



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

MĚŘENÍ TEPLoty PYROMETRY

TEMPERATURE MEASUREMENT USING THE PYROMETERS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Denis Holík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Kamil Podaný, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Denis Holík**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Kamil Podaný, Ph.D.**
Akademický rok: 2019/20

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

Měření teploty pyrometry

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedná se o zpracování aktuální literární studie metod bezkontaktního měření teploty pomocí pyrometrů. Součástí práce bude rozbor jejich významu a příklady použití ve strojírenské praxi.

Cíle bakalářské práce:

- provést průzkum v oblasti bezkontaktního měření teploty,
- popsat princip měření,
- zhodnotit využitelnost a problémy,
- uvést příklady použití v praxi.

Seznam doporučené literatury:

ČECH, Jaroslav, Jiří PERNIKÁŘ a Kamil PODANÝ. Strojírenská metrologie. Skriptum FSI VUT v Brně, 4. přeprac. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2005. 176 s. ISBN 80-214-30-0-2.

KŘÍŽ, Rudolf a Pavel VÁVRA. Strojírenská příručka - 2. Sv. D: Měřicí technika a bezdemontážní diagnostika. 1. vyd. Praha: SCIENTIA, spol. s.r.o., 1993. 224 s. ISBN 80-85827-00-X.

ZEHNULA, Karel. Snímače neelektrických veličin. 2. vyd. Praha: SNTL, 1983. 371 s.

JENČÍK, Josef a Jaromír VOLF. Technická měření. 1. vyd. Praha: ČVUT, 2000. 212 s. ISBN 80-0-02138-6.

SVOBODA, Miroslav. Měření teploty v energetice a průmyslu. Allforpower [online]. 2009 [cit. 2012-0-22]. Dostupné z: <http://www.allforpower.cz/clanek/mereni-teplotyv-energetice-a-prumyslu/>

VDOLEČEK, František. Technická měření. Brno, 2002. Dostupné z:
<http://autnt.fme.vutbr.cz/lab/a1-731a/ETC.pdf>

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

HOLÍK Denis: Měření pyrometry

Práce se zabývá řešením a rozбором informací o principech fungování pyrometrů. Rozebrána je jak komplexní problematika jednotlivých druhů pyrometrů a možnost jejich praktického využití, tak základní chyby bezkontaktního měření teploty. Parametry jednotlivých druhů pyrometrů jsou zpracovány ve formě tabulky.

Klíčová slova: pyrometr, měření teploty, záření, emisivita

ABSTRACT

HOLÍK Denis: Temperature measurement using the pyrometers

The thesis is pursuing research and analysis of information about function principles of pyrometers. Complex problematic of particular types of pyrometers and options of practical use is analysed. Basic errors of contactless temperature measurement are also included. Parameters of particular types of pyrometers are processed in the form of a table.

Keywords: pyrometer, temperature measurement, radiation, emissivity

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HOLÍK, Denis. *Měření teploty pyrometry* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124826>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Ing. Kamil Podaný, Ph.D

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma *Měření teploty pyrometry* vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně dne

Denis Holík

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji Ing. Kamilu Podanému, Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování bakalářské práce.

Velmi děkuji také svým rodičům, kteří mě při studiu podporovali. Přátelům a blízkým, kteří mi při psaní práce byli oporou, patří taktéž značné díky.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

	Str.
ÚVOD	9
1 PRINCIP	10
2 PYROMETRY	13
2.1 Subjektivní	14
2.1.1 Jasové	14
2.1.2 Barvové	16
2.2 Objektivní	17
2.2.1 Pásmové	19
2.2.2 Poměrové	22
2.2.3 Pyrometry celkového záření	24
2.3 Chyby spojené s měřením	25
3 ZHODNOCENÍ	26
4 ZÁVĚRY	27

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratek

Seznam obrázků

Seznam tabulek

Seznam příloh

Seznam výkresů

ÚVOD [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7]

Teplota je významnou veličinou, na které závisí mnoho vlastností materiálu. Zejména v kovozpracujícím průmyslu ale nejen tam je na ni kladen značný důraz. Její znalost je zásadní pro bezpečný, ekonomický průběh výroby a zpracování ocelí i ostatních technických slitin.

Teplotu lze měřit dvěma způsoby – kontaktně nebo bezkontaktně. Při použití kontaktní metody je nejčastěji využíváno termočlánků, které mají často omezený počet použití a pokud na zkoumané těleso v důsledku jeho pohybu, malých rozměrů nebo příliš vysokých teplot nelze umístit snímač, není s nimi možné měřit. V tomto případě je nutné využít bezkontaktních způsobů měření, které jsou rozděleny do dvou základních skupin. Objekt lze sledovat s využitím zobrazovacích metod, které vykreslují teplotu povrchu pomocí barevné škály a tím jasně informují o jeho problémových částech. Tam, kde není třeba znát celkový teplotní profil a je jasné, co má být měřeno, jsou použity infračervené teploměry neboli pyrometry.

Následkem postupujícího vývoje a technologie dnes může být nalezeno mnoho druhů pyrometrů využívajících k dosažení výsledku různých metod. Pro každou lze najít patřičnou oblast uplatnění, ale také z nich plynoucí chyby. Cílem této práce je seznámení čtenáře se základními principy spojenými s fungováním bezkontaktního měření teploty a jeho zasloužení do problematiky dnes dostupných měřidel, jejich řazení, výhod, nevýhod a limitů.

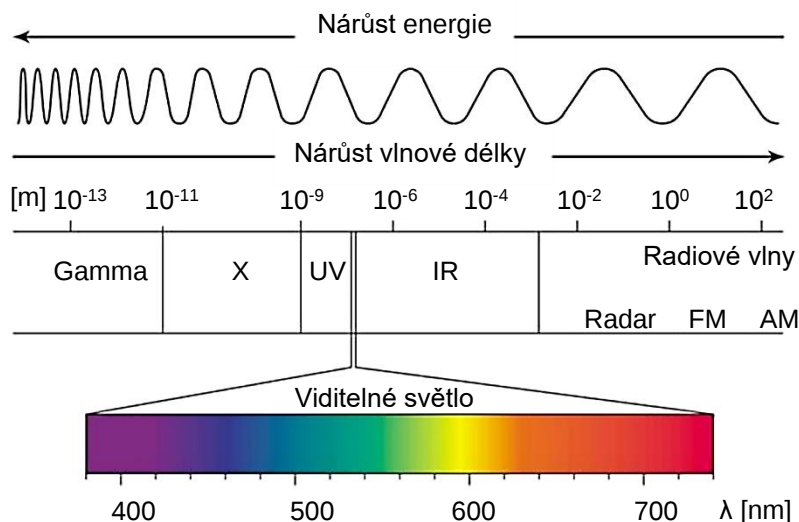


Obr. 1 Měření pyrometry [5], [6], [7]

1 PRINCIP [1], [2], [3], [4], [8], [9], [10], [11]

Pro správné pochopení fungování pyrometrů je třeba znát principy a zákony spojené s vyzařováním energie, kterou do svého okolí vysílají všechna tělesa vyskytující se v prostoru o teplotě vyšší, než je absolutní nula. Toto elektromagnetické záření o různých vlnových délkách je emitováno pohybem atomů sledovaného objektu, což u pevných látek, plynů a kapalin platí přibližně do 4250 K.

Jak je zobrazeno na obrázku 2, záření lze podle vlnové délky dělit do skupin. Jedna z kategorií – nejvíce vnímána člověkem – je nazývána viditelné světlo, které nabývá vlnových délek od 380 do 740 nm, což je nepatrným zlomkem celého spektra. Proto je nutno sledovat také infračervené (IR) záření, které není viditelné lidským okem, ale přesto je člověkem zaznamenáno v podobě tepla.



Obr. 2 Spektrum elektromagnetického záření [11]

Každý předmět záření nejen vysílá, ale také pohlcuje, odráží a propouští. Toto je graficky znázorněno na obr. 3. S využitím zákona zachování energie lze určit jeho celkové množství:

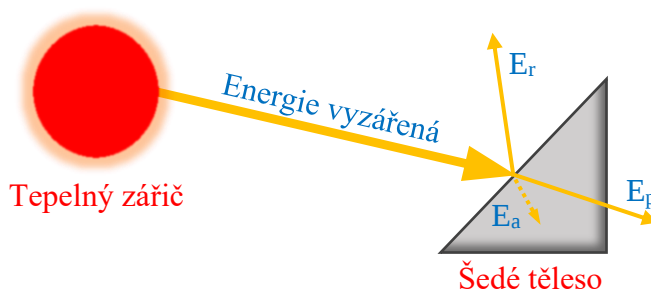
$$E = E_r + E_a + E_p [J], \quad (1.1)$$

kde: E_r – energie vyzářená,
 E_a – e. absorbovaná,
 E_p – e. propuštěná.

Pro snadnější měření vyzářené energie byl zaveden pojem dokonale nebo také absolutně černé těleso, což je objekt, který pohltí 100 % záření dopadajícího na svůj povrch, tudíž žádné nepropustí ani neodrazí, veškerá energie tak přejde do změny jeho teploty. Zároveň je ideálním zářičem a při jeho srovnání s reálným předmětem o stejné teplotě, je tedy větší (maximální možné) množství energie vyslané do okolí právě černým tělesem. Tímto se zabývali vědci Stefan a Boltzman, kteří definovali zákon:

$$M_0 = \int_0^\infty M_\lambda d\lambda = \sigma T^4 [K], \quad (1.2)$$

kde: M_0 – intenzita záření od černého tělesa (podíl výkonu a plochy) [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$],
 M_λ – spektrální intenzita záření [$\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$],
 λ – vlnová délka [m],
 σ – Stefanova-Boltzmanova konstanta ($\sigma = 5,670400 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$),
 T – termodynamická teplota [K].



Obr. 3 Dopad záření na šedé těleso [2]

Říká, že intenzita záření odpovídá ploše pod křivkou teplot vyobrazených na obr. 4. Obsah této plochy je přímo úměrný čtvrté mocnině teploty.

Spektrální intenzita záření není po celé škále rozložena rovnoměrně na daných vlnových délkách zkracujících se s narůstající teplotou lze pozorovat její maxima. Z obrázku 4 je patrné, že při teplotě 6000 K, což je přibližně teplota na povrchu Slunce, je největší

množství záření vysíláno na vlnové délce odpovídající středu člověkem viditelného spektra. Tento jev byl popsán roku 1893 Wienovým zákonem posunu:

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T} [m], \quad (1.3)$$

kde: b – Wienova posunová konstanta ($b = 2897,771955 \text{ m.K}$).

Rovnice pro výpočet spektrální intenzity záření byla sestavena Maxem Planckem roku 1900:

$$M_\lambda = \frac{c_1}{\lambda^5 (e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1)} [W \cdot m^{-3}],$$

kde: c_1 – první vyzařovací konstanta ($c_1 = 3,69 \cdot 10^{16} \text{ W.m}^2$),

c_2 – druhá vyzařovací konstanta ($c_2 = (0,01438769 \pm 12 \cdot 10^{-8}) \text{ m.K}$).

Pro tento objev byl zásadní Planckův předpoklad, že energie je vyzařována nikoli spojitě, nýbrž skokově po tzv. kvantech. Díky tomuto objevu je Max Planck považován za otce kvantové fyziky.

Pro použití v technické praxi bylo k simulování absolutně černého tělesa navrženo mnoho konstrukcí, dvě jsou zobrazeny na obr. 5. Povrch materiálu je uzpůsoben tak, aby paprsek vnikl do dutiny nebo klínu a postupným odražením od stěn zanikl, čímž jim předá veškerou svou energii.

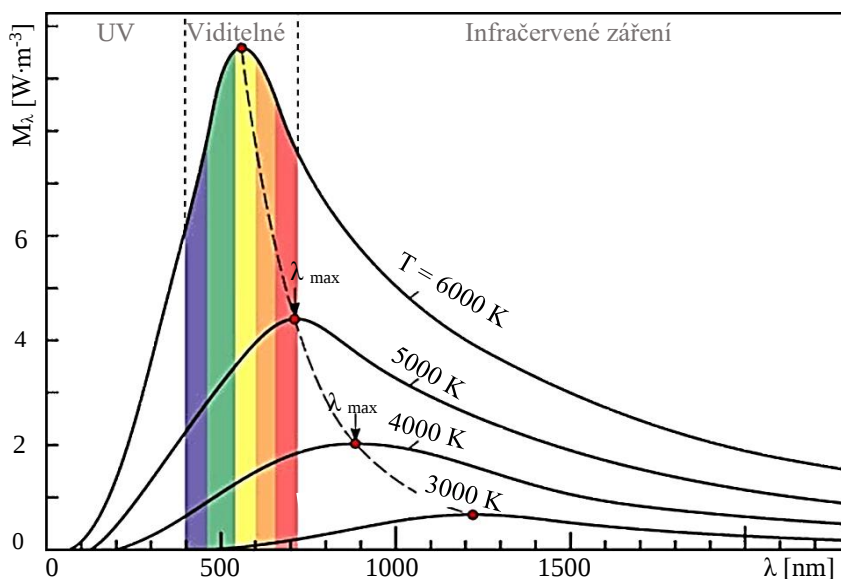
Reálné předměty se však takto nechovají, neemitují a nepohlcují záření zcela, ale pouze částečně. Pro určení rozdílu sálání je užívána emisivita, která je definována jako poměr energií vyzářených reálným a černým tělesem:

$$\varepsilon = \frac{M_r}{M_0} [-]. \quad (1.4)$$

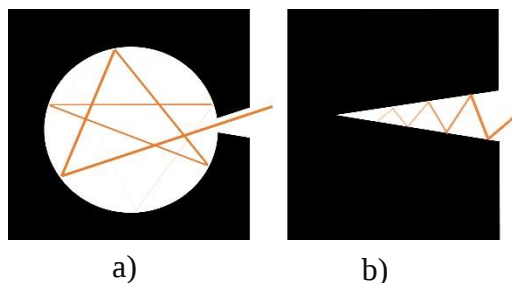
Pro černé těleso tedy platí: $\varepsilon = 1$ a pro reálné $\varepsilon \in (0; 1)$.

Podle Stefanova-Boltzmanova zákona pak záření reálného tělesa popisuje vztah:

$$M_r = \varepsilon \sigma T^4 [W \cdot m^{-2}]. \quad (1.5)$$



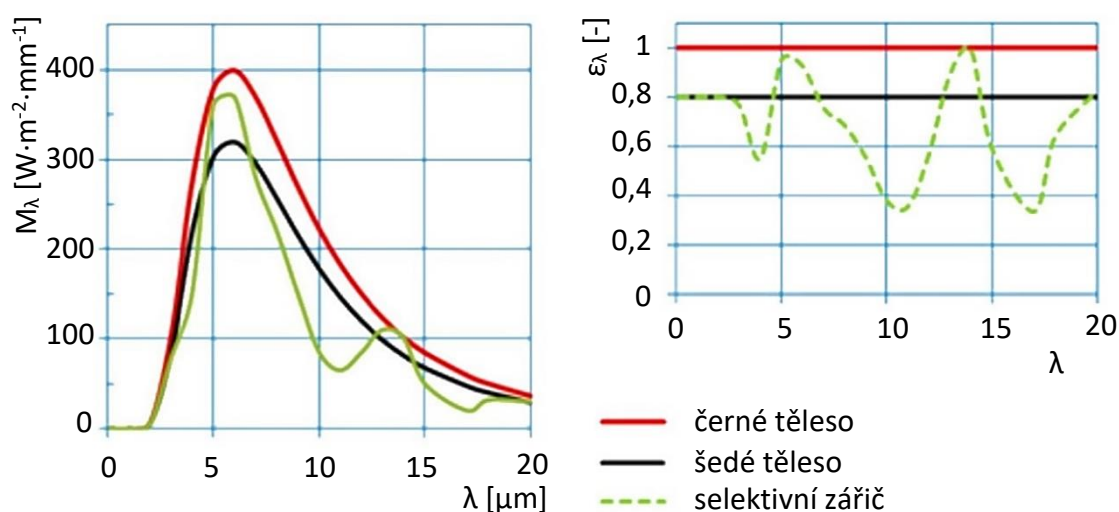
Obr. 4 Závislost elektromagnetického záření na teplotě a vlnové délce [10]



Obr. 5 Modely absolutně černého tělesa a) dutina b) klín [1]

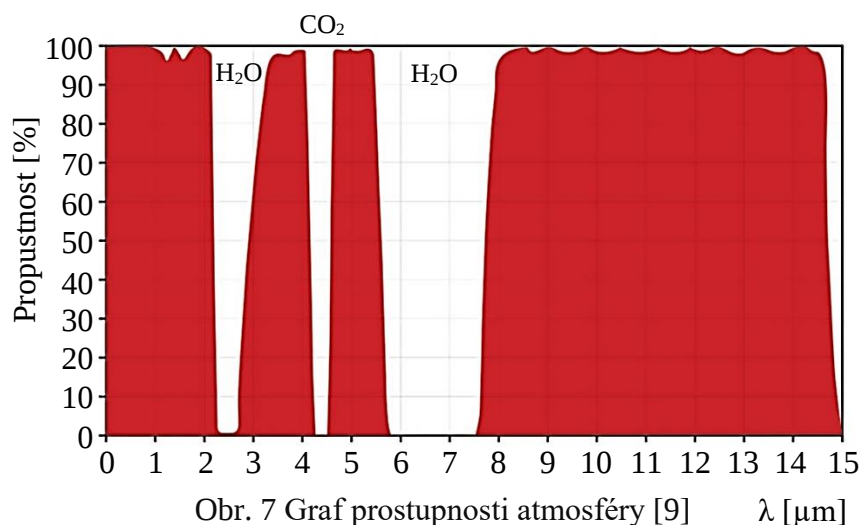
Na povrchu materiálu, jeho úpravě, teplotě a měřené vlnové délce, na tomto všem je emisivita závislá, jestliže je však neměnná na dostatečně širokém pásmu vlnových délek, lze takovýto zářič v daném rozmezí označit za tzv. šedý. Takový charakter je pro využití v pyrometrii ideální. Tmavé hrubé povrchy jsou charakterizovány vyššími hodnotami emisivity nad 0,9. U lesklých hladkých povrchů (zejména kovových) jsou sledovány nízké hodnoty do 0,5, zároveň může být pozorován jejich patrný pokles v závislosti na rostoucí sledované vlnové délce. Pro potřebu měření lze v některých případech dosáhnout konkrétní hodnoty s použitím např. k tomu určených nálepek nebo nátěrů, toto však není možné u vysokých teplot nebo při obráběcích či tvářecích procesech.

Objekty vyznačující se zásadní závislostí emisivity na sledované vlnové délce jsou nazývány selektivní (spektrální) zářiče nebo nešedá tělesa. Jejich chování je zachyceno na obrázku 6.



Obr. 6 Vyzařování a emisivita tří základních druhů zářičů [8]

Povaha selektivního pohlcování je vykazována v atmosféře běžně přítomnými plyny, které propouštějí některé vlnové délky více než jiné. Takto vzniklé oblasti propustnosti jsou často nazývány atmosférické okno. Na obrázku 7 lze pozorovat, že do 15 μm je nejvíce znát pohlcování vodní párou a oxidem uhličitým. Tuto vlastnost běžně přítomného prostředí je třeba zahrnout do problematiky správného fungování bezkontaktních měřidel.



Obr. 7 Graf propustnosti atmosféry [9]

2 PYROMETRY [1], [2], [3], [4], [12], [13], [14], [15]

Bezkontaktní měřiče teplot, které detekují elektromagnetické záření tepelné nebo světelné, jsou nazývány pyrometry (obr. 8). Toto slovo vzniklo složením řeckých slov pyr (ohně nebo žár) a metr (měřit). Měřitelné teploty se pohybují v rozmezí od -50 do $4000\text{ }^{\circ}\text{C}$ (firma Spectrodyne udává jako horní mez až $4200\text{ }^{\circ}\text{C}$), přičemž jen málo z přístrojů je schopno toto pásmo pokrýt celé, nikdy to však není v rámci jednoho měřicího rozsahu. Teplota není určována přímo, je měřeno množství záření, které vydává sledovaný objekt a na jeho základě je s použitím vyzařovacích zákonů vypočítána teplota povrchu tohoto objektu. Při měření tedy není obsluha nucena stát v bezprostřední blízkosti objektu o vysoké teplotě, což představuje značné bezpečnostní riziko. Stejně tomu je například při měření součástí pod vysokým napětím nebo v nedostupných místech. Pohybuje-li se sledované těleso, stačí jej často pro správné pořízení výsledku zacílit jen na zlomek sekundy, měření je tudíž prováděno rychleji než kontaktní metodou.

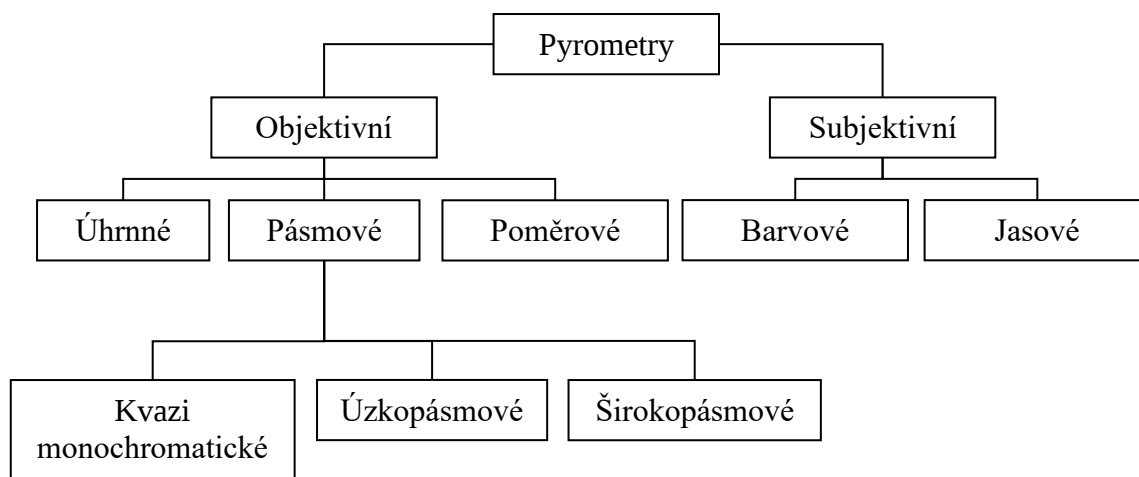


Obr. 8 Pyrometr od firmy Keller [13]

U kontaktních teploměrů může následkem nedostatečného přitlaku docházet ke zkreslení zapříčiněnému špatným spojením mezi sondou a stěnou zkoumaného objektu. V případě měření malých objektů o nízké tepelné kapacitě může být zkoumané těleso tepelně ovlivněno sondou. Ta může být v průběhu měření pohybujících se součástí (např. na dopravním páse nebo ve sklícidle soustruhu) poškozena otěrem. Bezkontaktní měření není zatíženo žádnou ze zmíněných chyb, ale rozhodně není bezchybné.

Mezi negativa spojená s pyrometry lze zahrnout fakt, že je možno měřit pouze teplotu povrchu součástí, která může být při větších rozměrech tělesa zavádějící. Významnou roli hraje také neznalost přesné emisivity povrchu, jejíž hodnota může být proměnlivá v závislosti na vlnové délce. Odchylka může být tvořena i přítomností plynů pohlcujících určité vlnové délky.

Z důvodu technologického vývoje a zvyšování přesnosti měření bylo vyvinuto mnoho konstrukcí a principů fungování, podle kterých lze pyrometry dělit do několika kategorií, viz obr. 9.



Obr. 9 Schéma rozdělení pyrometrů [8]

2.1 Subjektivní [1], [2], [3], [16], [15]

Nejstarší konstrukcí se vyznačují subjektivní pyrometry, u kterých je pro vyhodnocení záření využíváno lidského oka, které porovnává světlost měřené plochy ku referenčnímu zdroji zabudovanému v konstrukci. K provádění měření je tedy nezbytný člověk, který posuzuje přesnost seřízení přístroje, z čehož plyne subjektivní chyba způsobena rozdílnou kvalitou zraku a citlivostí na jas či barvu u jednotlivých pracovníků. Jejich zkušenost a úsudek je tedy podstatnou veličinou pro správnost a rychlost měření, což lze brát jako výhodu i nevýhodu v jednom.

Vzhledem k typu detektoru je možno sledovat pouze záření ve velmi omezeném pásmu, z čehož plyne zejména nemožnost měření nízkých teplot, kdy ještě není sledovaným objektem produkováno světlo viditelné lidským okem.

Z důvodu nemožnosti automatizace dnes na trhu není příliš rozmanitá nabídka těchto měřidel, na stránkách výrobců však mohou být stále nalezena (obr. 10).

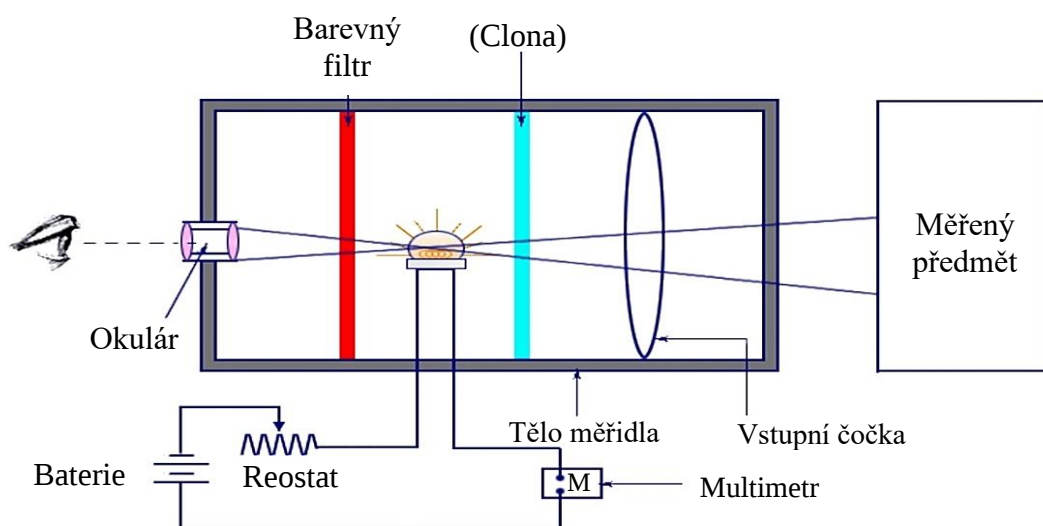


Obr. 10 DFP 2000 [15]

2.1.1 Jasové [1], [2], [3], [4], [16]

U toho druhu pyrometrů je měřena pouze intenzita záření o jedné vlnové délce, která je dána barevným filtrem. Nejčastěji užívanou barvou je červená odpovídající vlnové délce $0,65 \mu\text{m}$.

Schéma na obrázku 11 zobrazuje celkový princip fungování. Záření proniká přes vstupní čočku do tubusu měřidla, kde prochází kolem referenčního vlákna a filtrem do okuláru. Proud procházející vláknem je možno měnit za pomoci reostatu a tak upravovat jeho jas.



Obr. 11 Schéma jasového pyrometru [16]

Cílem je dosáhnout nastavení proudu, kdy vlákno na pozadí opticky zaniká, což je ukázáno na obr. 12. Nastavení je třeba provádět pomalu, jelikož žárovka reaguje na změnu proudu se zpožděním. Obrázek 12 ukazuje také případ, kdy je proud příliš vysoký a vlákno moc jasné nebo naopak.



Staré přístroje tohoto typu nejsou vybaveny možností změny emisivity, je dána pevně

Obr. 12 Nastavení jasového pyrometru [16]

výrobce nebo přístroje udávají jasovou teplotu, která by odpovídala černému tělesu o dané teplotě. Tu je po správném nastavení možno přečíst na stupnici a pro získání reálné teploty je třeba ji navýšit o část ztracenou v důsledku nedokonalého vyzařování, což je možno provést pomocí vzorce:

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_{\epsilon}} + \frac{\lambda}{c_2} \ln \epsilon_{\lambda} \quad (2.1)$$

kde: λ – použitá vlnová délka [m],
 T – skutečná teplota tělesa [K],
 T_{ϵ} – teplota jasová [K],
 ϵ_{λ} – emisivita pro vlnovou délku λ [–].

Modernějšími přístroji (obr. 10 a obr. 13) je nabízena možnost zadání emisivity a změny měřicího rozsahu, čímž je zrychleno měření a zvýšena jejich univerzálnost. Mikro PV od firmy Keller disponuje šesti pásmy měření:

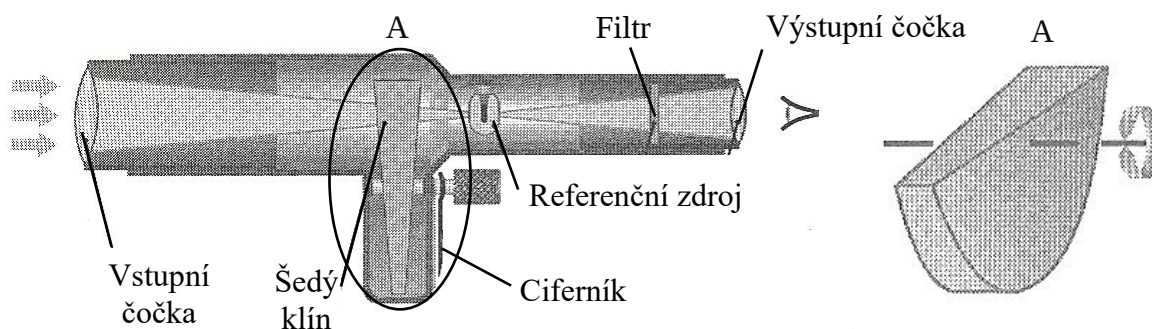
- 1. 700 až 800 °C,
- 2. 780 až 950 °C,
- 3. 900 až 1100 °C,
- 4. 1050 až 1500 °C,
- 5. 1450 až 2100 °C,
- 6. 2000 až 3000 °C.



Obr. 13 Subjektivní pyrometr od firmy Keller – Mikro PV 11 [13]

Pokud je použit přídatný filtr, je přístroj schopen měřit až do teploty 3500 °C. Podle zvoleného měřicího rozsahu se nejistota pohybuje od 0,6 do 2 %. Výrobce udává také průměrná odchylka nastavení, tedy subjektivní chyby, která dosahuje od $\pm 1,5$ do ± 10 °C.

V praxi mohou být nalezeny také vláknové pyrometry s konstantní hodnotou procházejícího proudu, které jsou vybaveny šedým klínem, jehož otáčením je zeslabována nebo zesilována záře do takové míry, že wolframové vlákno opět splyne s měřeným pozadím. Schéma lze vidět na obrázku 14. Klín je připevněn na jedné hřídeli s ručičkou ciferníku, ze které je určena hodnota teploty T_{ϵ} , která by odpovídala dokonale černému tělesu. Reálná hodnota je dopočítána z rovnice (2.1).



Obr. 14 Jasový pyrometr s šedým klínem [2]

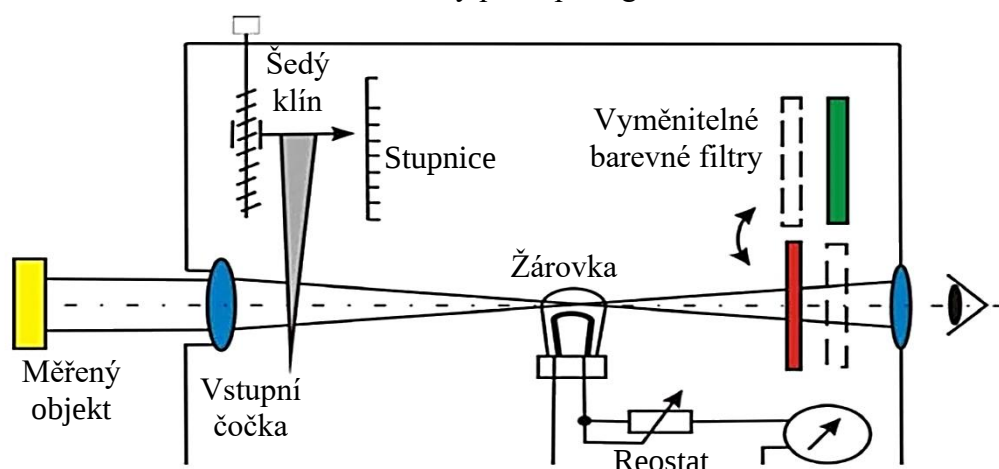
U starých jasových pyrometrů bez clony je udáván měřicí rozsah od 650 do 1500 °C, při vyšších teplotách je už jas pro oko příliš silný. Literaturou jsou běžně udávány chyby v řádu desítek až stovek °C, některé prameny uvádějí 7 až 9 % naměřené hodnoty. Je-li tedy zjištěna teplota např. 1000 °C, je třeba počítat s chybou v rozmezí od 70 do 90 °C. Přístroje mohou být

využívány například k určování teploty v kovářské výhni, kde je topeno uhlím, to vakazuje vysokou hodnotu emisivity.

Novější přístroje jsou využívány např. v laboratořích, při testování vláken žárovek nebo při slinování uranových tablet. Mezi jejich výhody patří pokročilá optika umožňující sledování malých těles o velikosti desetin milimetru a válcové zorné pole, které umožňuje měření úzkými průhledy nebo tunely. Minimální měřitelná teplota je 600–700 °C, která je v technické praxi poměrně běžná, ale ne vždy přítomná, tudíž to lze považovat za nevýhodu.

2.1.2 Barvové [1], [2], [3], [17]

Následkem obtížného určování emisivity povrchu byly vyvinuty barvové pyrometry využívající ke stanovení teploty poměr světla o dvou vlnových délkách. Nejčastěji se jedná o 0,65 a 0,55 μm odpovídající filtrům červené a zelené barvy, které jsou zobrazeny na obrázku 15, zde lze sledovat také celkový princip fungování.



Obr. 15 Schéma barvového pyrometru [17]

Otáčením šedého klínu je srovnán jas žárovky s pozadím nejdříve pomocí jednoho a následně druhého filtru, což odpovídá měření dvěma nezávislými jasovými pyrometry. Z naměřených hodnot je vypočtena barvová teplota pomocí vzorce:

$$\frac{1}{T_b} = \frac{\frac{1}{\lambda_1 T_1} + \frac{1}{\lambda_2 T_2}}{\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}} \quad (2.2)$$

kde: $\lambda_1 = 0,55 \text{ } [\mu\text{m}]$,
 $\lambda_2 = 0,65 \text{ } [\mu\text{m}]$,
 T_1 – teplota na $\lambda_1 \text{ } [\text{K}]$,
 T_2 – teplota na $\lambda_2 \text{ } [\text{K}]$.

Za předpokladu, že se těleso chová jako šedé, emisivita povrchu není do výpočtu zahrnuta, jelikož se její hodnoty navzájem odečtou, pak je barvová teplota rovna skutečné teplotě. U nešedých zářičů toto nenastává a podle [2] musí být provedena oprava odečtením hodnoty vypočítané následujícím vzorcem:

$$T_k = \frac{a \cdot T_b^2}{1 + a \cdot T_b} \text{ } [\text{K}], \quad (2.3)$$

kde: $a = 14 \text{ } 380 \text{ } [\mu\text{m} \cdot \text{K}]$.

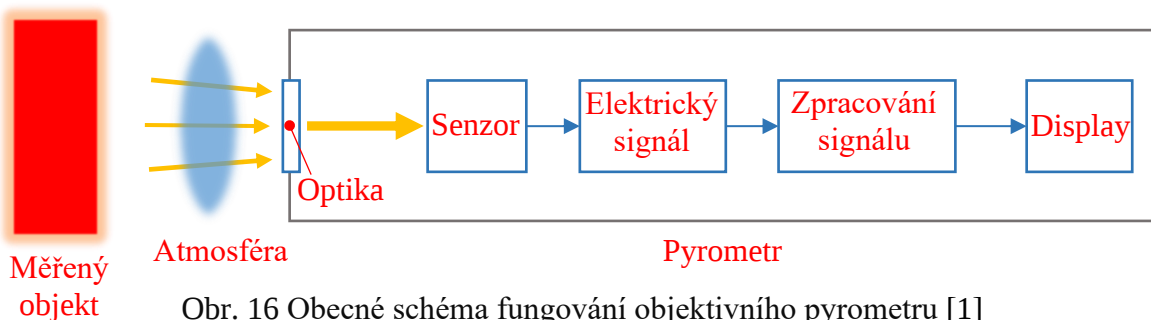
Měřitelné teploty jsou udávány od 700 do 2000 °C s chybou 1,5 až 3 % z naměřené hodnoty. Výhodou je, že při měření těles, která se chovají jako šedá, není třeba znát emisivitu.

Za nevýhodu lze považovat teplotní rozsah, který neumožňuje měření teplot pod 700 °C, a dlouhou dobu vyžadovanou pro provedení dvou samostatných měření.

2.2 Objektivní [1], [2], [3], [5], [14], [18], [19], [20]

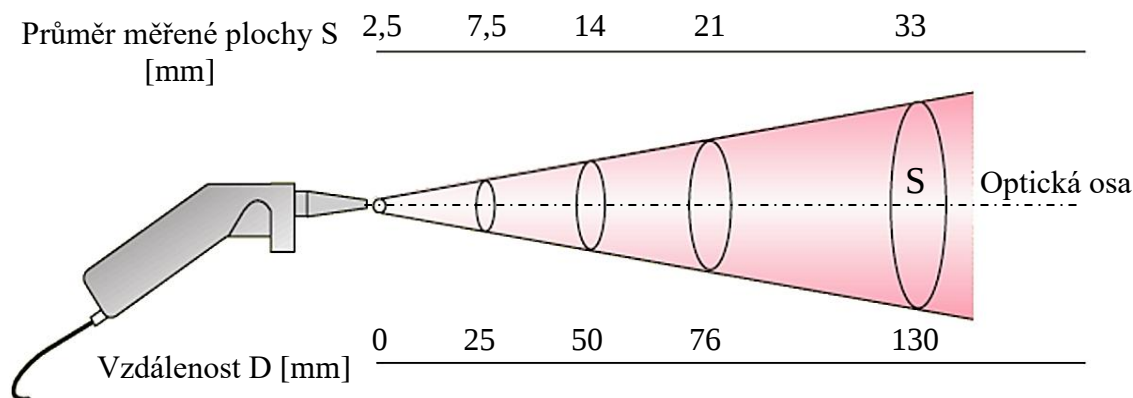
V dnešní době jsou již subjektivní pyrometry méně časté a jsou nahrazovány modernějšími, rychlejšími a snadněji použitelnými objektivními, u kterých bylo lidské oko nahrazeno elektrickým senzorem. Ten byl do konstrukce přidán za účelem zmírnění dopadu osobní chyby a umožnění automatizace měření, která je dnes na výrobních linkách velmi častá. Pyrometry nemusí mít pouze podobu ručního měřiče, ale také mohou být zhotoveny jako samostatné s počítačem propojitelné sondy uchycené do držáku. Zároveň je možno zařízení osadit senzorem citlivým na záření mimo viditelné spektrum, díky tomu je možno měřit i teploty nižší než 600 °C.

Záření je pomocí optiky koncentrováno na senzor, který v závislosti na jeho množství mění své elektrické vlastnosti – produkuje proud či mění odpor. Změna je vyhodnocována a následně zobrazena digitálním číselníkem. Princip fungování je schematicky znázorněn na obrázku 16.



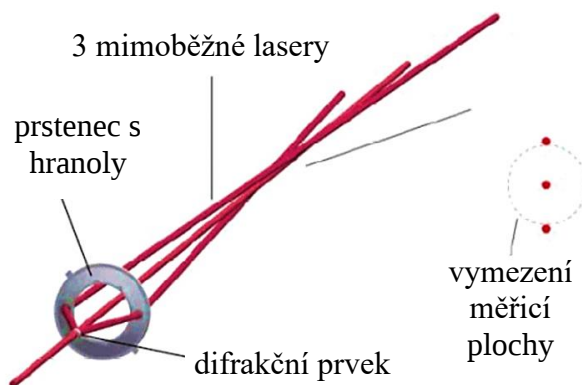
Velmi podstatnou částí aparátu, která zahrnuje čočky, zrcadla a případně clony, je optika. Plní funkci jednak ochrannou, chrání měřicí systém, a jednak filtru, propouští požadované záření a zaostřuje je na senzor.

Konfigurace optiky je popsána rozlišením, které je dáno poměrem vzdálenosti přístroje od měřeného objektu 'D' a průměrem měřené plochy 'S' (obr.17). Běžně se pohybuje od 10:1 do 300:1, ale lze najít i zařízení s jinými hodnotami nebo přídavnými objektivy, které mění hodnotu rozlišení. Vyšší optické rozlišení umožňuje zaostření na drobnější předměty při stejné vzdálenosti, to je výhodné např. v elektrotechnice. Zařízení s rozlišením přibližně 4:1 je znázorněno na obrázku 17.



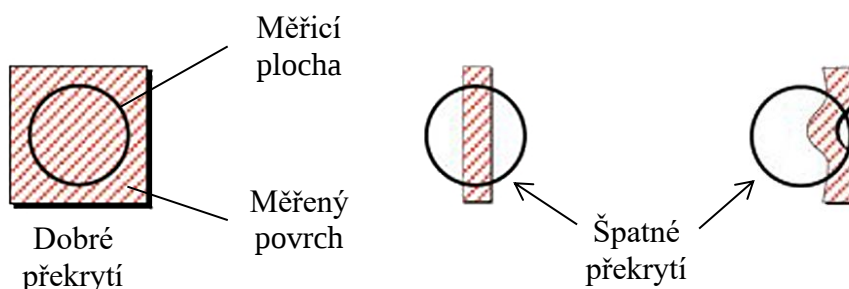
Pro snadnější používání mohou být pyrometry opatřeny jedním či více zaměřovacími lasery definujícími rozmezí měřené plochy. Jejich barva je volena s ohledem na spektrální citlivost senzoru, nejčastěji je užívána červená odpovídající $0,65 \mu\text{m}$. Tyto zaměřovače mohou být nalezeny v mnoha konstrukčních provedeních, z nichž některé jsou:

- laserový paprsek s posunem od optické osy – neukazuje přesně střed měřené plochy, což je nejvíce patrné při měření na krátké vzdálenosti,
- koaxiální laserový paprsek – nezávisle na vzdálenosti odpovídá středu měřené plochy, tvoří optickou osu pomyslného záměrného kuželu,
- dvojitý laser – dvěma body na obvodu určuje průměr měřené plochy, její velikost tak nemusí být odhadována,
- kruhový laser s posunem od optické osy – při delších vzdálenostech je vyznačena oblast větší, než je plocha měření,
- tříbodový koaxiální laser (obr. 18) – plocha je přesně popsána třemi body na jakoukoli vzdálenost



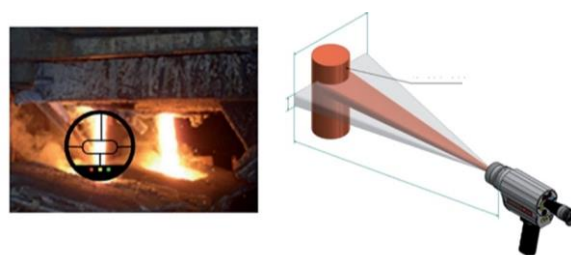
Obr. 18 Tříbodový koaxiální laser [19]

Jak je naznačeno na obrázku 19, měřicí plocha musí být zcela vyplněna zkoumaným povrchem, jinak obdržení výsledek odpovídá průměrné hodnotě zkoumaného předmětu a jeho pozadí. Důležité není jen jeho správné zacílení, ale také zaostření. Profesionální měřidla proto často disponují seřaditelným hledím, zatímco levnější přístroje lze ostřit pouze změnou jejich vzdálenosti od objektu. Lze říci, že velikost měřené plochy je úměrná sledované vlnové délce, čím je vyšší, tím je plocha větší. U stacionárních přístrojů sledujících teplotu materiálu na dopravníku je v důsledku pohybu zaostření obtížné, což je bráno v úvahu použitím určitého typu pyrometru.



Obr. 19 Pokrytí měřicí plochy [5]

Měřicí plocha vždy nemusí mít kruhový tvar, na trhu jsou dostupné i přístroje s obdélníkovým záměrným polem, které je pro jisté oblasti mnohem praktičtější. Patří mezi ně například měření povrchové teploty drátů či proudu tekoucího kovu (obr. 20), kdy roztavený materiál nestačí zoxidovat a tak vykazuje poměrně stálé hodnoty emisivity.



Obr. 20 Obdélníkové záměrné pole [18]

V případě nedostupných míst, stísněných prostor nebo překážek, které zabraňují montáži, někteří výrobci nabízejí světlovodné kabely (Williamson poskytuje 9m, Keller 25m), pomocí kterých se lze vyhnout rušivým elementům vstupujícím do zorného pole nebo docílit umístění přístroje mimo dosah nežádoucích vlivů. Kabel nainstalovaný na pyrometr, viz obr. 21, je možno uchytit do přírub inspekčních otvorů nebo jiných držáků.



Obr. 21 Zařízení se světlovodným kabelem [5]

Pro získání a zachování přesnosti měření jsou pyrometry kalibrovány pomocí kalibračních stanic (modelů černých těles), které disponují danou emisivitou povrchu velmi blízkou 1. Na trhu mohou být nalezeny typy s fixní nebo nastavitelnou teplotou sahající od -40 do 3000 °C. Toto pásmo celé nepokrývá žádný z modelů. Například přenosná stanice od firmy Fluke (obr. 22) nabízí rozsah od 100 do 500 °C s emisivitou 0,95 ($\pm 0,02$) na vlnových délkách 8 až 14 μm . Doba zahřívání činí 15 až 30 minut podle volené teploty. Ta je určena s přesností $\pm 0,5$ °C při 100 °C a $\pm 0,8$ °C při 500 °C. Dalším údajem je stabilita, která v tomto případě odpovídá $\pm 0,1$ °C při 100 °C $\pm 0,3$ při 500 °C.

Jednotný kalibrační interval není snadné určit přesně, jelikož závisí na několika faktorech spojených s používáním přístroje, podle kterých je třeba rozhodovat:

- jaká přesnost je vyžadována pro výrobu, kde je využíván,
- jak zásadní je vliv teploty v daném procesu,
- v jakých podmínkách pracuje,
- jak často pracuje.



Obr. 22 Kalibrační stanice Fluke [20]

Probíhá-li měření v prostředí těžkého průmyslu, kalibrační proces by měl být prováděn každého půl roku, obzvláště je-li kvalita produktu závislá na teplotě. Naopak je-li přístroj provozován v laboratorních podmínkách – v čistém prostředí při pokojové teplotě – interval mezi jednotlivými kalibracemi lze prodloužit. V závislosti na stálosti měření by mělo být v úvahu bráno také posouzení pracovníka.

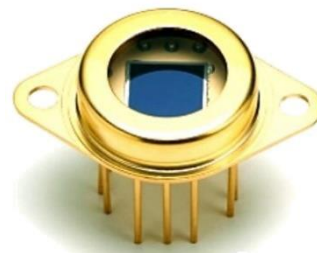
Za další hledisko pro zvážení je považována frekvence používání měřidla, které logicky vykazuje vyšší známky poškození při častějším užívání. Toto se týká jak vnějších, tak vnitřních součástí přístroje. Časté vystavení vysokým teplotám, ať při měření nebo skladování, má za následek degradaci detekčního systému, což se projevuje na snížení přesnosti a opakovatelnosti měření. V potaz by měly být brány i případné následky plynoucí z chybného měření (např. v leteckém průmyslu). Dále musí být zváženo, jaká je úroveň vystavení přístroje extrémním podmínkám.

2.2.1 Pásmové [1], [2], [3], [5], [13], [18], [19], [21], [22], [23], [24], [25]

Dnes již velmi častou metodou bezdotykového měření je použití rychle reagujících snímačů citlivých pouze na vybranou oblast vyzařovacího spektra. Podle naměřených hodnot a zadané emisivity je dopočítána teplota měřeného povrchu. Poloha a rozsah detekčního pásma je dána

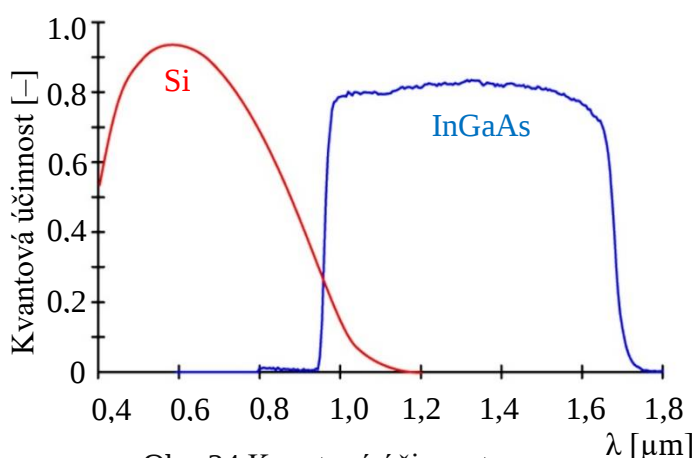
spektrální propustností použité optiky a spektrální citlivostí senzor, kterých byla vyvinuta celá řada – každý citlivý na jiné pásmo záření – nejčastější jsou:

- Se fotočlánky (oblast viditelného spektra)
- Si fotočlánky ($0,4\text{--}1,2\ \mu\text{m}$)
- InGaAs skupina ($0,7\text{--}2,7\ \mu\text{m}$)
- PbS fotoodpory ($0,7\text{--}3,0\ \mu\text{m}$)
- InSb senzory ($1,6\text{--}7,3\ \mu\text{m}$)



Obr. 23 InGaAs senzor [23]

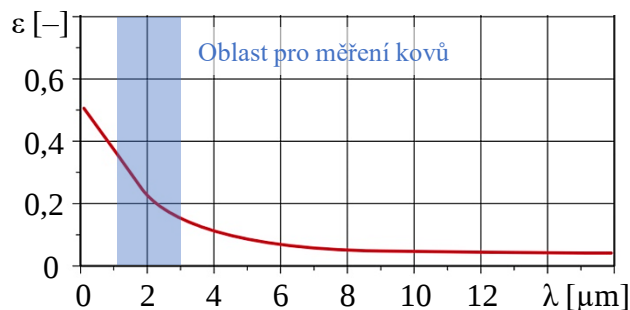
Nelze vyrobit senzor (obr. 23) citlivý pouze na jednu vlnovou délku, vždy se jedná o úzké pásmo spektra, také lze mluvit o efektivní vlnové délce, na kterou detektor vykazuje nejvyšší odezvu. Účinnost dvojice senzorů v závislosti na dopadajícím záření o různých vlnových délkách je znázorněna na obrázku 24. Typem senzoru jsou značně ovlivňovány vlastnosti pyrometru jako je například rozsah měřitelných teplot, náchylnost k rušení okolím nebo velikost chyby. Tyto parametry určují výslednou oblast použití. U převážné většiny dražších přístrojů je možno měnit hodnotu emisivity. Současně některé přístroje nabízejí funkce zpříjemňující měření např. zobrazení maximální, minimální nebo průměrné teploty.



Obr. 24 Kvantová účinnost senzorů v závislosti na vlnové délce [25]

Podle šíře sledovaného pásma mohou být pásmové pyrometry, které mohou být nalezeny také pod názvem infračervené teploměry, děleny na:

- tzv. kvazi monochromatické – jsou vybaveny senzorem citlivým pouze na úzké pásmo vlnových délek. Pro měření vysoké teploty kovů je nejčastěji sledováno $0,55$ až $3,0\ \mu\text{m}$ (obr. 25), jelikož na kratších vlnových délkách vykazují vyšší hodnoty emisivity, což vede ke snížení nároků na citlivost elektronické části zařízení a také menší náchylnosti k rušení okolními vlivy. Firmou Williamson je uváděno, že jejich přístroje detekující např. $0,9\ \mu\text{m}$ jsou schopny měřit i přes $5\text{--}13\text{mm}$ vrstvu vody nebo prach a kouř, zařízení snímající $1,6\ \mu\text{m}$ nejsou rušena vodní parou, spaliny fosilních paliv nebo plameny. Hraniční teploty měřicího rozsahu se odvíjí od dané vlnové délky, udávaná šíře rozsahu však průměrně nepřesahuje $1200\ ^\circ\text{C}$.

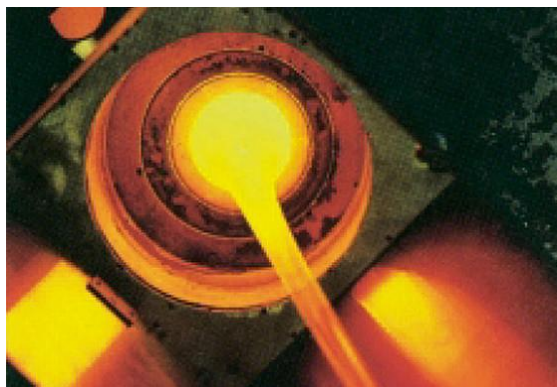


Obr. 25 Emisivita kovů v závislosti na vlnové délce [24]

- kvazi monochromatické pro speciální určení – je možno provádět měření netradičních materiálů nebo plynů a plamenů (obr. 26), za tímto účelem jsou vybaveny senzorem citlivým na vyzařovací oblast tohoto jednoho materiálu. Teplotu je možno měřit v rozmezí 100 až 2200 °C podle daného typu přístroje. Ke zjištěnému výsledku musí být započtena odchylka měření, která je firmou Williamson odhadována na 0,5 % z naměřené hodnoty nebo 2 °C. Jako směrodatná je vždy brána vyšší z těchto dvou hodnot. Keller udává přesnost na 1 % při rozsahu 500 až 1600 °C. Na trhu jsou poskytována zařízení citlivá v různých spektrálních oblastech. Ta jsou určena pro měření teploty rozličných materiálů, mezi které patří například:

- 1,86 μm – plameny vzniklé spalováním vodíku, amoniaku nebo uhlovodíku (375–1750 °C),
- 3,43 μm – tenké folie z polyethylenu nebo polypropylenu (125–535 °C),
- 3,9 μm – komory plamenných pecí (500–1600 °C)
- 4,65 μm – horké spaliny fosilních paliv a plameny vzniklé spalováním CO nebo CO₂ (550–2200 °C),
- 5 μm – skleněné povrchy (60–535 nebo 260–1375 °C),
- 7,9 μm – tenké folie z polyesteru, akryláty a teflonové vrstvy (60–535 nebo 1375 °C).

- úzkopásmové – je pokryto rozmezí teplot 75–2500 °C, díky čemuž jsou využitelné např. při popouštění, kování, pájení, ale také při měření teploty keramiky, skelné taveniny (obr. 26) nebo grafitu. Sledované pásmo vlnových délek se pohybuje v intervalu 0,78–7,3 μm , nejčastěji však nepřesahuje šířku několika desetin μm . Výsledek je zatížen chybou od 0,4 do 1 % z naměřené hodnoty nebo 2–5 °C. Firmou LumaSense je uvedena hodnota

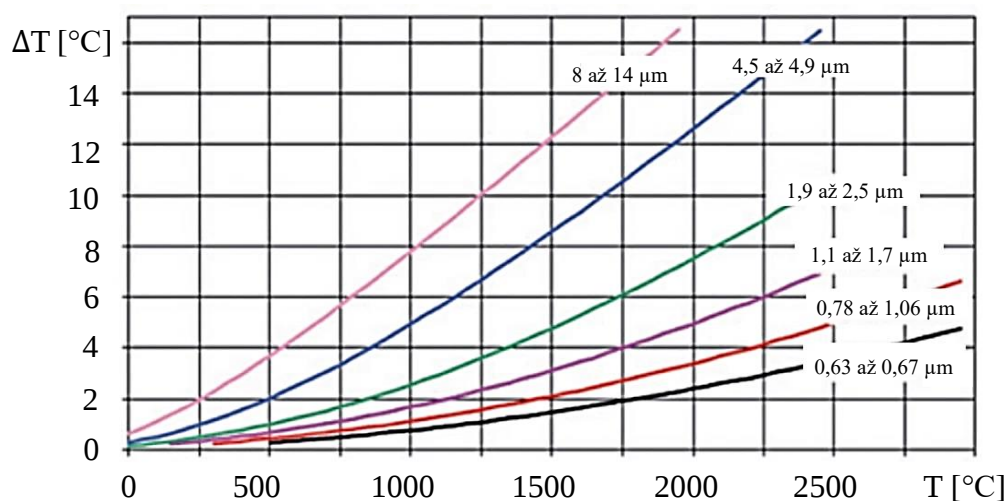


Obr. 26 Skelná tavenina [13]

0,4 % + 1 °C. Sledovaná pásma a s nimi spojené teplotní rozsahy mohou být:

- 0,78–1,1 μm (750 až 2500 °C)
- 1,45–1,8 μm (1000 až 2000 °C)
- 1,8–2,4 μm (75 až 650 °C)
- širokopásmové – nejčastěji detekující zařízení v rozsahu 8–14 μm , což umožňuje sledování běžných okolních i poměrně vysokých teplot od –40 do 1000 °C. Výrobce Testo je nejistota měření stanovena v rozmezí 1–2 % nebo 1–3 °C. Jsou využívány například ve stavebnictví nebo při kontrole správného fungování elektrických či spalovacích zařízení. V kombinaci s vpichovací sondou mohou být využívány i v gastronomii, kde jsou s jimi kontrolovány teploty mražených potravin nebo připravených jídel.

Jak je vyobrazeno na obrázku 27, jestliže jsou sledovány větší hodnoty vlnových délek dochází k markantnějším odchylkám způsobeným nepřesně zadanou emisivitou nebo rušením z okolí.

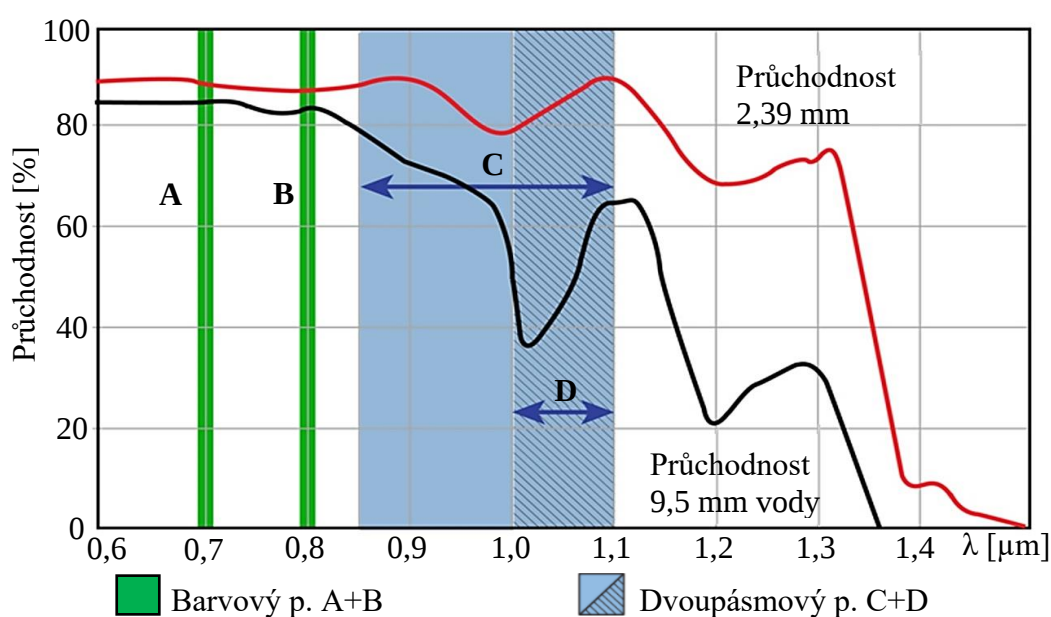


Obr. 27 Velikost chyby při 1% změně emisivity [18]

2.2.2 Poměrové [5], [6], [13], [26], [27]

Pro dosažení výsledku je intenzita záření měřena ve dvou oblastech a teplota je následně počítána na základě poměru naměřených záření, čímž je u šedých těles umožněna kompenzace neznáme emisivity. Ta následně do výpočtu nemusí být zahrnuta, protože je pro obě oblasti stejná a ve výpočtu se tak její hodnoty vykrátí. Tato zařízení mohou být rozdělena do dvou podskupin:

- Dvoupásmové – je využíváno dvojice detektorů pro snímání dvou překrývajících se intervalů, z nichž jeden odpovídá např. 0,85–1,1 μm a druhý 1,0–1,1 μm (obr. 28 pole 'C' a 'D'). Tento způsob zajišťuje kompenzaci mírných změn emisivity a drobných překážek v zorném poli. Teplota je měřitelná od 600 do 1750 °C s chybou 0,25 % z výsledku nebo 2 °C. Jako odpovídající je vždy brána vyšší z nich. Ideálním



Obr. 28 Průchodnost světla vodní vrstvou [5]

využitím je měření železných kovů bez okují rovnoměrně zahřátých nad 600 °C. Tento typ snímání není na trhu příliš častý.

- Barvové – vyšetřují dvě samostatné vlnové délky, ty však tentokrát mohou být zvoleny bez ohledu na viditelné spektrum. V závislosti na oblasti využití, tedy nejčastěji měření kovových materiálů, jsou běžně voleny dvojice krátkých vlnových délek např. 0,95 a 1,05 μm nebo 0,95 a 1,55 μm. Teplota je dopočítána pomocí následujícího vzorce:

$$T = \frac{-C_2\left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}\right)}{\ln \left[\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)^5 \cdot E \frac{M_1}{M_2} \right]} \text{ [K]}, \quad (2.4)$$

kde: M_1 – intenzita na 1. vlnové délce [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$],

M_2 – intenzita na 2. vlnové délce [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$],

λ_1 – 1. zvolená vlnová délka [m],

λ_2 – 2. zvolená vlnová délka [m],

E – emisní spád [-],

$$E = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} [-]. \quad (2.5)$$

Závislost mezi emisivitou na zvolených vlnových délkách je udávána emisním spádem, který nabývá hodnot v rozmezí 0 až 2. Šedými tělesy je vykazováno $E = 1$. Pro nešedá tělesa lze emisní spád vypočítat při daných intenzitách a vlnových délkách z rovnice (2.4). Není určeno, v jaké vzdálenosti by se od sebe měly dané vlnové délky nacházet, je však třeba brát v potaz emisní charakter většiny kovů, tudíž by měly být co možná nejblíže u sebe. S narůstajícím rozdílem emisivit je sledováno vyšší zkreslení výsledku než při měření na každé vlnové délce samostatně. Tento problém je popsán na příkladu v tabulce 1, kdy je sledována součást o teplotě 800 °C na $\lambda_1 = 0,95 \mu\text{m}$ a $\lambda_2 = 1,05 \mu\text{m}$. Sloupec 'T' odpovídá vypočtené hodnotě a sloupec ' ΔT ' chybě způsobené daným rozdílem emisivit.

Tab. 1 Odchylka spojená s nárůstem emisního spádu [24]

	$\varepsilon_1 = 0,95$ $\varepsilon_2 = 0,93$ $\Delta\varepsilon = 0,02$ $E = 1,022$		$\varepsilon_1 = 0,40$ $\varepsilon_2 = 0,38$ $\Delta\varepsilon = 0,02$ $E = 1,053$		$\varepsilon_1 = 0,40$ $\varepsilon_2 = 0,30$ $\Delta\varepsilon = 0,1$ $E = 1,33$	
Zvolený kanál	T [°C]	ΔT [°C]	T [°C]	ΔT [°C]	T [°C]	ΔT [°C]
λ_1	796	-4	731	-69	731	-69
λ_2	794	-6	723	-77	706	-94
λ_1 a λ_2	823	+23	856	+56	1164	+364

Z tabulky 1 plyne, že barvové pyrometry bez správně nastaveného emisního spádu, který bývá zadáván s přesností na tisíce, zobrazují teplotu vyšší než skutečnou. Použití těchto přístrojů je doporučováno v místech, kde je zorné pole stíněno např. kouřem nebo oknem. Jejich velkou výhodou je možnost měření objektů, které nevyplňují celé zorné pole nebo povrchů s vysokým teplotním gradientem. Zároveň vykazují nízkou citlivost na špatné zaostření měřeného objektu, jelikož poměr intenzit zůstává i v tomto případě zachován. Negativem metody je značná citlivost na změnu některé z emisivit a potřeba vysoké citlivosti senzoru, zesilovače a celkově elektroniky přístroje. Zároveň je sledována vysoká citlivost na plameny, je tedy

nutné zabránit při seřizování jejich přítomnosti v zorném poli. Výrobce Williamson udává jako dolní mez pro měření 95 °C. Ostatními firmami je však většinou uváděna teplota 300 °C. Maximální teploty se odvíjejí od vybraného modelu, nepřesahují však 3000–3300 °C. Některé přístroje firmy Keller mohou být vybaveny softwarem pro detekci míst bez oxidů a strusky. Tyto přístroje jsou používány ve slévárnách k měření teploty proudu taveniny, což vede k velkým finančním úsporám.

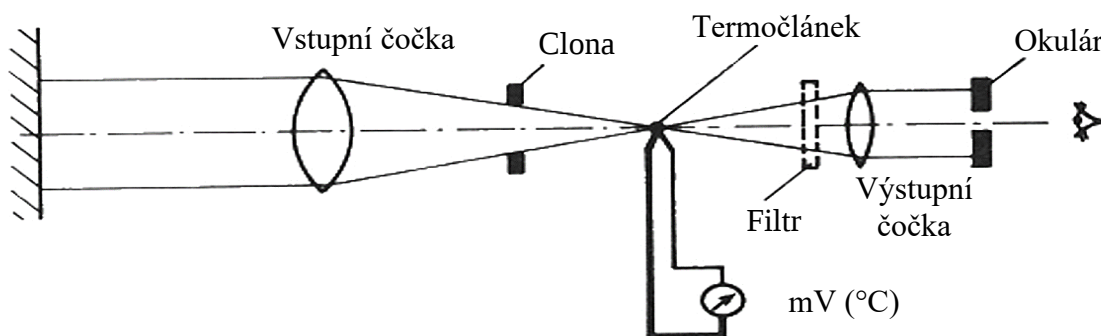


Obr. 29 Stacionární pyrometr [13]

Poměrové pyrometry jsou často využívány jako stacionární měřiče (obr. 29) v provozech, kde za definovaných podmínek sledují teplotu např. výrobků dopravovaných na pásu nebo proudu tekutého kovu.

2.2.3 Pyrometry celkového záření [1], [2], [3], [4], [12], [28]

Tato měřidla pracují na principu, sledování celkového množství vyzářené energie na všech vlnových délkách. Schéma fungování je znázorněno na obrázku 30. Tok záření prochází vstupní optikou, kterou je zacílen na detektor – termoelektrický článek, bolometr, termistor či bimetalickou spirálu. Teplota je pak zjištěna na základě jeho zahřátí. Při průchodu soustavou čoček je část záření pohlcena a odražena. V důsledku takto vzniklé ztráty by pyrometr udával nižší než skutečnou teplotu. Údaj o množství ztrátového záření je naměřen a zaznamenán při kalibraci každého z přístrojů, odpovídající teplota je připočtena k naměřené teplotě.



Obr. 30 Schéma pyrometru celkového záření [12]

Je-li měřeno šedé těleso se známou emisivitou, vztah pro skutečnou teplotu lze odvodit z rovnice (1.2) jako:

$$T_s = \frac{(T_c + T_z)}{\sqrt[4]{\varepsilon}} \text{ [K]} \quad (2.6)$$

Kde: T_c – teplota na stupnici pyrometru [K],
 T_z – teplotní ztráta [K].

Měřitelné teploty se pohybují od –40 do 2300 °C při chybě měření 1,5–2 %. Zejména citlivost a odezva na změnu je dána typem snímače. Nejčastěji jsou tyto pyrometry uplatňovány pro měření teploty v pecích (obr. 31) nebo objektů blízkým černému tělesu.

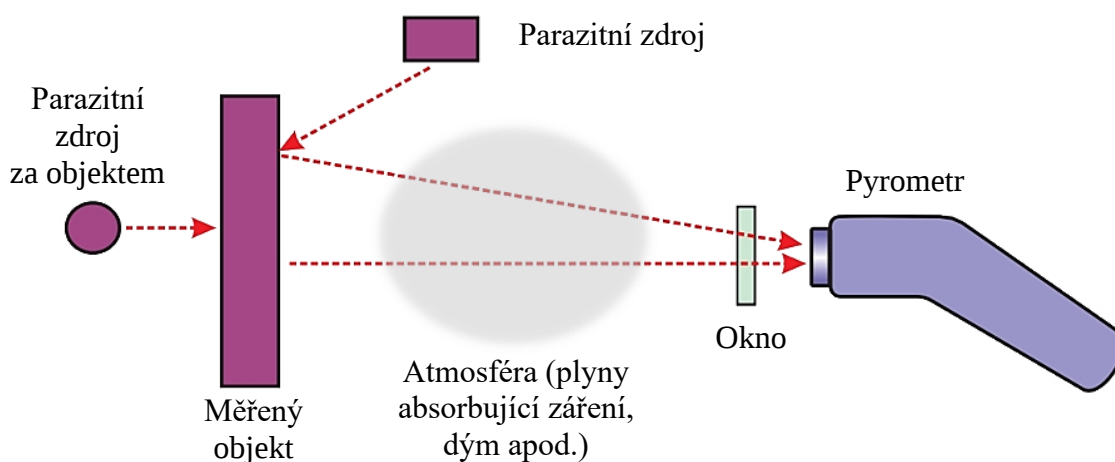


Obr. 31 Plamenná pec [28]

2.3 Chyby spojené s měřením [2], [5], [14], [24]

Konečný výsledek udávaný číselníkem měřidla může být zatížený řadou chyb, které je třeba mít na paměti a pokud možno se jim vyhnout. Některým je možno předcházet používáním měřidla podle návodu výrobce, jiným nelze zamezit, ale je možné provést jejich korekci.

Nemalé zkreslení lze pozorovat, nachází-li se v blízkém okolí měřeného objektu jiné žhavé těleso neboli parazitní zdroj (obr. 32), jehož záření dopadá na měřený povrch a odráží se do objektivu, tím zvyšuje měřenou hodnotu. Zkreslení tohoto typu lze pozorovat například při měření teploty materiálu procházejícího kontinuální pecí. Je-li těleso chladnější než stěny pece, zkreslení je znatelnější, s vyrovnávající se teplotou klesá. V takových případech lze do značné míry zamezit chybě použitím vodou chlazených záměrných představečů, které sahají co nejbliž k měřenému objektu, a tak zajišťují snížení příjmu odraženého žáru.



Obr. 32 Nejčastější příčiny chyb při měření [14]

V případě použití mimo pokojové podmínky, je třeba do přesnosti výsledku zahrnovat také vliv okolní teploty. Pro tyto účely je výrobcem pro každý přístroj stanovena konstanta ve tvaru např. 0,05 %/K. nebo 0,01 K/K. Tím je značeno, že s nárůstem teploty nad hodnotu danou návodem (obvykle 22 nebo 23 °C), je na každý °C třeba přičíst nejistotu odpovídající konstantě. Pro práci v extrémních teplotách mohou být přístroje osazeny do vodou chlazených boxů, viz obr. 33. Vliv okolní teploty je možno kompenzovat také odčítáním okolní teploty naměřené druhým pyrometrem nebo termočlánkem.

Odchytky mohou být způsobeny měřením přes okna, na kterých dochází k částečnému pohlcení, štěpení a odrazu procházejících paprsků. Této chybě nelze předejít zcela, je možno ji snížit na minimum, a to použitím vlnové délky, která není materiálem okna tolik zachycována nebo použitím barvového pyrometru. Je-li zkoumán objekt z průhledného materiálu, může být příčinou chyby měření i parazitní zářič umístěný za ním.



Obr. 33 Chladicí box [5]

3 ZHODNOCENÍ

V práci byl proveden průzkum principů fungování a oblastí využití pyrometrů. V závislosti na něm lze říci, že moderní jasové pyrometry jsou vhodné pro laboratorní zařízení, která se zabývají prací s grafitem nebo při testování nových slitin pro vlákna žárovek. Také bývají používány pro stanovení teploty malých vzorků ve vakuových pecích, které mohou být testovány ve fyzikálních, chemických nebo materiálových výzkumných centrech.

Subjektivní barvové pyrometry dnes již nejsou příliš používány, jelikož byly nahrazeny modernější verzí, která je schopna sledovat i vlnové délky mimo viditelné spektrum a zároveň eliminuje chybu spojenou s variabilitou zraku pozorovatele.

Modernější poměrové pyrometry mohou být využívány ve slévárnách při měření proudu taveniny nebo pro sledování teploty kovů v různých místech výrobní linky.

Výhodou kvazi monochromatických pyrometrů je možnost volby velmi úzkého pásma měřeného spektra, proto mohou být využívány ve speciálních aplikacích např. měření teploty plynů, plamenů nebo plastů.

Širokopásmové pyrometry disponují možností měření nízkých teplot. Proto jsou využívány v běžné praxi širokou veřejností k měření teplot v rozmezí přibližně -10 až 100 °C. Přechodem mezi kvazi monochromatickými a širokopásmovými jsou úzkopásmové.

Posledním typem popsaným v této práci jsou pyrometry úhrnné, které mohou být použity při měření objektů blízkým černému tělesu a mohou disponovat vysokou citlivostí.

Pro přehlednost byly průměrné údaje všech skupin pyrometrů zaneseny do tabulky 2. Jako údaje pro porovnání byli vybráni maximální a minimální teplota, přesnost měření a pole spektrální citlivosti, ve kterém dané přístroje měří.

Tab. 2 Souhrn parametrů a využití pyrometrů [1], [2], [3], [5], [13], [21], [22]

		Subjektivní		Objektivní			
		Jasové	Barvové	Poměrové	Pásmové		
					Kvazi mono	Úzko	Široko
Min. T [°C]		700	700	300	750	250	-40
Max. T [°C]		4000	2000	3300	2400	2500	1000
Přesnost *	%	2	1,5–3	0,25–1	0,5	0,7	0,75–2
	°C	10 °C	–	2	1–2	1–2	1–4
Spektrální citlivost [μm]		0,65	0,55 a 0,65	0,95/1,05	0,55–7,9	0,78–7,3	8–14
Využívány k měření:		Grafitu, uranu, vláken žárovek	Šedých zářičů	Taveniny ve slévárně	Taveniny Sklo Spaliny Teploty CO ₂	Kování, kalení, tepel. zprac. kovů	Stavebnictví, gastro-nomie
							Měření teploty v pecích

* $\pm$ % z naměřené hodnoty nebo $\pm$ °C (brána vyšší z hodnot)

Ze shrnutí je patrné, že sledování kratších vlnových délek vede u objektivních pyrometrů k nižší odchylce měření, nelze ale sledovat nízké teploty.

4 ZÁVĚRY

Princip fungování pyrometrů je založen na emisi elektromagnetického záření, jež vydávají měřená tělesa. Toto je popsáno Stefanovým-Boltzmanovým, Planckovým a Wienovým posunovým zákonem, kterých je využíváno pro stanovení teploty.

Obecně platí, že by nejdříve mělo být rozhodnuto pro jakou funkci bude pyrometr využíván, na základě čehož by měl být vybrán takový, který snímá nejlépe vyhovující vlnovou délku. U přístrojů se specifickým určením nebo citlivých pouze na úzké pásmo či jednu vlnovou délku je však třeba počítat s vyšší cenou. Nelze tedy stanovit univerzální řešení, pouze řešení nejlépe vyhovující danému účelu s ohledem na finanční prostředky.

Metoda subjektivních pyrometrů není vhodná pro snímání nízkých teplot a k automatizaci. Je zatížena subjektivní chybou spojenou se zrakovými možnostmi obsluhy, ale umožňuje stanovování velmi vysokých teplot, okolo 3500 °C.

Pro technickou praxi měření vysoké teploty jsou v návaznosti na emisní charakter kovů využívána objektivní zařízení snímající krátké vlnové délky okolo 1 μm . Dále jsou pro použití v technických závodech vhodné poměrové pyrometry, které jsou méně náchylné k chybám způsobeným špatnými podmínkami prostředí.

Širokopásmové pyrometry jsou vhodné pro zjišťování běžnějších neextrémních teplot (do 1000 °C) při kontrolních měřeních. Za vysokých teplot vykazují velké nepřesnosti v důsledku rušení okolními vlivy.

Úhrnné pyrometry jsou využívány pro měření teplot v pecích nebo pro měření těles s vysokou hodnotou emisivity, další možnosti využití zdroje neuvádějí.

Přesnost měření může být snižována parazitními zářiči, neznámou spektrální propustností prostředí nebo vysokou okolní teplotou, proti které je možno přístroje různými způsoby chránit. Dosažení vysoké přesnosti je také podmíněno patřičným seřízením přístrojů pro dané podmínky a přílišnou neměnností těchto podmínek. Toho lze docílit ve výrobním prostředí těžkého průmyslu nejlépe u stacionárních pyrometrů, které sledují dodržování jedné dané teploty. V ostatních případech je velmi složité dosáhnout přesného měření v důsledku neznáme emisivity.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [30]

1. ČECH, Jaroslav, Jiří PERNIKÁŘ a Kamil PODANÝ. *Strojírenská metrologie I*. Vyd. 5., V Akademickém nakl. CERM vyd. 3. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2014. ISBN 978-80-214-4010-4.
2. CHUDÝ, Vladimír. *Meranie technických veličín*. 1. vyd. V Bratislave: Slovenská technická univerzita v Bratislave, 1999. Edícia vysokoškolských učebníc. ISBN 80-227-1275-2.
3. KŘÍŽ, Rudolf a Pavel VÁVRA. *Strojírenská příručka: 24 oddílů v osmi svazcích*. Vyd. 1. Praha: Scientia, 1993. ISBN 80-85827-00-X.
4. ZEHNULA, Karel. *Snímače neelektrických veličín*. 2., uprav. a dopl. vyd. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1983. Automatizace a regulace.
5. Williamson [online]. Concord (Massachusetts): Williamson, 2018 [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: <https://www.williamsonir.com/>
6. PRECISE NON-CONTACT TEMPERATURE MEASUREMENT OF LIQUID IRON AND STEEL THANKS TO A NOVEL CSD PYROMETER. In: *FOUNDRY-PLANET.COM: THE B2B PORTAL* [online]. Füssen (Germany): FOUNDRY-PLANET, c2004-2020 [cit. 2020-05-10]. Dostupné z: <https://www.foundry-planet.com/de/d/precise-non-contact-temperature-measurement-of-liquid-iron-and-steel-thanks-to-a-novel-csd-pyrometer/>
7. Optris LS Pyrometer. *MSI: MIDSTATE INSTRUMENTS* [online]. San Luis Obispo (California): Mid-state Instruments LLC, 2020 [cit. 2020-05-10]. Dostupné z: <https://www.midstateinstruments.com/optris-ls/>
8. KADLEC, Karel. Teoretické základy bezdotykového měření (1. část). *Časopis Automa* [online]. 2014, 20(2), 13–15 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: https://www.automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/52890.pdf
9. SCOTT, Iain. How To Correctly Use a Pyrometer: Are You Measuring the Correct Temperature?. *Industrial Heating* [online]. Dronfield Derbyshire (England): BNP Media, 2020 [cit. 2020-05-09]. Dostupné z: <https://www.industrialheating.com/articles/92857-how-to-correctly-use-a-pyrometer>
10. Black body radiation. *Online Astronomy Classes* [online]. Kathryn Zadrozny Hadley, 2020 [cit. 2020-05-15]. Dostupné z: <http://sites.science.oregonstate.edu/~hadlekat/COURSES/ph207/radiation207/blackbody-radiation.html>
11. The Electromagnetic Spectrum: the family of Light. *Cyberphysics.co.uk* [online]. (England): Cyberphysics, 2020 [cit. 2020-05-09]. Dostupné z: <https://www.cyberphysics.co.uk/topics/light/emspect.htm>
12. Typy pyrometrů. *Maryshfmmi* [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <http://www.maryshfmmi.webzdarma.cz/pmt.htm>
13. *Keller: infrared temperature solutions* [online]. Ibbenbüren (Německo): KELLER HCW [cit. 2020-06-20]. Dostupné z: <https://www.keller.de/de/its/pyrometer/>
14. KADLEC, Karel. Teoretické základy bezdotykového měření (2. část). *Časopis Automa* [online]. 2014, 20(4), 24–26 [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: https://www.automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/52626.pdf

15. DFP 2000. *Spectrodyne, Inc.* [online]. Quakertown (Pennsylvania): Spectrodyne, 2020 [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: <http://www.spectrodyne.com/DFP2000/>
16. Optical Pyrometer. *Instrumentation Today* [online]. Instrumentation-Electronics, 2020 [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: <http://www.instrumentationtoday.com/optical-pyrometer/2011/08/>
17. SEGEŤA, Petr. *Bezdotykové měření teploty*. Brno, 2012.. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Kamil Podaný, Ph.D.
18. SOVA, Jan a Jan KOVÁŘ. Termokamery a pyrometry. *Časopis Automa* [online]. 2014, **20**(2), 16–22 [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: https://www.automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/52891.pdf
19. HUŠEK, Miloš. Princip bezdotykového měření teploty. *QTEST* [online]. QTEST, c2011–2017 [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: <http://www.qtest.cz/bezdotykove-teplomery/bezdotykove-mereni-teploty.htm>
20. *Tiger Supplies: Fluke 1658205 9130 Series Portable Infrared Calibrator* [online]. Tiger Supplies, c2010–2020 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: https://www.tigersupplies.com/Products/9130-Series-Portable-Infrared-Calibrator__FLU1658205-.aspx
21. *Majer* [online]. Havířov: PyrometrCZ.cz, 2017 [cit. 2020-06-24]. Dostupné z: <https://www.pyrometrcz.cz/>
22. *Testo: Be sure.* [online]. Testo, 2020 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.testo.com/cz-CZ/>
23. Coaxial InGaAs Pin Photodiode/Optical Detectors 1000um 2000um. *Gtel* [online]. Shenzhen YiGuDian Technology [cit. 2020-06-24]. Dostupné z: <http://www.gtellaser.com/laser-diode/photodiode-module/coaxial-ingaas-pin-photodiode-optical.html>
24. BOOK, Albert. *Principle, advantages, limitations and applications of two-colour pyrometers in thermal processes*. 1. Germany: KELLER, 2015.
25. *PVEDUCATION.ORG* [online]. PVEducation, 2019 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.pveducation.org/>
26. LOWE, Dave, Graham MACHIN a Mohamed SADLI. Correction of temperature errors due to the unknown effect of window transmission on ratio pyrometers using an in situ calibration standard. *Measurement* [online]. 2015, **68**, 16–21 [cit. 2020-06-05]. DOI: 10.1016/j.measurement.2015.02.043. ISSN 02632241. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263224115001013>
27. MODERN TEMPERATURE MEASURING SAVES SEVERAL THOUSAND EUROS OF RUNNING COSTS. *FOUNDRY-PLANET.COM* [online]. Füssen (Germany): FOUNDRY-PLANET, 2020 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.foundry-planet.com/de/d/modern-temperature-measuring-saves-several-thousand-euros-of-running-costs/>
28. SMITH, Anthony. How to Measure Temperature Without Contact. *CALEX* [online]. Calex Electronics, 2020 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.calex.co.uk/how-to-measure-temperature-without-contact/>
29. HUANG, Yunwei, Mujun LONG, Dengfu CHEN, Huamei DUAN, Kai TAN, Lintao GUI a Tao LIU. A new wavelength selection criterion for two-color pyrometer interfered

- with participating media. *Infrared Physics & Technology* [online]. 2018, **93**, 136-143 [cit. 2020-06-05]. DOI: 10.1016/j.infrared.2018.07.022. ISSN 13504495. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1350449518302184>
30. CITACE PRO: *Generátor citací* [online]. Brno: Citace.com, 2015 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.citacepro.com/>

Seznam použitých symbolů a zkratek

Označení	Legenda	Jednotka
a	koeficient korekce ($a = 14380 \mu\text{m}\cdot\text{K}$)	$[\mu\text{m}\cdot\text{K}]$
b	Wienova konstanta ($b = 2897,771955 \text{ m}\cdot\text{K}$)	$[\text{m}\cdot\text{K}]$
c_1	První vyzařovací konstanta ($c_1 = 3,69\cdot 10^{16} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$)	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}]$
c_2	Druhá vyzařovací konstanta ($c_2 = (0,01438769 \pm 12\cdot 10^{-8}) \text{ m}\cdot\text{K}$)	$[\text{m}\cdot\text{K}]$
D	Vzdálenost od měřeného objektu	$[\text{m}]$
E	Emisní spád	$[-]$
E_a	Energie absorbovaná	$[\text{J}]$
E_p	Energie pohlcená	$[\text{J}]$
E_r	Energie vyzařená	$[\text{J}]$
M_0	Intenzita záření černého tělesa	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}]$
M_r	Intenzita záření reálného tělesa	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}]$
M_λ	Spektrální hustota záření	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-3}]$
S	Průměr měřené plochy	$[\text{m}]$
T	Teplota	$[\text{K}]$
T_b	Barvová teplota	$[\text{K}]$
T_c	Teplota na stupnici	$[\text{K}]$
$T_{\check{c}}$	Teplota jasová	$[\text{K}]$
T_k	Korekční teplota	$[\text{K}]$
T_s	Skutečná teplota	$[\text{K}]$
T_z	Teplota ztráta způsobená optickým systémem	$[\text{K}]$
ε	Emisivita povrchu	$[-]$
ε_λ	Emisivita pro danou vlnovou délku	$[-]$
λ	Vlnová délka	$[\text{m}]$
λ_{max}	Maximální vyzařovaná vlnová délka pro záření při dané teplotě	$[\text{m}]$
σ	Stefanova-Boltzmanova konstanta ($\sigma = 5,670400\pm 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$)	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}]$

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Měření pyrometry [5], [6], [7]	9
Obr. 2 Spektrum elektromagnetického záření [11]	10
Obr. 3 Dopad záření na šedé těleso [2]	10
Obr. 4 Závislost elektromagnetického záření na teplotě a vlnové délce [10]	11
Obr. 5 Modely absolutně černého tělesa a) dutina b) klín [1]	11
Obr. 6 Vyzařování a emisivita tří základních druhů zářičů [8]	12
Obr. 7 Graf prostupnosti atmosféry [9]	12
Obr. 8 Pyrometr od firmy Keller [13]	13
Obr. 9 Schéma rozdělení	13
Obr. 10 DFP 2000 [15]	14
Obr. 11 Schéma jasového pyrometru [16]	14
Obr. 12 Nastavení jasového pyrometru [16]	14
Obr. 13 Subjektivní pyrometr od firmy Keller – Mikro PV 11 [13]	15
Obr. 14 Jasový pyrometr s šedým klínem [2]	15
Obr. 15 Schéma barvového pyrometru [17]	16
Obr. 16 Obecné schéma fungování objektivního pyrometru [1]	17
Obr. 17 Optické rozlišení [19]	17
Obr. 18 Tříbodový koaxiální laser [19]	18
Obr. 19 Pokrytí měřicí plochy [5]	18
Obr. 20 Obdélníkové záměrné pole [18]	18
Obr. 21 Zařízení se světlovodným kabelem [5]	19
Obr. 22 Kalibrační stanice Fluke [20]	19
Obr. 23 InGaAs senzor [23]	20
Obr. 24 Kvantová účinnost senzoru v závislosti na vlnové délce [25]	20
Obr. 25 Emisivita kovů v závislosti na vlnové délce [24]	20
Obr. 26 Skelná tavenina [13]	21
Obr. 27 Velikost chyby při 1% změně emisivity [18]	22
Obr. 28 Průchodnost světla vodní vrstvou [5]	22
Obr. 29 Stacionární pyrometr [13]	24
Obr. 30 Schéma pyrometru celkového záření [12]	24
Obr. 31 Plamenná pec [28]	24
Obr. 32 Nejčastější příčiny chyb při měření [14]	25
Obr. 33 Chladicí box [5]	25

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Odchylka spojená s nárůstem emisního spádu [24].....	23
Tab. 2 Souhrn parametrů a využití pyrometrů [1], [2], [3], [5], [13], [21], [22]	26