
VYSOKÁ ŠKOLA BAŇSKÁ - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA

Fakulta strojní

Katedra výrobních strojů a konstruování

STUDIJNÍ PODKLADY

TERMOGRAFIE

doc. Ing. František Helebrant, CSc.

Ing. Vlastimil Moni

Ing. Jan Blata

Ostrava 2010

OBSAH

PŘEDMLUVA	3
1 ÚVOD DO DANÉ PROBLEMATIKY	4
1.1 Historie dané problematiky	4
2 TEPLOTA A KONTAKTNÍ MĚŘENÍ TEPLoty	6
2.1 Základní pojmy z oboru měření teplot	6
2.2 Rozdělení kontaktního měření teploty	7
2.3 Dilatační teploměry	9
2.4 Odporové teploměry	11
2.5 Termoelektrické teploměry	13
2.6 Speciální dotykové měření teplot	14
2.6.1 Speciální dotykové senzory teploty	14
2.6.2 Indikátory teploty	15
2.7 Zabudování dotykových teploměrů	16
3 BEZKONTAKTNÍ MĚŘENÍ TEPLoty A DALŠÍ MOŽNÁ MĚŘENÍ	18
3.1 Základní veličiny	18
3.2 Rozdělení bezkontaktního měření teploty	19
3.3 Pyrometry	19
3.4 Fotografické měření teploty	21
3.5 Skenování liniové systémy	21
4 TERMOGRAFIE	23
4.1 Základní princip, pojmy a terminologie	23
4.2 Základy teorie termografie	25
4.2.1 Záření reálných těles	25
4.2.2 Záření černého tělesa	26
4.2.3 Základní zákony tepelného záření	28
4.2.4 Nečerné zářiče	31
4.3 Technika termodynamického (termovizního) měření	33
4.3.1 Měřicí řetězec	34
4.3.2 Zadávací parametry ke kompenzaci při měření	35
4.3.2.1 Emisivita	35
4.3.2.2 Teplota okolí	36
4.3.2.3 Atmosféra	37
4.3.3 Měřicí technika	37
4.3.3.1 Optický systém	38
4.3.3.2 Detektory	40
4.3.4 Techniky měření při termografii	40
4.3.5 Konstrukce termografických systémů	41
4.3.6 Metody infračervené termografie	44
4.3.6.1 Pasivní termografie	44
4.3.6.2 Aktivní termografie	44
4.3.7 Využití termografie v provozní praxi	47
5 ZÁVĚR	68
LITERATURA	69

PŘEDMLUVA

Skriptum je určeno především studentům oboru a specializace „Technická diagnostika, opravy a udržování“, ale je samozřejmě využitelné i pro další obory a specializace nejen na Fakultě strojní, zabývající se obecně údržbou a technickou diagnostikou, v tomto případě i měřením teploty.

Původním záměrem bylo vyčerpávajícím způsobem se ve skriptech zabývat danou problematikou. Je bohužel nesporným faktem, že v posledních dvou letech byla napsána řada knih, především ve vydavatelství technické literatury BEN Praha, věnujících se dané problematice, takže jsme se rozhodli od původního záměru ustoupit. Předkládaná skripta pouze shrnují tuto oblast tak, aby bylo jednoznačně zřejmé co je obsahem studia na daném studijním oboru a odkazují na dostupnou literaturu a to nejen jazykově.

Klíčová část skript je pak zaměřena na využití termografie v provozní praxi různých technických oborů se zaměřením na využití v technické diagnostice stavu strojů a zařízení. Hlavním cílem je tedy celkový přehled možností termodiagnostiky ke stanovení technického stavu sledovaného objektu. V současné době se nejen technická diagnostika jako taková stává samostatným vědeckým oborem, ale k danému spějí i samostatné metody technické diagnostiky.

1 ÚVOD DO DANÉ PROBLEMATIKY

V současné době se technická diagnostika stává nejen samostatným vědeckým oborem, ale především klíčovým nástrojem, kterým stanovujeme technický stav sledovaného objektu. Tzn. jedním ze základních a rozhodujících nástrojů (prostředků) údržby, která je tím čím zajišťujeme provozní spolehlivost v celé své komplexnosti a jejím dnešním systémově procesním pojmání.

Je proto naprosto logické, že nejen multiparametrický přístup v technické diagnostice, ale stále se rozšiřující technické a měřicí možnosti jednotlivých metod technické diagnostiky (vibrodiagnostika, tribodiagnostika, akustická diagnostika apod.) vedou k tomu, že i tyto metody se stávají relativně samostatnými vědními obory.

Proto i termodiagnostika se stává oborem s poměrně širokým rozsahem, obsahem a nasazením. Hlavní důraz je kladen na měření teploty a to jak kontaktními či bezkontaktními způsoby a metodami. Veškerá hmota, živá nebo neživá a v jakémkoliv skupenství si trvale vyměňuje se svým okolím tepelnou energii formou elektromagnetického záření. Množství tohoto záření nese v sobě informace o teplotě emitujícího povrchu a právě měřením této emitované energie je podstatou bezdotykového měření teploty, dnes nejpoužívanějšího způsobu. Teplota je jedna z nedůležitějších termodynamických vlastností, které určují stav hmoty a objevují se v celé řadě fyzikálních zákonů. Existuje jen velmi málo vlastností látek, které by nebyly teplotně závislé.

Znalost teploty je nutná ve všech oblastech lidské činnosti. Jednou z prvních aplikací teploměru byl lékařský teploměr (vynalezen roku 1866). V roce 2003, kdy svět ohrožovala infekce SARS, byl na hraničních přechodech lékařský teploměr základním diagnostickým přístrojem, který monitoroval počáteční stadium nemoci. Diagnostika ale není jen lékařská disciplína, ale také základní prostředek ke zjišťování technického stavu neživých objektů. Základem bezpečnosti, spolehlivosti v energetice, v letecké, železniční a automobilové dopravě a ve veškeré průmyslové produkci elektrospotřebičů, výpočetní a telekomunikační techniky je technická diagnostika, přičemž měření teploty patří mezi základní diagnostické veličiny. V poslední době již například jezdí expresní vlaky, u nichž se monitoruje teplota všech ložisek během jízdy. Samozřejmě nelze opomenout měření teploty v potravinářské, chemické a farmaceutické výrobě. Potřeba přesného měření teplot v metalurgii je dána především vysokými požadavky na kvalitu odlitků, které lze docílit pouze přísným dodržováním technologických předpisů, v nichž znalost teploty a dalších fyzikálních a chemických vlastností taveniny hraje nemalou úlohu. Měření a regulace teploty jsou základem pro zajištění hospodárného vytápění a současně tepelné pohody obytných a pracovních prostor.

1.1 Historie dané problematiky

Historie teploměru začíná vynálezem italského fyzika, astronoma, matematika a filozofa Galilea Galilei roku 1592. Jeho málo přesný (na atmosférickém tlaku závislý) teploměr byl založený na teplotní roztažnosti vzduchu. Roku 1724 přichází německý fyzik Daniel G. Fahrenheit již s moderním rtuťovým teploměrem a s první teplotní stupnicí. Od té doby se vývoj teploměrů nezastavil. Roku 1730 navrhuje francouzský přírodovědec René-Antoine Ferchault de Réaumur svoji stupnici a dále pak v roce 1742 švédský astronom Andres Celsius zavádí Celsiovu stupnici a konečně roku 1848 britský fyzik lord William Thomsom Kelvin zavedl termodynamickou stupnici (někdy také označovanou jako Kelvinovu stupnici.)

První, kdo objevil infračervené (tepelné) záření byl Sir Herschel (William 1738-1822) a to v roce 1800. (Pozn.: Některé materiály uvádí, že byl původem Němec, jeho jméno bylo Friedrich Wilhelm Herschel). Tento vědec, který se stal dvorním astronomem anglického

krále Jiřího III, (mj. objevil planetu Uran), hledal při pozorování Slunce vhodný materiál, který by použil jako optický filtr pro snížení jasu i tepla v okuláru teleskopu. Začal experimentovat s hranolem (opakoval v podstatě Newtonův experiment), a po rozložení světla na jednotlivé „barvy“ - části elektromagnetického spektra měřil pomocí teploměru se začerněnou baňkou teplotu jednotlivých barev. Zjistil postupný nárůst teploty spektra od fialové po červenou a objevil, že při umístění teploměru za viditelné červené spektrum je bod maxima teploty poměrně daleko od červeného barvy - v místě které je dnes nazýváno „IČ (vlnové) pásmo“. Je zajímavé, že termín „infrared - infračervený“ se začal používat o 75 let později. Herschel se domníval, že jako optické prvky pro IČ záření bude možné používat pouze odrážející prvky jako rovná a zakřivená zrcadla (vzhledem k omezené propustnosti skla vůči nově objevenému tepelnému záření).

V r. 1830 italský badatel Melloni objevil, že kamenná sůl (NaCl), je vhodným materiálem, vzhledem k dostatečně velkým přírodním krystalům, pro výrobu čoček a hranolů - používala se dalších 100 let, než byla v r. 1930 zvládnuta metoda výroby syntetických krystalů.

Teploměry, které byly upraveny tak, že měly začerněnou baňku se jako detektory záření používaly až do r. 1829, kdy Nobili vynalezl termočlánek. Další vědec, již citovaný Melloni připojil určitý počet termočlánků do série a vytvořil tak první termobaterii. Toto nové zařízení pro detekci tepelného záření bylo asi 40x citlivější než tehdejší nejlepší teploměr - uvádí se, že bylo schopné detekovat teplo osoby stojící ve vzdálenosti 3 metrů.

K dalšímu pokroku v tomto oboru došlo, když anglický badatel Langley vynalezl (v r. 1880) bolometr. Tento bolometr se sestával z tenkého začerněného proužku platiny připojeného k jedné větvi Wheatstonova můstku, na který bylo zaměřeno IČ záření, na které pak reagoval citlivý galvanometr. O tomto zařízení se říká, že bylo schopné detekovat teplo krávy na vzdálenost 400 metrů.

V roce 1940 bylo možné vytvořit tzv. „tepelný obraz“ a to na základě rozdílného odpařování tenké vrstvy oleje vystavené tepelnému záření - interferenci olejových vrstev. Sir John Herschel také vytvořil jednoduchý záznam tepelného obrazu na papír, který pak nazval „termograf“.

Sir James Dewar byl první kdo začal používat při výzkumu v oblasti nízkých teplot jako chladivo zkapalněné plyny (např. tekutý dusík N_2 s teplotou - 196 °C) a v roce 1892 vynalezl vzduchotěsnou nádobu, ve které bylo možné skladovat zkapalněné plyny.

K rozvoji IČ techniky došlo v letech 1. světové války. V meziválečném období byly vyvinuty dva nové a revoluční IČ detektory: konvertor obrazu a fotonový detektor. K dalšímu velkému rozvoji IČ techniky došlo jak za 2.světové války, tak samozřejmě po ní a lze uvést, že výzkum a vývoj v této oblasti není (tak ostatně jako i v jiných oblastech či oborech) ukončen a jistě bude dále pokračovat.

I když, jak bylo v úvodu uvedeno, existence IČ záření byla známa již v r. 1800, první termografický systém na světě byl vyroben až v r. 1964. Byl vyroben švédskou firmou AGA (divizí Infrared Systems) a jeho použití bylo určeno, vzhledem k jeho hmotnosti a robustnosti, především pro vojenské účely. Firma AGA vyrobila také první termografický systém určený pro civilní použití, který byl v r. 1965 nabízen a prodáván pod názvem Thermovision® 651.

2 TEPLOTA A KONTAKTNÍ MĚŘENÍ TEPLoty

Teplota (z latinského „temperatura $\approx$ příjemný pocit“) jak sám název říká, že pojem teplota vychází ze zvláštního pocitu člověka, který je schopen některými svými orgány vnímat a reagovat na teplo a chlad. Teplota se, ale neprojevuje jen jako podnět pro určitý druh pocitů podráždění člověka, nýbrž i řadou jiných způsobů: např. změna teploty mění rozměry většiny těles (některá se zvětšují, jiná zmenšují). Zvýšením teploty se kovová tyč roztahuje, kaučukové vlákno se zkracuje, plyny mění svůj objem atd. Teplota je jednou z nejdůležitějších stavových veličin ovlivňující téměř všechny stavy a procesy v přírodě.

Teplota je stavová veličina určující stav termodynamické rovnováhy tj. stav, kdy v izolované soustavě těles od okolního prostředí neprobíhají žádné makroskopické změny a všechny fyzikální veličiny, jimiž je stav soustavy popsán, nezávisí na čase. Stav termodynamické rovnováhy bývá charakterizován termodynamickou teplotou, která musí být stejná pro všechny části izolované soustavy. Fyzikální veličina teplota se nesmí zaměňovat za fyzikální veličinu teplo, neboť teplo je forma energie související s pohybem částic dané soustavy těles, ale není stavovou veličinou, neboť nezávisí na přítomném stavu soustavy, ale na celé minulosti vývoje této soustavy. Teplota je jedna z mála veličin, která se nedá měřit přímo, ale pouze prostřednictvím jiných fyzikálních veličin. Měření teploty je tedy měření nepřímé.

2.1 Základní pojmy z oboru měření teplot

- ❖ **Termodynamická teplotní stupnice** je definována na základě účinnosti vratného Carnotova cyklu. Počátek termodynamické stupnice je dán termodynamickou absolutní nulou. Základní jednotkou teploty v termodynamické stupnici je **kelvin (K)**. Kelvin byl definován zvolením termodynamické teploty trojného bodu vody, tj. rovnovážného stavu tří skupenství vody (ledu, vody a syté páry) jako referenčního a dobře reprodukovatelného teplotního bodu termodynamické stupnice a přiřazením hodnoty termodynamické teploty trojného bodu na pevně stanovenou hodnotu $T = 273,16 \text{ K}$.

Jeden Kelvin je 273,16 díl termodynamické teploty trojného bodu vody.

- ❖ **Celsiova teplotní stupnice** je odvozena od Kelvinovy termodynamické stupnice posunutím o teplotu 273,15 K, což je hodnota o 0,01 K nižší než termodynamická teplota trojného bodu vody. Jednotkou Celsiovy stupnice je stupeň Celsia ($^{\circ}\text{C}$). Celsiova teplota t je rovná rozdílu termodynamické teploty T a teploty 273,15 K, neboli platí

$$t (^{\circ}\text{C}) = T - T_0 = T - 273,15 \text{ K}$$

dále pro teplotní rozdíl platí

$$\Delta t = \Delta T$$

- ❖ **Fahrenheitova teplotní stupnice** se používá v některých státech. Pro převod na Fahrenheitovu teplotu platí:

$$t (^{\circ}\text{F}) = \frac{9}{5} T - 459,67 = \frac{9}{5} t - 32$$

Tab.1 Převodní vztahy mezi teplotními stupnicemi [2]

Teplota:	T (K)	t (°C)	T_1 (°R)	t_1 (°F)
T (K) =	1	$t + 273,15$	$(5/9) \cdot T_1$	$(5/9)(t_1 + 459,67)$
t (°C) =	$T - 273,15$	1	$(5/9)(T_1 - 491,67)$	$(5/9)(t_1 - 32)$
T_1 (°R) =	$(9/5) \cdot T$	$(9/5) \cdot t + 491,67$	1	$t_1 + 459,67$
t_1 (°F) =	$(9/5) \cdot T - 459,67$	$(9/5) \cdot t + 32$	$T_1 - 459,67$	1

Pro obtížnou realizaci termodynamické stupnice pomocí tzv. plynové termometrie byla zavedena mezinárodní teplotní stupnice.

Mezinárodní teplotní stupnice 1990 - ITS-90 (z anglického: The International Temperature Scale of 1990) je definována od 0,65 K do teplot prakticky měřitelných v podmínkách Planckova radiačního zákona. Tato teplotní stupnice značená T_{90} je tvořena tak, aby jednotlivé rozsahy měření T_{90} těsně vyjadřovaly číselné hodnoty termodynamické teploty a měly vysokou reprodukovatelnost.

2.2 Rozdělení kontaktního měření teploty

Dotykové teploměry jsou při měření v přímém dotyku s měřeným prostředím (objektem).

Dotykové teploměry lze rozdělit podle fyzikálního principu funkce na:

- ✓ **dilatační** - využívají teplotní roztažnosti tuhých látek, kapalin a plynů,
- ✓ **parní** - využívají teplotní závislosti tlaku syté páry teploměrové kapaliny,
- ✓ **odporové** - využívají teplotní závislosti elektrického odporu vodičů a polovodičů,
- ✓ **polovodičové** - využívají změn vlastností polovodičů s teplotou, velmi často je tato změna převáděna na změnu odporu čidla, proto jsou také často řazeny k odporovým.
- ✓ **termoelektrické** - využívají teplotní závislosti termoelektrického napětí termoelektrického článku,
- ✓ **optovláknové** - využívají změn vlastností optických vláken s teplotou,
- ✓ **speciální** - využívají změn vybraných fyzikálních vlastností tuhých látek a kapalin s teplotou (např. měknutí, tavení, index lomu apod.).

Měřicí rozsahy jednotlivých teploměrů ukazuje tab.2. Pro srovnání jsou uvedeny i bezkontaktní teploměry (další viz. kap. 3 a 4).

Tab.2 Měřicí rozsahy vybraných typů teploměrů [2]

Dotykové teploměry:	Měřicí rozsah (°C)
tyčové	-30 až 1000
bimetalické	-30 až 350
skleněné s organickou náplní	-200 až 100
skleněné s kovovou náplní	-30 až 630 (1000)
tlakové kapalinové	0 až 850
tlakové parní	-50 až 200
tlakové plynové	-260 až 800
odporové platinové	-270 až 850 (1000)
odporové niklové	0 až 180
termoelektrické T (Cu-CuNi)	-200 až 400
termoelektrické J (Fe-CuNi)	-200 až 760
termoelektrické E (NiCr-CuNi)	-100 až 700 (900)
termoelektrické K (NiCr-NiAl)	-200 až 1000 (1300)
termoelektrické S (PtRh10-Pt)	0 až 1300 (1600)
termoelektrické R (PtRh13-Pt)	0 až 1300 (1600)
termoelektrické B (PtRh36-PtRh6)	300 až 1600 (1800)
termoelektrické A (WRe5-WRe20)	0 až 2500
termoelektrické N (nicrosil-nisil)	-270 až 1370
se světlovody	-11 až 200
s kapalnými krystaly	-20 až 250
iontové	200 až 720
krystalové	-80 až 250
barevné nátěry a tužky	40 až 1400
tavná tělíska a tablety	100 až 1650
keramické žároměrky	600 až 2000
Bezdotykové teploměry:	
pyrometry jasové	650 až 3500
pyrometry pásmové	300 až 2000
pyrometry barvové	700 až 2000
pyrometry radiační	-50 až 2300
fototermometrie	-50 až 650
(termovize)	-50 až 2000

2.3 Dilatační teploměry [2], [3], [10]

Funkčním principem dilatačních teploměrů je využití teplotní roztažnosti látek všech skupenství. Podle tohoto principu a podle konstrukce lze dilatační teploměry rozdělovat na tyčové bimetalické, skleněné, tlakové kapalinové a plynové, parní.

❖ Tyčové teploměry

Využívají rozdílné teplotní roztažnosti dvou konstrukčních oddělených dílů z pevných látek (trubice a vnitřní tyče), které jsou spojeny v jediném místě. Tyčové teploměry se používají hlavně v termostatech jako snímače dvupolohových regulátorů teploty. Výhodou je velký teplotní rozsah (až 1000 °C), malé pořizovací náklady, robustní konstrukce a nevýhodou menší přesnost měření (do 2%).

Blíže především [2].

❖ Bimetalické teploměry

Bimetalické teploměry využívají deformace kovových pásků z rozdílných materiálů o odlišných hodnotách teplotní délkové roztažnosti. Tyto pásky jsou po celé délce spolu pevně spojeny, Délkou pásků a jejich vhodným tvarováním lze docílit značné výsledné deformace.

Výhodami bimetalických teploměrů jsou malé pořizovací náklady, jednoduchá údržba a obsluha, robustní konstrukce, a tím i značná přestavující síla.

Nevýhodou bimetalických teploměrů je menší rozsah teplot (pouze do 400 °C), menší přesnost (do 1,5 %), pomalá odezva na změnu teploty (musí se prohřát nejen vnější trubice, ale i stočený bimetalický pásek uvnitř).

Blíže především [3]

❖ Skleněné teploměry

Skleněné teploměry využívají ke své funkci objemové roztažnosti teploměrové kapaliny (náplň teploměru) ve skle. Přírůstek objemu kapaliny se stoupající teplotou odečteme přímo v kapiláře teploměru, která vychází z teploměrové nádoby. Prostor v kapiláře je vakuován u běžných typů, pouze u vysokoteplotních rtuťových teploměrů je kapilára nad rtutí vyplněna stlačeným inertním plynem, nejčastěji dusíkem, aby se zvýšila teplota varu rtuti a tím i měřicí rozsah.

Jako teploměrových kapalin se u skleněných teploměrů používá:

- a) pentanová směs: rozsah od -200 °C do +30 °C; používá se k přesnému měření velmi nízkých teplot;
- b) rtuť: rozsah od -38 °C do 350 °C (v kapiláře vakuum) a do 630 °C (v kapiláře tlakový dusík); používá se k přesnému měření středních teplot;
- c) toluol: rozsah od -90 °C do +100 °C; používá se k méně náročným měření nízkých teplot;
- d) etylalkohol: rozsah od -110 °C do +70 °C; používá se k méně náročným měřením.

Skleněné teploměry jsou jednoduché, spolehlivé, levné a přesné. Nevýhodou je jejich křehkost, omezená možnost dálkového přenosu a někdy špatná čitelnost.

Nejvíce jsou rozšířeny skleněné teploměry rtuťové; jejich výhodou je značná tepelná vodivost rtuti, nesmáčivost stěn, dobrá čitelnost a možnost použití pro signalizaci a regulaci teploty. Nevýhodou je velmi malá teplotní objemová roztažnost rtuti.

Podle konstrukce lze skleněné teploměry rozdělit na laboratorní, technické a speciální.

Laboratorní teploměry ukazují správně měřenou teplotu pouze tehdy, když je celý sloupec teploměrové kapaliny v kapiláře v měřeném prostoru. Tyto teploměry se také ověřují tak, že celý sloupec teploměrové kapaliny je ponořen v měřeném prostoru. Vyrábějí se obalové a tyčinkové.

Technické stonkové teploměry jsou provozní teploměry a jsou odlišné konstrukce než laboratorní teploměry. Technické teploměry mají stonek, který je celý ponořen v měřeném prostředí. Stupnice teploměru je vždy mimo měřené prostředí. Délka stonku tak určuje hloubku ponoru. Protože sloupec teploměrové kapaliny v kapiláře v oblasti stupnice má jinou teplotu než měřené prostředí, je tento vliv zahrnut do kalibrace a není třeba provádět opravu na vyčnívající sloupec.

Speciální teploměry jsou obvykle jednoúčelové. Jedná se např. o teploměry kalorimetrické, teploměry k určování tepelně fyzikálních vlastností látek (bod vzplanutí apod.), teploměry maximální, maximominimální, minimální apod.

Diferenční teploměry (Beckmannovy) tvoří samostatnou skupinu. Používají se k velmi přesnému měření malých teplotních změn ve velkém rozsahu teplot. Vyrábějí se v délkách 500 až 600 mm, délka stupnice 300 mm s rozpětím 1 °C až 5 °C. Kalibrace je provedena s plně ponořeným stonkem.

Blíže v [2], [3].

❖ Tlakové teploměry kapalinové

Tlakové kapalinové teploměry se skládají z teploměrové nádoby, spojovací kapiláry a měřicího přístroje (deformačního tlakoměru). Celý teploměrový systém je vyplněn teploměrovou kapalinou, často se používá rtuť nebo organické kapaliny, např. xylo, metylalkohol nebo petrolej. Při použití těchto teploměrů musí být teploměrná náplň stále v kapalném stavu. Proto musí být měřená teplota nižší, než je bod varu použité teploměrové kapaliny. Teplotou vyvolaná změna objemu teploměrové kapaliny se převádí na změnu tlaku, který se měří deformačním tlakoměrem. Stupnice tlakových kapalinových teploměrů je lineární. Tlakové kapalinové teploměry jsou ověřovány tak, že přístroj (tlakoměr) i teploměrová nádoba jsou ve stejné výši. Po montáži teploměrů na měřicí místa je třeba nastavit ukazovatel na hodnotu teploty, udávanou kontrolním teploměrem, umístěným v blízkosti teploměrové nádoby. Proto jsou tyto teploměry vybaveny mechanismem pro otevíření a uzavření krytu ukazovatele. Tato justáž se provádí u teploměrů bez kompenzace.

Rtuťové tlakové teploměry se používají v rozsahu (-30 až 600) °C. Organické kapaliny se používají pro rozsah od -30 °C do 350 °C. Materiálem teploměrového systému je legovaná ocel (pro rtuťovou náplň), mosaz, měď a bronz (pro organické kapaliny).

Výhodou tlakových kapalinových teploměrů je lineární stupnice přístroje, poměrně velký rozsah měření (až 600 °C), robustní konstrukce a tím i velká představující síla.

Nevýhodou tlakových teploměrů je nutnost korekce údaje na okolní teplotu u jednoduchých typů, nutnost korekce údaje na změnu hydrostatického tlaku teploměrové kapaliny vlivem rozdílného výškového umístění přístroje od teploměrové nádoby u typů s dlouhou kapilárou, nutnost použití vystárlého materiálu na deformační systém přístroje (v systému je trvalý vysoký přetlak).

Hlavní použití je pro měření teploty v těžkých provozních podmínkách i při venkovní montáži, signalizaci a dvupolohovou regulaci teploty a pro dálkové měření do 50 m.

Blíže v [2], [3].

❖ Tlakové teploměry plynové

Jsou používány též plynové tlakové teploměry plněné vysokým přetlakem. Měřicím principem je změna tlaku plynu za stálého objemu s teplotou. Konstrukční uspořádání plynových teploměrů je podobné jako u teploměrů tlakových kapalinových, ale není nutno provádět korekce jako u tlakových teploměrů kapalinových.

Výhodou plynových teploměrů je lineární stupnice, velký rozsah (od -260 °C do 800 °C), malý obsah teploměrové nádoby (cca 1 cm³), vysoká přesnost (až 0,5 %), velká dlouhodobá stabilita (0,2 % za rok), necitlivost vůči vnějšímu barometrickému tlaku, délka kapiláry (až 100 m), možnost instalace v agresivním prostředí.

Nevýhodou plynových teploměrů je velmi malý přírůstek tlaku s teplotou a velké pořizovací náklady.

Blíže především [3].

❖ Tlakové teploměry parní

Konstrukční uspořádání je podobné jako u tlakových teploměrů kapalinových. Použitý tlakoměr má podstatně menší rozsah (řádově desetiny MPa). Teploměřová nádoba má malý objem a je naplněna pouze zčásti a nad ní je sytá pára této kapaliny.

Nevýhodou parních teploměrů je nelineární stupnice, malý rozsah (do 400 °C) a malé rozpětí měření (50 °C až 100 °C). Hlavní pole použití je v průmyslu k měření a signalizaci teploty.

Blíže především [3], ale také i v [2].

2.4 Odporové teploměry [2], [3], [10]

Využívají k měření teploty teplotní závislosti elektrického odporu materiálu. Tuto závislost vyjadřuje teplotní součinitel odporu α (K^{-1}), jeho střední hodnotu pro teplotní rozsah od 0 do 100 °C. K měření teploty se využívá především čistých kovů (platina, měď a nikl) a polovodičů.

❖ Materiály a provedení čidel odporových teploměrů

✓ Kovové materiály

Čidla odporových teploměrů se nazývají *měřicí odpory*. Přehled materiálů k jejich výrobě spolu s hlavními parametry obsahuje tab. 3., v tabulce je pro srovnání uveden i termistor, který se již řadí k polovodičovým.

Tab.3 Parametry materiálů na měřicí odpory

.Materiál	α (K^{-1})	ρ ($\Omega.m$)	Rozsah (°C)
platina	0,00385 až 0,00391	$9,81 \cdot 10^{-8}$	-200 až 850
nikl	0,00617 až 0,00675	$12,13 \cdot 10^{-8}$	-70 až +150 (+200)
měď	0,00426 až 0,00433	$1,54 \cdot 10^{-8}$	-50 až +150
termistory	-0,015 až -0,06	---	-80 až +200
elektrolyty	-0,015 až -0,10	---	0 až +100

Platina nejlépe splňuje požadavky kladené na materiál měřicích odporů. Teplotní součinitel odporu je poměrně velký a hlavně časově stálý. To umožňuje vzájemnou záměnu měřicích odporů bez dodatečného ověřování. Výhodné vlastnosti platiny řadí platinové odporové teploměry mezi nej přesnější teploměry. Používají se též jako etalony k realizaci Mezinárodní teplotní stupnice ITS-90. Jsou rovněž nezastupitelnými etalony k ověřování všech druhů teploměrů. Pro svoji přesnost, stabilitu a spolehlivost patří též k oblíbeným druhům provozních teploměrů. Platinové měřicí odpory se vyrábějí v několika provedeních jako keramické, skleněné, pertinaxové a vrstvé.

Keramické měřicí odpory obsahují platinový drátek o průměru cca 0,05 mm, stočený do šroubovice a zatavený v keramické dvoukapiláře. Oblast použití až do teploty 850 °C.

Skleněné měřicí odpory obsahují platinový drátek navinutý bifilárně na skleněném válečku a povrchově zalit tenkou vrstvou skla. Jsou určeny pro snímáče jímkové. Rozsah použití je do 600 °C. Jejich nevýhodou je přídavný tzv. tenzometrický jev, vzniklý namáháním platinového drátku vlivem nestejně teplotní roztažnosti skla a platiny.

Pertinaxové měřicí odpory obsahují platinový drátek navinutý bifilárně na ploché pertinaxové destičce a vně izolovaný papírem a lakem. Používají se k měření teploty okolí, teploty vinutí elektrických strojů, povrchových teplot apod. v rozsahu do 150 °C.

Vrstvové měřicí odpory se vyrábějí buď tištěním platinového meandru na plochu korundovou podložku, nebo nanášením platinové pasty a jejím vypalováním. Tyto měřicí odpory mají velmi malé rozměry, jsou ploché a používají se především k měření povrchových teplot. Jejich charakteristickou vlastností je kromě velké otřesuvzdornosti také dlouhodobá stabilita.

Nikl je vhodným materiálem pro měřicí odpory užívané v měřicích tepla v sítích centrálního zásobování teplem. Nikl má podstatně větší teplotní součinitel odporu než platina a měřicí rozsah do 200 °C je pro uvedené účely dostatečný.

✓ **Polovodičové materiály**

Polovodičové odporové snímače teploty využívají změny svého odporu v závislosti na teplotě, obdobně jako kovové odporové teploměry. U polovodičů je dominantní teplotní závislostí koncentrace nositelů náboje. Na rozdíl od kovových odporových teploměrů se mohou elektrické vlastnosti měnit dvěma způsoby:

- se vzrůstající teplotou jejich odpor klesá (negativní teplotní koeficient odporu α)
- se vzrůstající teplotou jejich odpor stoupá (pozitivní teplotní koeficient odporu α)

Termistory jsou asi 10x citlivější než kovy, ale jejich charakteristika je silně nelineární. Termistory jsou dvojího druhu: NTC s negativním součinitelem α a PTC s kladným součinitelem α . Termistory NTC se také nazývaly "negastory", termistory PTC "pozistory". K měření teploty se používají pouze termistory NTC, a tak jim zůstal zjednodušený název termistory.

Termistory NTC (negastory) se vyrábějí práškovou technologií ze směsi oxidů kovů.

Termistory PTC (pozistory) se dnes vyrábějí nejčastěji technologií tlustých vrstev z feroelektrických keramických látek (např. BaTiO₃) nebo použitím cermentových past na bázi uhlíku. Odpor pozistoru nejprve mírně klesá a při překročení Curieovy teploty se odpor pozistoru téměř skokově změní.

❖ **Měření elektrického odporu**

Uplatňují se zásadně dvě měřicí metody: můstková (výhylková i nulová a kompenzační (pro nejpřesnější měření).

Výhylková můstková metoda je nejrozšířenější provozní metodou měření odporu. Můstek musí být napájen ze stabilizovaného zdroje.

Nulová můstková metoda je přesnější než výhylková, ale přístrojově složitější. V laboratorní praxi se používá ručně vyvažovaných můstků, pro provozní měření se používá automaticky vyvažovaných mostů. Vyvažovaný můstek nemusí být napájen stabilizovaným zdrojem.

Kompenzační metoda vyžaduje čtyřvodičové zapojení měřicích odporů; proudové vodiče jsou zapojeny v napájecím obvodu, napětové vodiče v měřicím obvodu. Měří se úbytek napětí U_t na měřicím odporu R_t a srovnává se s úbytkem napětí U_N na etalonovém odporu R_N .

❖ **Konstrukce odporových teploměrů**

Odporový teploměr se skládá z odporového snímače teploty, spojovacího měděného vedení, napájecího zdroje a měřicího přístroje - ukazovacího nebo zapisovacího.

Odporový snímač teploty je konstrukční celek, který obsahuje měřicí vložku. V měřicí vložce je měřicí odpor spojený vnitřním vedením se svorkovnicí. Pro teploty do 500 °C je vnitřní vedení kantalové, pro vyšší teploty je stříbrné. Měřicí vložka se umísťuje do ochranné armatury, se kterou tvoří snímač do jímky. Odporové snímače teploty se vyrábějí s ponorem 160, 250 a 400 mm.

Plášťované odporové snímače teploty jsou ve formě dvou vodičů navzájem izolovaných keramickým lisovaným práškem MgO nebo SiO₂ ve stonkové trubici, kde je rovněž umístěn

měřicí odpor. Stonek lze libovolně tvarovat ohýbáním s minimálním poloměrem oblouku 25 mm. Teplotní rozsah $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+250\text{ }^{\circ}\text{C}$, vysoká stabilita, velká otřesuvzdornost, použití bez jímek do 4 MPa.

❖ Iontové teploměry

Využívají skokové změny elektrické vodivosti v oblasti fázové změny pevných elektrolytů. Při vzrůstu nebo při poklesu teploty dochází k přechodu pevné fáze na kapalnou a naopak. Při vzrůstu teploty dochází k rozpadu krystalů, a tím k uvolnění nositelů proudu - iontů - a nastává iontová vodivost. Uvedená změna vodivosti je zvláště výrazná u krystalických látek s iontovou vazbou a je závislá na čistotě látky. Např. u CdBr_2 nastává při změně teploty v rozmezí $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ při teplotě $567\text{ }^{\circ}\text{C}$ změna vodivosti o 6 řádů.

Čidlem skleněného snímače je skleněná nádobka o průměru 3 mm až 5 mm a délky 20 mm, vyplněná elektrolytem. V elektrolytu jsou ponořeny dvě platinové elektrody a přídavné elektrické topení. Teplota v čidle je udržována regulátorem na teplotě fázové přeměny a měřítkem měřené teploty (která musí být vždy nižší než teplota fázové přeměny) je velikost topného proudu. Přesnost měření dosahuje až 0,5 %, tj. $3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Podle volby druhu elektrolytu lze použít iontové teploměry od $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $700\text{ }^{\circ}\text{C}$.

❖ Krystalové teploměry

Čidlem krystalového teploměru je speciálně provedený výbrus krystalu. Tento krystal je zapojen v rezonančním obvodu tranzistorového oscilátoru. Měřená teplota krystalu mění jeho rezonanční kmitočet, a tím také frekvenci oscilátoru, jehož kmity se směšují s kmity teplotně nezávislého referenčního oscilátoru. Rozdílový kmitočet se vyhodnocuje čítačem a indikuje na číslicovém displeji. Frekvenční rozdíl je přesně úměrný přírůstku teploty, a tak indikátor udává teplotu přímo ve $^{\circ}\text{C}$. Teplotní závislost rezonančního kmitočtu krystalu je lineární v rozsahu teplot od -80 do $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ s odchylkou maximálně 0,05 %, rozlišitelnost až $0,0001\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Krystalové teploměry se pro svou citlivost a přesnost používají v kalorimetrii, kryogenice, ebulliometrii, diferenční tepelné analýze, při proměřování teplotních polí a při ověřování teploměrů.

2.5 Termoelektrické teploměry [2], [10]

Využívají k měření teploty termoelektrického jevu v termoelektrickém článku. Rovnice pro konkrétní termoelektrické články jsou uvedeny v ČSN IEC 751.

Dvojice materiálů na výrobu termoelektrických článků má vykazovat pokud možno velký přírůstek termoelektrického napětí s teplotou, stabilitu údaje při dlouhodobém provozu a odolnost proti chemickým a mechanickým vlivům. Pro průmyslové použití v oblasti středních teplot jsou nejrozšířenějšími termoelektrickými články železo - měďnikl (Fe-CuNi), měď - měďnikl (Cu-CuNi), niklchrom - nikl (NiCr-Ni), niklchrom - měďnikl (NiCr-CuNi) a niklchrom - niklhlíník (NiCr-NiAl). Pro vysoké teploty se používají termoelektrické články ze vzácných kovů a to platina rhodium - platina (PtRh10-Pt a PtRh13-Pt, popř. PtRh30-PtRh6) a wolframrhenium - wolframrhenium (WRe5-WRe20, WRe10-WRe20, WRe5-WRe26 a WRe3-WRe25).

Blíže k termoelektrickým článkům v [3] včetně termoelektrických pravidel a konstrukce termoelektrických snímačů teploty.

❖ Zapojení termoelektrických teploměrů

Termoelektrický článek je z měřicího místa prodloužen do srovnávacího místa prodlužovacím nebo kompenzačním vedením

❖ Měření termoelektrického napětí

Termoelektrické napětí se měří výchylkovou a kompenzační metodou, tj. milivoltmetrem nebo kompenzátozem.

Milivoltmetr při *výchylkové metodě měření* neudává přímo termoelektrické napětí E (mV), ale vlivem úbytku napětí v obvodu hodnotu e (mV), která je závislá na odporu obvodu termoelektrického článku r_j a vnitřním odporu milivoltmetru R .

Kompenzační metoda měření termoelektrického napětí umožňuje přímo určit velikost termoelektrického napětí E , protože v okamžiku měření neprotéká obvodem termoelektrický proud. Tím zde nenastává úbytek napětí jako u výchylkové metody. Měřicí přístroje jsou kompenzátory, a to s konstantním proudem, s konstantním odporem a mostové kompenzátory.

Pro průmyslové použití jsou termoelektrické články umístěny do ochranných trubic, které jsou konstrukčně shodné s odporovými snímači teploty. Termoelektrický článek je tvořen dvěma vodiči, které jsou spolu v místě měřicího spoje svařeny. Průměry drátů jsou do 3,5 mm pro obecné kovy a 0,35 mm pro vzácné kovy. Dráty jsou navzájem izolovány a připojeny na svorkovnici v hlavici měřicí vložky. Snímače se vyrábějí o ponorech 100 mm až 2 m. Vyrábějí se jednoduché nebo dvojité (se dvěma termoelektrickými články).

2.6 Speciální dotykové měření teplot [2], [3], [10]

Sem patří teploměry pro speciální, popř. jednorázové použití, např. k měření povrchových teplot apod.

2.6.1 Speciální dotykové senzory teploty

❖ Akustické teploměry

Akustické teploměry jsou založeny na teplotní závislosti šíření zvuku v plynném nebo pevném prostředí. Pak se používá:

- rezonanční metoda se zpětnovazebním oscilátorem využívá teplotně závislé rychlosti šíření zvuku v plynném prostředí.
- pulsní metoda využívá teplotní závislosti rychlosti šíření zvuku v pevném prostředí (čas průchodu pulsu tyčí).

Použití je jak pro velmi nízké (od 2K do 20K), tak i vysoké teploty.

❖ Krystalové teploměry [3]

Využívají teplotní závislosti rezonančního kmitočtu křemenného výbrusu.

❖ Šumové teploměry [3]

Na vývodech každého rezistoru je v důsledku teplotně závislého volného pohybu elektronů ve vodivostním pásmu měřitelné elektrické napětí stochastického charakteru. Toto napětí se označuje jako tepelný šum (také Johnsonův nebo Nyquistův) a odpovídá specifikaci bílého šumu.

❖ Magnetické teploměry [3]

Jsou založeny na teplotní závislosti magnetické susceptibility paramagnetických solí (např. dusičnan hořečnatý, síran amonný aj.) a platí tzv. Curie-Weissův zákon. Měřením indukčnosti měříme vlastně teplotu.

❖ Optické vlákno senzory teploty [2], [3], [10]

Vznikly využitím nežádoucích vlivů okolního prostředí na parametry optických sdělovacích kabelů. Základ je ve využití vlivu teploty na vlastnosti optických vláken, tzn. měřená teplota moduluje optický signál.

Sestava optoelektronického snímače teploty má obvykle tyto části:

- a) měřicí část z teplotně citlivého optického vlákna v ochranném obalu,
- b) signálové vedení optických vláken z křemenného skla s velmi malým útlumem v PVC obalu,
- c) elektrické konektory s luminiscenčními diodami, fotodiodami a optickými vlákny,
- d) elektronický stabilizátor proudu pro LED diodu,
- e) zesilovač signálu z detektoru.

Podle funkčního principu lze rozdělit optoelektronické snímače teploty na:

- ✓ *Refraktometrické snímače* využívají závislosti indexu lomu optického vlákna na indexu lomu okolního prostředí.
- ✓ *Absorpční snímače* jsou založeny na fyzikálních jevech, kdy se teplotní závislosti, projevují pohlcením části světla, šířícího se optickým prostředím.
- ✓ *Polarizační snímače* s křemíkovými čidly využívají teplotní závislosti natáčení roviny polarizace světla.
- ✓ *Fluorescenční snímače* jsou buzené a samobuzené. Fluorescenční látka je nanášena na konci měřicí části optického vlákna, kterým je přiváděno ultrafialové záření. To vyvolá fluorescenci ve viditelné oblasti spektra (např. teplotní závislost intenzity červené a zelené nebo modré složky záření). Poměr intenzit těchto dvou složek záření je teplotně závislou měřicí veličinou.
- ✓ *Snímače s rozprostřeným sledováním teploty* umožňují sledovat teplotu podél optického vlákna. Tyto snímače jsou označovány DTS (Distributed Temperature Sensing) nebo FTR (Fibre Temperature Radar). Vláknem se umísťuje podél měřeného objektu, např. plynovodu, ropovodu, energetických kabelů vn nebo vvn, popř. je ovinuto kolem nádob, tanků, reaktorů a musí být s tímto objektem v kontaktu. Lze tak odečíst teplotu i v několika tisících měřených bodech, včetně jejich polohy.

Nevýhodou optoelektronických snímačů teploty je nutnost vyhodnocení měřicích signálů mikropočítači řízenou aparaturou, poměrně vysoké pořizovací náklady a nutná zaškolená obsluha.

2.6.2 Indikátory teploty [2], [3], [10]

Jsou používány k přibližnému stanovení teplot tělesa. Teplota je stanovena na základě znalosti kritické teploty, tj. teploty, při níž nastává definovaná změna vzhledu indikátoru - tvar nebo barva. Nejistota měření je závislá na základní skutečnosti - rozdíl prostředí kalibrace od měřeného prostředí, tzn. vliv má atmosféra, tlak apod. Důležitým parametrem je rychlost ohřevu. Barevné indikátory se dále dělí na vratné a nevratné a s jedním nebo s více barevnými zvraty.

❖ Keramické žároměrky [3]

Jsou nevratné deformační indikátory. Teplotní rozsah od 600 °C do 2000 °C s odstupňováním po 10 °C až po 50 °C, nejistota měření ± 15 °C. Vyrábí se ve tvaru trojbokých jehlanů, kroužků, čtvercových tyčinek.

❖ Tavné indikátory teploty [3]

Měří s nejistotou $\pm 1\%$ z hodnoty kritické teploty

- ✓ *Teploměřové tablety* - nevratné indikátory, které se po dosažení kritické teploty roztaví. Rozsah od 40 °C do 1650 °C.

- ✓ *Teploměřové kapaliny* - nevratné indikátory z keramického prášku rozpuštěného v těkavé kapalině. Nanáší se štětcem nebo sprejem. Po dosažení teploty se značka zředí a rozteče. Rozsah od 40 °C do 1371 °C.
- ✓ *Teploměřové tužky* - nevratné indikátory z keramického prášku spojeného pojídlem. Stopa nakreslená tužkou se roztaví ve skvrnu a ztmavne. Rozsah od 40 °C do 1371 °C.
- ✓ *Teploměřové nálepky* - nevratné indikátory. Nálepka s adhezivní vrstvou na spodní straně po dosažení teploty zčerná. Rozsah od 38 °C do 316 °C.

❖ **Barevné indikátory teploty** [2], [3], [10]

- ✓ *Chemické barevné indikátory teploty* jsou složité látky, které při dosažení určité teploty ostře změni svoji barvu vlivem chemických složek. Tato změna může probíhat pomalu nebo rychle, vratně nebo nevratně. Rozsah od 40 °C do 1000 °C.
- ✓ *Teploměřové barvy* jsou buď v prášku a teprve těsně před nanášením na měřený povrch se rozmíchají v alkoholu, nebo jsou připraveny k použití v kapalném stavu. Teplotní rozsah barev je od 40 °C do 1370 °C, přesnost 1 %. Barvy se nanášejí před ohřevem. Při vlastním ohřevu se barevná stopa změni při dosažení teploty zvratu.
- ✓ *Teploměřové tužky* se nanášejí na ohřátý povrch. Jsou jednozvrtné (mají pouze jednu změnu barvy), dvouzvrtné (měni svoji barvu při dvou teplotách) nebo reverzibilní (měni svoji barvu při stoupání teploty a při jejím poklesu nabývá původní barvy). Teplotní rozsah do 1400 °C. Měří se jimi teploty pouze kovových těles.
- ✓ *Teploměřové tablety* se ukládají na měřené těleso před ohřevem. Při dosažení teploty zvratu se měni barva tablety. Teplotní rozsah až 1650 °C, rozměry Ø 11 x 3,5 mm, popř. Ø 3,5 x 3,5 mm.
- ✓ *Teploměřové nálepky* jsou obvykle nalepeny na adhesivním podkladu, kterým se přitisknou na měřený povrch. Nálepkou je černý kroužek s bílým středem, tzv. indikačním okénkem. Při dosažení teploty zvratu okénko zčerná. Pro vlastní použití jsou nalepeny čtyři indikátory na jedné podložce s teplotními rozsahy např. (38 - 43 - 49 - 54) °C až (188 - 193 - 199 - 204) °C ve 28 sadách.
- ✓ *Luminiscenční indikátory* - indikátory po dosažení kritické teploty změni luminiscenci, což se projeví ultrafialovým zářením změnou jasu nebo barvy.
- ✓ *Kapalné krystaly* jsou organické sloučeniny, které při ohřevu na určitou teplotu tají a během tání měni své vlastnosti, především index lomu bílého světla.

2.7 Zabudování dotykových teploměrů [2], [3], [10]

Při měření teploty nestačí použít přesného a správného teploměru a zaručit správný odečet údajů, ale je nutno teploměr zabudovat tak, aby správně měřil.

Základním předpokladem správného měření teploty dotykovými teploměry je správné umístění snímačů teploty v měřeném prostředí. Měřicí místo musí být voleno tak, aby byla zajištěna snadná montáž a demontáž snímače včetně údržby. Pro dosažení co nejmenší chyby měření je nutno zajistit, aby tepelné ztráty ze snímače teploty do okolí byly co nejmenší, a aby byl zajištěn co největší přestup tepla z měřeného prostředí do snímače teploty. Dále je pro správnou funkci teploměru nutno zajistit bezvadný stav celého měřicího zařízení. Specifické podmínky je třeba splnit podle toho, měří-li se teplota plynu v klidu, nebo plynu proudícího, teplota kapaliny, teplota povrchu apod.

❖ **Měření teploty v tekutinách a plynech** [2], [3]

Snímače teploty se téměř vždy umísťují do teploměrových jímek nebo ochranných trubic, které je chrání před působením prostředí a to chemickým i mechanickým. Materiál jímek musí proto splňovat tyto požadavky: musí být neprodyšný, nesmí vyvíjet škodlivé

plyny, musí odolávat náhlým změnám teploty, chemickým vlivům měřeného prostředí a být mechanicky pevný při pracovních teplotách.

❖ **Měření teploty tuhých těles [3]**

Měření teploty uvnitř tělesa je spojeno vždy s nutností vyvrtat do tělesa otvor, což může narušit konstrukci. Snímač umísťujeme vždy do místa, kde lze naměřit požadovanou teplotu, tzn. je daleko lepší zjistit jeho umístění uvnitř tělesa již při konstrukčním návrhu a zabudovat jej během montáže. Vesměs se používá termoelektrických článků jako čidel snímačů teploty.

❖ **Měření povrchové teploty tuhých těles [3]**

Při měření teploty na povrchu dotyk snímače způsobí změnu sdílení tepla mezi tělesem a okolním prostředím a měřená teplota je pak zatížena chybou, což musíme brát na zřetel při měření. Proto se za nejpohodlnější považují termoelektrické články, jejichž vodiče mají co nejmenší průřez a malý součinitel tepelné vodivosti a spoj tohoto článku je připájen na tenkou destičku o velké hodnotě tepelné vodivosti, která je k povrchu objektu pevně připojena.

3 BEZKONTAKTNÍ MĚŘENÍ TEPLOTY A DALŠÍ MOŽNÁ MĚŘENÍ [2], [3], [10]

V této kapitole bude také velmi stručná zmínka o měření tepelného výkonu a množství tepla (kap. 3.5). Větší část je věnována bezkontaktnímu měření teploty. Bezkontaktní (bezdotykové) měření teploty využívá k měření teploty elektromagnetického záření v různých spektrálních oblastech.

3.1 Základní veličiny

Bezdotykové měření teploty (také označována jako *infračervená pyrometrie*) je měření povrchové teploty těles na základě vysílaného elektromagnetického záření tělesem a přijímaného senzorem (detektorem) záření vlnové délky od 0,4 μm do 25 μm . Tento rozsah pokrývá oblast viditelného spektra od 0,4 μm do 0,78 μm , oblast blízkého infračerveného spektra od 2 μm do 3 μm , oblast středovlnného infračerveného spektra od 3 μm do 5 μm a konečně oblast dlouhovlnného infračerveného spektra od 5 μm do 25 μm .

Elektromagnetické záření s vlnovou délkou od 2 μm do 25 μm se označuje jako *tepelné záření*. Uvedené rozsahy pokrývají měření teplot v rozsahu od - 40 °C do + 10000 °C.

Blíže bude v kap. 4.2.

Bezdotykové měření teploty je vhodné pro:

- zanedbatelný vliv měřicí techniky na měřený objekt,
- možnost měření teploty na rotujících nebo pohybujících se objektech,
- měření teploty z bezpečné vzdálenosti (elektrická zařízení, hutní objekty aj.)
- možnost měření velmi rychlých změn teploty,
- možnost měřit a dále číselnicově zpracovat teploty celých povrchů těles (termografie, termovize).

Je však nutné upozornit na nevýhody bezdotykového měření teplot:

- nejistoty měření způsobené neznalostí správné hodnoty emisivity povrchu tělesa,
- nejistoty měření způsobené neznalostí správné hodnoty prostupnosti mezi čidlem a objektem,
- nejistoty měření způsobené nepřesnou korekcí parazitního odraženého záření z okolního prostředí na měřený objekt.

Následující tab. 4 pak udává veličiny dle ČSN ISO 31-6.

Tab.4 Veličiny dle ČSN ISO 31-6

veličina	značka	definice	jednotka
zářivý tok zářivý výkon	Φ	výkon přenášený zářením (vysílaný nebo přijímaný)	W
intenzita vyzařování	M	podíl zářivého toku vycházejícího z elementu povrchu a plochy tohoto povrchu	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
spektrální hustota intenzityvyzařován í	M_λ	podíl intenzity vyzařování v malém intervalu vlnových délek a tohoto intervalu	$\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$
zářivost	I	podíl zářivého toku vycházejícího ze zdroje nebo elementu do elementárního prostorového úhlu a tohoto prostorového úhlu	$\text{W}\cdot\text{sr}^{-1}$
zář	L	podíl zářivosti elementu povrchu a plochy	$\text{W}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$

		kolmého průmětu tohoto elementu do roviny kolmé k danému směru	
spektrální hustota záře	L_λ	podíl záře v malém intervalu vlnových délek a tohoto intervalu	$W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-3}$
intenzita ozáření	E	podíl zářivého toku dopadajícího na element povrchu dopadajícího na element povrchu a plochy tohoto elementu	$W \cdot m^{-2}$

V lit. [3] pak najdeme obecné definice záře, pohltivosti, prostupnosti, odraznosti, emisivity apod. a v lit [5] v příloze I. - pojmy a veličiny používané v pyrometrii. Literatura [3] rovněž uvádí zákony jež podporují daný způsob měření teploty (Planckův, Wienův, Stefan-Boltzmanův, Lambertův, Kirchhoffův) o nichž bude sice zmínka v kap. 4.2, ale zde najdeme samozřejmě širší vysvětlení včetně hlubších souvislostí.

Pro bezkontaktní měření teploty se v podstatě používají dvě skupiny senzorů (detektorů) tepelného záření, které se člení dle interakce fotonů s materiálem, tepelné a kvantové. Tepelné se dělí na termoelektrické (tzv. termoelektrické baterie), bolometrické (snímá se teplotně závislým odporovým materiálem a pyroelektrické (pyroelektrický jev - změna spontánní polarizace při změně teploty).

Blíže v [3], ale především [5].

3.2 Rozdělení bezkontaktního měření teploty

Pyrometry se rozdělují podle různých hledisek, nejčastěji a pro praxi nejpohodlnější rozdělení je podle spektrální oblasti využitelného záření na:

- ✓ *spektrální* (jasové, monochromatické) - využívají tepelného záření při jedné vlnové délce, zpravidla $\lambda = 0,65 \mu m$,
- ✓ *pásmové* - využívají tepelného záření v úzkém pásmu vlnových délek, který je dán absorpčními vlastnostmi použitého detektoru záření,
- ✓ *spektrálního rozložení* (barvové) - využívají tepelného záření při dvou vlnových délkách, zpravidla $\lambda_1 = 0,55 \mu m$ a $\lambda_2 = 0,65 \mu m$ (zelená a červená barva),
- ✓ *celkového záření* (radiační) - využívají tepelného záření ve velkém rozsahu vlnových délek (teoreticky celý rozsah), který je omezen pouze absorpční schopností použitého detektoru a propustností optiky pyrometru.

Do dané rozdělení musíme z pohledu jejího nadpisu zahrnout *termovizi* (termografii) - viz. kapitola 4 a **fototermometrii** - využívá klasického fotoaparátu s velkou světelností a fotomateriálem sensibilovaným na infračervené záření.

3.3 Pyrometry [3]

Jak je už známo, tak pyrometry využívají k měření teploty tepelného záření v různých oblastech spektra.

❖ Úhrnné pyrometry (pyrometry na celkové záření).

Úhrnné pyrometry jsou měřicí přístroje, které měří teplotu dle Stefan-Boltzmannova zákona, tj. vyhodnocují tepelné záření v celém spektru vlnových délek od $\lambda = 0$ do $\lambda = \infty$. Požadavku měření v celém spektru vyhovují pouze tepelné detektory. Zářivý tok se zaostřuje na detektor soustavou čoček z materiálu se širokým spektrem prostupnosti nebo zrcadlem se širokým spektrem odrazivosti. Vzhledem k tomu, že ani spektrální pohltivost detektoru není ideální, dochází u technické realizace ke spektrálnímu omezení. Pokud zanedbáme výše uvedené spektrální omezení, pak za předpokladu nulové hodnoty odrazivosti měřeného objektu $\rho = 0$ platí Stefan-Boltzmanův zákon.

Nastavíme-li na pyrometru hodnotu emisivity $\varepsilon = 1$, pak při měření povrchové teploty T_s reálného tělesa, jehož emisivita $\varepsilon < 1$, nebude změřená hodnota teploty odpovídat skutečné teplotě povrchu reálného tělesa, ale takové teplotě T_ε , při níž by byla zář L_ε černého tělesa právě stejná jako zář reálného tělesa. Neboli změřená teplota T_ε bude vždy nižší než skutečná teplota T_s .

Korekce údajů bývá obtížná, proto se používají pokud možno k měření teploty zářičů blízkých černým zářičům. Jinak musí být kalibrována stupnice přístroje. Z pohledu funkčního schéma je tepelné záření soustředěno objektivem nebo dutým zrcadlem na detektor (termoelektrický článek), který ovlivňuje rozsah pyrometru (- 40 °C do + 5000 °C). Při měření teploty nečerných zářičů se údaj pyrometru od skutečné teploty liší v závislosti na emisivitě (blíže kap. 4) nebo [3].

❖ Monochromatické pyrometry

Monochromatický pyrometr je spektrálně selektivní pyrometr založený na závislosti spektrálního vyzařování tělesa při dané vlnové délce na teplotě. Pro diskrétní hodnotu vlnové délky platí Planckův resp. Wienův zákon. Nejčastěji se nazývají jasové, které využívají úzkého spektrálního pásma v oblasti viditelného záření, což je vymezeno barevným filtrem, nejčastěji červeným ($\lambda = 0,65\mu\text{m}$).

Měřícím principem je porovnání jasu měřeného předmětu s jasnem srovnávacího zdroje - pyrometrické žárovky. Jelikož měřený objekt je málokdy černým zářičem, tak pyrometr neukazuje skutečnou teplotu, nýbrž jasovou, která je všeobecně nižší než skutečná. Údaj se pak většinou koriguje pomocí korekčních grafů odvislých od vlnové délky využitého záření (λ) a spektrální emisivity měřeného objektu (ε_λ). Jasové pyrometry jsou subjektivní, protože kvalita měření je odvislá od pozorovatele.

❖ Pásmové pyrometry

Jsou spektrálně selektivní pyrometry, které měří záři na povrchu tělesa ve stanoveném rozsahu vlnových délek, tzn. měří teplotu prostřednictvím záření v úzkém pásmu vlnových délek. Šíře pásma je od 10 nm do jednotek mikrometru. Výhodou je rychlá reakce na změny teploty a možnost měření i na malých objektech. Jinak platí v podstatě vše, co bylo uvedeno u jasových včetně korekce skutečné a změřené teploty.

❖ Poměrové pyrometry

Vyhodnocují povrchovou teplotu objektu na základě poměru dvou září při dvou různých vlnových délkách.

Pyrometry jsou kalibrovány při tzv. teplotě spektrálního složení, tj. teplotě černého tělesa T_o , při níž je poměr září pro dvě vlnové délky λ_1 a λ_2 stejný jako poměr září reálného měřeného tělesa, jehož povrchová teplota je T_s . Je-li tvar křivky spektrální hustoty záře stejný u černého tělesa a u reálného tělesa a využíváme-li vlnových délek viditelného záření, nazývá se teplota spektrálního záření teplotou barvy. Z Planckova zákona lze dokázat, že poměr září je zcela jednoznačný a pro každou teplotu jiný.

❖ Vícepásmové pyrometry

Zmenšují nejistotu měření u poměrových pyrometrů vlivem $\varepsilon = f(\lambda)$, tím že se používá třípásmový pyrometr, který vyhodnocuje poměr měřených veličin. Pak za určitých podmínek se zajistí, že měřený poměr není funkcí emisivity.

❖ Pyrometry s automatickou korekcí emisivity

Kromě poměrových a vícepásmových pyrometrů existují principy umožňující měření teploty bez znalosti emisivity měřeného objektu. Jedním z těchto principů je měření monochromatickým pyrometrem, a to střídavě zář z měřeného předmětu ozářeného laserem s přesně definovanou září. Laser tvoří součást pyrometru.

❖ **Pyrometry s optickými vlnovody v infračervené oblasti**

Optický vlnovod je zařízení k vedení elektromagnetických vln o vysokých frekvencích. Pro přenos infračerveného záření jsou podstatné ztráty vlnovodu, které způsobují pokles zářivého toku. Ztráty jsou způsobeny absorpcí v prostředí vytvářejícím vlnovod, rozptylem na nepravidelných nehomogenitách indexu lomu materiálu vlnovodu a ztráty vyzařováním na ohybech vlnovodu.

Optické vlnovody jsou u bezdotykových měření teplot využívány pro přenos fotonového toku z místa, které není přímočaře viditelné z místa pyrometru, přičemž pyrometr nelze umístit v blízkosti měřené plochy z důvodu malého prostoru, vysoké nebo nízké teploty, absorpce prostředí (pára, plyny prach), explozivní prostředí, silného elektromagnetického pole (např. u indukčního ohřevu), radioaktivního záření, chemicky agresivního prostředí; výhodou je možnost měření v distribuovaných měřicích systémech, mechanická pevnost a u vláknových vlnovodů pružnost a délka k senzorové hlavici do 10 m, možnost využití vlnovodu pro zaměření místa měření zpětným světelným tokem.

IR vlnovody lze rozdělit do kategorií:

- skleněná optická vlákna
- krystalická optická vlákna
- dutinové vlnovody

3.4 Fotografické měření teploty [2]

Fototermometrie umožňuje proměřovat i teplotní pole na povrchu předmětů, jejichž teplota se značně mění. Využívá se fotografického materiálu citlivého na IČ záření ($\lambda = 0,78\mu\text{m}$). Pro vyhodnocení snímku se musí současně vyfotografovat tzv. teplotní měřítko se známým rozložením teploty, což je řada destiček, které jsou vyhřátý na různou teplotu určenou termoelektrickými články. Vyhodnocovat se mohou již plošky $0,25\text{ mm}^2$, rozsah měření je od $+250\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Přesnost měření je dána rozdílností emisivit teplotního měřítka a měřeného povrchu.

3.5 Skenování liniové systémy

Jedná se o systémy bezkontaktního měření teploty v řádku, tzn. liniové skenery. Princip skenování takový, že optický systém s velmi úzkým zorným polem „virtuálně posouvá“ detektor v řádku. K tomuto posuvu dochází díky uspořádání optického systému (který má většinou malý zorný úhel) a v dochází k němu v důsledku otáčení se jednoho optického prvku, připevněného na otáčející se mechanismus. Při každé „otočce“ se nejprve sejme zářivý tok jednoho referenčního zdroje záření (černého tělesa), potom se při „skenování“ průzorem v plášti skeneru, který je vyplněn IČ oknem (plastickým materiálem) sejme zářivý tok v jenom „řádku“ na měřeném objektu a dále potom zářivý tok druhého zdroje záření, který má jinou teplotou (obvykle vyšší) než jakou měl sejmutý zářivý tok z dříve sejmutého referenčního zdroje záření. (Referenční zdroje záření se používají pro auto kalibraci skenovacího systému). Tím je ukončen proces sejmutí a vyhodnocení vstupních signálů v „jednom řádku“ a dále se postup opakuje.

Skenování systémy, které jsou většinou osazeny termoelektricky chlazenými fotonovými detektory, a které se používají hlavně tam, kde je měřený objekt se pohybuje např. kolmo ke „skenovacímu“ řádku systému. Příkladem může být např. otáčející se cementárenská pec. Skenování systém snímá teplotu v řádku na povrchu pece v její podélné ose a po pootočení se pece v dalším řádku atd. Vzhledem k tomu, že je otáčecí mechanismus skeneru je osazen kódovacím diskem, který jednak spouští skenování řádek a který ještě rozděluje snímaný signál v řádku na jednotlivé „body“, je výsledkem informace o průběhu teplot v řádku, s rozdělením jednotlivé body. Informace o průběhu teplot v řádku - profil teplot - se ukládá do paměti připojeného počítače a při pootočení se pece je obdobně sejmuta

a zaznamenána informace v další zaměřené části pece atd. Po otočení pece o 360° je tak možné získat informace o teplotách nebo případně o jejich změnách na plášti otáčející se pece.

3.6 Měření množství tepla [2]

Třebaže na první pohled tato kapitola do předkládaných skript nepatří, přesto ji zde zařazujeme, neboť dané je nejen velmi důležité, ale také se s ním v životě setkáme.

❖ Měřič tepla ve vodní tepelné síti

Hlavní části měřiče tepla ve vodní síti jsou:

- odporové snímače teploty párované (jejich přesnost je zaměřena především na teplotní rozdíl)
- vodoměr s vysílačem impulsů - počet impulsů odpovídá proleklému množství, jejich četnost pak okamžitému průtoku, používají se ale také indukční a ultrazvukové průtokoměry
- kalorimetrický převodník - vyhodnocuje tepelný výkon a množství tepla
- počítadla proleklého množství vody a množství tepla.

❖ Měřič tepla v parní tepelné síti

Hlavní části měřiče tepla v parní tepelné síti jsou:

- průtokoměr - nejčastěji normovaný škrtící orgán s elektrickým převodníkem tlakové difference
- odporové vysílače teploty s platinovými měřicími odpory ve čtyřvodičovém zapojení,
- matematický člen pro výpočet tepelného výkonu a množství tepla zahrnující potřebné korekce na změny měrné entalpie páry s jejím tlakem a teplotou,
- počítadla proleklého množství páry a množství tepla

Modifikace matematických členů a kalorimetrických převodníků s mikroprocesorovou výpočetní technikou umožňují řešit elektronické obvody velmi úsporně a výkonně a udávat všechny potřebné veličiny, jako např. okamžitý průtok a proteklé množství, teplotní rozdíl, tepelný výkon a množství tepla, ale také příslušné hodnoty součinitelů a konstant.

❖ Poměrové měřiče tepla

Speciální skupinou měřičů tepla jsou ty, které se připevňují na topná tělesa (radiátory). Měřícím principem je odpařování speciální kapaliny v závislosti na době ohřevu a výši teploty, nebo trvalá deformace páskových čidel, popř. změn vodivosti elektrolytu.

Volba umístění měřiče na topném tělese se řídí požadavkem, aby byl v oblasti střední povrchové teploty tělesa (radiátoru). Tomu odpovídá poloha ve výšce cca 55% až 60% celkové výšky radiátoru. Co se týká vodorovného umístění, má být měřič v úhlopříčce ose tělesa. U dlouhých těles (více jak dva metry) je nutno umístit dva měřiče souměrně. Takto zabudované měřiče nevykazují chyby větší než 7%.

4 TERMOGRAFIE

Pojem termografie zahrnuje metody pro zobrazování teplotních polí na povrchu snímaných těles (rozložení povrchových teplot), které je reprezentováno energií a hustotou fotonů emitovaných z povrchu snímaného tělesa a jeho vyhodnocením - kvantifikací.

IČ termografie je i názvem pro techniku, která je obecně určitým transformačním systémem, pomocí kterého je možné zobrazit neviditelné (pro lidské oko) IČ záření vyzařované z objektů a to v závislosti na jejich tepelných stavech. Velice efektivním nástrojem nekontaktní IČ termografie je technika zvaná termovize, obecně infratechnika. (Pozn.: Termovize (Thermovision[®]) je registrovaná výrobní a obchodní značka firmy FLIR Systems - tato firma, produkující zobrazovací a detekční systémy pro nekontaktní termografii, vyrábí určité výrobky s tímto názvem. U nás je pojmem termovize obecně označována nekontaktní termografie, resp. jí používané infrazobrazovací systémy (nazývané také infrakamery, termokamery).

Typický termografický systém - termovize se podobá videokameře, který ale, na rozdíl od videokamery, zobrazuje tepelné vyzařování objektu(-ů) většinou ve standardní televizní obrazové frekvenci. Termovizi je také možno popsat jako zobrazovací systém transformující informaci o rozložení teploty na povrchu snímaného objektu v infračerveném spektru na obraz viditelný lidským okem. (Zobrazovacím systémem pro oblast viditelného záření je zrakový orgán, tedy oko). Více sofistikované IČ kamery potom mohou nejen zobrazovat teplotní pole objektů (většinou jejich povrchů), ale umožňují tato pole kvantifikovat - vyhodnocovat (měřit) teploty těchto polí a to u dnes běžně dostupných systémů v teplotním rozsahu až od - 40 °C až do + 2000 °C s obrazovou frekvencí až 50 Hz. Vlastní zobrazení tepelného (teplotního) pole - termogram může být buďto černobílé nebo (pseudo) barevné.

4.1 Základní princip, pojmy a terminologie [10]

Předmětem termografie - termovizního měření je snímaný objekt, resp. většinou jeho povrch, emitující (sálající) fotony - zářivou energii v IČ části ELMG spektra. Povrch je možné si představit jako soustavu „bodových“ zdrojů signálové radiace, přičemž každý „bod“ vyzařuje z povrchu objektu signál - fotony do všech směrů.

Zářivá energie může být v IČ části spektra generována třemi typy zdrojů:

- luminiscenčními zdroji
- radiovými zdroji
- tepelnými zdroji

Tepelné zdroje jsou takové zdroje, které generují zářivou energii, která je hrazena na úkor jejich tepelné energie, tj. rotačně vibračních kmitů jejich atomů a molekul. IČ záření generuje veškerá hmota, jejíž teplota je vyšší než absolutní nula (0 K). Zdrojem tepla je tedy každý objekt s teplotou vyšší než 0 K (tzn. všechny objekty kolem nás); přenos tepla z tělesa (i na těleso) se děje prostřednictvím radiace (sáláním) v IČ části ELMG spektra. Signální radiační tok - tepelné záření je reprezentován tokem fotonů v IČ části spektra a jeho velikost u každého objektu závisí především na teplotě objektu - při zvýšení jeho teploty rychle roste celková energie (intenzita) zářivého toku a naopak. Výsledným „produktem“ IČ zobrazovacího systému je termogram - tepelné zobrazení (teplotního pole) na povrchu objektu.

(Pozn.: Ve skutečnosti se jedná o zobrazení distribuce fotonového toku na, či z povrchu zaměřovaného objektu - vyhodnocení resp. kvantifikace tohoto toku na teploty).

Určitě nebude na škodu věci vysvětlit dvě nejčastější otázky.

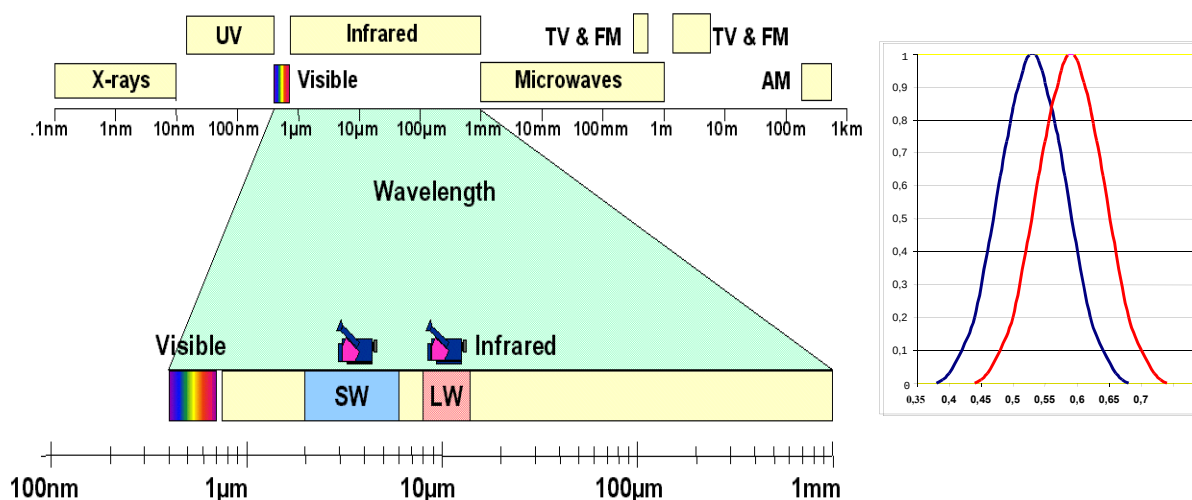
Jaký je rozdíl mezi termovizní technikou a technikou na „noční vidění“?

Technika na noční vidění v podstatě zesiluje zbytkové množství (fotonů) viditelného záření (a někdy také i část infračerveného záření - do vlnových délek cca 1 μm). Princip činnosti techniky na noční vidění je asi takový, že po průchodu speciálním objektivem světlo o nízké intenzitě dopadá na fotokatodu, která po dopadu fotonů emituje elektrony, které se dále násobí až na hodnoty řádu 10^4 až 10^5 . Tok elektronů potom dopadá na stínítko, které je obvykle pokryto fosforem (odtud „zelený“ obraz) a v podstatě tak se zobrazí - vytvoří obraz „nočního vidění“.

Jaký je rozdíl mezi termogramem a IČ fotografií?

IČ fotografie je v podstatě záznam odrazu IČ záření velmi horkých zdrojů jako je např. Slunce, od objektu. Záření ve spektrálním rozsahu přibližně mezi 0,7 až 0,9 μm může být zaznamenáno na speciální fotografickou emulzi, jejíž největší citlivost je právě v tomto pásmu. Protože takový film je také citlivý i na viditelnou část ELMG spektra, musí být použit speciální filtr pro „odstínění“ viditelného záření. IČ fotografie mohou být také použity pro zobrazení rozložení vyzařování z objektů, jejichž teploty dosahují hodnot přibližně od 250 do 500 $^{\circ}\text{C}$ (kap.3.4). Termogram nám pak zobrazuje plochu rozložení teplot, tzn. jsme schopni určit každý bod plochy.

Infračervené (dále jen IČ) záření je neviditelná část elektromagnetického (dále ELMG) spektra projevující se tepelnými účinky; jedná se o záření s vlnovou délkou v intervalu přibližně 0,78 μm až 1 mm - tedy nad viditelnou částí. Viditelné záření, odpovídající spektrální citlivosti lidského oka, leží v rozsahu vlnových délek cca 0,38 až 0,78 μm (obr.1).



Obr.1 Elektromagnetické spektrum a spektrální citlivost oka

Termografie tedy využívá vlnové pásmo infračerveného záření. Hranice je, kde začíná pásmo krátkovlnného infračerveného záření, tzn. končí tzv. viditelné pásmo (tmavě červená) a končí v pásmu dlouhovlnného infračerveného záření, tzn. kde začíná pásmo „mikrovlnných délek“, tj. v pásmu několika milimetrů vlnové délky.

Infračervená oblast elektromagnetického spektra se dělí na různé části. Přesné rozdělení není jasně specifikováno, v dalším textu použijeme rozdělení, které je v písemných materiálech použito nejčastěji:

Blízká oblast	0,75 μm - 2 μm NWIR (Near Wave IR)
Krátkovlnná oblast	2 μm - 3 μm MWIR (Short Wave IR)
Střední oblast	3 μm - 5 μm MWIR (Middle Wave IR)
Vzdálená oblast	5 μm - 15 μm LWIR (Long Wave IR)
Velmi vzdálená oblast	15 μm - 1 mm VLWIR (Very Long Wave IR)

Přestože jsou vlnové délky udávány v μm (mikrometry), používají se v tomto spektrálním pásmu i jiné jednotky například mikrony (μ), nanometry (nm) a Ångströmy (Å).

Vztah mezi různými jednotkami je:

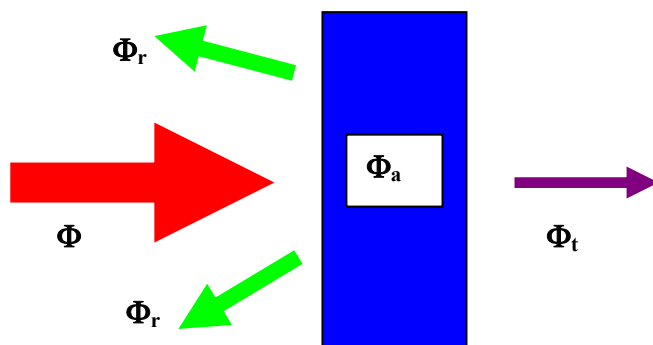
$$10\,000\text{ Å} = 1\,000\text{ nm} = 1\text{ }\mu = 1\text{ }\mu\text{m}$$

Na závěr této kapitoly musíme uvést, že veličiny, jednotky a další najdeme v ČSN ISO 31-6. Veličiny a jednotky - Světlo a příbuzné elektromagnetické záření, ČSN ISO 31-4 Veličiny a jednotky - Teplo, ČSN ISO 13372 Monitorování stavu a diagnostika strojů - slovník v literatuře [10] jsou na 20 stránkách uvedeny vybrané termíny v dané problematice v českém jazyce včetně stručného objasnění a anglických ekvivalentů. V [5] již zmíněné přílohy na pojmy a veličiny v pyrometrii a další (detektory), takže jsme přesvědčeni, že dostupnost je velmi vysoká, proto uvádíme pouze tyto odkazy.

4.2 Základy teorie termografie

4.2.1 Záření reálných těles [10]

Zářivá energie, kterou vysílá povrch tělesa určitou plochou za jednotku času, se nazývá zářivým tokem či výkonem, je to výkon přenášený zářením, má označení P nebo Φ a jeho jednotkou je W ($1\text{ W} = 1\text{ J}\cdot\text{s}^{-1}$). Intenzita vyzařování M v daném bodě povrchu je podíl zářivého toku, vycházející z elementu povrchu a plochy tohoto elementu a má jednotku $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$



Obr.2 Přenos zářivé energie prostředím interakce

Ozařujeme-li nějaké těleso zářivým tokem Φ , (obr.2), potom těleso bude část tohoto toku pohlcovat - Φ_a , část toku bude odrážet - Φ_r a část toku propouštět - Φ_t . Protože tato skutečnost platí pro všechna tělesa, definují se odpovídající součinitelé, které popisují vlastnosti tělesa:

$$\text{součinitel pohlcení (pohltivosti)} : \alpha = \frac{\Phi_a}{\Phi} \quad (1)$$

$$\text{součinitel odrazu (odrazivosti)} : \rho = \frac{\Phi_r}{\Phi} \quad (2)$$

$$\text{součinitel prostupu (propustnosti): } \tau = \frac{\Phi_t}{\Phi} \quad (3)$$

Ze zákona o zachování energie platí:

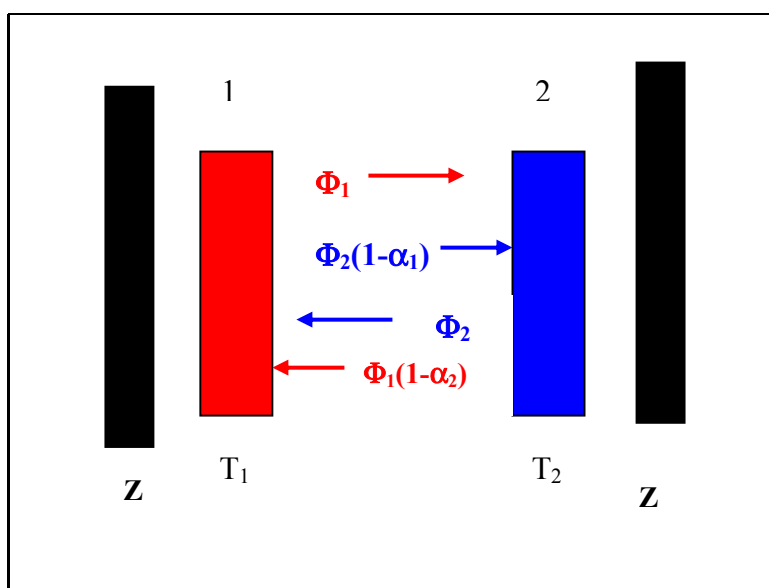
$$\Phi = \Phi_a + \Phi_r + \Phi_t = \alpha\Phi + \rho\Phi + \tau\Phi \quad (4)$$

z toho plyne :

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (5)$$

Vyzařování (tepelného) z tělesa je provázeno snižováním jeho tepelné energie (tepla), která se navenek projevuje jako snížení jeho teploty. Aby se teplota tělesa udržela konstantní a těleso bylo v termodynamické rovnováze s jeho okolím, musí být ztracená energie vyzařovaného tepelného záření nahrazena z vnějšku dodanou energií.

Předpokládejme, že existuje od okolí tepelně izolovaná soustava (viz obr.3), která dovoluje jen přenos tepla zářením - sáláním. V této soustavě jsou umístěny dvě rovnoběžné desky vyrobené z různých materiálů, u každé (za každou deskou) je umístěno zrcadlo (Z), které odráží zářivou energii generovanou každou deskou - při bilanci zářivého toku lze potom uvažovat jen tok, který přechází pouze mezi deskami 1 a 2.



Obr.3 Tepelná soustava

Po dostatečně dlouhé době se ustálí teplota těles 1 a 2 na stejné hodnotě $T_1 = T_2$ - platí zákon zachování energie. Při $T_1 = T_2$ musí deska 1 ozařovat desku 2 stejným zářivým tokem, jakým ozařuje deska 2 desku 1. Deska 1 vyzáří vlastní tok Φ_1 a odráží nepohlcenou část toku od desky 2 tj $\Phi_2(1-\alpha_1)$ - obdobně to platí i pro desku 2 a to jak pro celkové záření na všech vlnových délkách, tak i pro každý interval vlnových délek zvlášť.

4.2.2 Záření černého tělesa [6], [10]

U těles, jejichž součinitel prostupu τ a odrazu ρ se rovnají 0, platí vztah:

$$\alpha = 1 \quad (6)$$

a taková tělesa se nazývají černá tělesa (dále ČT). Absolutně černé těleso (dále AČT) je takové těleso, u něhož součinitel pohlcení dosahuje hodnoty 1 a to na všech vlnových délkách - u modelů černých těles je tento součinitel vždy menší než 1. U velmi kvalitních ČT se hodnota součinitele pohlcení α velmi přibližuje hodnotě 1.

V rovnovážném stavu tělesa je (podle Kirchhoffova zákona) množství emitované energie z objektu stejné s množstvím absorbované energie a tedy platí u AČT :

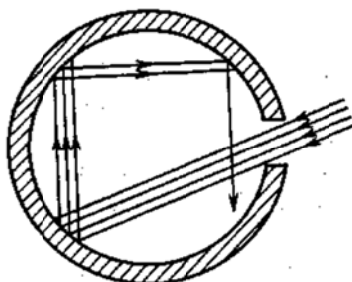
$$\varepsilon = \alpha \quad (7)$$

Označíme-li intenzitu vyzařování (absolutně) černého tělesa M_o , potom pro AČT platí:

$$\frac{M_o}{\pi} = f(T) \quad (8)$$

Intenzita vyzařování (absolutně) černého tělesa závisí jen na jeho absolutní teplotě!

Modelem černého tělesa může být dutinový zářič. Zářivý tok, který otvorem dopadne do dutiny, se mnohonásobným odrazem dokonale pohltí. Činitel pohlcení tohoto dutinového zářiče je roven 1 a to pro každou vlnovou délku. Pokud se udržuje v dutině tělesa konstantní teplota, je dutina tělesa v termodynamické rovnováze a potom otvor modelu černého tělesa, který pohlcuje veškeré dopadající záření (bez ohledu na jeho vlnovou délku, směr i polarizaci) je zároveň zdrojem záření.



Obr.4 Schématické znázornění ČT

Energie záření z černého tělesa je obecně různá pro různé vlnové délky, resp. je určitým způsobem rozdělena podle vlnových délek. Po kvantitativní stránce je energie záření charakterizována veličinou, která se nazývá spektrální hustota vyzařování H [J/m^2]. Byla provedena celá řada experimentů a byly zjištěny tyto závislosti:

1. Pro danou teplotu vykazuje závislost spektrální hustoty vyzařování na frekvenci nebo vlnové délce jediné maximum.
2. Se zvyšující se teplotou roste i spektrální hustota vyzařování a to pro kteroukoli frekvenci nebo vlnovou délku.
3. Hodnoty vlnové délky λ pro niž závislost spektrální hustoty na vlnové délce nabývá maxima, se s rostoucí teplotou posouvá k nižším hodnotám (kratším vlnovým délkám).

Na základě provedených experimentů, jejichž výsledky byly zpracovány do grafu, byly potom odvozeny dva zákony:

- zákon **Stefan - Boltzmanův** - intenzita vyzařování pro černé těleso závisí pouze na termodynamické teplotě tělesa (viz kap.4.2.3)
- a (posouvací) zákon **Wienův** - při určité vlnové délce λ má spektrální hustota vyzařování při dané teplotě T své maximum (viz kap.4.2.3)

O vysvětlení průběhu závislosti vyzařované energie na vlnových délkách pro černé těleso se koncem 19.století pokoušela řada fyziků. Použití zákonů klasické termodynamiky a statistiky vedlo k výsledkům, které se s experimentálně zjištěnými závislostmi shodovaly tím lépe, čím delší byla vlnová délka záření - v oblasti kratších vlnových délek této shody nebylo dosaženo. Úsilí odvodit teoreticky tvar $f(\lambda, T)$ (10) nevedlo dlouho k žádným výsledkům, až **Max Planck** odvodil potřebný vztah (viz kap.4.2.3).

Což ve shrnutí lze vyjádřit tak jak je na následujících řádcích. Černé těleso je definováno jako objekt, který pohlcuje veškeré záření, které na něho dopadá a to bez ohledu na vlnovou délku záření. Na první pohled pojmenování („černé“ je vztaženo k objektu s vysokou intenzitou záření) a je vysvětleno Kirchhoffovým zákonem, který říká, že těleso schopné pohlcovat (absorbovat) veškeré na něho dopadající záření, je schopné také stejné množství záření vyzařovat (emitovat).

Konstrukce černého tělesa je v principu velmi jednoduchá. Černé těleso lze charakterizovat pomocí vyzařovacích charakteristik otvoru vytvořeného v izotermní dutině neprůhledného absorbujícího materiálu. V praxi je možné takovýto „pohlcovač záření“ vytvořit jako např. kouli s jedním otvorem, nebo krychli s otvorem ve středu jedné stěny. Každé záření, které „projde“ tímto otvorem je rozptýleno, a po odrazech od vnitřních stěn je postupně tělesem (jeho vnitřními stěnami) absorbováno, takže „unikne“ pouze nekonečně malé množství záření. „Černost“, které je dosaženo v otvoru se svými vlastnostmi téměř rovná černému tělesu a je vyhovující pro všechny vlnové délky.

Pokud je takováto izotermní dutina vybavena vhodným zdrojem tepla, je možné získat tzv. „dutinový zářič“. Izotermní dutina zahřátá na konstantní teplotu „vytváří“ záření černého tělesa, což je specifická vlastnost, kdy intenzita záření závisí pouze na teplotě dutiny. Takovéto dutinové zářiče se velmi často používají jako zdroje záření pro kalibraci přístrojů využívajících (vyhodnocujících) infračervené záření, tedy také termovizní kamery.

Překročí-li teplota černého tělesa 525 °C, zdroj začíná být „viditelný“, protože lidské oko jej začíná vnímat jako červený objekt. Je to počáteční stav tzv. červené sálavé teploty zářiče, která potom (při zvyšování teploty) přechází do barvy oranžové resp. žluté. Definice tzv. „barevné teploty“ určuje takovou teplotu, na kterou musí být zahřáté černé těleso, aby mělo stejnou barvu, jako objekt.

4.2.3 Základní zákony tepelného záření [5], [6], [10]

❖ Kirchhoffův zákon

Souvislost mezi vyzařováním černých a nečerných těles (zářičů) udává Kirchhoffův vyzařovací zákon. V roce 1860 Kirchhoff odvodil, že podíl intenzity vyzařování $H(T)$ a pohltivosti $\alpha(T)$ libovolného tělesa nezávisí na materiálu tělesa, nýbrž je pouze funkcí jeho teploty T , což lze zapsat ve tvaru

$$\frac{H(T)}{\alpha(T)} = f(T) \quad (9)$$

Vztah ukazuje na skutečnost, že tělesa čím více pohlcují, tím více vyzařují. Kirchhoff také ukázal, že tento fakt musí být splněn také v každém oboru vlnových délek zvlášť, tj. že platí

$$\frac{H(T, \lambda)}{\alpha(T, \lambda)} = f(T, \lambda) \quad (10)$$

Platí-li, že čím větší je hodnota spektrální pohltivosti $\alpha(T, \lambda)$, tím větší pro danou vlnovou délku je hodnota parametru $H(T, \lambda)$, znamená to, že tělesa vyzařují nejvíce záření té vlnové délky, kterou také nejvíce pohlcují.

Nejvíce vyzařuje černé těleso, jehož $\alpha_0(T, \lambda) = 1$. Zavedením pojmu černého tělesa (zářiče) Kirchhoffem se zjednodušilo nalezení funkcí $f(T)$ a $f(T, \lambda)$.

Zjištění, že tělesa vyzařují nejvíce záření té vlnové délky, kterou také nejvíce pohlcují, vedlo k zavedení *emisivity* ε .

Tedy platí:

$$\alpha(T, \lambda) \equiv \varepsilon(T, \lambda) \quad (11)$$

$$\text{a po úpravě } H(T, \lambda) = \varepsilon(T, \lambda) \cdot H_0(T, \lambda) \quad (12)$$

Z předchozího výkladu je zřejmé, že poměr intenzit je roven emisivitě povrchu měřeného předmětu

$$\frac{H(T)}{H_0(T)} = \varepsilon(T) \quad (13)$$

❖ Stefan-Boltzmannův zákon

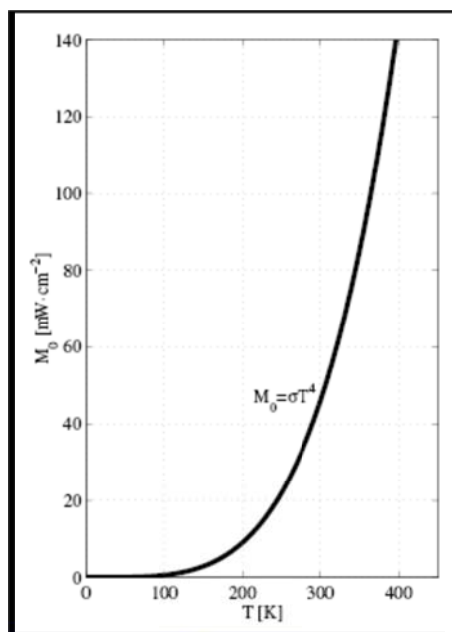
Udává intenzitu vyzařování černého tělesa při termodynamické teplotě T

$$H_0(T) = \sigma \cdot T^4 \quad [\text{W}] \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}] \quad (14)$$

kde σ je Stefan - Boltzmanova konstanta a má přibližnou velikost

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ (W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}\text{)}$$

Převzatý obrázek 5 udává jiné, než obvykle uváděné označení, které jsme také použili ve vzorci (4), ale přesto jej uvádíme ke zvýšení informovanosti.



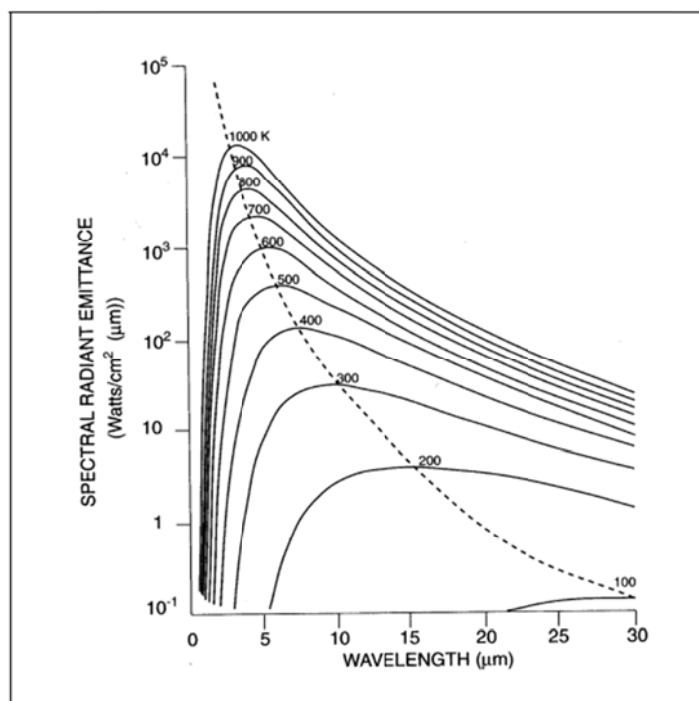
Obr.5 Intenzita vyzařování ČT [10]

❖ Wienův zákon posuvu [6]

Udává závislost vlnové délky maxima vyzařování na termodynamické teplotě T

$$T \lambda_{max} = b \quad [-] \quad [\text{m} \cdot \text{K}] \quad (15)$$

kde b je hodnota konstanty Wienova zákona ($2,897 \cdot 10^{-3}$) [$\text{m} \cdot \text{K}$]



Obr.6 Wienův zákon posuvu [6]. Čárkovaná křivka představuje spojnicí největšího vyzařování (max.) každé teploty jak popisuje Wienův zákon posuvu

❖ Planckův zákon

Udává spektrální rozložení teplotního záření. Pro černé těleso je tvaru

$$H_{e\lambda 0} = H_0(T, \lambda) = \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\left(e^{\frac{c_2}{T \cdot \lambda}} - 1 \right)} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-3}] \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}] \quad (16)$$

kde $H_0(T, \lambda)$ je spektrální hustota intenzity vyzařování, c_1, c_2 jsou první a druhá vyzařovací konstanta.

$$\begin{aligned} c_1 &= (3,741\,832 \pm 0,00\,020) \cdot 10^{-16} & [\text{W} \cdot \text{m}^2] \\ c_2 &= (1,438\,786 \pm 0,000\,045) \cdot 10^{-2} & [\text{m} \cdot \text{K}] \end{aligned}$$

Aby tento výsledek Planck obdržel, tak předpokládal v rozporu s klasickou termodynamikou, že se energie nešíří spojitě, ale po kvantech závislejících na frekvenci a konstantě (Planckova)

$$h = 6,6 \cdot 10^{-34} [\text{J} \cdot \text{s}]$$

4.2.4 Nečerné zářiče [6], [10]

Tato kapitola je pokračováním toho, co bylo uvedeno v kap. 4.2.1, o záření reálných těles. Reálné objekty (tělesa), resp. jejich záření se neřídí v delších rozmezích vlnových délek stejnými zákony, jako to platí pro černé těleso, přestože v určitých intervalech vlnových délek tomu tak může být. Například bílá barva se jeví dokonale „bílou“ ve viditelné části spektra, ale stává se „šedou“ okolo 2 μm , a okolo 3 μm je téměř „černá“.

Existují tři skutečnosti (složky záření), které mohou odlišovat reálný objekt od černého tělesa: část dopadajícího záření α může být pohlcována, část záření ρ může být odražena a část τ může tělesem prostupovat. Protože jsou tyto složky více méně závislé na vlnové délce, užívá se pro jejich vyjádření spektrální závislost λ .

U reálných těles proto v návaznosti na kap. 4.2.1 mluvíme, že

- Spektrální pohltivost $\alpha\lambda$ = poměr energie pohlcené spektrálním zářičem a celkovým tokem.
- Spektrální odrazivost $\rho\lambda$ = poměr energie odražené spektrálním zářičem a celkovým tokem.
- Spektrální propustnost $\tau\lambda$ = poměr energie propuštěné spektrálním zářičem a celkovým tokem.

Pro výpočet vyzařování z objektu se používá faktor (činitel) vyzařování, který se nazývá emisivita ε . Je to v podstatě poměr záření vyzařovaného objektem, k záření, které by vyzařovalo černé těleso při té samé teplotě. Spektrální emisivita ($\varepsilon\lambda$) = poměr mezi energií spektrálního zářiče objektu a energií černého tělesa při stejné teplotě a vlnové délce.

Planckův, Stefan-Boltzmannův i Wienův zákon byly odvozeny pro (absolutně) černé těleso, takže *obecné radiační zdroje (tělesa) mají bezrozměrný koeficient emisivity (ε), který je vyšší než 0 a nižší než 1 ($0 < \varepsilon < 1$), což znamená, že mají zhoršené vyzařovací vlastnosti ve srovnání s (absolutně) černým tělesem.*

Koeficient emisivity reálných těles je obecně závislý na:

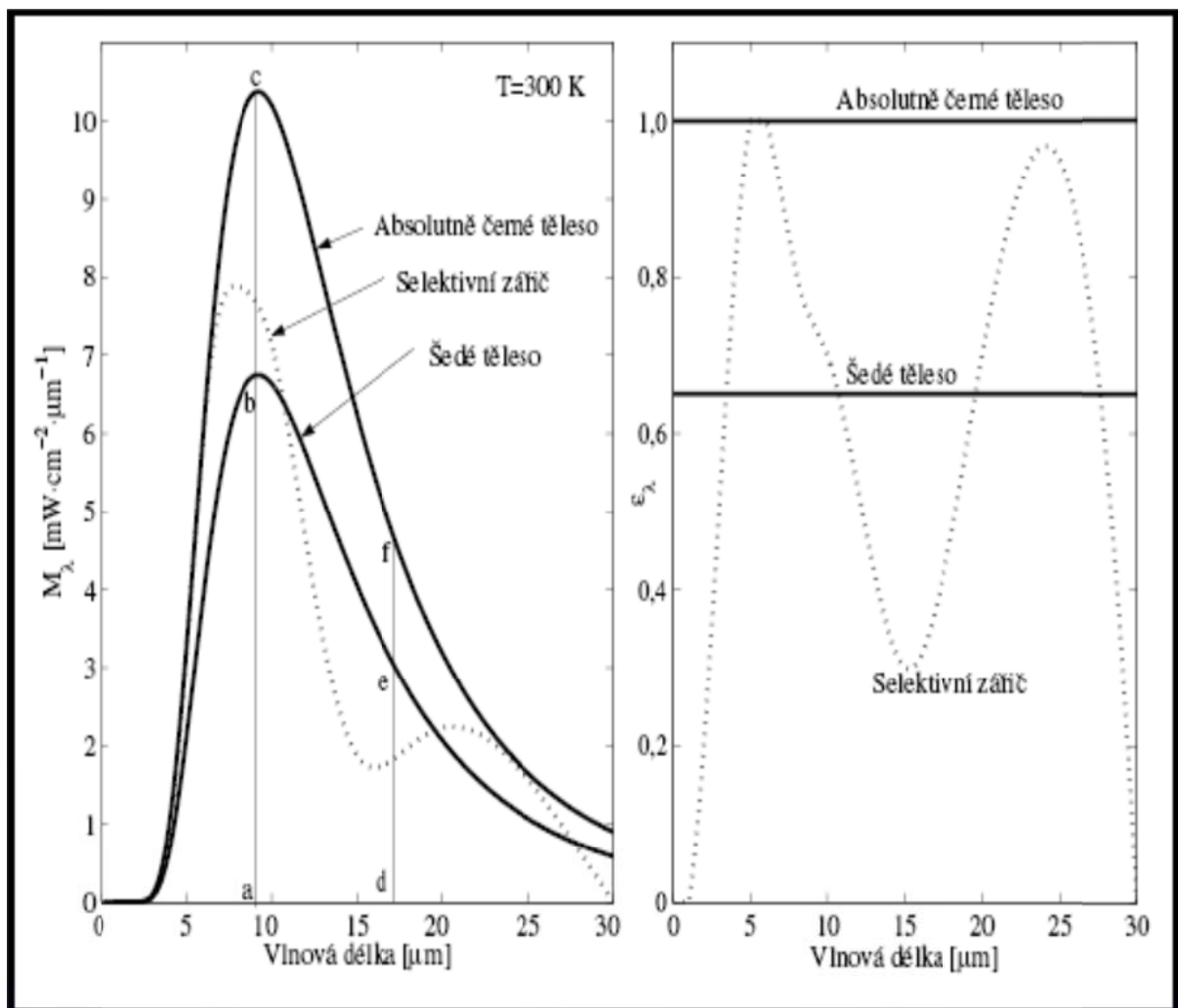
- *typu materiálu* zdroje (kov, izolant, oxid atd.),
- *vlastnostech jeho povrchu* (hladký, opracovaný atd.),
- *vlnové délce* (spektrální závislost),

- *teplotě zdroje,*
- *směru vyzařování.*

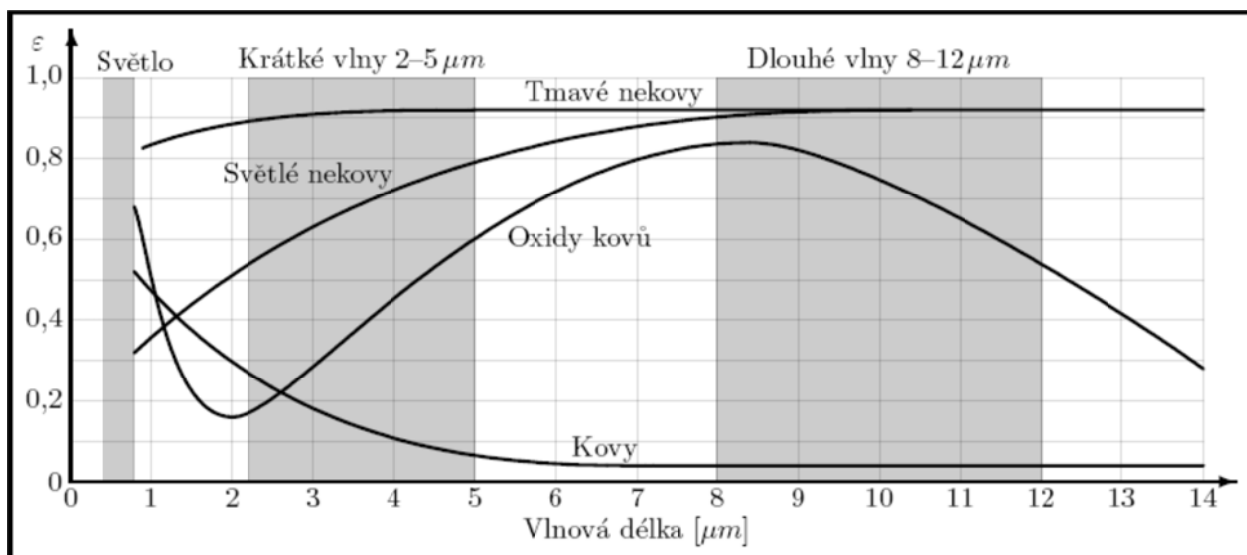
Průběh *spektrální závislosti emisivity* vymezuje tři základní typy tepelných radiačních zdrojů:

- *(absolutně) černá tělesa* AČT (blackbody) pro která platí, že na všech vlnových délkách $\varepsilon(\lambda) = 1$,
- *šedá tělesa* ŠT (graybody), pro která platí, že $\varepsilon(\lambda) < 1$, ale je konstantní na všech vlnových délkách,
- *selektivní zdroje* (selective radiator) - správněji *reálná tělesa*, pro které platí, že $\varepsilon(\lambda)$ se mění v závislosti na λ . Tato závislost může být obecně velmi složitá.

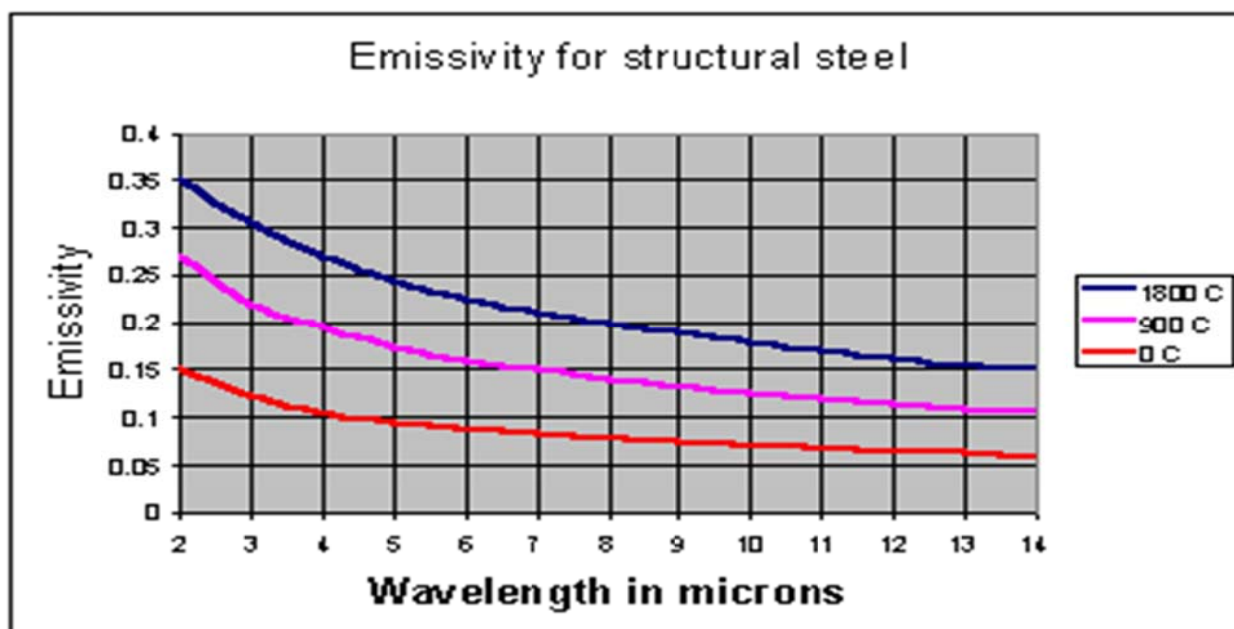
Lze konstatovat, že *většina materiálů* vykazuje vlastnosti *selektivního zdroje*.



Obr.7 Intenzity vyzařování a spektrální emisivity různých těles - zdrojů [10]



Obr.8 Informativní spektrální emisivity těles z různých materiálů. [10]



Obr.9 Informativní hodnoty emisivit konstrukční oceli (spektrální a teplotní závislost) [10]

Pozn.: Emissivity for structural steel - Emisivity konstrukční oceli
Wavelength in microns - Vlnová délka vyjádřena v μm

4.3 Technika termodynamického (termovizního) měření

Termovizní aparatura měří a zobrazuje objektem vyzařované infračervené záření. Fakt, že radiace - vyzařování je funkcí povrchové teploty objektu, umožňuje kameře tuto teplotu vypočítat a zobrazit.

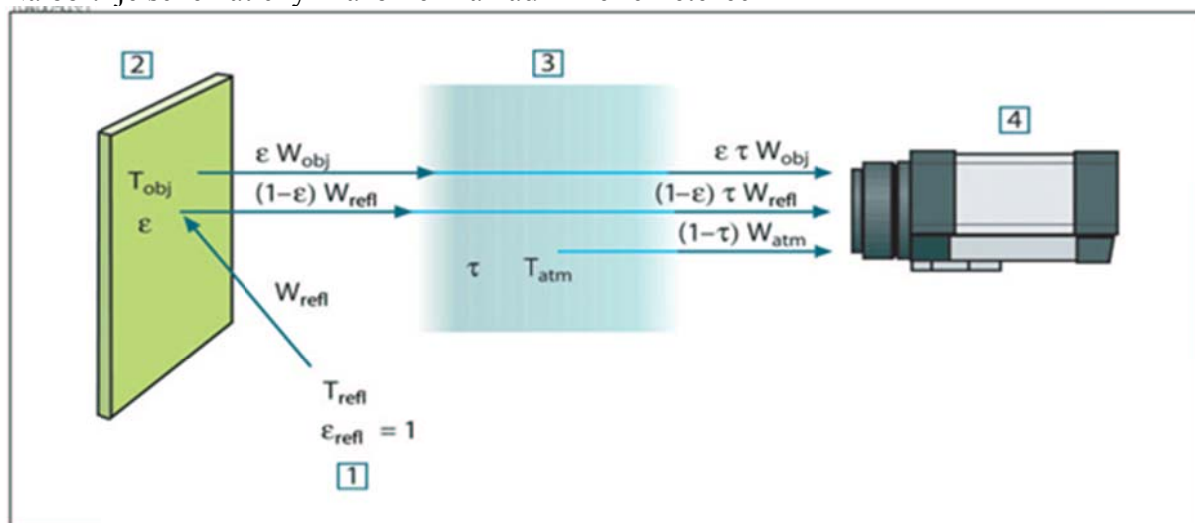
Nicméně radiace měřená termovizní kamerou nezávisí pouze na teplotě objektu, ale na řadě faktorů a vlivů, bez jejich znalosti by nebyla povrchová teplota objektu změřena. Kompenzace těchto faktorů a vlivů je u moderních termovizních aparatur prováděna automaticky, nicméně musí být zadány.

4.3.1 Měřicí řetězec [10]

Na obr.10 je schématicky uveden základní měřicí řetězec se svými částmi.

- 1** - Okolí (pozadí) měřeného tělesa
- 2** - Vlastní měřené těleso
- 3** - Atmosféra mezi měřeným tělesem a měřícím systémem
- 4** - Měřicí systém

Na obr. je schématicky znázorněn základní měřicí řetězec



Obr.10 Měřicí řetězec [10]

Do měřicího systému 4 (obr.10) vstupují tři zářivé toky:

- Záření od měřeného objektu, jehož intenzita je úměrná emisivitě ϵ , které při průchodu atmosférou se součinitelem propustnosti τ má výslednou hodnotu $H_{obj} = \epsilon \cdot \tau \cdot \sigma \cdot T_{obj}^4$
- Záření resp. odražený se záření od povrchu měřeného objektu nazývané odražená zdánlivá teplota - $H_{odr} = (1 - \epsilon) \cdot \tau \cdot \sigma \cdot T_{okoli}^4$
- Záření atmosféry - $H_{atm} = (1 - \tau) \cdot \sigma \cdot T_{atm}^4$

Pozn. V obrázku je sice použito jiné značení, ale smysl značení je určitě zřejmý

Pro zjištění a vyhodnocení stanovení správných hodnot teplot na povrchu měřeného objektu - kvantifikaci teplotních polí je nezbytné znát všechny související skutečnosti, které je možno přibližně shrnout do těchto bodů:

- Velikost detekovaného signálu z povrchu AČT je úměrná teplotě T .
- Velikost detekovaného signálu z povrchu obecného a matného materiálu je úměrná teplotě T , spektrálně, teplotně a úhlově závislé emisivitě povrchu $\epsilon(\lambda, \Theta, T)$ a vlivu reflektované složky signálu od radiačních zdrojů z okolí ($\rho = 1 - \epsilon$).
- Povrchová teplota T všech těles je ovlivněna: existencí zdrojů tepla pod povrchem a šířením tepla k povrchu mechanismem kondukce-vedení tepla a mechanismem konvekce-proudění tepla.
- Velikost detekovaného signálu od všech typů zdrojů signálu je ovlivněna prostředím, kterým se IČ záření šíří:

- vzduch (závislost útlumu signálu na spektrálním intervalu, teplotě a vlhkosti atmosféry)
- vzdálenost mezi zdrojem signálu a měřícím systémem (exponenciální zeslabení signálu)
- optické okno (spektrální závislost transparence, reflexe a útlum signálu).

4.3.2 Zadávací parametry ke kompenzaci při měření

4.3.2.1 Emisivita [3], [6], [10]

Z předchozích stránek skript by mělo být zřejmé, že:

Emisivita je poměr vyzařování tepelného zářiče k vyzařování černého tělesa při téže teplotě.

Spektrální emisivita je poměr spektrální hustoty intenzity vyzařování tepelného zářiče ke spektrální hustotě vyzařování černého tělesa při téže teplotě

Emisivita je nejdůležitější parametr, který musí být správně určen. Vyzařování běžných materiálů z povrchu objektů se pohybuje přibližně v intervalu od 0,1 do 0,95. Silně vyleštěný povrch (zrcadlo), má emisivitu povrchu 0,1 nebo méně, zatímco zoxidovaný nařtený povrch má emisivitu mnohem vyšší. Olejové barvy mají emisivitu větší než 0,9, a to nezávisle na jejich barvě ve viditelném spektru. Lidská pokožka má emisivitu blízkou hodnotě 1.

Nezoxidované kovy jsou extrémním případem skoro naprosté „neprůhlednosti“ a vysoké odráživosti, která se mnoho ve vlnových délkách (ve spektru vlnových délek) neliší. Proto je emisivita povrchu takovýchto kovů nízká - zvyšuje se pouze s teplotou. U nekovů je emisivita většinou vysoká a snižuje se s teplotou.

Jinak hodnoty emisivit najdeme v tabulkách, viz. příklad v [10] str. 67, kde jsou uvedeny převzaté hodnoty emisivit pro hliník, měď od fy FLIR Systems a v [3] příloha IV. jsou uvedeny hodnoty spektrálních emisivit pro celou řadu materiálů.

V případě, že nemáme k dispozici správnou hodnotu emisivity, je několik způsobů, jak tuto hodnotu zjistit a to v případě, že máme termografický systém, který umožňuje zadávat (měnit) hodnoty emisivity a také odrážející se zdánlivou teplotu.

❖ *změříme kontaktně* (v případech kdy je to možné) teplotu v daném místě či oblasti, nastavíme správnou hodnotu zdánlivě se odrážející teplotu a potom zadáváme hodnotu součinitele emisivity tak dlouho, až systémem vypočtená teplota je stejná, jako je skutečná, kontaktně změřená teplota. Je doporučeno tento postup opakovat při jiné teplotě měřeného tělesa. Je také doporučeno, aby teplota objektu při měření emisivity byla min. o 10 °C vyšší, než je teplota okolí. Pokud se hodnoty emisivity při různých teplotách tělesa nemění, můžeme takto získanou hodnotu emisivity pro bezkontaktní měření teplot daného materiálu (tělesa) přinejmenším v rozsahu teplot, při kterých bylo provedeno zjišťování emisivity.

Jak postupujeme při použití termoelektrického článku popisují následující řádky. Zvolíme si bod a změříme jeho teplotu s použitím termoelektrického článku. Upravením (nastavením) hodnoty emisivity v termovizní kameře se docílí stejné teploty změřené termoelektrickým článkem a teploty naměřené (vypočtené) kamerou. Nicméně, aby bylo dosaženo dobrých výsledků v určení správné emisivity povrchu měřeného objektu, nesmí být teplota takového objektu příliš blízká teplotě okolního prostředí.

❖ *referenční cvičení*

Místo (oblast) měření (opětovně je připomenuto, že v případech, kdy je to možné) částečně opatříme látkou o známé (nejlépe vysoké) emisivitě, jako je např. černá izolační páska, speciální černá barva (ThermaSpray) nebo štítek o známé emisivitě (ThermaSpot) a bezkontaktně změříme teplotu místa či oblasti s tímto krytím. (V tomto případě použijeme známou vysokou emisivitu). Protože teplota v bezprostředním okolí krytí bude stejná jako

v místě krytí, získáme tak údaj o skutečné teplotě a dále použijeme postup uvedený v předchozím bodě.

❖ *porovnávací určení*

U členitých těles s mnoha prvky, jako je např. osazená deska tištěných spojů, je doporučen tento postup pro zjišťování emisivity jednotlivých částí a komponentů: celá osazená deska se zahřeje (v zahřívacím boxu) na jednu teplotu. Po zahřátí desky se v co možná nejkratším čase po vyjmutí desky z boxu pořídí termogram. Na termogramu se zobrazí jednotlivé komponenty s „jinými teplotami“; je ale jasné, že tento „rozdílný“ teplot není způsoben jinými teplotami, ale jinými emisivitami. Protože skutečná teplota je známa, potom se emisivity pro jednotlivé části desky a komponenty vyhodnotí tak, jak je uvedeno v prvním bodu.

❖ Emisivitu vzorku materiálu lze změřit *spektrometrem*

4.3.2.2 Teplota okolí [10]

Tento parametr se užívá ke kompenzaci radiace odražené od objektu a radiace atmosféry mezi kamerou a objektem. Je-li emisivita nízká, vzdálenost vysoká a teplota objektu relativně blízká teplotě okolí, je velmi důležitá hodnota okolní teploty pro kompenzaci jejího vlivu.

Na obr.10 kap. 4.3.1 je v schématickém měřicím řetězu také uvedeno, že jeho součástí *okolí (pozadí) měřeného tělesa*. Odrážející se zdánlivá teplota je v podstatě odrážející se záření od zdrojů - objektů v okolí měřeného tělesa. Je nutné mít na paměti, že zvláště u těles či objektů, které nejsou transparentní pro IČ záření a mají nízkou emisivitu povrchu, má odrážející se záření většinou velký vliv na výsledný údaj teploty.

Z předchozích kapitol (4.2.1 a 4.2.4) je zřejmé, že odrazivost a spektrální odrazivost (reflektance) je dána poměrem odraženého spektrálního toku a dopadajícího spektrálního toku. Je charakteristickou vlastností pro danou vlnovou délku. Při malých hodnotách emisivit může být hodnota odrážející se zdánlivé teploty velká což bude mít i vliv na vyhodnocenou teplotu na povrchu měřeného tělesa. Z toho důvodu u téměř všech moderních radiometrických termografických systémů je možné v interním software kamer zadávat jak emisivitu tak také odrážející se zdánlivou teplotu. Velikost součinitele odrazivosti ρ systém vypočte z $\rho = 1 - \varepsilon$.

POZNÁMKA

Termín „odrážející se (odražená) zdánlivá teplota“ vznikl doslovným překladem z angličtiny; technicky sice není správný, protože teplota se nemůže „odrážet“, ale vzhledem k tomu, že termín „Reflected apparent temperature“ je v odborné literatuře běžně používán, stejně jako jeho zkrácený výraz Trefl, je proto zaváděn český ekvivalent „odrážející se (odražená) zdánlivá teplota“.

K určení odrážející (odražené) zdánlivé teploty se používají dvě metody

✓ **metoda odrazu (nepřímá metoda)**

✓ **přímá metoda**

Popis obou uvedených metod najdeme v [10], ale také [3]. Při měření odražené teploty si musíme uvědomit, že pracovníci provádějící termografická měření mohou provést zkoušku platnosti hodnoty odražené zdánlivé teploty tím způsobem, že budou zakrývat měřený objekt od záření (odražených zdánlivých teplot) okolních zdrojů a při tom kontrolovat, zda a jak se mění hodnoty kamerou měřených teplot. Pokud je to možné, je užitečné odstínit záření teplých nebo studených zdrojů v okolí měřeného objektu. Odraženému záření z „bodových zdrojů“ (jako je např. Slunce), je možné se často vyvarovat tak, že kamera bude zaměřovat měřený objekt z jiného směru. Je nutné pamatovat, že odražená zdánlivá teplota může být nižší než je teplota okolí. Musíme si by si měli být vědomi skutečnosti, že při přímé metodě není obvykle do odraženého záření zahrnuto záření od jejich osob. Zanedbání odrážejícího se záření od vlastní osoby (osob) by mohlo v určitých případech způsobit podstatnou chybu ve výsledku.

4.3.2.3 Atmosféra [6], [10].

Určitě není nutné silně zdůrazňovat, že nerespektování útlumu přenosu atmosférou způsobí značnou chybu v konečném výsledku měření. Dosti často se setkáváme s vyjádřením, že musíme respektovat:

❖ **Vzdálenost**

Vzdálenost je délka mezi vlastním měřeným objektem a objektivem kamery. Tohoto parametru se používá pro korekci vlivu způsobeného skutečností, že radiace objektu je částečně pohlcována v atmosféře, která je mezi objektivem a kamerou, a že přenos v atmosféře klesá (je utlumován) se vzdáleností.

❖ **Relativní vlhkost**

Termovizní aparatura rovněž může „vykompenzovat“ skutečnost, že přesnost v atmosféře poněkud závisí na její relativní vlhkosti. Pro korekci tohoto vlivu je nutné parametr relativní vlhkosti správně zadat. U malých vzdáleností může být hodnota relativní vlhkosti ponechána na předvolených 50 %.

❖ **Teplota atmosféry**

Dalším prvkem (činitelem), který je součástí měřeného řetězce, je přírůstek zářivého toku k záření tělesa a tím je záření atmosféry. Je třeba si uvědomit, že atmosféra se skládá z molekul různých plynů, vodních par, pevných částic, které mají určité fyzikální vlastnosti a které mají také některé obdobné vlastnosti jako pevná tělesa; např. při dané teplotě daná atmosféra také vyzařuje zářivou energii. Tento přírůstek k zářivé energii měřeného objektu je u některých termografických systémů zadáván jako teplota atmosféry T_{atm} (T_{ATM} , ...).

Existují určitá doporučení:

- Při venkovních měření je doporučeno používat tzv. LW systémy, protože útlum IČ záření v pásmu 7,5 μm až 13 μm tj. v pásmu, kde pracují prakticky všechny LW systémy, je menší než v ostatních pásmech. Další významnou skutečností je to, že v tomto pásmu jsou silně potlačeno záření Slunce, které se může projevovat jako odraz od měřeného objektu.
- Není doporučeno provádět měření za deště (voda není transparentní pro IČ záření!), při padání sněhu, za mlhy.
- V případě měření v silně znečištěné atmosféře používat správné údaje přenosu atmosférou; je-li k dispozici technické vybavení pro stanovení součinitele přenosu pokusit se hodnotu součinitele experimentálně zjistit.

4.3.3 Měřicí technika [6], [10]

Když v roce 1965 představila švédská firma AGA Infrared[®] (AGEMA Infrared[®]) Systems AB první průmyslově použitelný termovizní[®] systém AGA Thermovision[®] 665, byl to v podstatě začátek používání termografické techniky (mimo vojenské aplikace) v širokém oboru použití: energetika, různá průmyslová odvětví, petrochemie, stavebnictví, lékařství, výzkum atd. Do dříve ČSSR byl první systém dovezen v roce 1967 a brzy "zdomácněl" v ČR i pojem termovize.

V té době se termovizní aparatury skládaly z termovizní kamery s výměnnými objektivy, monitoru s černobílou obrazovkou pro sledování objektů snímaných kamerou, napájecími bateriemi, videomagnetofonem se vstupem upraveným pro nahrávání teplotních obrazů, sejmutých termovizní kamerou, Dewarovou nádobou na kapalný dusík a stativem s otočnou hlavou.

Infračervený obraz snímaného objektu byl v kameře rozložen pomocí rotujících hranolů na 25 čtvrtobrázků za sekundu, se sedmdesáti řádkami. Rozložený obraz byl přiváděn do

detektoru infračerveného záření, kde byl převáděn na elektrický signál. Pomocí detektoru, řádkového a bodového rozkladu se získali impulsy, které jsou funkcí intenzity infračerveného záření vycházejícího z jednotlivých plošných elementů snímání objektu směrem ke kameře. Převod těchto impulsů na obraz na obrazovce monitoru je u termovize podobné jako u televize. U televizního obrazu odpovídá jasová modulace obrazového paprsku intenzitě světelného vyzařování plošných elementů sledovaného povrchu, zatímco u termovizního obrazu je jasová modulace úměrná intenzitě infračerveného vyzařování plošných elementů sledovaného obrazu. Z toho vyplívají kromě jiného vysoké nároky na citlivost detektoru. Fotovoltaický element detektoru kamery od firmy Agema byl tvořen antimonidem inditým (InSb). K dosažení potřebné citlivosti bylo nutno teplotu detektoru udržovat a stabilizovat na 77 °K (- 196 °C) kapalným dusíkem.

Současné nejmodernější termovizní aparatury se skládají z kamery a příslušenství. Kamera má maticový nechlazený mozaikový (FPA) detektor III. Generace 320 x 240 pixelů (mikrobolometry) a více. Spektrální pásmo kamery je 7,5 - 13 μm s možností měření teplot od -40 °C až do + 2500 °C s přesností ± 2 % z rozsahu nebo ± 2 °C, teplotní citlivost při 30 °C je 0,08 °C. Hlavní předností současných termovizních systémů je vysoká citlivost a zobrazovací frekvence (50 Hz) detektoru, která umožňuje především rychlé a kvalitní zobrazení měřeného objektu.

Nové termovizní aparatury jsou schopny pomocí zabudovaného zobrazovacího systému vytvářet detailnější teplotní obraz, kterým jsou popsány teplotní vlastnosti pole měřeného objektu. Jednotlivé izotermální plochy jsou odlišeny barevně v nastavené paletě barev, kterou je možno libovolně měnit. Obraz snímaného objektu je možno také natočit na připojený speciální videorekordér nebo uložit jako obrázek (termogram) ve 14-ti bitovém dynamickém rozsahu na paměťové médium (např. PCMCIA PC CARD ATA se 175 MB paměti). V průběhu měření jsou kamerou automaticky zaznamenávány veškeré údaje o podmínkách měření, které jsou potřebné pro vyhodnocení termogramů. Nicméně je nutné v kameře nastavit již výše zmíněné parametry objektu, jako jsou emisivita, teplota okolí, relativní vlhkost vzduchu a vzdálenost mezi objektem a kamerou.

Termogramy pořízené termovizní kamerou mají na levém okraji stupnici, která rozděluje nastavený rozsah měřených teplot na jednotlivé izotermální intervaly v energetických hladinách udávaných v „izotermálních jednotkách“. Ke každému termogramu je možné pomocí speciálního digitálního fotoaparátu vytvořit doprovodnou fotografii. Pro další zpracování a analýzu pseudobarevných termogramů (obrázků snímaného objektu, kde každá barva stupnice odpovídá definovanému rozmezí teplot) přenesených spolu s fotografiemi do PC se využívají moderní rozsáhlé počítačové software (např. ThermaCAMTM Reportér 2000 Profesionál).

Podle konstrukce se dají termovizní systémy rozdělit na pevně zabudovatelné, tzn. automatická činnost s možností automatizace procesů při výrobě (např. Tušimice - Termovizní kamerový systém pro měření teplot deponie uhlí na homogenizační skládce) a přenosné, které nabízejí široké použití.

Každý typ této techniky má optický systém, detektor a systém zpracování naměřené informace (kap.4.3.6)

4.3.3.1 Optický systém [10]

Optický systém - optická soustava slouží pro efektivní zaostření zářivého toku zdroje záření na detektor systému. Konstrukce optického bloku musí zabezpečovat přímou úměrnost zářivého toku vysílané zdrojem - měřeným objektem a dopadajícího na detektor; ve většině případů nezávisle na vzdálenosti od zdroje záření.

Základní parametry charakterizující optickou soustavu jsou:

- ✓ koeficient propustnosti v pracovní oblasti
- ✓ zorné pole

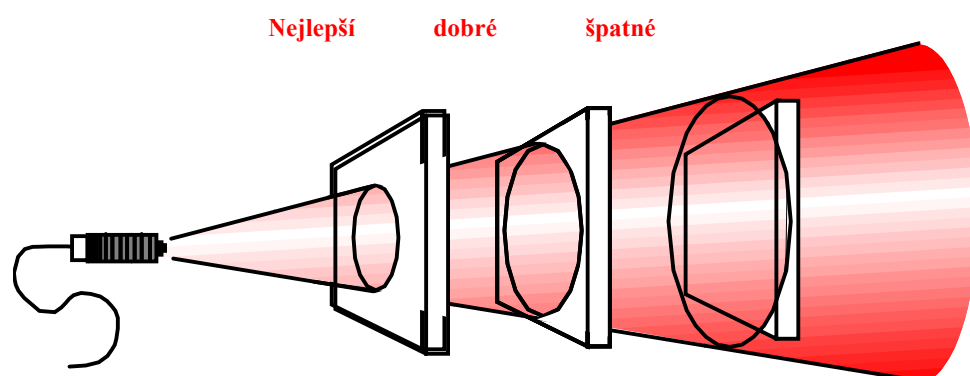
- ✓ ohnisková vzdálenost
- ✓ rozlišovací schopnost

V infračerveném pásmu, které je děleno na různé oblasti, se prakticky již od krátkovlnné oblasti používají speciální optické materiály, které jsou propustné - transparentní pro IČ záření. Klasické materiály, jako je např. sklo nebo speciální sklo, ze kterých jsou zhotoveny objektivы standardních video kamer, není propustné v infračervených oblastech, ve kterých pracují systémy pro termografii.

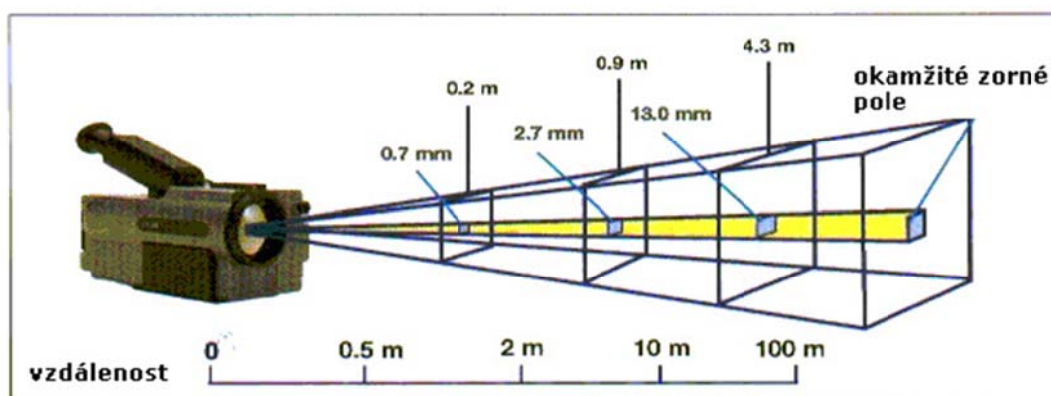
Materiálů, které jsou propustné v IČ pásmu existuje celá řada. Některé z nich jsou uvedeny v [10], ale pro naše účely postačí uvést následující.

Pro objektivы termografických systémů, které pracují v tzv. vzdálené - dlouhovlnné IČ oblasti je nejvíce používaným materiálem germanium a pro systémy, které pracují v krátkovlnné a středněvlnné IČ oblasti se nejvíce používá křemík. Jsou to v podstatě monokrystaly germania (Ge) a křemíku (Si), které jsou opracovány do potřebného tvaru čočky, jsou vyleštěny a pokryty antireflexní vrstvou (vrstvami). V některých případech jsou jejich povrchy ještě pokryty speciální vrstvou, která zabraňuje jejich snadnému poškození (poškrábání).

Velmi důležitými ukazateli optických systémů IČ techniky je zorný úhel (zorné pole) a rozlišovací schopnost (geometrické rozdělení). Na dalších obrázcích jsou přiblíženy souvislosti mezi optickým - zorným polem, skutečným (okamžitým zorným polem IFOV) a „kvalitou“ měření a zobrazení



Obr.11 Závislost velikosti zorného pole na vzdálenosti od měřeného objektu pro zvolený objektiv [10]



Obr.12 Vzdálenost, zorné pole a skutečné zorné pole u termografického systému s mozaikovým detektorem [10]

Z obr.11 by mělo být zřejmé, že pokud vymezený kruh v dané vzdálenosti je menší než plocha měřeného objektu, jedná se o správné geometrické přizpůsobení optického systému měřicího systému vzhledem k měřenému objektu. Měřicí systém - jeho detektor totiž vyhodnotí celkový zářivý tok v zorném poli vymezeném optickým systémem bez toho, že by byl schopen odlišit co je zářivý tok z měřeného objektu a co je z jeho okolí.

4.3.3.2 Detektory

Vzhledem k rozsahu kapitoly, tak pro případ vyčerpávajícího popisu této kapitoly odkazujeme na [10], kde najdeme základy o detektorech používaných v IČ a další popis a vysvětlení musíme hledat v [3] a [5].

Detektor (senzor) je základním prvkem systémů je detektor (senzor) záření, který převádí - konvertuje dopadající zářivý tok na elektrický signál. Detektory IČ záření, které se používají v termografii je možné rozdělit do dvou základních skupin:

- detektory kvantové - záření je konvertováno přímo na elektrický signál
- detektory tepelné - záření ohřívá každý detektor a je vyhodnocována změna teploty

K základním charakteristikám IČ detektorů patří [10]

- ✓ kvantová účinnost
- ✓ spektrální citlivost - responzivita
- ✓ prahový výkon NEP (Nois Equivalent Power)
- ✓ detektivita
- ✓ šumový ekvivalent rozdílů teplot NETD (Nois Equivalent Temperature Difference)

4.3.4 Techniky měření při termografii [10]

Existuje několik IČ termografických technik pro použití in situ, ale *komparativní - srovnávací termografie* je nejvíce používanou technikou měření která se normálně používá pro pořizování vhodných dat a používá se místo absolutních měření teplot. Základem této techniky je vyhodnocení změn v zářivém toku (teplot) měřeného zařízení. Vyhodnocení získaných informací závisí na použitém termografickém přístroji, na vzdělání a zkušenostech pracovníka, který termografická měření provádí a na použité metodě zjišťování. Srovnávací termografie může být buď **kvantitativní** nebo **kvalitativní**.

❖ Srovnávací kvantitativní termografie

Srovnávací kvantitativní termografie je přípustná a efektivní metoda pro hodnocení stavu strojů nebo komponentů určením přibližných teplot. Určení přesných skutečných teplot komponentů pomocí IČT v terénu je považováno za velmi obtížné. Je to proto, že musí být znám určitý rozsah fyzikálních zákonů IČT a parametrů které musí být použity, aby byly získány správné hodnoty absolutních teplot. Tyto parametry jsou: emisivita, odrazivost a propustnost (přenos) atmosférou. V případech, kdy nejsou známy přesné hodnoty těchto parametrů a jsou použity pouze jejich přibližné hodnoty, výsledkem jsou pouze přibližné absolutní hodnoty teplot prvků a komponentů, což v mnoha případech je dostatečné pro stanovení míry závažnosti případné poruchy či poškození.

Příkladem srovnávací kvantitativní termografie může být provoz dvou nebo více strojů za stejných podmínek a při stejných provozních stavech (zatíženích), kdy jeden stroj dosahuje zvýšené teploty, což obvykle znamená, že pravděpodobně dochází k jeho určitému poškození. Jinak řečeno, zjištění rozdílných teplot by mohlo pomoci při stanovení závažnosti případné závady. Na základě znalosti přibližných hodnot zvýšených teplot by tedy mohlo být určeno, že mezní hodnoty teplot prvků by se mohly blížit k stanoveným mezním hodnotám. Proto, zatím co kvalitativní měření mohou zjišťovat závady, kvantitativní měření mají možnost stanovovat jejich závažnost.

❖ Srovnávací kvalitativní termografie

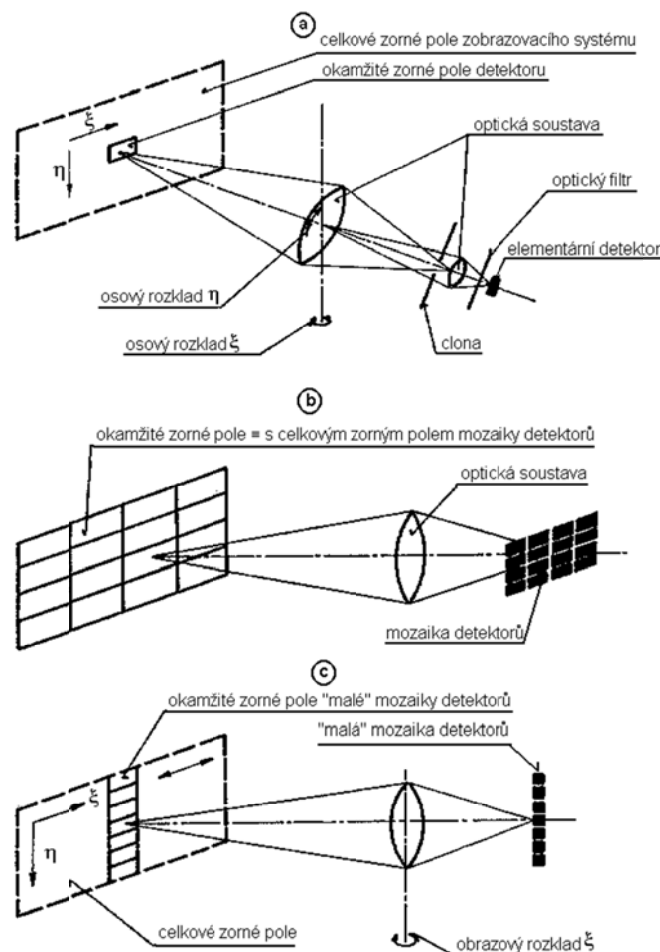
Srovnávací kvalitativní termografie porovnává teplotní mapy nebo teplotní profily jednoho komponentu se stejným nebo podobným komponentem pracujícím za stejných nebo podobných podmínek. Při prozkoumávání rozdílných teplotních map nebo profilů je definováno podle intenzity změn mezi dvěma nebo více podobnými objekty, a to bez vyhodnocování hodnot teplot. Tuto techniku je možné použít rychle a snadno a není nutné použít žádné korekční činitele pro atmosféru a obklopující okolí nebo emisivitu povrchu. Třebaže výsledek tohoto typu měření může zjistit závady, nemůže určit jejich stupeň závažnosti.

Tato technika IČ měření se používá ve většině (průmyslových) odvětví. Je velmi efektivní pro určení horkých ložisek nebo jiných horkých částí strojů, horkých míst na elektrických rozvodech, nežádoucích otepleních na spojích a kontaktech, netěsností nebo ucpaných kapalných výměnících a prvcích (trubek) a na úniky kapaliny z tlakových nádob, trubek a ventilů.

4.3.5 Konstrukce termografických systémů [10]

Určitě z daného textu je zřejmé, že termografické systémy lze členit podle různých hledisek a kritérií. Poznali jsme podle spektrálního pásma (NIR, SW, MW, LW), umíme si představit podle způsobu nasazení (přenosné, pevné) apod. Z hlediska konstrukčního principu se rozdělují na systémy s opticko-mechanickým rozkladem obrazu nebo s FPA detektory (Focal Plane Array - pole v ohniskové rovině). Miniaturní bolometry (tepelné detektory, kdy změna elektrického odporu se mění vlivem ohřevu ozářením) jsou uspořádány do matice detektoru FPA (tzn. mikrobolometry). Hustota pixelů mikrobolometrických detektorů je různá, a to matice od 4x4 až po dnes používanou 640x480 pixelů.

Obr. 13 zobrazuje tři základní principy (způsoby) vytváření obrazu u termografických zobrazovacích systémů. Nahoře je naznačen opticko-mechanický „skenovací“ systém, kdy je nejprve vytvářen v jednotlivých bodech řádek a následně potom obdobně je vytvářen po jednotlivých bodech obraz v dalších řádcích. Snímaná „plocha“ je tedy „rozložena“ na jednotlivé body složené do řádků, ze kterých je potom „složena“ plocha. Tento systém je někdy také nazýván jako systém s postupným zaváděním vstupní informace a jejím postupným vyhodnocením.



Obr.13 Základní principy optických systémů IČ termografické zobrazující techniky [10]

Na prostředním obrázku vlevo je potom naznačen systém s mozaikovým detektorem, kde každý pixel detektoru, se svým zorným polem snímá určitou část snímané „plochy“, kterou následně zobrazí jako jednu část plochy. Protože tyto systémy pracují v reálném čase - snímací resp. obrazová frekvence je normálně 25 nebo 50 Hz - a pokud detektor má dostatečnou hustotu pixelů, je vytvářen termografický obraz - termogram s dostatečným (geometrickým) rozlišením, který je „složen“ z informací jednotlivých pixelů. Takovýto systém se nazývá jako systém se současným zavedením vstupní informace a jejím současným vyhodnocením.

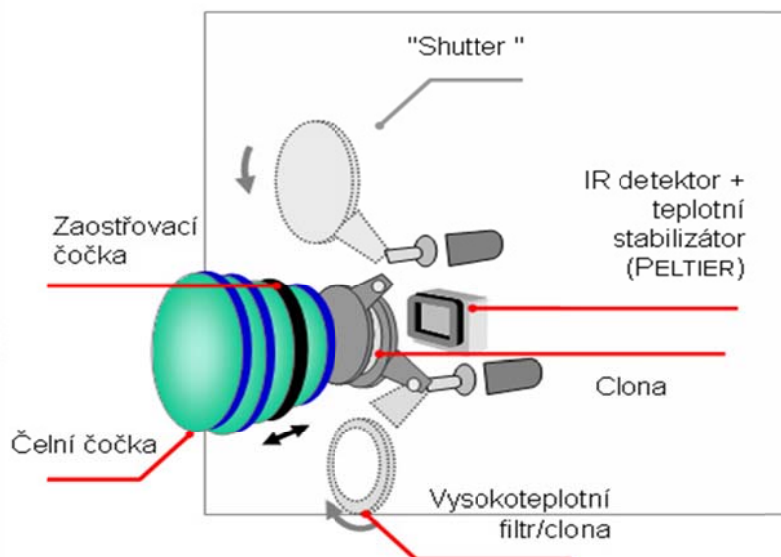
Posledním typem je systém se smíšeným zaváděním vstupní informace a jejím smíšeným vyhodnocením. Takovýto systémy jsou osazen detektorem „sloupec“ a pomocí rozkladového prvku obrazu je tento sloupec „virtuálně“ rozmítán po řádku nebo detektor řádek, který je naopak rozmítán do sloupců. Výsledkem je opět obraz, zobrazující plochu.

V dalším textu budou podány základní informace o termografických systémech s FPA chlazenými a nechlazenými mozaikovými detektory.

Optický systém s nechlazeným mikrobolometrickým mozaikovým detektorem je na obr.14. Žářivý tok měřeného objektu je pomocí vstupní optiky zaostřen na detektor. Do optické cesty mezi objektiv a detektor se vkládá tzv. „shutter - clonka“, která slouží k „homogenizaci“ signálů z jednotlivých pixelů mozaikového detektoru. Do optické cesty se někdy také vkládá vysokoteplotní filtr pro rozšíření rozsahu měřených teplot.

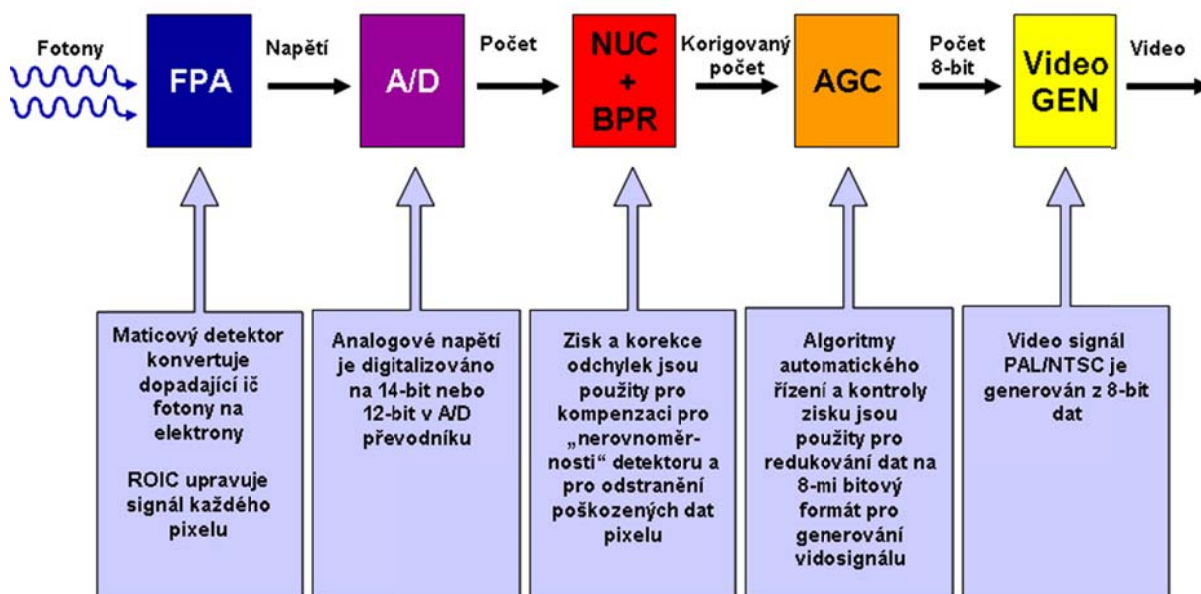
Optický systém s chlazeným mozaikovým detektorem se obdobný jako předcházejícím případě. Základní rozdíl je v tom, že mozaikový detektor je chlazen, většinou pomocí uzavřeného Stirlingova chladiče. Žářivý tok měřeného objektu je obdobně pomocí vstupní optiky zaostřen na detektor. Do optické cesty se vkládá tzv. „shutter - clonka“, která

slouží k „homogenizaci“ signálů z jednotlivých pixelů mozaikového detektoru, někdy také vysokoteplotní filtr pro rozšíření rozsahu měřených teplot a v určitých případech také tzv. spektrální filtr.



Obr.14 Optický systém s nechlazeným FPA detektorem [10]

Jaké je základní „elektrické schéma“ zobrazujícího IČ termografického systému je pak na obr.15.



Obr.15 Základní elektrické schéma termografického systému [10]

Dostí často se při popisu konstrukčního provedení termografických systémů s FPA detektory uvádí, že mají funkci NVC (Non Uniformity Correction - korekce nerovnoměrnosti) - blíže [10].

4.3.6 Metody infračervené termografie [3], [4], [10]

4.3.6.1 Pasivní termografie [4]

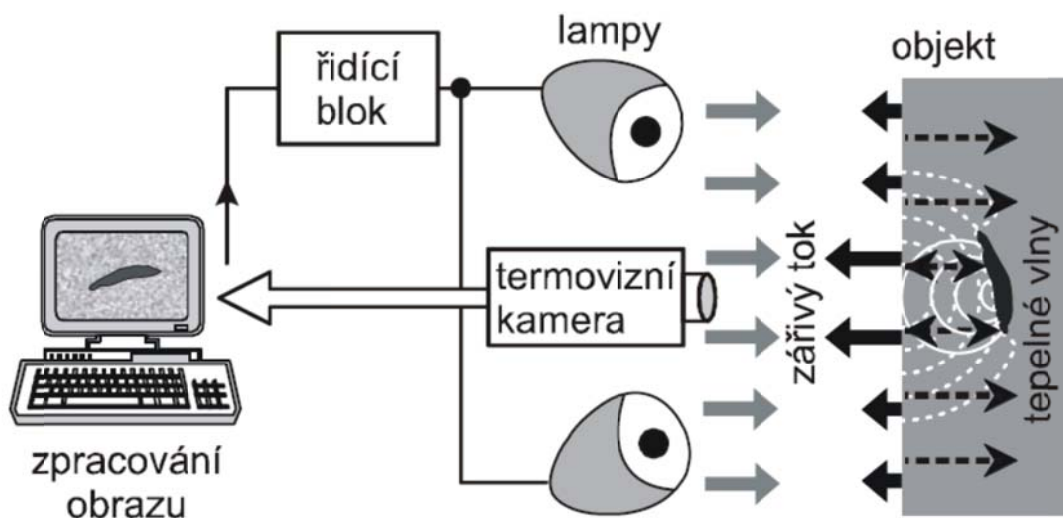
Pasivní termografie je zobrazování teplotních polí na površích měřených objektů. Základním principem této metody je pasivní snímání zářivého toku z objektů a jejich následné vyhodnocování. Je to v podstatě nejvíce rozšířená metoda, která se používá v IČ termografii. Pasivní termografie je zobrazování teplotních polí povrchů elektrických nebo mechanických objektů, jejichž činnost je spojena s vývinem nebo absorpcí tepla během provozu. Na termogramu lze zjistit opotřebení mechanického prvku jako je např. převodovka nebo ložisko vlivem tření, v elektrických zařízeních lze diagnostikovat nepřipustný ohřev ztrátovým výkonem způsobený elektrickým proudem např. na spojovacích svorkách kontaktů, na kontaktech silových spínačů, na izolátorech vysokého napětí, na vinutích elektromotoru atd.

Při pasivní termografii se jedná o monitorování objektu v rámci preventivní údržby. Hodnotící veličinou jsou teplotní rozdíly ve vybraných místech na povrchu objektu mezi teplotami změřenými a teplotami referenčními (připustnými). Zpracování signálu je u moderních termovizních systémů realizováno přímo na čipu prostřednictvím multiplexů a 14bitových převodníků. Standardní programové vybavení od výrobců kamer umožňuje vyhodnocení teploty v libovolném bodě obrazu, vyhodnocení střední a maximální teploty a vykreslení teplotního profilu ve zvolené oblasti obrazu, volitelné barevné zobrazení izoterem (poz.: v infračerveném spektru barvy neexistují), korigovat vliv emisivity objektu, prostupnosti prostředí mezi kamerou a objektem, vliv teploty okolí aj. Pro nedestruktivní testování lze uvést např. lokalizaci poškození tepelné izolace a koroze potrubí, vyzdívek pecí aj. Nevýhodou pasivních metod je možnost chybného vyhodnocení termogramu vlivem artefaktů způsobených prostředím, turbulencí vzduchu, nehomogenních hodnot emisivity aj.

4.3.6.2 Aktivní termografie [10], [3]

❖ Aktivní termografie

Aktivní termografie je založena na řízené stimulaci tepelné vlny v tělese, následném snímání rozložení teploty termografickou kamerou na povrchu tělesa a analýzou signálu. Defekty v podpovrchové vrstvě se projeví diferencemi v rozložení povrchové teploty. Zdrojem tepla, který je nejčastěji umístěn vně tělesa, je halogenová lampy, pulzní laser, výkonový blesk, xenonová výbojka nebo teplý proudící vzduch (obr.16).



Obr.16 Uspořádání systému aktivní termografie [10]

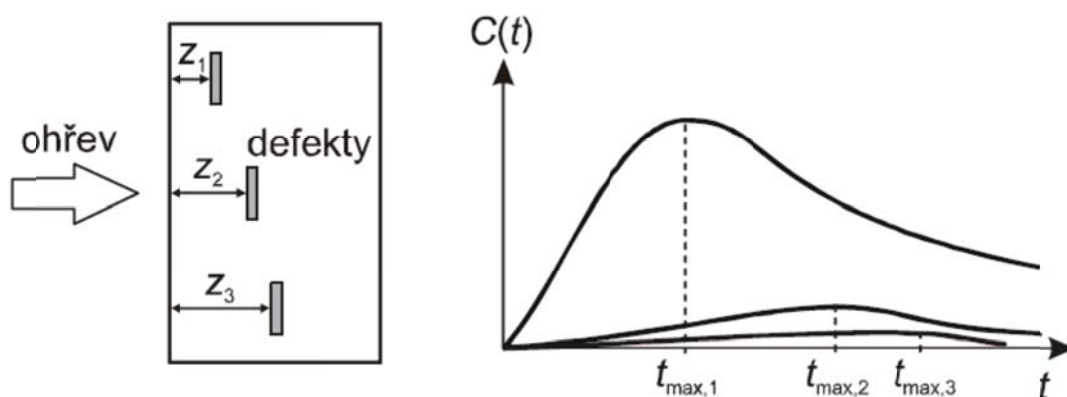
Tepelná stimulace může být také vybuzena vnitřním třením struktury hmoty tělesa prostupující ultrazvukovou vlnou, u elektricky vodivých objektů z externí cívky indukovaných vířivých proudů nebo rozkmitáním objektu. Při známých vlastnostech materiálu lze z tepelného obrazu vyhodnotit rozsah a hloubku podpovrchové vady teoreticky nebo srovnáváním s etalonem.

Aktivní termografické metody lze dle způsobu stimulace a vyhodnocení termogramu rozdělit na:

- pulzní termografii,
- lock-in termografii (*lock-in thermography*).

❖ Pulzní termografie [10]

Pulzní termografie spočívá v rychlém (pulzním) externím nebo interním ohřevu tělesa (uspořádání systému je na obr.16) a následném vyhodnocení tepelného pole na povrchu tělesa termokamerou. Dle uspořádání zdroje ohřevu, objektu a kamery se pulzní metoda dělí na *reflexní* a *průchodovou*. Teplota povrchu se po řízené pulzní stimulaci vlivem rozptylu tepelné vlny, vyzařováním a konvekcí rychle mění. Defekt v tělese způsobí snížení rychlosti šíření tepelné vlny a na teplotním poli na povrchu lze pak dle čela tepelné vlny pozorovat oblasti s rozdílnou teplotou. V důsledku tohoto jevu defekty ve větší podpovrchové hloubce jsou pozorovány později a se sníženým kontrastem v obraze (viz obr.17). Pokles kontrastu je úměrný třetí mocnině hloubky z .



Obr.17 Závislost relativní hodnoty kontrastu na hloubce z [10]

Potřebná doba trvání pulzu závisí na difuzi tepla v materiálu a tedy na hodnotě tepelné vodivosti.

Pozn.

Tepelná vodivost materiálu ($W.K^{-1}$) je převrácená hodnota tepelného odporu, který udává podíl teplotního rozdílu a tepelného toku ($K.W^{-1}$).

Pro materiály s vysokou hodnotou tepelné vodivosti, jako jsou kovy, je potřebná doba trvání pulzu v řádech milisekund, u materiálů s nízkou hodnotou tepelné vodivosti, jakou jsou plasty a kompozitní materiály, je doba trvání v řádu sekund. Oteplení obvykle činí několik stupňů Celsia neboť řízený ohřev nikdy nesmí poškodit objekt. Pokud jsou v materiálu větší nehomogenity (trhliny, delaminace) a jiné anomálie s rozdílnou tepelnou kapacitou, hustotou a tepelnou vodivostí, zobrazí se tato skutečnost v určitém časovém okamžiku jako odchylka v teplotním poli na povrchu objektu.

Pulzy mají nejčastěji obdélníkový průběh a jejich frekvenční spektrum je složeno z řady spektrálních složek s různou amplitudou. Z hlediska prostupující tepelné vlny lze tedy uvažovat šíření vln o různých frekvencích s následným vyhodnocením fáze pomocí FFT analýzy, což je využíváno v metodě PPT (*Pulsed Phase Thermography*).

Nevýhodou pulzní termografie je stejně jako u pasivní termografie vliv prostředí, kmitání objektu a vliv emisivity povrchu tělesa. Mezi pulzní aktivní termografické principy patří také metoda SH (*Step Heating*) neboli metoda dlouhého pulzu. Od výše uvedené metody se liší tím, že je vyhodnocován tepelný obraz povrchu jak během stimulačního pulzu tak po jeho ukončení. Metoda je někdy označována také jako TRIR (*Time-Resolved Infrared Radiometry*).

❖ Lock-in termografie [10]

Z teorie signálu je známo, že modulací signálu lze oddělit užitečnou složku signálu od složek rušivých. Na modulaci řízeného tepelného toku dopadajícího na diagnostikované těleso je založena lock-in termografie. Uspořádání měřicího systému je stejné, jako je na obr.16.

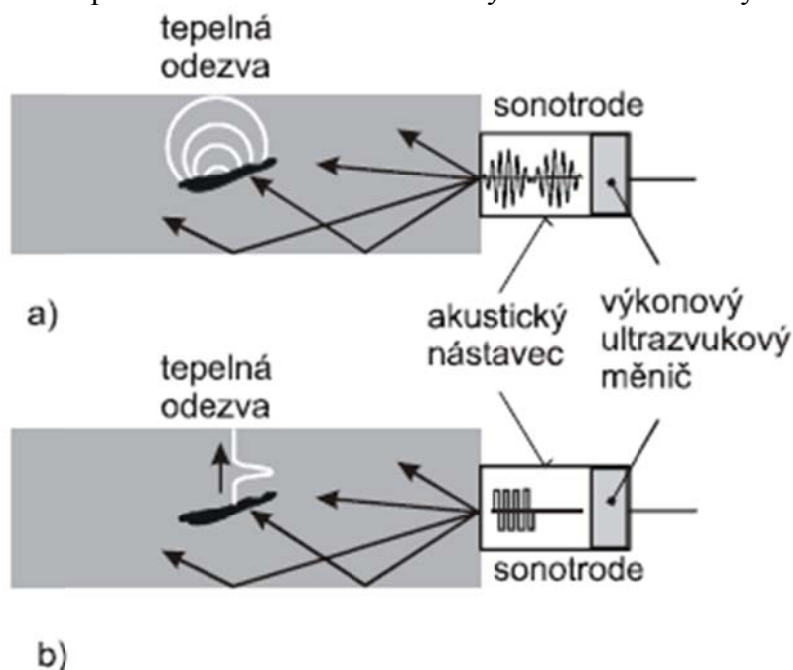
Pozn.: Označení lock-in není z hlediska zpracování signálu vždy korektní.

Tepelná (obvykle sinusová) tepelná vlna proniká dovnitř tělesa a v místě změny prostředí, tj. anomálie struktury materiálu, se odráží zpět k povrchu. Na povrchu objektu dochází k interferencím vyzařovaného a primárního (dopadajícího) infračerveného záření. Termografickou kamerou snímané obrazce jsou tedy modifikovány vracející se tepelnou vlnou z vnitřku tělesa. Avšak ve fázové informaci jsou uvedené efekty vyloučeny a metoda lock-in poskytuje nezkreslené informace o podpovrchové teplotě v tělese. Vyhodnocení amplitudy a fáze obrazového signálu lze docílit různými způsoby jako jsou duální synchronní detekce, FFT analýza a nebo nejčastěji zpracování čtyř o 90° fázově posunutých obrazů.

❖ Aktivní pulzní a lock-in ultrazvukové termografie [10]

Výkonová ultrazvuková vlna prostupující materiálem rozkmitává částice hmoty a jejich vzájemným třením vzniká teplo. Tepelná odezva na anomálii ve struktuře se šíří k povrchu tělesa a tepelný obraz je vyhodnocen termografickou kamerou (obr.18).

Výkonový ultrazvukový měnič (100 - 1000 W, ultrazvuková frekvence 15 - 30 kHz) je umístěn přes laděný akustický nástavec. V literatuře se často tato kombinace označuje jako sonotrode. Při pulzní metodě je generována skupina impulzů tj. jeden tzv. burst impulz o délce 10 ms až 10 s. Při lock-in metodě je generován modulovaný ultrazvukový signál (modulační frekvence 0,03 - 0,25 Hz). Oproti klasické lock-in termografii nedochází k interferenci vln na povrchu tělesa a defekt nelze vyhodnotit z fáze vlny.



Obr.18 Ultrazvuková termografie (a - ultrazvuková lock-in metoda, b - ultrazvuková pulzní metoda, c - uspořádání měřicího pracoviště)

❖ Vibrotermografie [10]

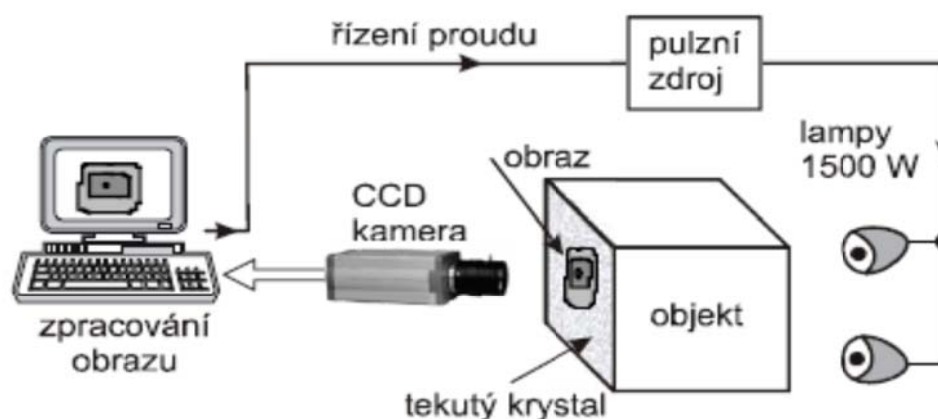
Princip vibrotermografie je založen na periodickém silovém namáhání tělesa prostřednictvím řízeného budiče kmitů (20 - 50 Hz). Při průchodu mechanické napěťové vlny objektem dochází vlivem vzájemného tření částic hmoty a pohlcování energie k transformaci mechanických vln na vlny tepelné, které se šíří objektem k jeho povrchu. V místě defektu v materiálu je větší hodnota mechanického napětí, což způsobí nárůst útlumu napěťové vlny a nárůst energie tepelných vln. Defekt má za následek také změnu tepelných vodivosti materiálu. Vysokofrekvenční signál budiče kmitů je nízkofrekvenčně modulován. Teplotní pole na povrchu objektu je snímáno termografickou kamerou a vyhodnoceno lock-in měřicím systémem. Fázová informace z videosignálu zajišťuje optimální věrohodnost a reprodukovatelnost měření.

Mezi vibrotermografické defektoskopické metody je zařazována také metoda SPATE (*Stress Pattern Analysis by Thermal Emission*) firmy Ometron Ltd., UK. Objekt je u této metody zatěžován nízkofrekvenčně (řádově Hz) elektrohydraulickým budičem

❖ Aktivní termografie s využitím kapalných krystalů [10]

Kapalné krystaly jsou kapaliny, které si při zvyšování teploty udržují do určité teploty molekulární orientaci při skupenské přeměně z pevné do kapalné fáze tj. molekuly ve tvaru tyčinek se volně pohybují, ale udržují si směrovost.

Bude-li dopadat na objekt s nanesenou vrstvou kapalného krystalu bílé světlo obsahující všechny barevné složky a odrazí se např. pouze spektrum modré barvy, znamená to, že ostatní spektrální složky byly krystalem absorbovány a oko nebo CCD kamera registruje modré zabarvení objektu. Pro defektoskopii se používají krystaly tzv. cholesterického typu.



Obr.19 Uspořádání aktivní termografie s CCD kamerou

4.3.7 Využití termografie v provozní praxi

Hlavní přednosti či výhody při správném využívání IČ termografie lze ve stručnosti uvést takto:

- Závady lze zaměřovat rychle a to bez přerušování výrobních procesů či dodávek energií
- Lze stanovovat nápravná opatření a jejich priority
- Lze eliminovat či snižovat neplánované výpadky či odstávky zařízení
- Lze snižovat potřeby a rozsah preventivních kontrol a údržeb

- Je možné kontrolovat zařízení, které jsou nově uváděna do provozu a jsou v záruční době

Není absolutně prakticky možné vyčerpávajícím způsobem její využívání a nasazení v provozní praxi uvést, takže v následujících řádcích jsou heslovitě uvedeny obory využití IČ a následuje řada praktických ukázek

- ✓ *Výroba a rozvody elektrické energie* - technický stav elektromotorů, (svorky, spoje, izolace, vinutí), generátory, transformátory, el. rozvodny a vedení atd.
- ✓ *Stavebnictví* - izolace a únik tepla stavebních objektů, vlhkost stavebních objektů, vytápěcí systémy, atd.
- ✓ *Strojírenství* - kontrola a řízení technologických procesů, technický stav strojů a strojních částí a uzlů (ložiska, kotle, převodovky, dopravní válečky), atd.
- ✓ *Elektronika* - tištěné spoje, spojovací prvky, atd.
- ✓ *Hutnictví* - pece, izolace, procesy hoření, mapování procesů, atd.
- ✓ *Životní prostředí* - skládky, nádrže, zápary, atd.
- ✓ *Automobily* - motory, brzdy, pneumatiky, atd.
- ✓ *Letecká aplikace* - křídla, kompozity, el. vedení, rozvody tepla, požáry atd.
- ✓ *Medicína a veteriná* - záněty, fyzická námaha, onkologie, atd.
- ✓ *Výzkum a vývoj* - aplikace na výrobní a technologické procesy, samovznícení a jeho monitoring, hoření ve spalovacích procesech atd.
- ✓ *Údržba* - určování predikce technického stavu, multiparametrická diagnostika atd.

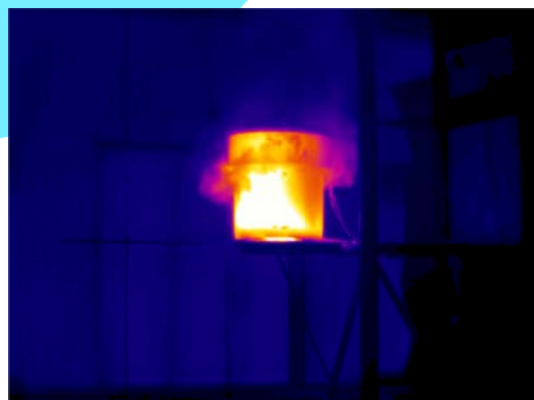
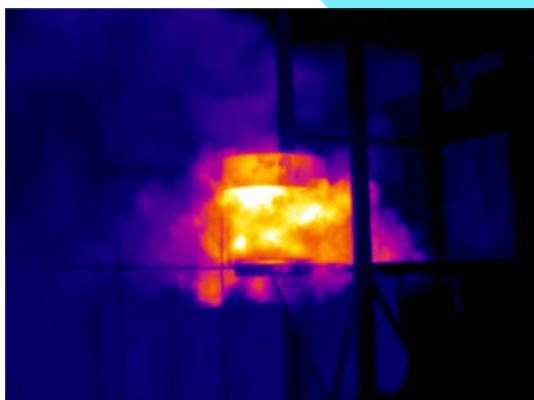
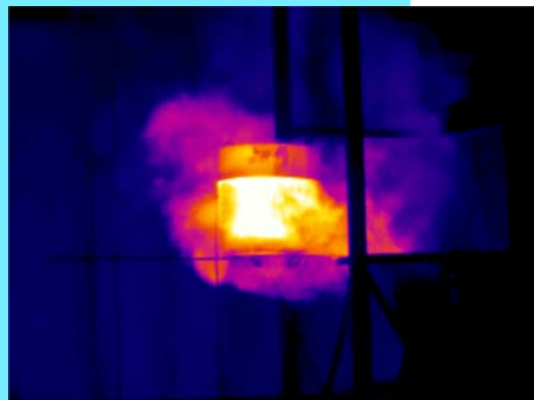
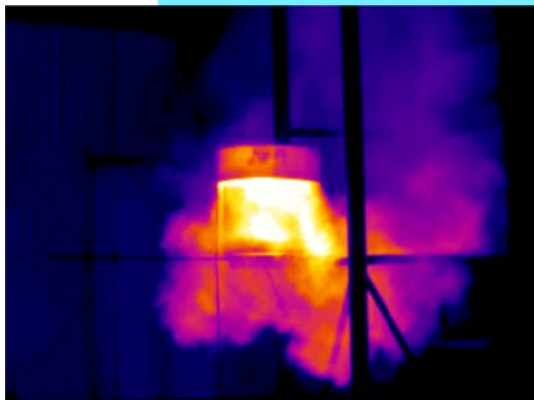
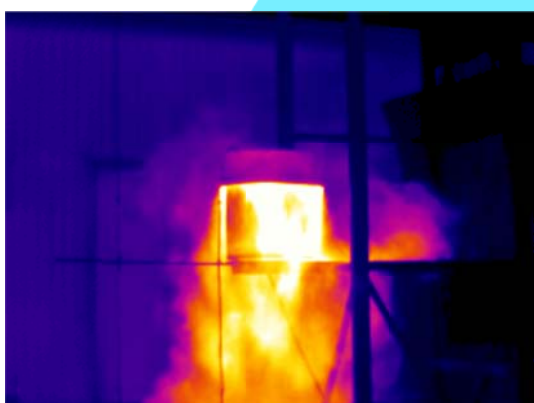
a bylo by možno takto pokračovat.

Na následujících stránkách jsou uvedeny snímky a termogramy řady provozních aplikací.

Termovizní měření teploty výbuchových zplodin

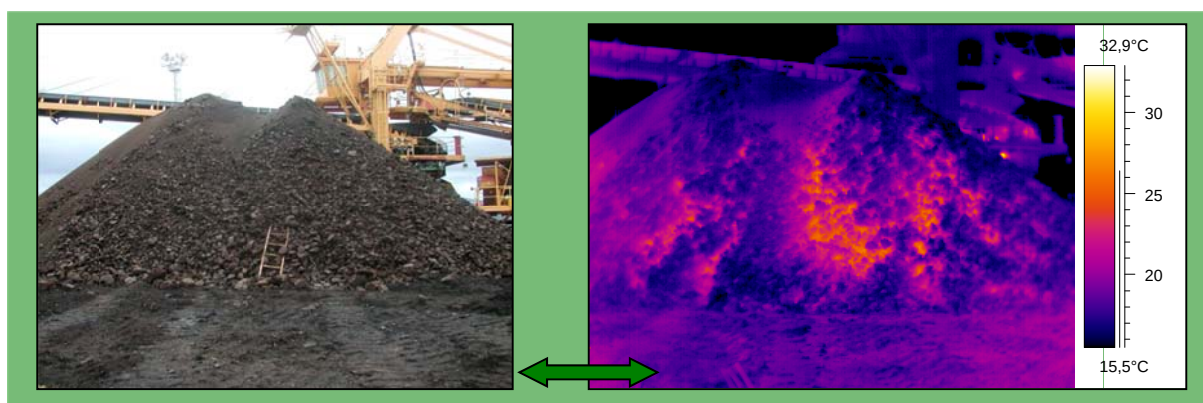


Obr.20 Aerosolový hasicí generátor „GABAR - P“ před a po výbuchu

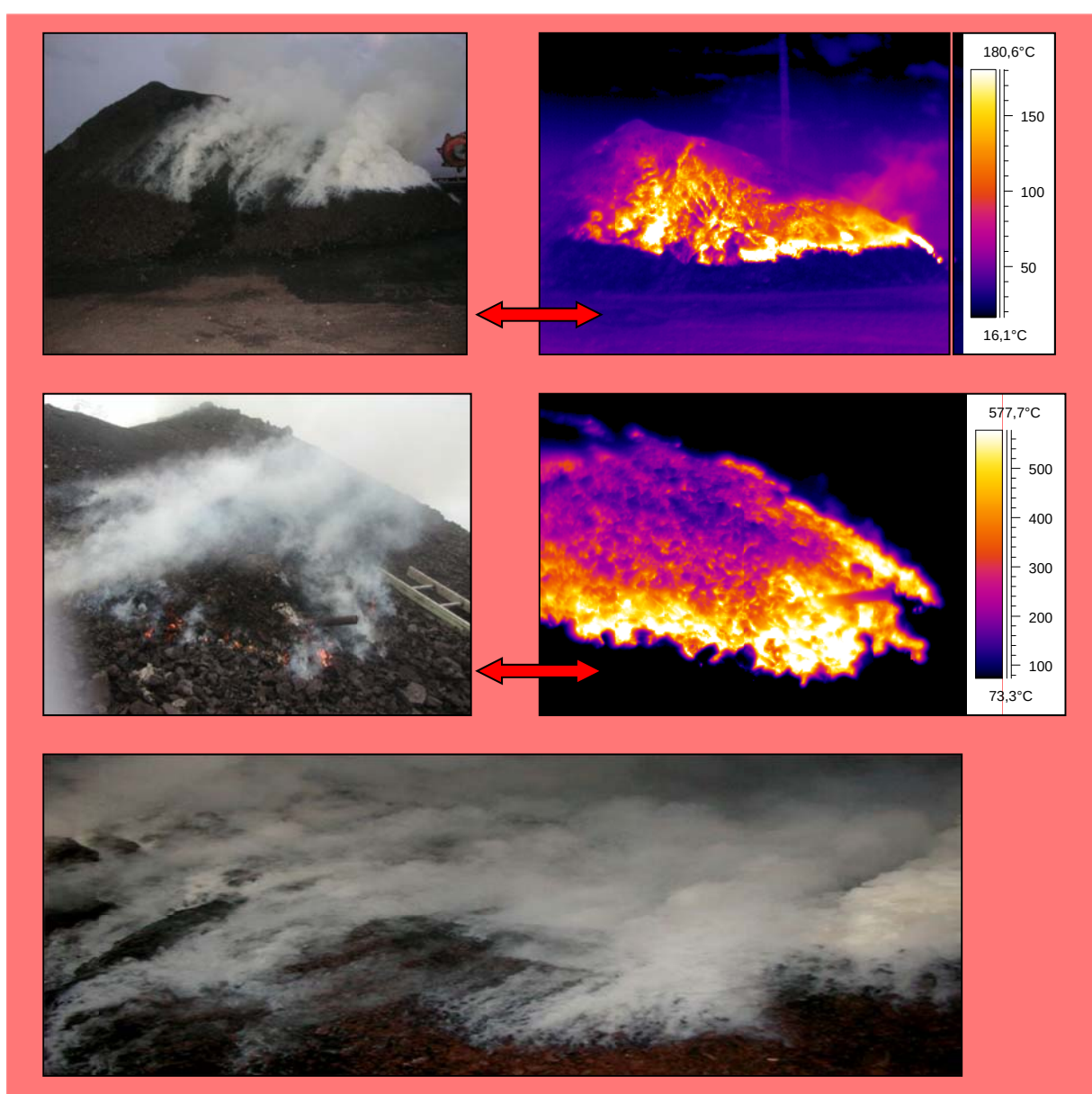


Obr.21 Termogramy zobrazující ohřáté plynné zplodiny vzniklé iniciací výbuchu uvnitř generátoru a šířících se od místa výbuchu

Termovizní měření deponovaného uhlí s cílem predikce jejího zapaření a následného samovznícení



Obr.22 Rozložení povrchové teploty uhelné deponie, bezprostředně po jejím nasypání

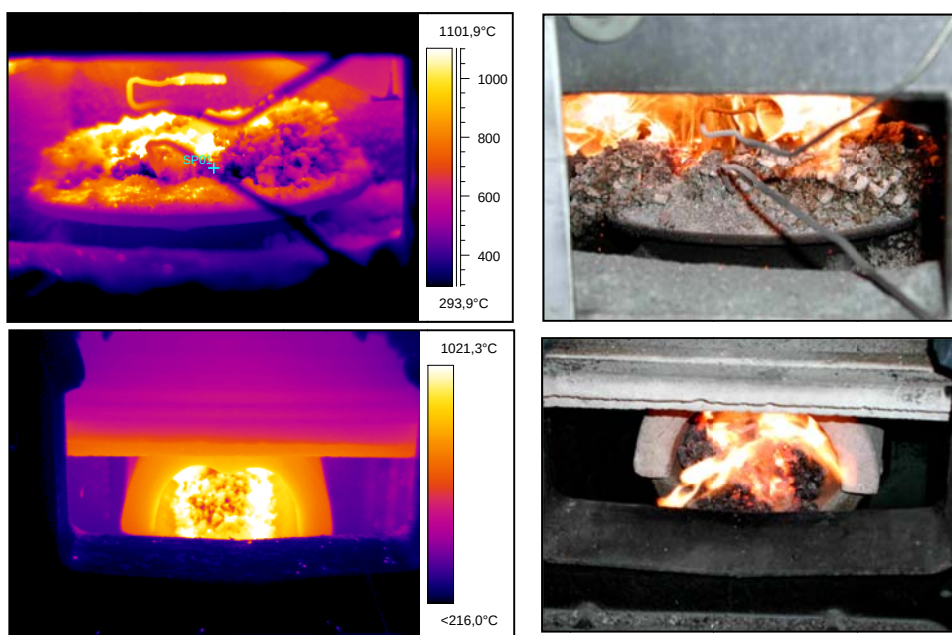


Obr.23 Rozložení povrchové teploty samovznícené uhelné deponie
po cca 1 měsíci od nasypání

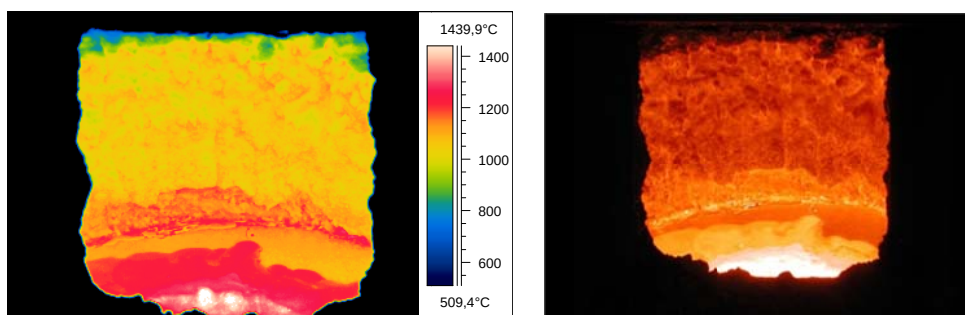
Ověřování spalovacích teplot aditivovaného a neaditivovaného uhlí, pelet a biomasy pomocí termovize, měření teplot v pecích



Obr.24 Přípravené vzorky neuhelných pelet určené pro laboratorní spalovací zkoušky při různých teplotách



Obr.25 Ukázka rozložení teploty uvnitř kotle, při spalování vzorku uhlí



Obr.26 Rozložení teplot v pánvové peci pro zušlechťování oceli

Tepelná diagnostika bubnů a válečků při dopravě skrývkových hmot a uhelné substance na výrobních provozech povrchových lomů

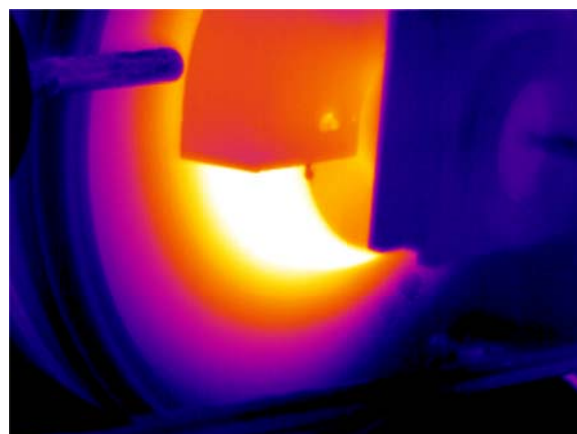
Vzhledem k uložení válečků a bubnů DPD ve valivých ložiscích se nesprávná funkce ložiska projeví zvýšením součinitele tření, což má za následek zvýšení povrchové teploty válečku a bubnů v okolí ložisek (čela válečků a bubnů)



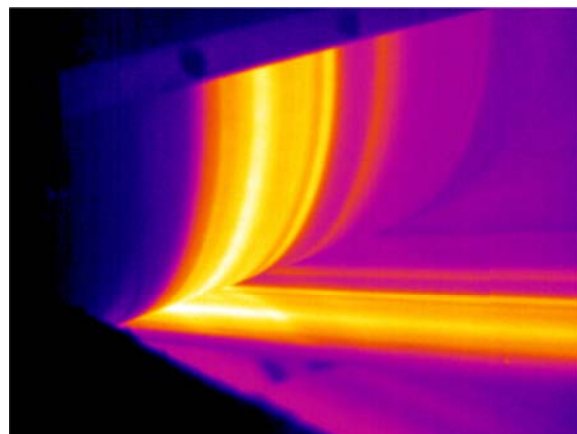
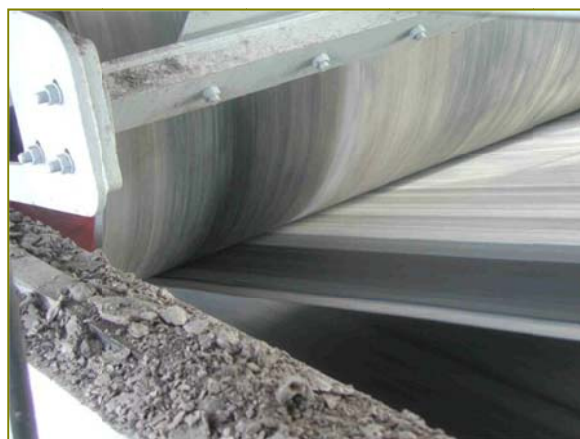
Pravá strana bubnu nevykazuje žádné tepelné anomálie



Levá strana bubnu se zvýšenou teplotou

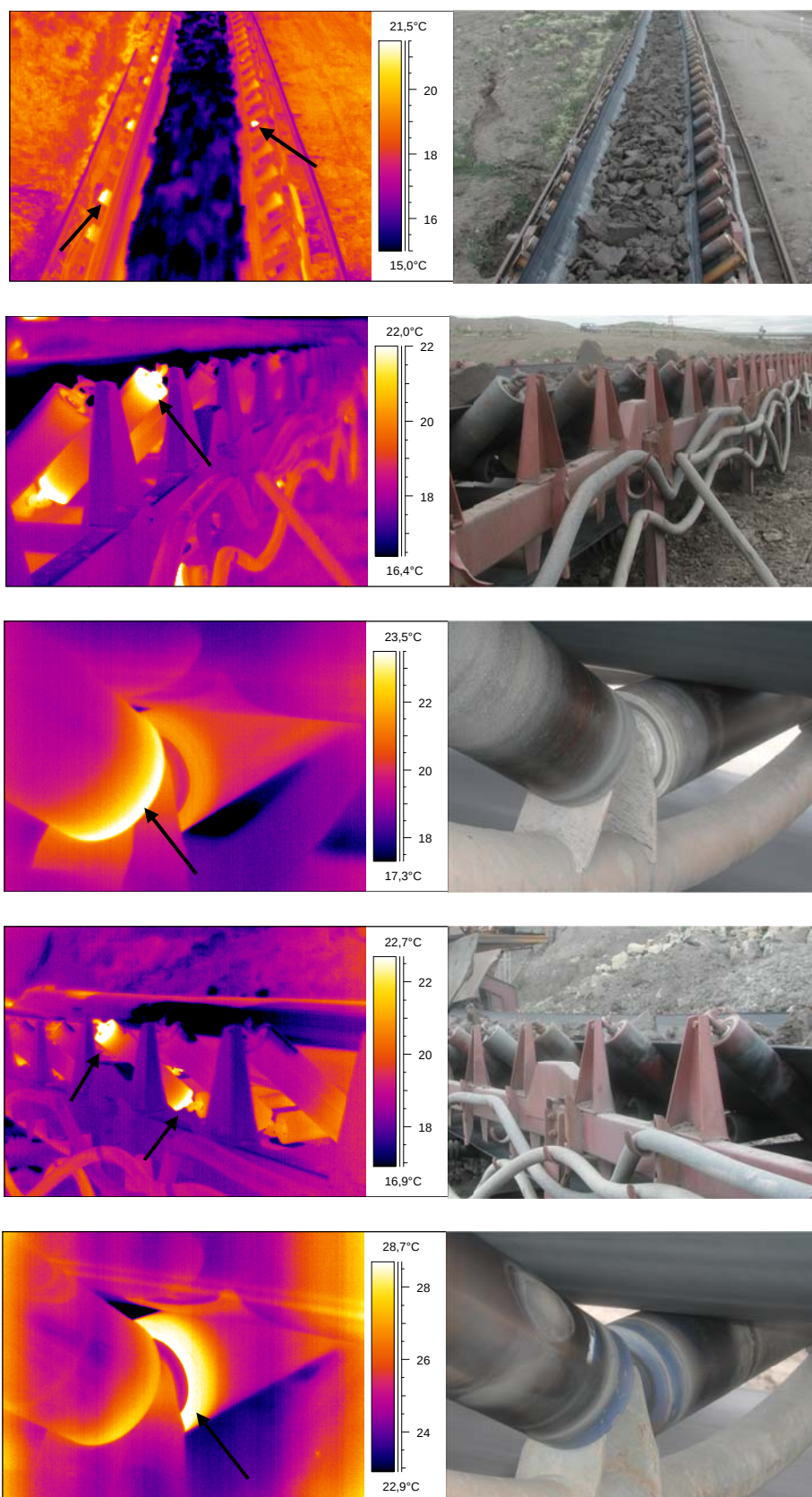


Obr.27 Příklad nalezené závady, zjištěné pomocí termovizní aparatury, na bubnu pásového dopravníku kolesového rýpadla



Obr.28 Nerovnoměrné zatížení pásu na PDP

Tepelná diagnostika válečků na DPD



Obr.29 Válečky pásových dopravníků

Příklad formuláře pro vyhodnocení termogramů válečků DPD

Při vyhodnocování termogramů jsou používány přehledné formuláře, do kterých jsou zapsány veškeré potřebné údaje pro jejich správné vyhodnocení. Každému termogramu přísluší jeden formulář.

Ilustrační fotografie

Objekt měření -
měřená část


10.7.2008

DPD 1800	Měřené místo
válečky TRANZA (opravené)	váleček č. 37

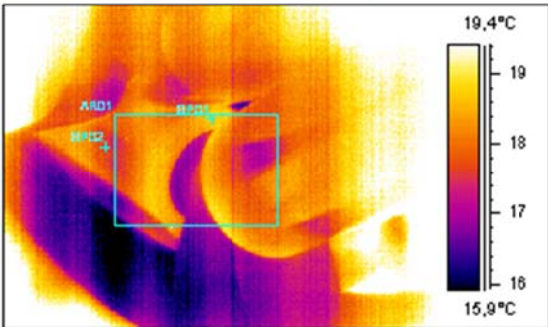
Fotografie

IR information	Value
Date of creation	9.11.2007
Time of creation	10:25:38
File name	H1109-79.img
Camera type	ThermaCAM
Camera filter	NOF
Zoom factor	1.00



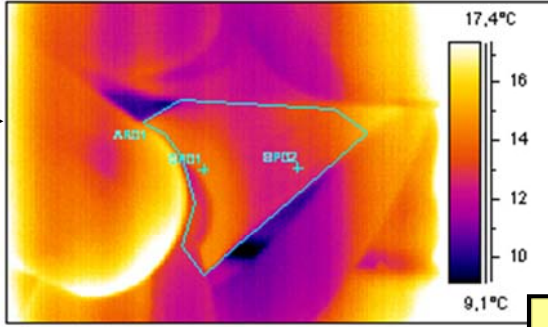
IR information
*Date of creation -
datum měření*
*Time of creation -
přesný čas měření*
File name -

Termogram - Levá strana



Object parameter	Value
Emissivity	0.90
Object distance	1.0 m
Ambient temperature	7.6°C
Label	Value
IR : max	28.8°C
SP01	18.7°C
SP02	17.6°C
AR01 : max	19.1°C

Termogram - Pravá strana



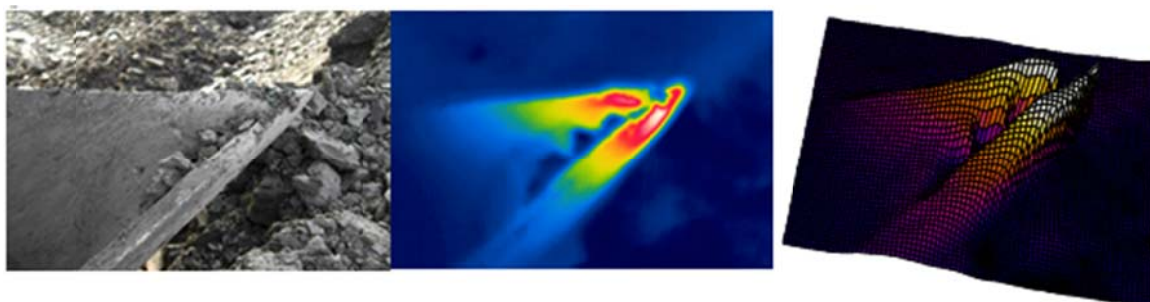
Object parameter	Value
Emissivity	0.90
Object distance	1.0 m
Ambient temperature	7.6°C
Label	Value
IR : max	23.2°C
SP01	14.3°C
SP02	12.9°C
AR01 : max	15.3°C

Termogramy se
 stupnicí teplot
 umístěné v pravé části

Object parameter
*object distance - vzdálenost mezi objektivem kamery
a měřeným objektem*
ambient temperature - teplota okolí v době měření
Label
IR: max - maximální teplota termogramu
SPO 1,2 - teplota v bodě
AR01: max - maximální teplota ve vybrané ploše
 termogramu

Termovizní měření oteplení zubů korečků kolesových rýpadel

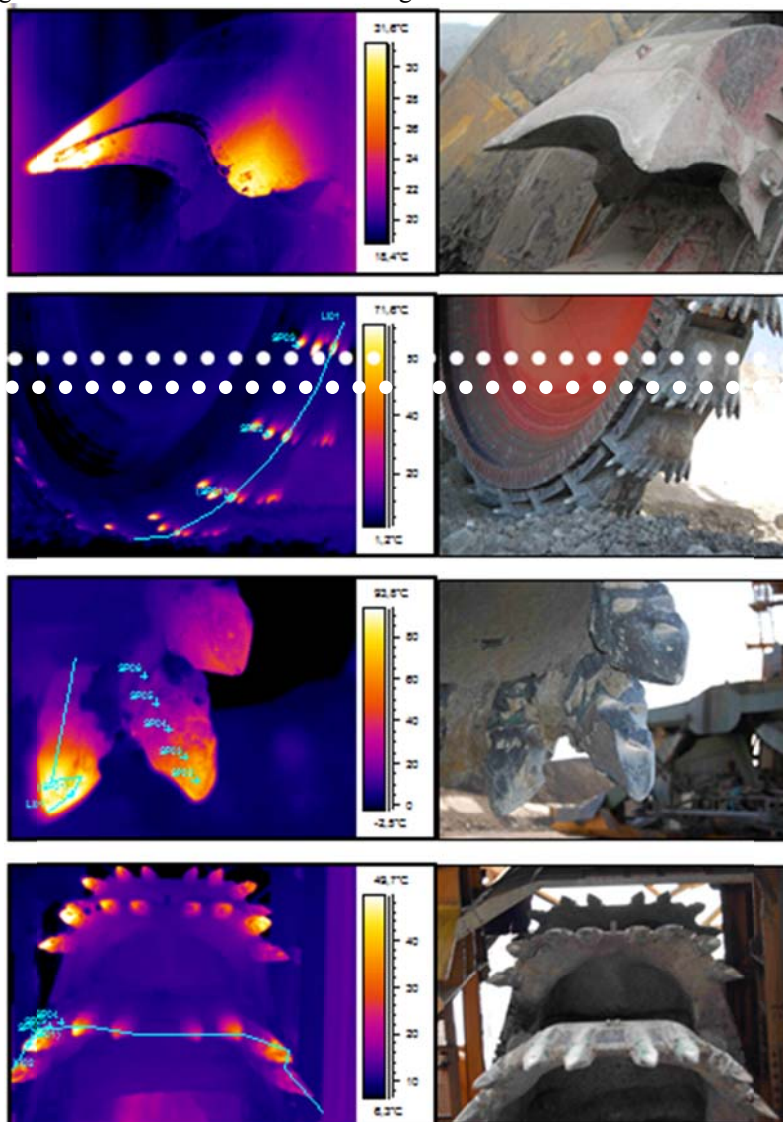
Součástí měření a vyhodnocení mechanických a elektrických veličin na dobývacích strojích při povrchovém dobývání hnědého uhlí bývá i měření tepelného zatížení dobývacího orgánu prováděné pomocí termovizní aparatury.

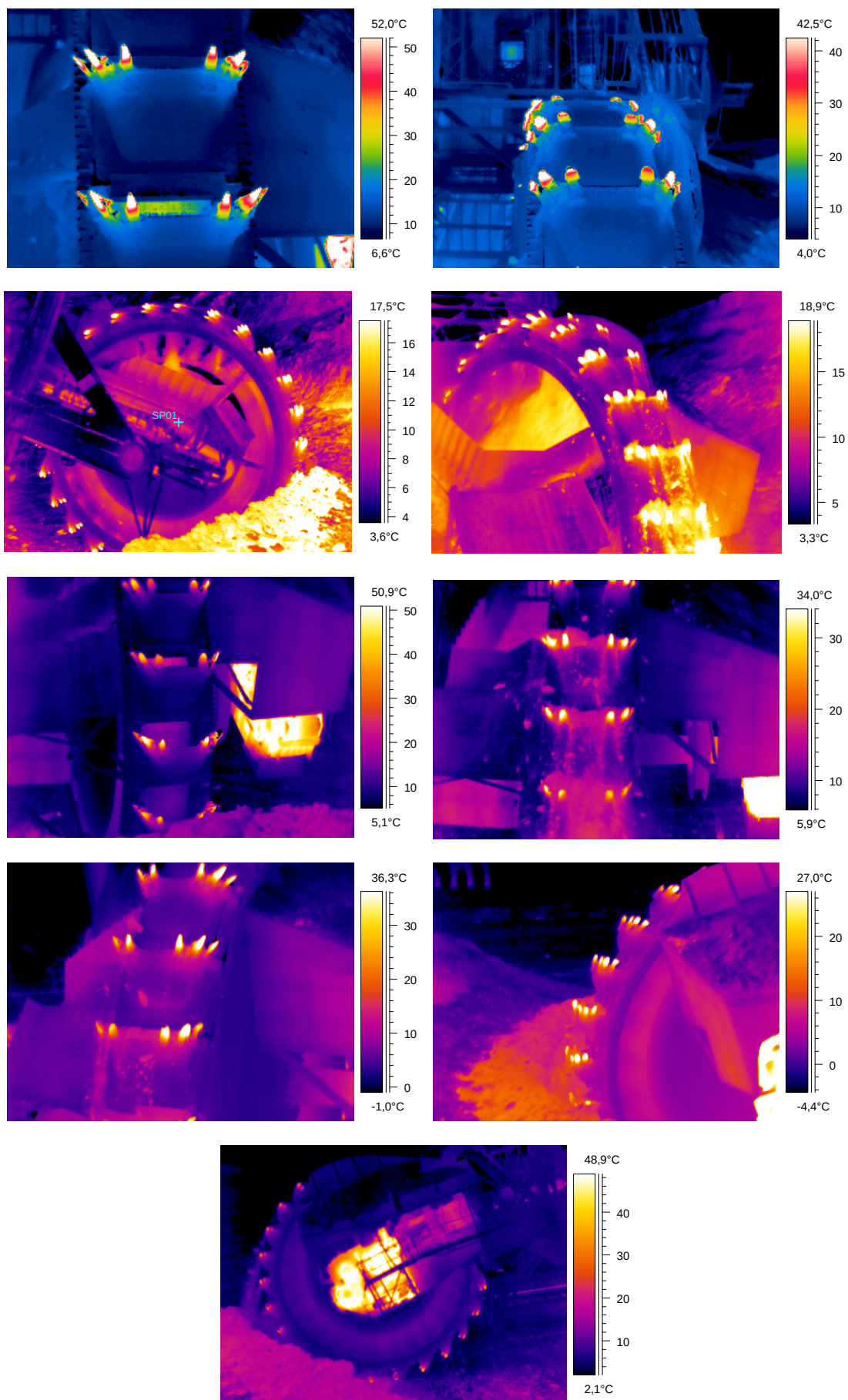


Fotografie

Termogram

3D-view





Termovizní měření povrchové teploty dobývacího orgánu kolesového rýpadla za provozu

Formulář pro vyhodnocení tepelného zatížení dobývacího orgánu



Rýpadlo K 2000

Název termogramu

Term č. 5

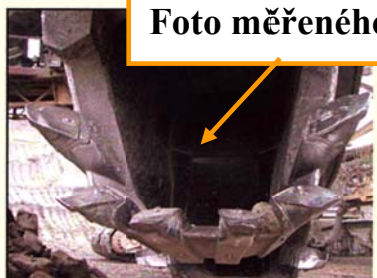
Datum měření

18. 1. 2002

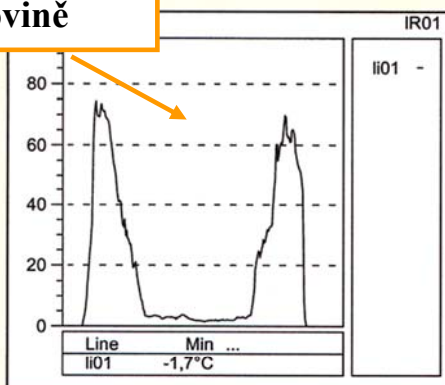
Termogram s
teplotní stupnicí



Foto měřeného místa



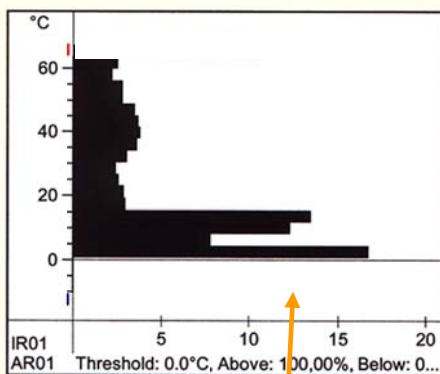
Rozvržení teplot
v dané rovině



Parametry objektu

IR information	Value
Time of creation	11:12:57
Object parameter	Value
Emissivity	0,90
Object distance	43,0 ft
Ambient temperature	1,1°C
Label	Value
IR : max	99,1°C
SP01	83,2°C
SP02	72,5°C
SP03	82,2°C
SP04	24,9°C
LI01 : max	74,5°C
LI01 : min	-1,7°C
LI01 : max-min	76,2°C
AR01 : max	89,3°C
AR01 : min	1,5°C
AR01 : max-min	87,7°C
AR01 : avg	27,0°C

Naměřené hodnoty

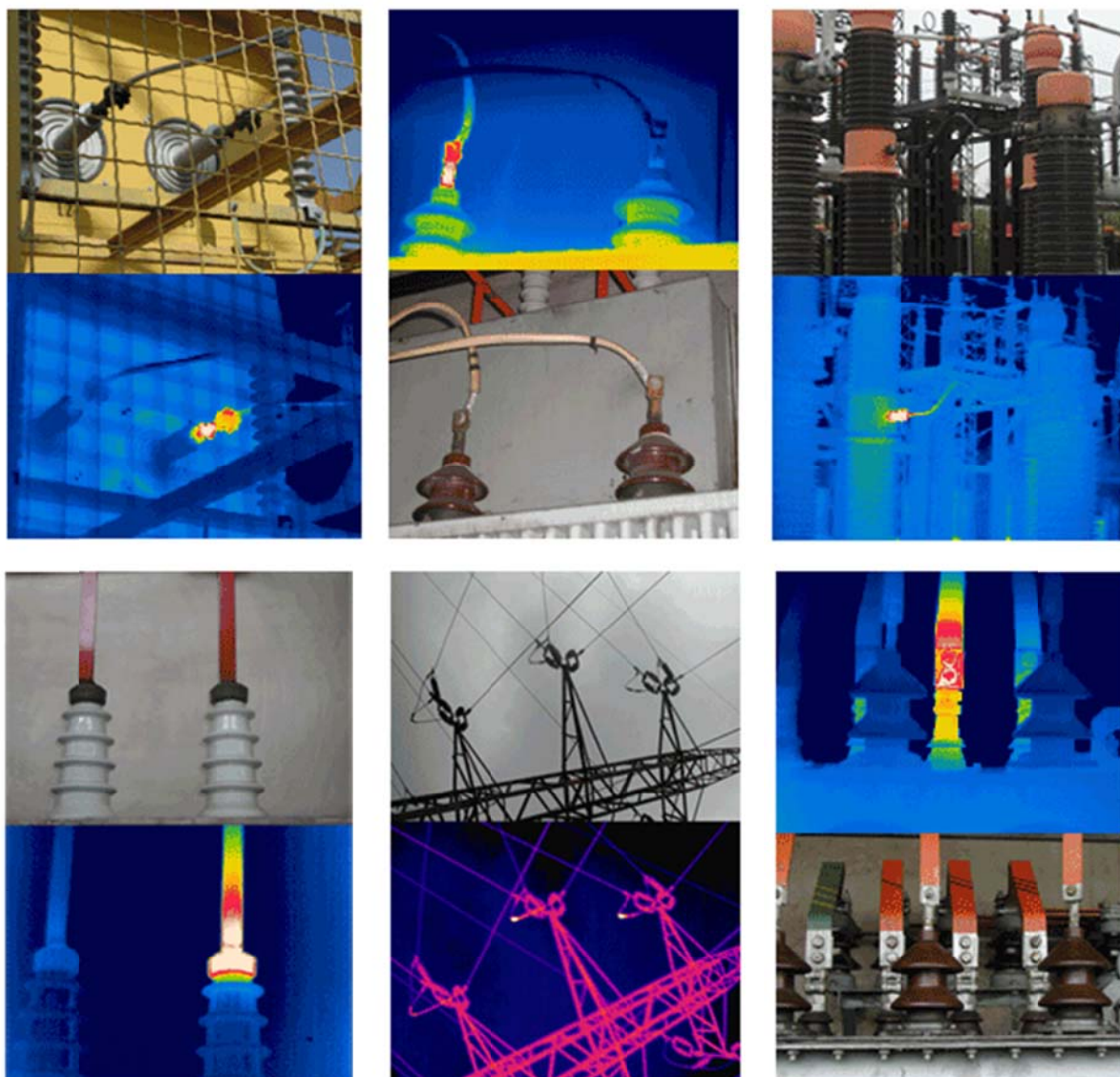


Histogram - procentuální
zastoupení teplot

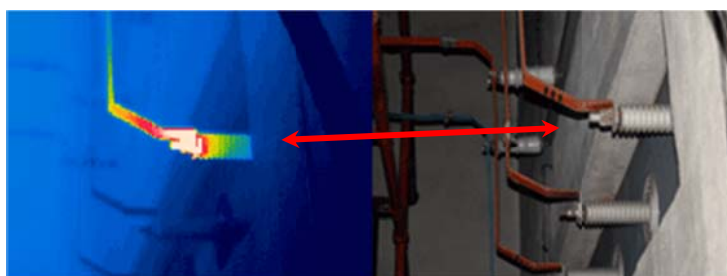
K 2000.

3.2.2002

Diagnostika VN a VVN rozvodů a rozvodů hnědouhelných lomů



Diagnostika elektrických rozvodů a zařízení pomocí termovize spočívá v odhalování míst se zvýšeným přechodovým odporem spojů a kontaktů či snížením izolačním odporem izolantů, které se projevují zvýšením teploty.



Termovizi lze používat pro vyhledávání vadných proudových spojů, kontaktů, svorek a částí elektrického zařízení či elektrických rozvodů pouze při dostatečném proudovém zatížení.

Formuláře pro vyhodnocení termogramů vadných spojů elektrických rozvodů

Ilustrační fotografie

Objekt měření - měřená část

Rozvodna
Daukkaj

Měřené místo
1. patro - kotla 13 A

IR information	value
Date of creation	11.4.2005
Time of creation	8:02:23
File name	F0411-01.img
Label	value
IR :max	13.1°C
IR :min	8.2°C

Object parameter	value
Emissivity	0.90
Object distance	1.5m
Ambient temperature	10.0°C
Label	value
Fault (SPO1)	13.0°C
SPO2	9.1°C

IR information
Time of creation -
přesný čas měření
File name -
název termogramu
Camera type -
použitá termovizní
aparatura
Label

IR: max -
maximální teplota
termogramu

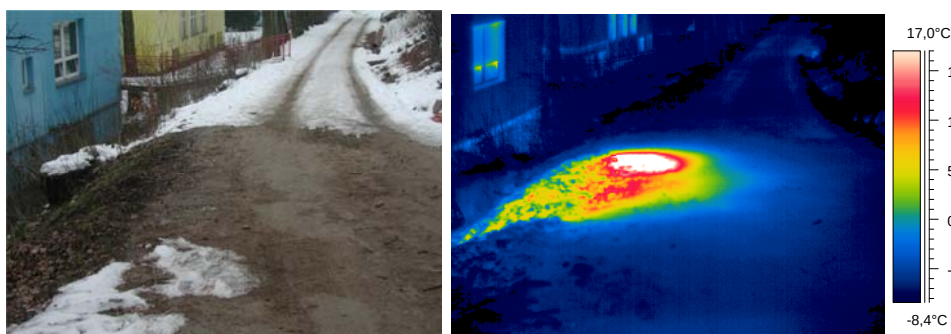
Termogram
se stupnicí teplot
umístěné v pravé
části

Object parameter
emisivita - parametr, který je definován jako poměr
intenzity vyzařování tělesa k intenzitě vyzařování
absolutně černého tělesa při stejné teplotě
object distance - vzdálenost mezi objektivem kamery a
měřeným objektem
ambient temperature - teplota okolí v době měření
Label
Fault (SPO 1) - poruchová teplota
SPO 2 - teplota v místě bez závady

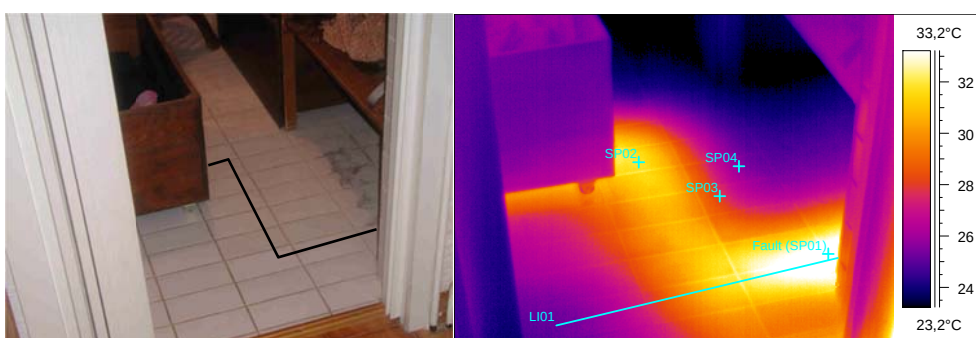
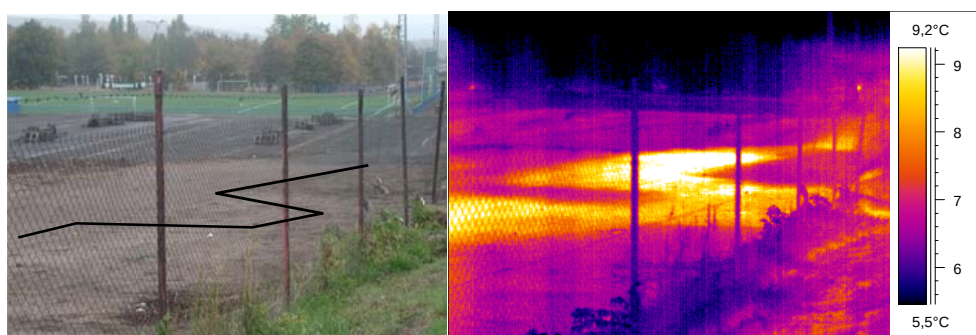
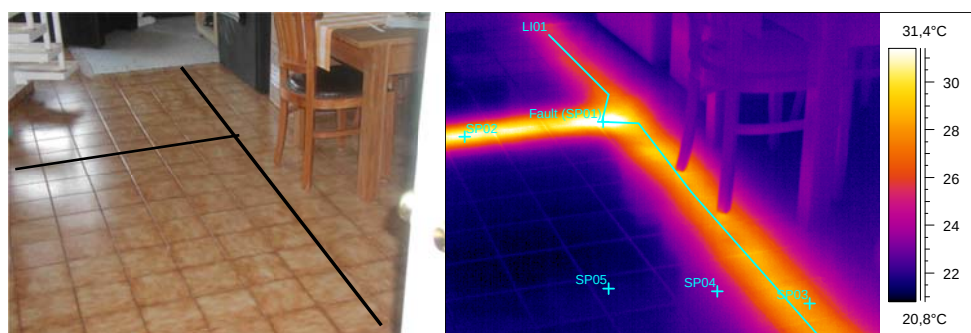
Profil teplot v dané rovině
Graf křivky teplot přímky
protínající termogram

59

Vyhledávání úniků teplé a studené vody



Vyhledávání rozvodů elektrických, teplé a studené vody v zemi, ve zdi atd.

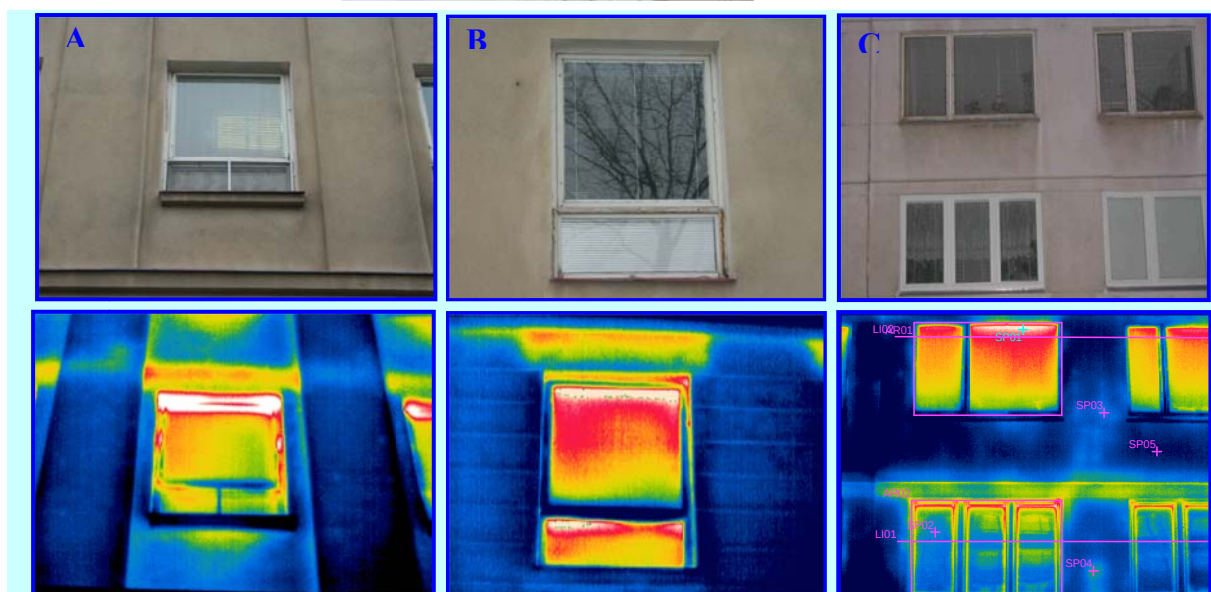
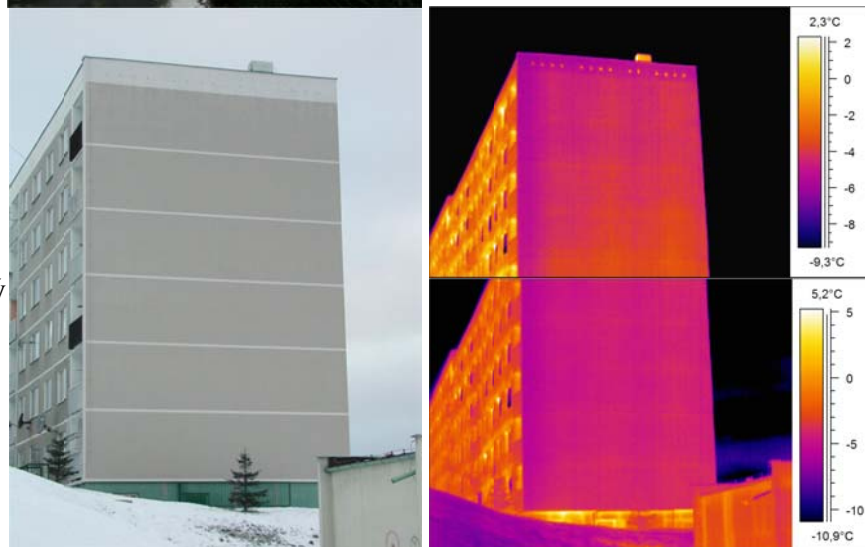


Termovizní měření skutečného stavu tepelné izolace obvodových stěn a střech stavebních objektů

Boční
část panelového domu
se sníženou tepelně-
izolační vlastností stěny

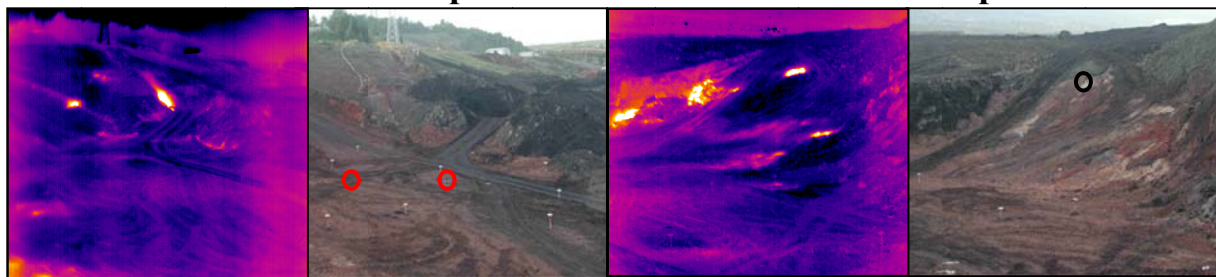


Panelový
dům dodatečně zateplený
tepelnou izolací

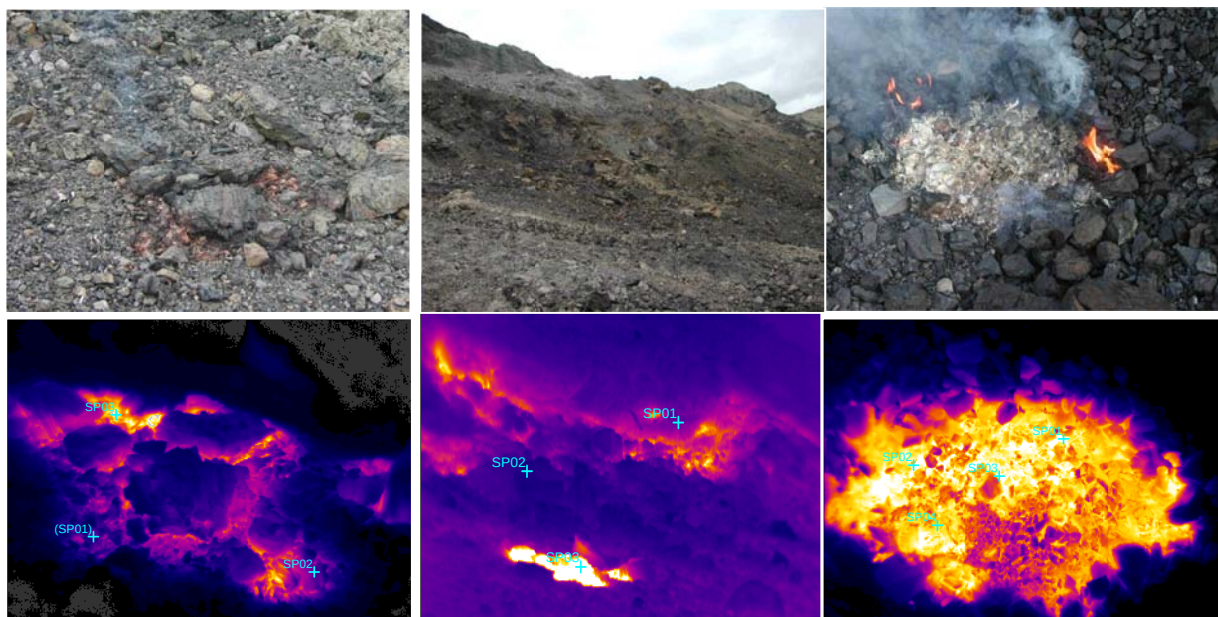


Obr.30 A, B - Netěsnost oken v jejich horní části a výskyt tepelných mostů nad okny
C - Rozdíl teplot mezi novými plastovými okny v přízemí a starými v 1. patře

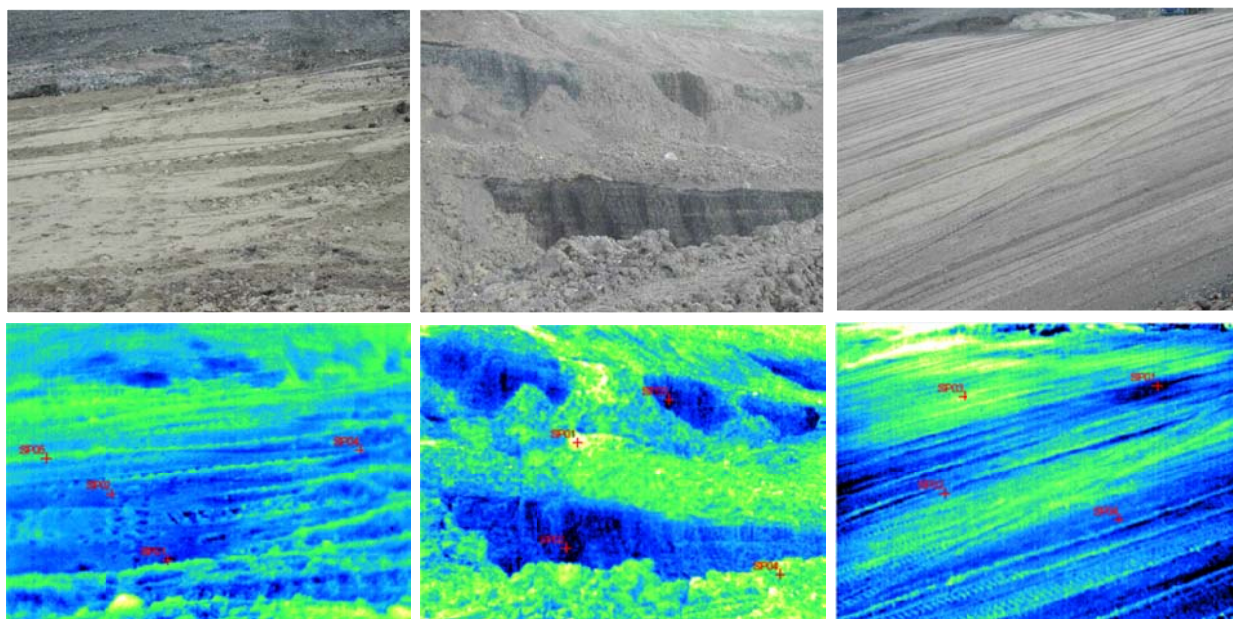
Termovizní měření při sanaci a rekultivaci dolového pole



Termovizním měřením povrchové teploty vytyčené oblasti je možné zjistit podzemní ložiska záparů uhelných zásob

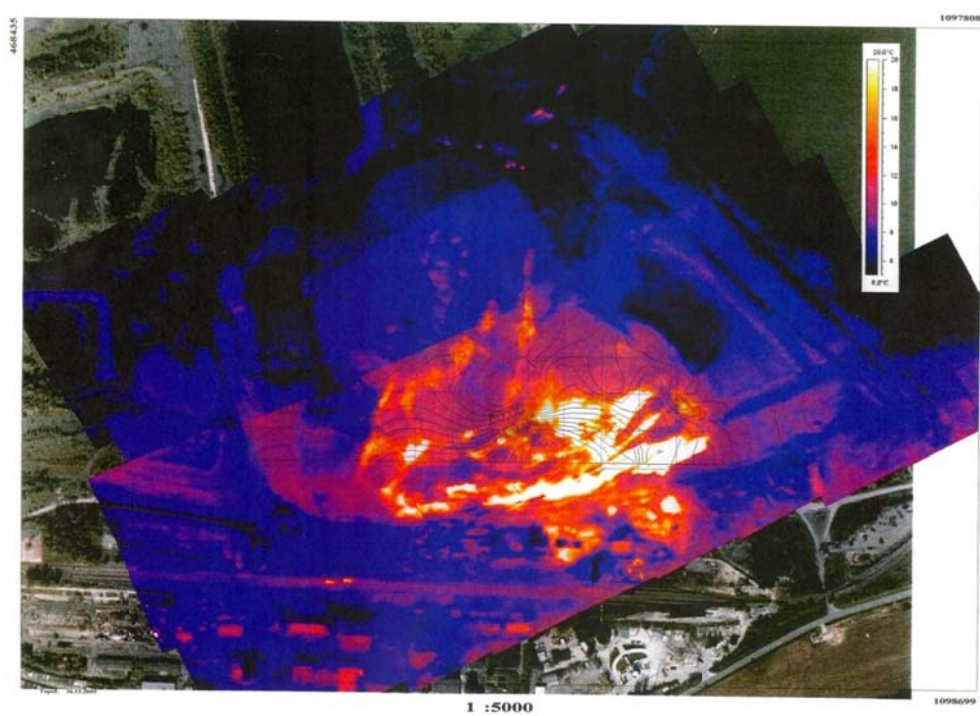
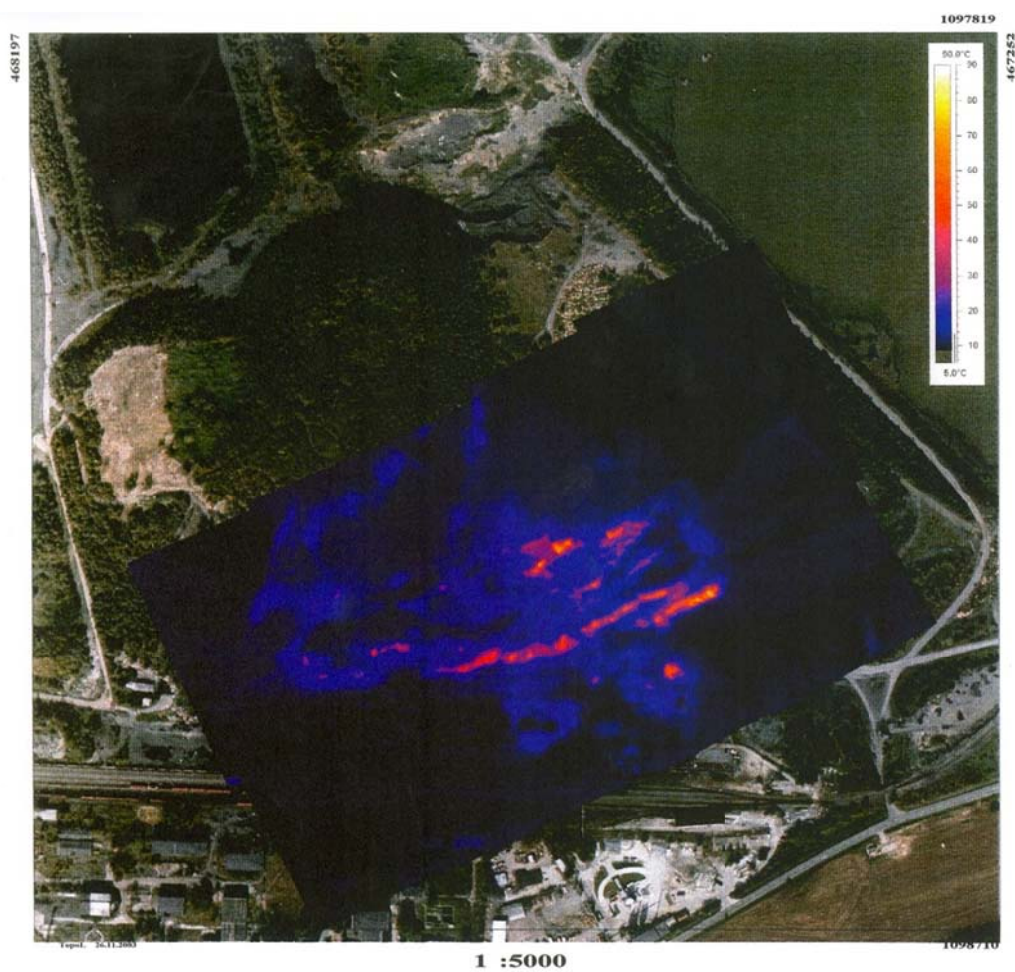


Na základě výsledků termovizních měření vytyčené zájmové oblasti jsou stanovena místa s výraznými tepelnými anomáliemi

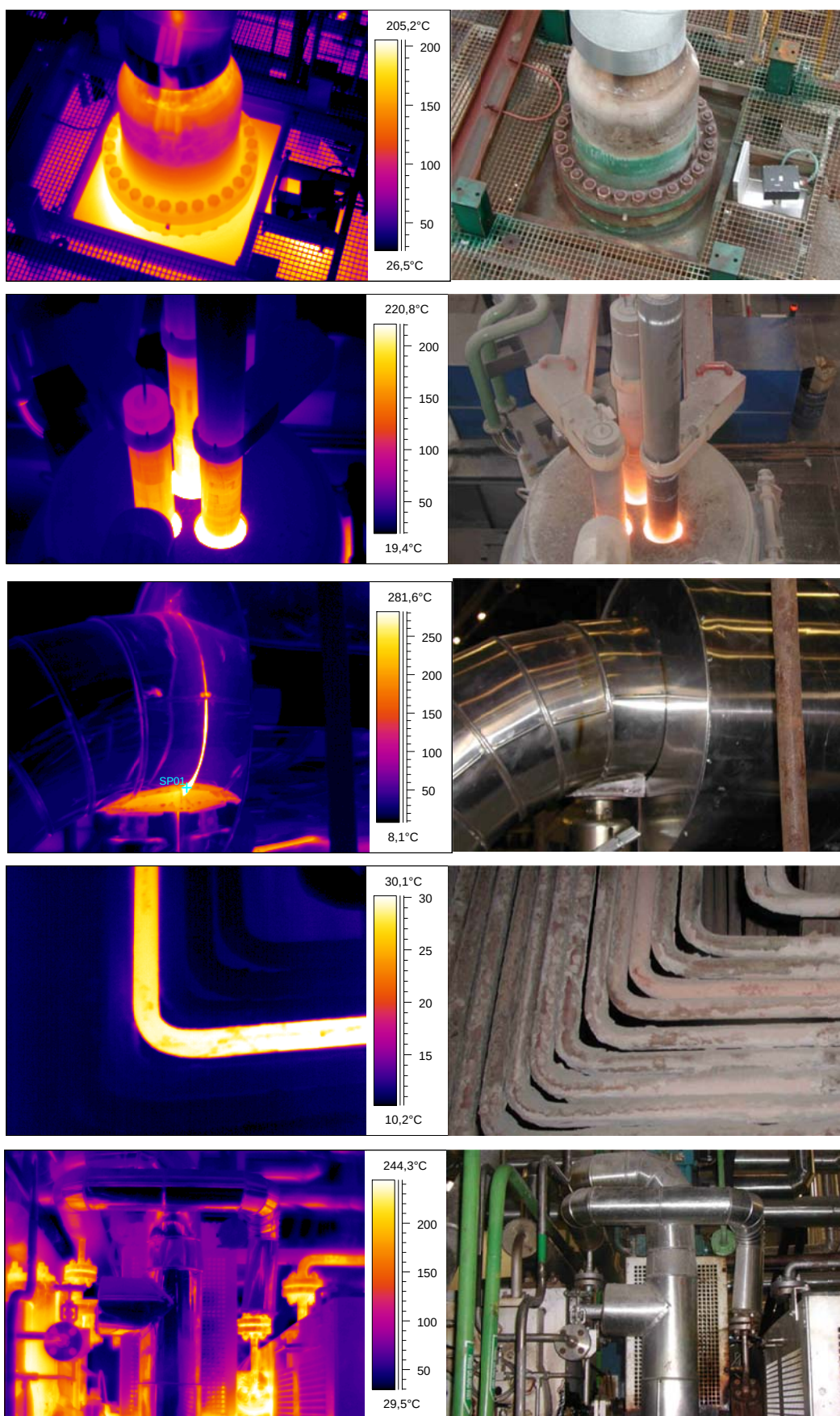


Kontrolní termovizní měření provedené po navenení a rozprostření inertních písků zabraňující vzniku zápar. Z pořízených termogramů je patrné, že použité sytké hmoty vyvolaly příslušný efekt. Souvislé vrstvy zamezily přístupu kyslíku. Zároveň se uplatnil chladivý efekt zvolených sanačních materiálů.

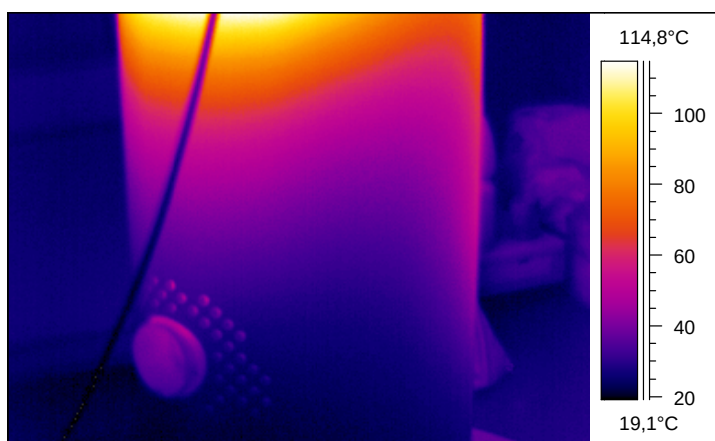
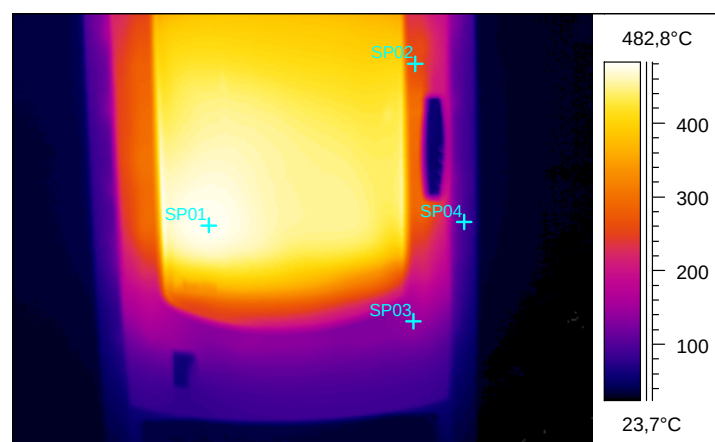
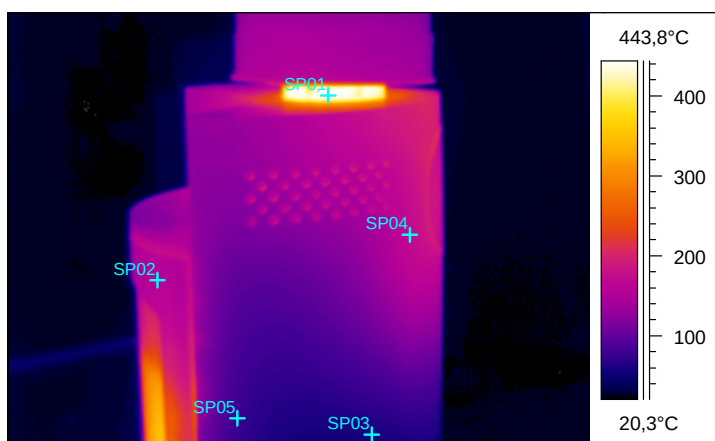
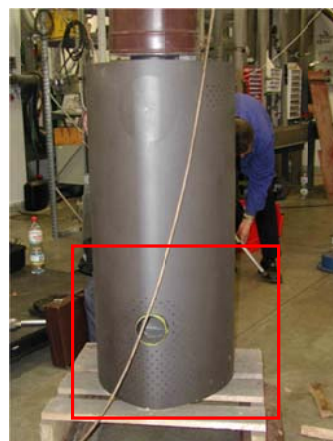
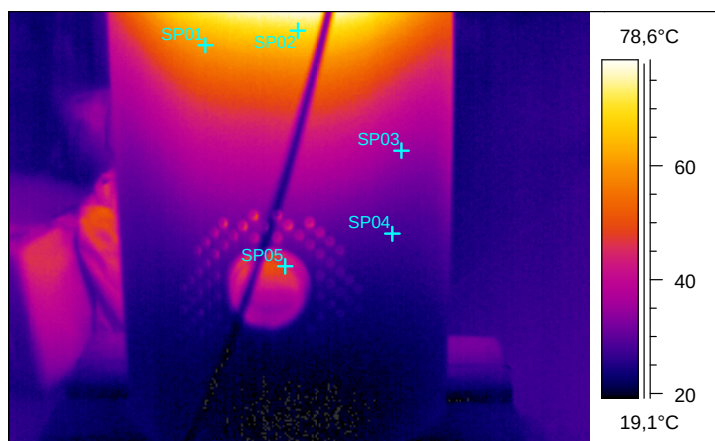
Letecké termografické snímkování krajiny (odvalů, výsypek, skládek atd.)



Měření povrchových teplot v těžkém, zpracovatelském, elektrotechnickém, chemickém, potravinářském či papírenském průmyslu



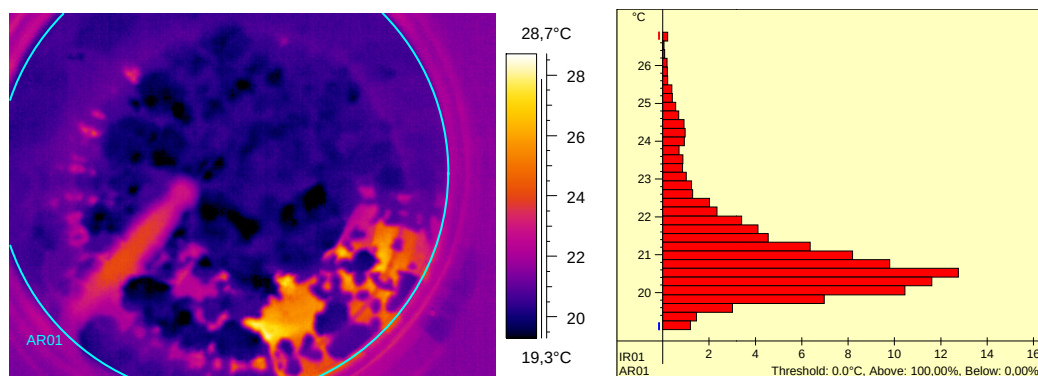
Ověřování rozložení povrchové teploty nových typů krbů a kamen



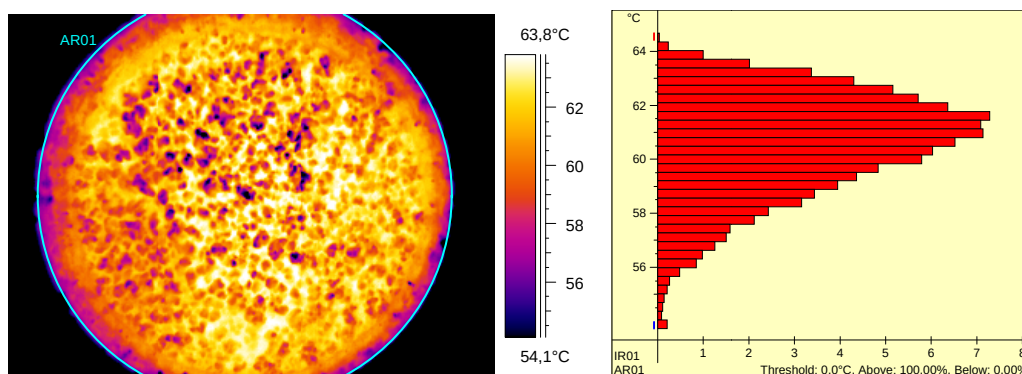
Ověřování změn teplot v důsledku exotermické reakce



Příklad: měření změn teplot po promíchání směsi 38 hmotnostních dílů vápenného hydrátu a 62 hmotnostních dílů kalů při hygienizaci kalů



Počáteční stav - teplota po promíchání směsi



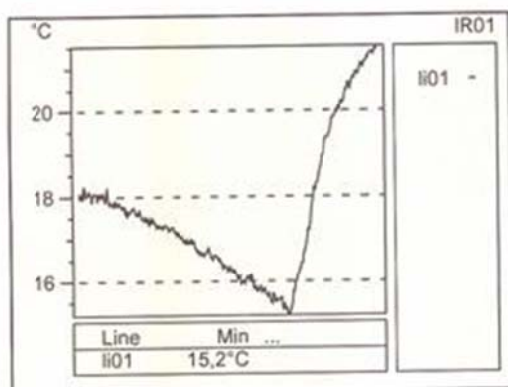
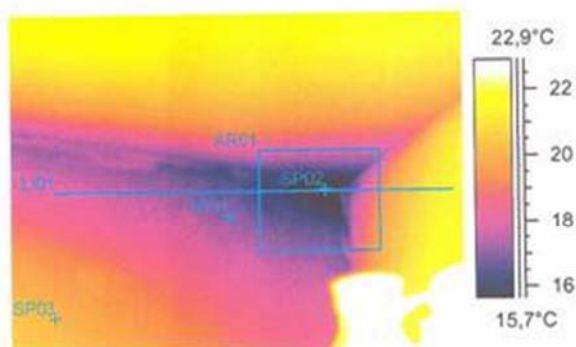
Teplota po cca 8 minutách od počátku míchání směsi

Kuchyňský kout panelového domu

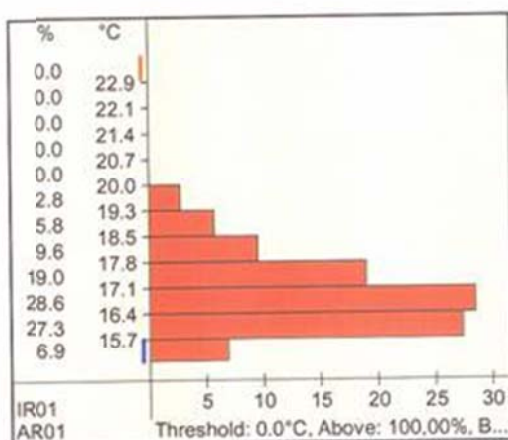
FLIR Systems AB

14.1.2002

Termogram	Objekt	Měřené místo	Datum
Term 12	Panelový dům bl. 612	Kuchyň - pravý horní roh	10.01.2002



Object parameter	Value
Emissivity	0,92
Object distance	2,2 m
Ambient temperature	22,2°C



Label	Value	Diff temperature
SP01	17,2°C	*
SP02	15,4°C	*
SP03	20,1°C	*
LI01 : max	21,5°C	294,7°C
LI01 : min	15,2°C	288,3°C
LI01 : avg	17,6°C	290,7°C
LI01 : stdev	1,6°C	-
AR01 : max	19,8°C	293,0°C
AR01 : min	15,1°C	288,2°C
AR01 : avg	16,9°C	290,1°C
AR01 : stdev	1,0°C	-

Kuchyň - pravý horní roh

5. ZÁVĚR

Nelze plně říci, že obor termodiagnostiky, resp. termografie je naprosto novým vědním oborem, nýbrž si uvědomit, že v souvislosti se značným rozvojem odpovídajícího technického vybavení nachází stále širší uplatnění. Dané uplatnění je podporováno nejen ekonomičností měření, svým způsobem technickou jednoduchostí vlastního provedení měření a odpovídající vypovídající jistotou pro rozhodnutí. Musíme si ovšem plně uvědomit, že na první pohled daná „jednoduchost a vypovídací schopnost“ nemůže existovat bez znalostí principů přenosu tepla, z šíření infračerveného záření, principů radiometrie atd., řečeno jinými slovy „mám-li ve vlastnictví termokameru, tak ještě nejsem diagnostikem analytikem v oboru termografie“.

Použití této diagnostické metody není tedy možné bez znalostí souvisejících faktorů ovlivňujících měření nebo jejich opomíjení či kompenzace. Správné nasazení veškerých činitelů do vyhodnocovacího procesu znamená nutný komplexní přístup k efektivnímu a mocnému nástroji technické diagnostiky.

Je nesporným faktem, že hlavní důraz je sice také kladen na oblast měření teplot existujícími metodami, ale především musí být na zobrazování teplotních polí a jejich kvantifikační hodnocení. Z těchto důvodů, už byla zmínka v úvodu, jsou skripta zpracována trochu netradičním způsobem, odkazující na již dostupnou literaturu, případně na literaturu k profesní certifikaci [10] v daném oboru, kde najdete vše potřebné k dalšímu hlubšímu studiu.

V této fázi musíme poděkovat zpracovatelům lit. [10], která je pro danou problematiku zpracována relativně vyčerpávajícím způsobem, proto na ní odkazujeme nejčastěji. Není účelem zpracovat text vyčerpávajícím slovním způsobem, dle nás plně postačí odkaz na již existující dostupné zpracování, i tímto způsobem předkládaná skripta z pedagogického pohledu naplní svůj účel.

V návaznosti na předchozí odstavec musíme také upozornit, že v lit. [10] je uvedena kapitola „Vybrané termíny“ z oboru termografie, které byly získány z celé řady publikací, především zahraničních. Zde je nutno v souladu s [10] uvést, že některé výrazy vzniklé překladem z anglického jazyka nemají v jazyce českém doposud ekvivalentní vyjádření.

Závěrem musíme uvést, že jsme si nekladli vůbec žádný nárok na originalnost a původnost zpracování. Byli jsme vedeni pouze jedinou snahou, zpracovat skripta tak, aby zaplnily existující mezeru v již existující řadě skript v souladu s obsahem předmětu „Technická diagnostika“, aby také byly základním informačním zdrojem pro hlubší studium daného oboru.

LITERATURA

- [1] FUKÁTKO, T.: *Detekce měření různých druhů záření*. BEN - technická literatura, Praha 2007, 1. vydání, 192s., ISBN 978-80-7300-193-3
- [2] JENČÍK, J., VOLF, J. a kol.: *Technická měření*. Vydavatelství ČVUT, Praha 2003, dotisk 1. vydání, 212s., ISBN 80-01-02138-6
- [3] KREIDL, M.: *Měření teploty - senzory a měřící obvody*. BEN - technická literatura, Praha 2005, 1. vydání, 240s., ISBN 80-7300-145-4
- [4] KREIDL, M., ŠMÍD, R.: *Technická diagnostika*. BEN - technická literatura, Praha 2006, 1. vydání, 408s., ISBN 80-7300-157-6
- [5] LYSENKO, V.: *Detektory pro bezdotykové měření teplot*. BEN - technická literatura, Praha 2005, 1. vydání, 160s., ISBN 80-7300-180-2
- [6] MONI, V.: *Aplikace výsledků bezkontaktního měření teplot v hornické praxi*. Diplomová práce HGF VŠB-TU Ostrava, Ostrava 2007, 42s.
- [7] Podkladové materiály VUHÚ, a.s. Most
- [8] Podkladové materiály TMVSS, s.r.o Praha
- [9] Podkladové materiály AHL BORN Měřící přístroje, Praha
- [10] SVOBODA, J.: *Termodiagnostika*. Učební texty TMV SS, s.r.o. + ATD ČR, a.s., Praha 2007, 124s.