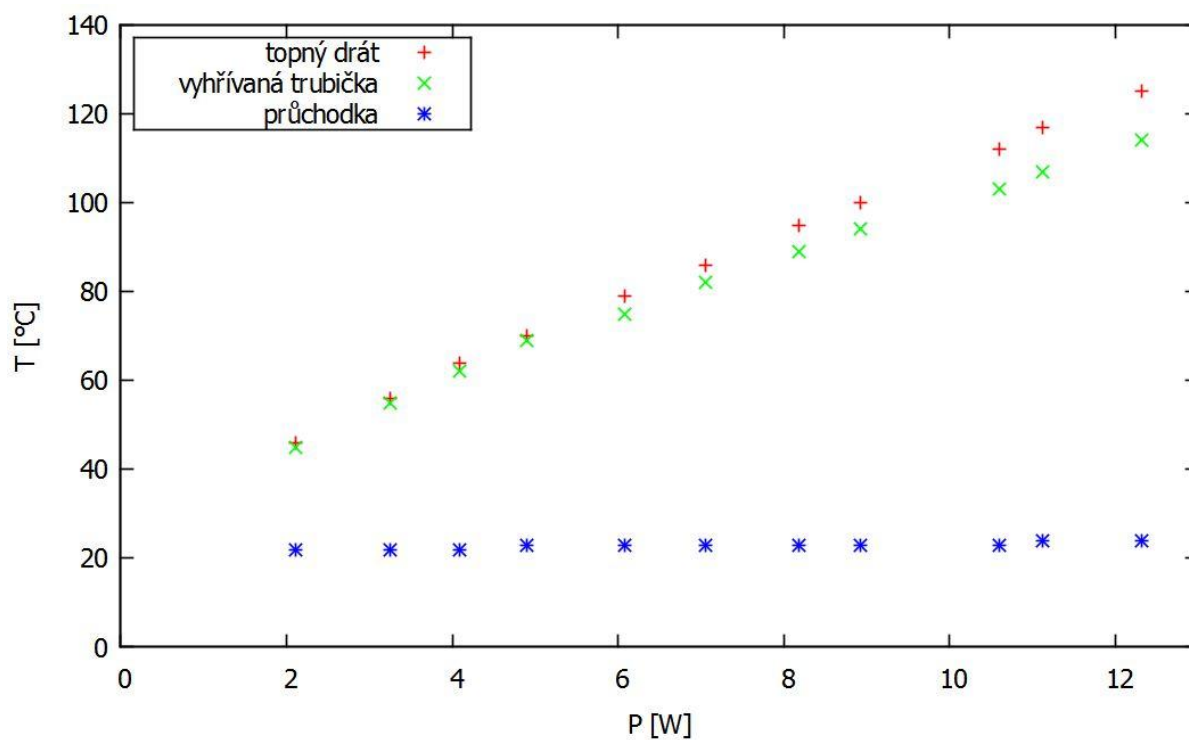
6. Přílohy

Tabulka 9: Naměřené hodnoty teplot topného drátu, vyhřívané trubičky a průchodky při daných hodnotách napětí a proudu topným drátem při atmosférickém tlaku, a dopočítané hodnoty výkonu na topném drátu a poměr teplot vyhřívané trubičky a topného drátu z měření závislosti teploty na tlaku při daných výkonech.

t [min]	p [Pa]	T{drátu} [°C]	T{trubičky} [°C]	T{průchodky} [°C]	U [V]	I [A]	P [W]
28	100000	46	45	22	4,6	0,46	2,1
58	100000	56	55	22	5,6	0,58	3,2
89	100000	64	62	22	6,3	0,65	4,1
113	100000	70	69	23	6,9	0,71	4,9
137	100000	79	75	23	7,6	0,80	6,1
158	100000	86	82	23	8,2	0,86	7,1
176	100000	95	89	23	8,8	0,93	8,2
194	100000	100	94	23	9,2	0,97	8,9
209	100000	112	103	23	10,0	1,06	10,6
222	100000	117	107	24	10,2	1,09	11,1
241	100000	125	114	24	10,8	1,14	12,3

Tabulka 10: Naměřené hodnoty teplot topného drátu, vyhřívané trubičky a průchodky při daných hodnotách napětí a proudu topným drátem při tlaku na úrovni 1 mPa, a dopočítané hodnoty výkonu na topném drátu a poměr teplot vyhřívané trubičky a topného drátu z měření závislosti teploty na tlaku při daných výkonech.

t [min]	p [Pa]	T{drátu} [°C]	T{trubičky} [°C]	T{průchodky} [°C]	U [V]	I [A]	P [W]
0	0,00032	24	23	22	0	0	0
50	0,00048	73	51	22	4,6	0,47	2,2
80	0,00054	95	63	22	5,6	0,57	3,2
98	0,00059	108	71	23	6,3	0,65	4,1
116	0,00068	123	81	23	6,9	0,71	4,9
133	0,00084	141	92	23	7,6	0,80	6,1
150	0,001	157	102	23	8,2	0,86	7,1
167	0,0013	172	114	24	8,8	0,93	8,2
180	0,0013	179	119	24	9,1	0,95	8,6



Obrázek 31: Graf závislosti teplot topného drátu, vyhřívané trubičky a průchodky na výkonu na topném drátu z měření závislosti teploty na tlaku při daných výkonech. Hodnoty naměřené při atmosférickém tlaku.

Tabulka 11: Naměřené hodnoty teplot uvnitř trubičky pomocí odporového teploměru pt100 a termočlánku a teploty pod destičkou v různých časech při atmosférickém tlaku při měření závislosti dosažené teploty na tlaku. K ohřevu byl dodáván výkon 41 W.

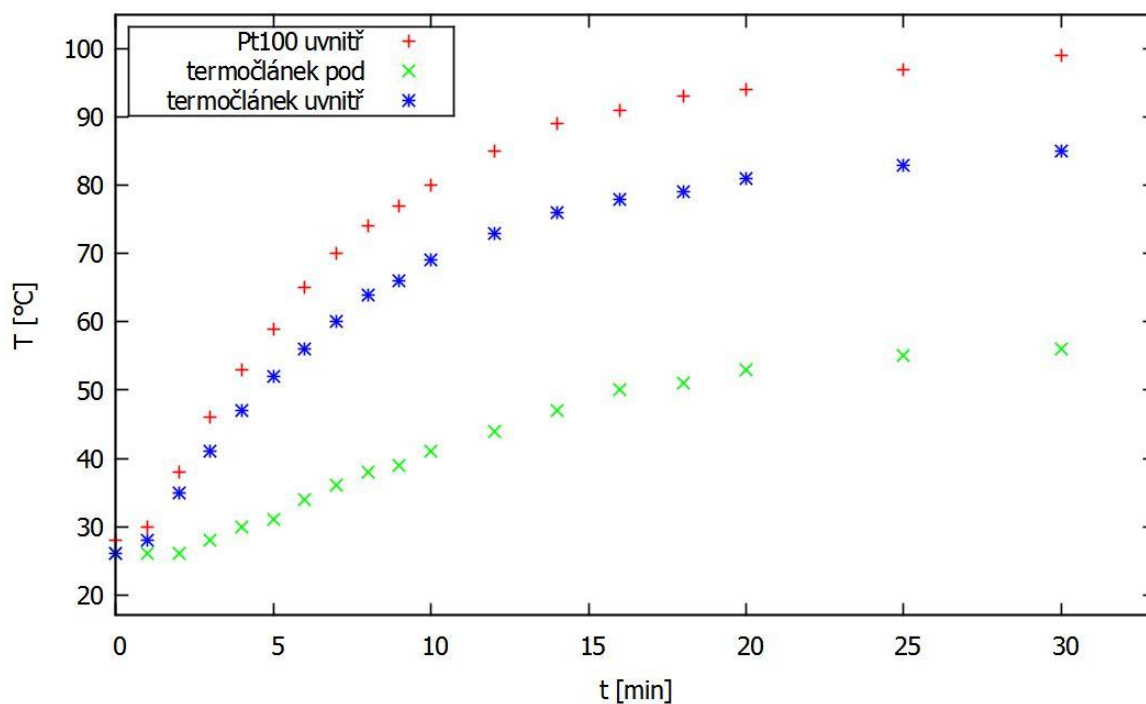
t [min]	T{uvnitř-pt100} [°C]	T{pod destičkou} [°C]	T{uvnitř-termoč.} [°C]
0	28	26	26
1	30	26	28
2	38	26	35
3	46	28	41
4	53	30	47
5	59	31	52
6	65	34	56
7	70	36	60
8	74	38	64
9	77	39	66
10	80	41	69
12	85	44	73
14	89	47	76
16	91	50	78
18	93	51	79
20	94	53	81
25	97	55	83
30	99	56	85

Tabulka 12: Naměřené hodnoty teplot uvnitř trubičky pomocí odporového teploměru pt100 a termočlánku, teploty pod destičkou a tlaků v různých časech při tlaku okolo 80 Pa při měření závislosti dosažené teploty na tlaku. K ohřevu byl dodáván výkon 41 W.

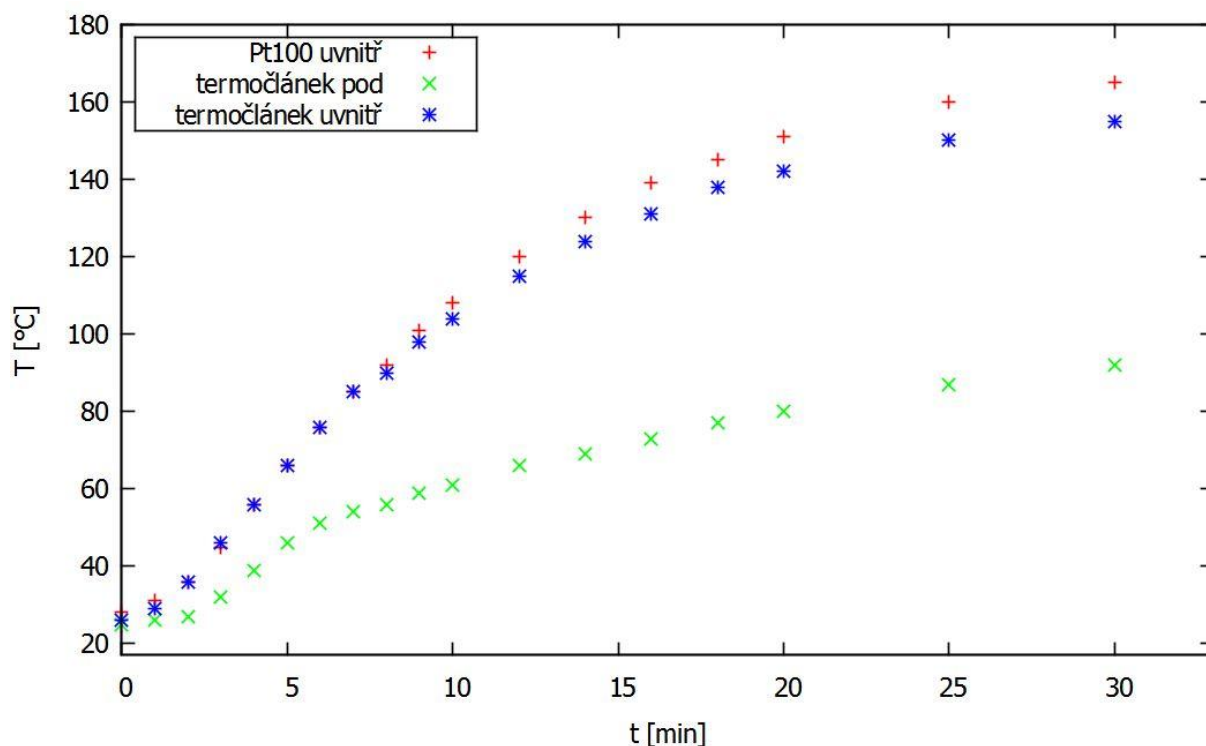
t [min]	p [Pa]	T{uvnitř-pt100} [°C]	T{pod destičkou} [°C]	T{uvnitř-termoč.} [°C]
0	30	28	26	27
1	30	31	56	29
2	30	37	27	39
3	36	46	31	50
4	39	58	35	62
5	42	69	39	74
6	47	81	41	84
7	53	91	45	94
8	58	101	48	103
9	65	111	51	112
10	71	120	54	119
12	91	134	60	133
14	100	146	66	144
16	100	154	71	151
18	92	161	76	157
20	84	165	84	161
25	68	174	88	161
30	60	178	92	173

Tabulka 13 Naměřené hodnoty teplot uvnitř trubičky pomocí odporového teploměru pt100 a termočlánku, teploty pod destičkou a tlaků v různých časech při tlaku okolo 0,8 Pa při měření závislosti dosažené teploty na tlaku. K ohřevu byl dodáván výkon 41 W.

t [min]	p [Pa]	T{uvnitř-pt100} [°C]	T{pod destičkou} [°C]	T{uvnitř-termoč.} [°C]
0	0,21	28	25	26
1	0,21	31	26	29
2	0,22	36	27	36
3	0,25	45	32	46
4	0,37	56	39	56
5	0,41	66	46	66
6	0,44	76	51	76
7	0,49	85	54	85
8	0,53	92	56	90
9	0,58	101	59	98
10	0,63	108	61	104
12	0,78	120	66	115
14	0,91	130	69	124
16	1,0	139	73	131
18	1,1	145	77	138
20	1,2	151	80	142
25	1,2	160	87	150
30	1,0	165	92	155



Obrázek 32: Graf závislosti teploty měřené uvnitř trubičky pomocí odporového teploměru pt100 a termočlánek a teploty měřené pod destičkou pomocí termočlánek na době ohřívání při atmosférickém tlaku při měření závislosti dosažené teploty na tlaku. K ohřevu byl dodáván výkon 41 W.



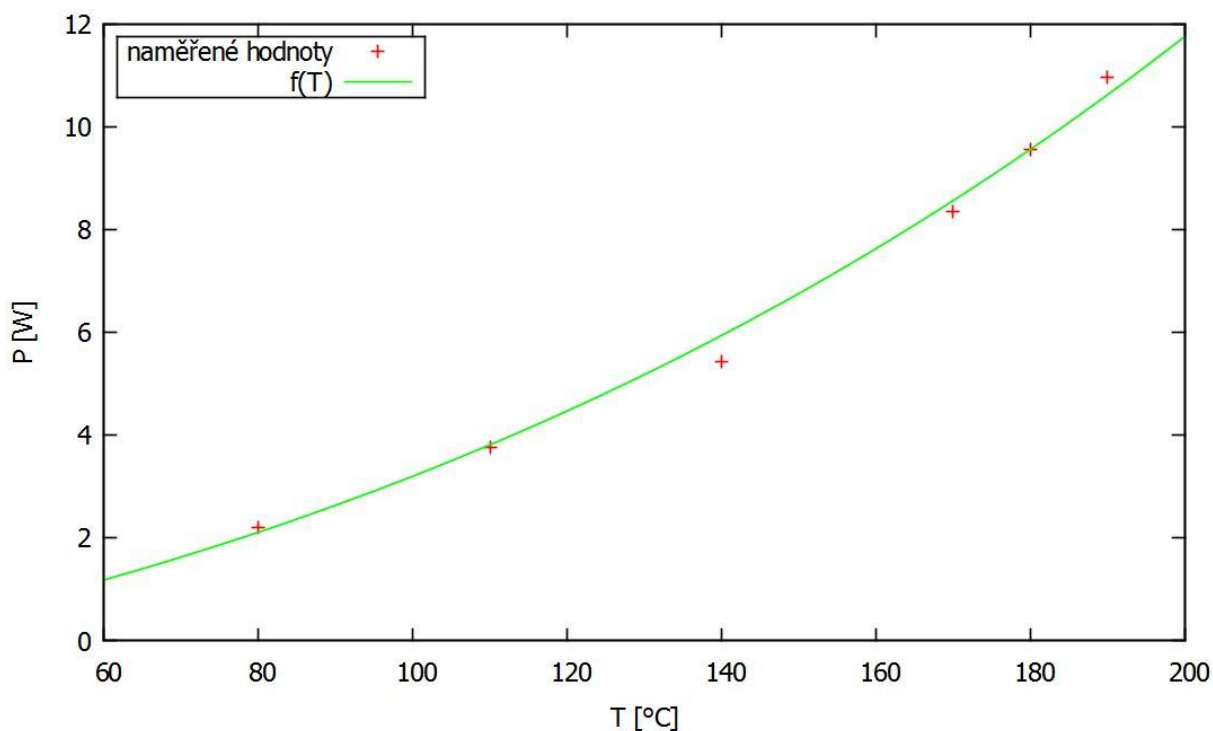
Obrázek 33: Graf závislosti teploty měřené uvnitř trubičky pomocí odporového teploměru pt100 a termočláneku a teploty měřené pod destičkou pomocí termočláneku na době ohřívání při tlaku okolo 80 Pa při měření závislosti dosažené teploty na tlaku. K ohřevu byl dodáván výkon 41 W.

Tabulka 14: Naměřené hodnoty ztrátových výkonů a tlaků při daných teplotách drátu při měření závislosti ztrátových výkonů na izolaci proti zářením. Měření prováděno bez jakýchkoliv alobalových štítů i bez alobalu těsně přitisknutého na trubičku s topným drátem. Uspořádání pro měření nižších teplot.

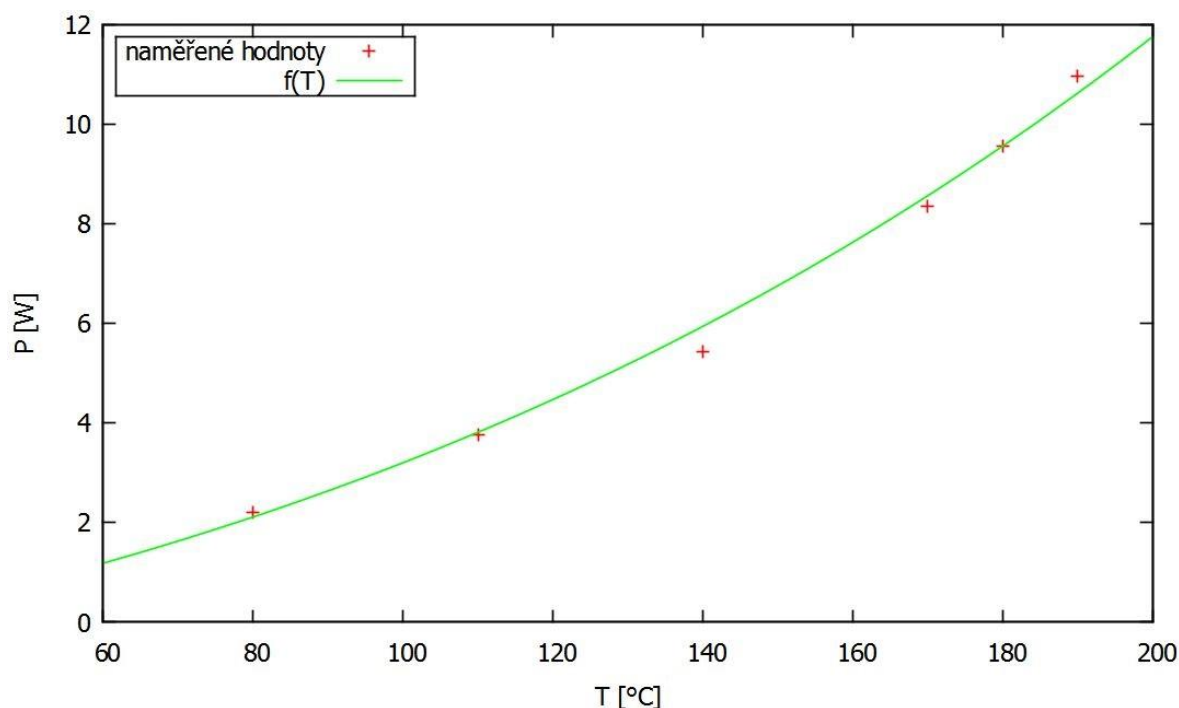
p [mPa]	t{drátu pt100} [°C]	t{drátu termoč.} [°C]	t{uvnitř} [°C]	I [A]	U [V]	P [W]
2,6	80	81	71	0,37	5,9	2,2
1,3	110	111	102	0,49	7,7	3,8
0,85	140	142	139	0,59	9,2	5,4
0,92	170	172	172	0,74	11,3	8,4
0,96	180	182	183	0,79	12,1	9,6
0,92	190	192	192	0,85	12,9	11,0
0,92	220	221	222	0,97	14,8	14,4

Tabulka 15: Naměřené hodnoty ztrátových výkonů a tlaků při daných teplotách drátu při měření závislosti ztrátových výkonů na izolaci proti záření. Měření prováděno s alobalem těsně obaleným okolo trubičky s topným drátem a dvěma alobalovými štíty upevněny vzdáleně. Uspořádání pro měření nižších teplot.

p [mPa]	t{drátu pt100} [°C]	t{drátu termoč.} [°C]	t{uvnitř} [°C]	I [A]	U [V]	P [W]
1,3	80	85	59	0,13	2,4	0,312
0,99	110	116	75	0,2	3,5	0,7
0,97	140	147	91	0,25	4,1	1,025
0,89	170	178	117	0,28	4,6	1,288
0,85	180	189	128	0,29	4,8	1,392
0,83	190	199	136	0,3	5	1,5
1,4	220	231	166	0,33	5,3	1,749



Obrázek 34: Graf závislosti ztrátových výkonů na teplotě drátu při měření závislosti ztrátových výkonů na izolaci proti záření. Měření prováděno bez jakýchkoliv alobalových štítů i bez alobalu těsně přitisknutého na trubičku s topným drátem. Data proložena funkcí $f(T) = 2,7 \cdot 10^{-11}T^4 + 3 \cdot 10^{-3}T - 2,3$ metodou nejmenších čtverců. Uspořádání pro měření nižších teplot.



Obrázek 35: Graf závislosti ztrátových výkonů na teplotě drátu při měření závislosti ztrátových výkonů na izolaci proti záření. Měření prováděno s alobalem těsně obaleným okolo trubičky s topným drátem a dvěma vzdálenými alobalovými štíty. Data proložena funkcí $f(T) = 2,1 \cdot 10^{-11}T^4 + 4,5 \cdot 10^{-3}T - 0,34$ metodou nejmenších čtverců. Uspořádání pro měření nižších teplot.

Tabulka 16: Naměřené hodnoty ztrátových výkonů a tlaků při daných teplotách drátu při měření závislosti ztrátových výkonů na izolaci proti záření. Měření prováděno bez jakýchkoliv alobalových štítů i bez alobalu těsně přitisknutého na trubičku s topným drátem. Uspořádání pro měření vyšších teplot.

p [mPa]	t{drátu pt100} [°C]	I [A]	U [V]	P [W]
3	300	1,79	6,5	11,6
22	330	1,9	6,9	13,1
1,8	360	2,08	7,5	15,6
2	400	2,31	8,4	19,4

Tabulka 17: Naměřené hodnoty ztrátových výkonů a tlaků při daných teplotách drátu při měření závislostí ztrátových výkonů na izolaci proti záření. Měření prováděno s alobalem těsně obaleným okolo trubičky s topným drátem a dvěma vzdálenými alobalovými štíty. Uspořádání pro měření vyšších teplot.

p [mPa]	t{drátu pt100} [°C]	I [A]	U [V]	P [W]
1,3	300	0,86	3,2	2,8
1,2	330	0,92	3,5	3,2
1,2	360	0,99	3,7	3,7
1,5	400	1,06	3,9	4,1
2,6	440	1,15	4,2	4,8
28	480	1,25	4,6	5,8
15	520	1,4	5,1	7,1
21	545	1,52	5,6	8,5

Tabulka 18: Naměřené hodnoty ztrátových výkonů a tlaků při daných teplotách drátu při měření závislostí ztrátových výkonů na izolaci proti záření. Měření prováděno bez alobalu těsně obaleným okolo trubičky s topným drátem a dvěma vzdálenými štíty z mědi. Uspořádání pro měření vyšších teplot.

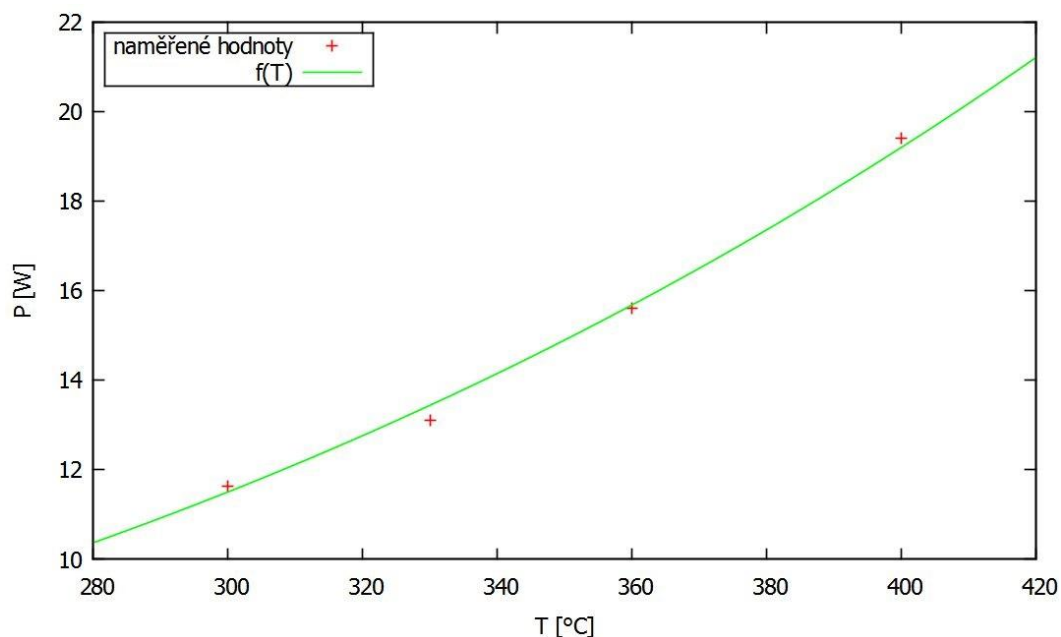
p [mPa]	t{drátu pt100} [°C]	I [A]	U [V]	P [W]
2,1	300	1,4	5,2	7,3
2,2	330	1,52	5,6	8,5
1,6	360	1,68	6,1	10,2
2,6	400	1,92	7	13,4
4,8	440	2,16	7,9	17,1
13	480	2,48	9,1	22,6
15	520	2,83	10,3	29,1
16	545	3,03	11,2	33,9

Tabulka 19: Naměřené hodnoty ztrátových výkonů a tlaků při daných teplotách drátu při měření závislostí ztrátových výkonů na izolaci proti záření. Měření prováděno bez alobalu těsně obaleným okolo trubičky s topným drátem a dvěma vzdálenými štíty z niklu. Uspořádání pro měření vyšších teplot.

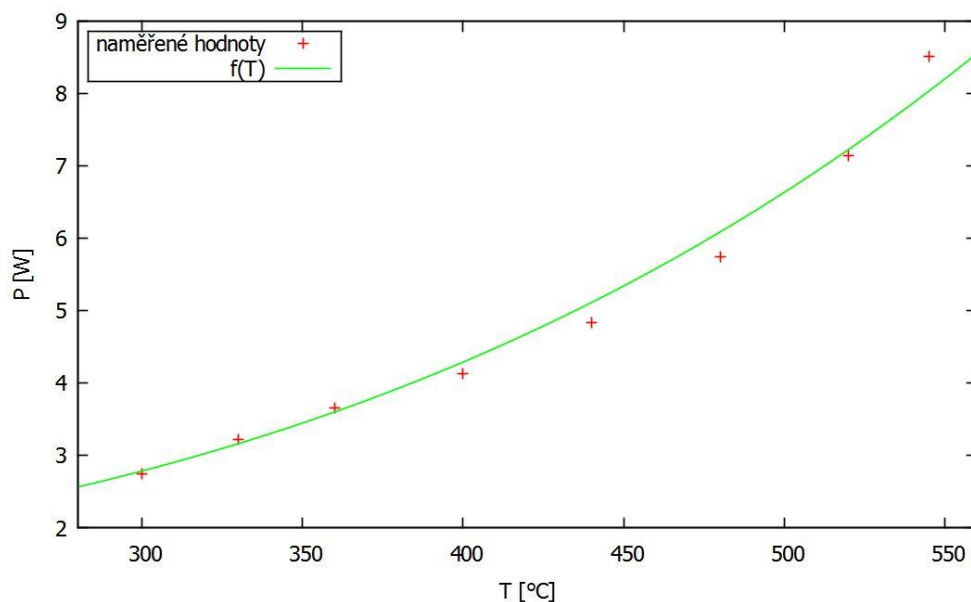
p [mPa]	t{drátu pt100} [°C]	I [A]	U [V]	P [W]
3,1	300	1,37	5,1	7,0
3,1	330	1,44	5,3	7,6
8,8	360	1,54	5,7	8,8
8,0	400	1,69	6,1	10,3
8,3	440	1,91	6,9	13,2
2,2	480	2,11	7,7	16,2
2,2	520	2,28	8,3	18,9
2,1	545	2,41	8,7	21,0

Tabulka 20: Naměřené hodnoty ztrátových výkonů a tlaků při daných teplotách drátu při měření závislosti ztrátových výkonů na izolaci proti zářením. Měření prováděno bez alobalu těsně obaleným okolo trubičky s topným drátem a dvěma vzdálenými štíty z alobalu. Uspořádání pro měření vyšších teplot.

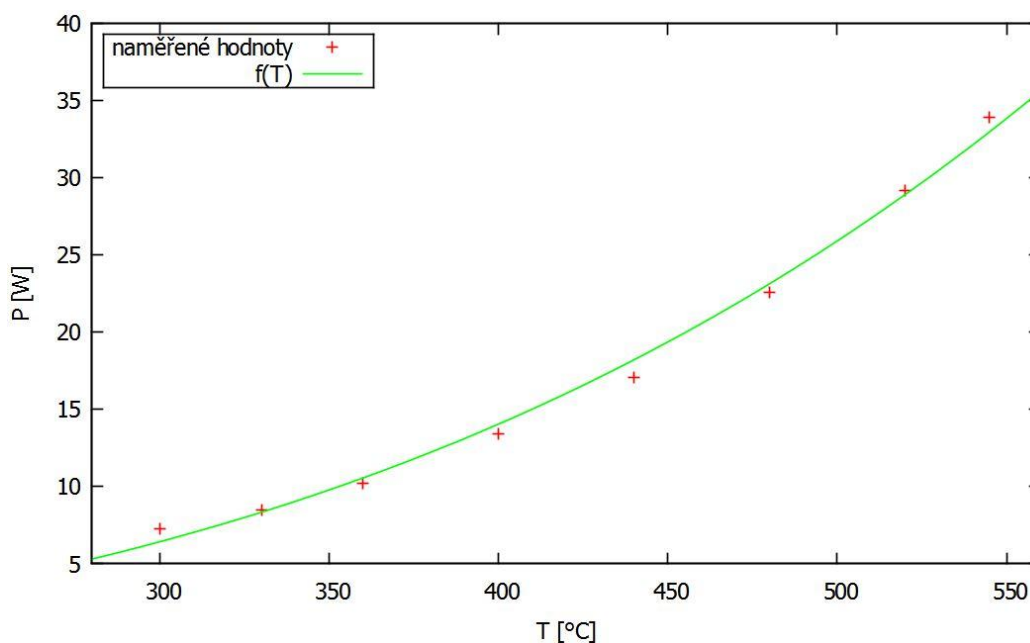
p [mPa]	t{drátu pt100} [°C]	I [A]	U [V]	P [W]
2,9	300	1,37	3,8	5,2
3,1	330	1,44	4,2	6,0
5,6	360	1,54	4,6	7,1
4,3	400	1,38	5,0	6,9
4,0	440	1,54	5,7	8,8
3,3	480	1,74	6,4	11,1
2,7	520	1,93	7,1	13,7
2,1	545	2,04	7,5	15,3



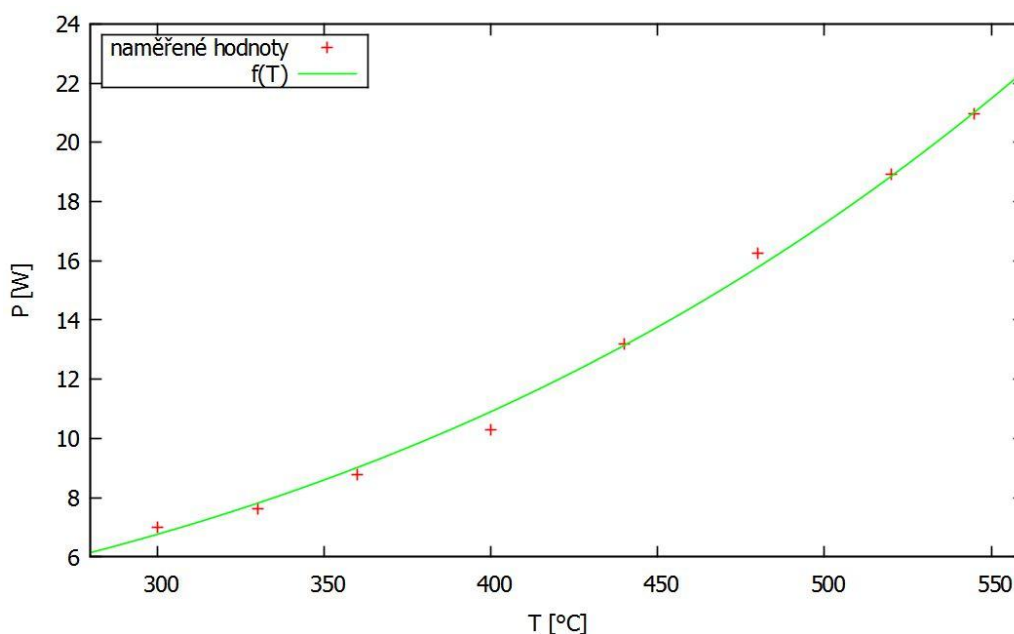
Obrázek 36: Graf závislosti ztrátových výkonů na teplotě drátu při měření závislosti ztrátových výkonů na izolaci proti záření. Měření prováděno bez jakýchkoliv vzdálených štítů i bez alobalu těsně přitisknutého na trubičku s topným drátem. Data proložena funkcí $f(T) = 7,8 \cdot 10^{-11}T^4 + 1 \cdot 10^{-3}T + 2,8$ metodou nejmenších čtverců. Uspořádání pro měření vyšších teplot.



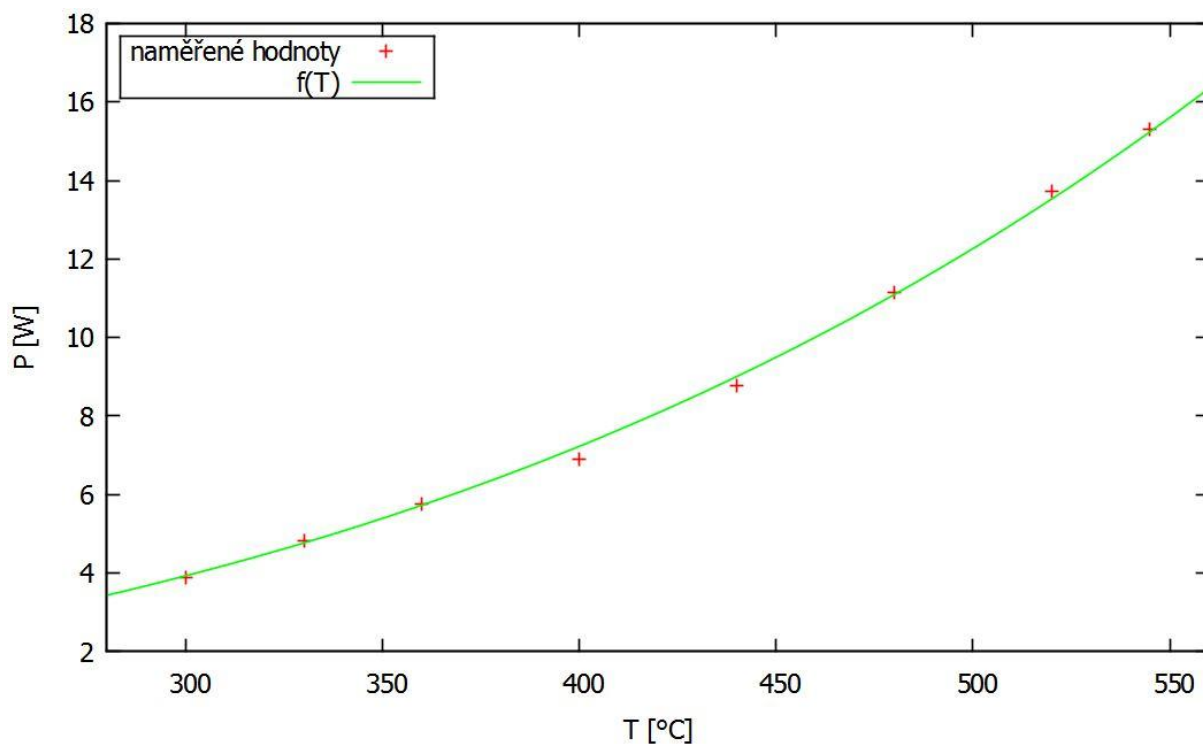
Obrázek 37: Graf závislosti ztrátových výkonů na teplotě drátu při měření závislosti ztrátových výkonů na izolaci proti záření. Měření prováděno s alobalem těsně obaleným okolo trubičky s topným drátem a dvěma vzdálenými alobalovým štíty. Data proložena funkcí $f(T) = 1,5 \cdot 10^{-11}T^4 + 0,1 \cdot 10^{-3}T + 1,1$ metodou nejmenších čtverců. Uspořádání pro měření vyšších teplot.



Obrázek 38: Graf závislosti ztrátových výkonů na teplotě drátu při měření závislosti ztrátových výkonů na izolaci proti záření. Měření prováděno bez odrazivé vrstvy těsně obalené okolo trubičky s topným drátem, ale dvěma vzdálenými měděnými štíty. Data proložena funkcí $f(T) = 7,8 \cdot 10^{-11}T^4 + 0,5 \cdot 10^{-3}T - 2,1$ metodou nejmenších čtverců. Uspořádání pro měření vyšších teplot.



Obrázek 39: Graf závislosti ztrátových výkonů na teplotě drátu při měření závislosti ztrátových výkonů na izolaci proti záření. Měření prováděno bez odrazivé vrstvy těsně obalené okolo trubičky s topným drátem, ale dvěma vzdálenými štíty z niklu. Data proložena funkcí $f(T) = 4,0 \cdot 10^{-11}T^4 + 2,0 \cdot 10^{-3}T + 1,8$ metodou nejmenších čtverců. Uspořádání pro měření vyšších teplot.



Obrázek 40: Graf závislosti ztrátových výkonů na teplotě drátu při měření závislosti ztrátových výkonů na izolaci proti záření. Měření prováděno bez odrazivé vrstvy těsně obalené okolo trubičky s topným drátem, ale dvěma vzdálenými štíty z alobalu. Data proložena funkcí $f(T) = 3,2 \cdot 10^{-11}T^4 + 2,0 \cdot 10^{-3}T - 0,1$ metodou nejmenších čtverců. Uspořádání pro měření vyšších teplot.

Tabulka 21: Naměřené hodnoty teplot a tlaků při daných časech při měření časového průběhu teplot při výkonu 21 W. Měření prováděno pro konfiguraci pro měření vyšších teplot při vzdálené izolaci ze dvou vrstev hliníku a bez jakékoliv další odrazivé vrstvy přímo na trubičce s topným drátem.

t [min]	t{drátu pt100} [°C]	t{drátu termoč.} [°C]	p [mPa]
0	28	27	4,5
1	49	48	4,8
2	109	108	4,6
3	188	187	4,5
4	263	262	4,3
5	322	321	4,0
6	369	368	3,8
7	403	402	3,5
8	432	430	3,1
9	456	454	2,9
10	476	474	2,8
12	507	505	2,6
14	532	530	2,7
16	549	547	2,8
16,2	550	547	2,8

Tabulka 22: Naměřené hodnoty teplot a tlaků při daných časech při měření časového průběhu teplot při výkonu 21 W. Měření prováděno pro konfiguraci pro měření vyšších teplot při vzdálené izolaci ze dvou vrstev mědi a bez jakékoliv další odrazivé vrstvy přímo na trubičce s topným drátem.

t [min]	t{drátu pt100} [°C]	t{drátu termoč.} [°C]	p [mPa]
0	28	28	4,7
1	48	48	5,5
2	116	115	4,9
3	205	204	4,7
4	280	279	4,5
5	333	332	4,4
6	374	372	4,0
7	405	403	3,8
8	428	426	3,7
9	446	444	3,5
10	461	458	3,4
12	481	478	3,1
14	493	490	2,9
16	504	501	2,6
18	512	509	2,4
20	521	518	2,2

Tabulka 23: Naměřené hodnoty teplot a tlaků při daných časech při měření časového průběhu teplot při výkonu 21 W. Měření prováděno pro konfiguraci pro měření vyšších teplot při vzdálené izolaci ze dvou vrstev niklu a bez jakékoliv další odrazivé vrstvy přímo na trubičce s topným drátem.

t [min]	t{drátu pt100} [°C]	t{drátu termoč.} [°C]	p [mPa]
0	28	28	4,2
1	48	48	4,9
2	118	117	4,9
3	211	210	4,8
4	290	289	4,1
5	347	345	3,8
6	388	386	3,5
7	419	417	3,3
8	442	439	3,2
9	460	458	3,0
10	474	472	2,9
12	494	492	2,7
14	508	505	2,5
16	517	514	2,3
18	523	520	2,1
20	528	525	2,0