

Ing. Roman VAVŘIČKA, Ph.D.
ČVUT v Praze
Fakulta strojní
Ústav techniky prostředí

Měření vysokých povrchových teplot bezkontaktním způsobem

Contactless Measurement of High Surface Temperatures

Recenzent
Ing. Vladimír Jirka, CSc.

Článek se zabývá měřením vysokých povrchových teplot termografickou metodou. Autor ověřuje teoretické předpoklady použitelnosti bezkontaktního měření vysokých teplot na několika experimentálních měření. Experimentální ověření je zaměřeno na rozsah spektrální citlivosti bezkontaktních přístrojů a použití speciálního nástriku měřeného povrchu. Závěr článku je věnován vlivu okrajových podmínek na přesnost měření.

Klíčová slova: termografie, spektrální citlivost, experiment, bezkontaktní měření teploty

The paper deals with measurement of high surface temperatures by thermography method. The author verified by several experiments the theoretical assumptions of usability of contactless measurement of high temperatures. The experimental verification is focused on spectral sensitivity range of contactless devices and on application of special coating on measured surface. The ending of the paper is devoted to the influence of boundary conditions on the accuracy of the measurement.

Klíčová slova: thermography, spectral sensitivity, experiment, contactless temperature measurement

ÚVOD

V technických zařízeních budov se setkáváme i se zařízeními, která vykazují povrchovou teplotu vyšší než 100 °C. Typickým příkladem jsou např. komínová tělesa, tmavé a světlé plynové zářiče, parní rozvody potrubních sítí apod. Metodika měření vysokých teplot je daná použitou technologií měření. Měření kontaktním způsobem je v těchto případech omezeno použitelností daného čidla, resp. materiálem čidla, který definuje měřicí rozsah. Dalším problémem kontaktního způsobu měření je vysoký podíl odvedeného tepla z místa styku mezi čidlem a měřeným povrchem. Bezkontaktní způsob měření má zcela jiná omezení. Pro bezkontaktní měření teplot je velice důležité nastavení okrajových podmínek měření. Mezi základní okrajové podmínky patří emisivita měřeného povrchu, okolní teplota, teplota pozadí teplotního reliéfu měřeného povrchu (odrážena zdánlivá teplota), vlhkost vzduchu a vzdálenost mezi přístrojem a měřeným objektem.

Ve vazbě na použitelnost resp. vhodnost měřicího zařízení je nutné stanovit pro konkrétní měření základní hodnotící kritéria. U bezdotykových teploměrů se jedná o spektrální citlivost a teplotní citlivost. Spektrální citlivost je vázána na relativně široké pásmo frekvencí elektromagnetického záření, ve kterém daný přístroj pracuje. Teplotní citlivost je minimální rozlišitelná teplotní difference – tzv. MRTD. Kritérium MRTD určuje, jaká nejmenší změna povrchové teploty bude systémem ještě vyhodnotitelná. V případě použití termovizní kamery je dále důležitá rozlišovací schopnost přístroje. Při výběru systému pro bezkontaktní měření teploty je proto vhodné znát, na jaké konkrétní aplikace bude přístroj používán a podle toho požadovat konkrétní typ.

TEORETICKÉ PŘEDPOKLADY

Na následujícím příkladu můžeme porovnat dvě zcela rozdílné termovizní kamery s různými spektrálními citlivostmi, jak ukazuje obr. 1. Zásadní otázka zní, zda je možné měřit s IČ termovizním systémem se spektrální citlivostí v infraoblasti delších vlnových délek (termovizní kamera FLIR ThermoCAM S65) i vysoké teploty, které vykazují maximální vyzařování v oblasti kratších vlnových délek? Jak vidíme z obr. 1 např. pro teplotu objektu 500 °C je maximum vyzařování při vlnové délce cca 3,9 μm, což je na rozmezí střední a blízké infraoblasti vyzařování (NWIR a

MWIR). Termovizní kamera AGEMA Thermovision 400 je přizpůsobena právě pro měření v blízké (NWIR) a střední infraoblasti (MWIR). Odpověď nalezneme ve Stefan-Boltzmannově zákonu a jeho softwarové aplikaci při zpracování infračerveného signálu v termovizní kameře.

Stefan-Boltzmannův zákon (obr. 2) vyjadřuje celkový zářivý výkon absolutně černého tělesa na všech vlnových délkách při dané teplotě. Matematicky lze zapsat ve tvaru

$$I_c(T) = \int_0^{\infty} I_c(\lambda, T) \cdot d\lambda = \frac{2 \cdot \pi^5 \cdot k_B^4}{15 \cdot c^2 \cdot h^3} \cdot T^4 = \sigma \cdot T^4 \quad (1)$$

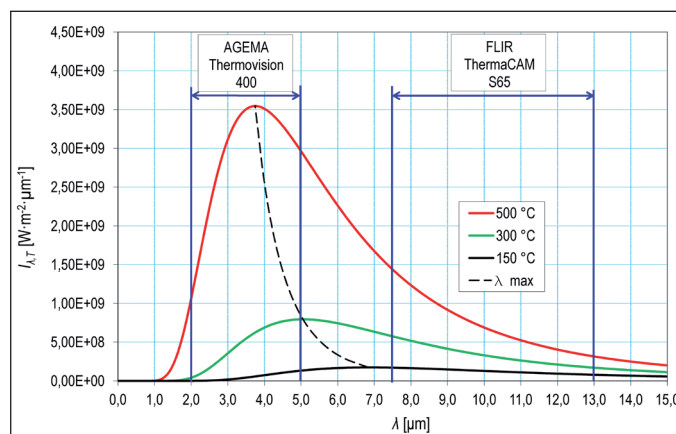
kde je

I_c celkový zářivý výkon [W/m²],

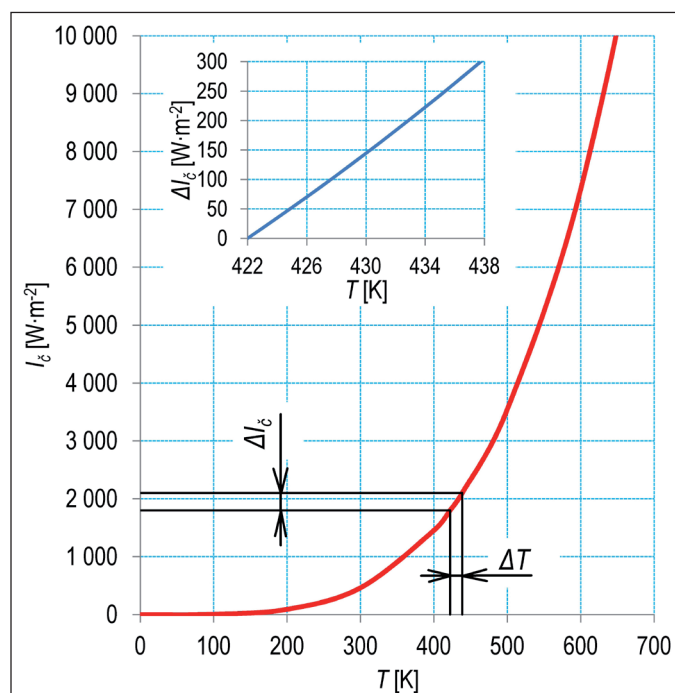
σ Stefan-Boltzmannova konstanta ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ [W/(m²K⁴)]).

Pokud chceme řešit změny intenzity vyzařování v daném intervalu teplot, kdy změna intenzity vyzařování je relativně malá s absolutní hodnotou teploty T , lze změnu infračerveného signálu ze Stefan-Boltzmannova zákona vypočítat derivací vztahu (1) jako

$$\Delta I_c = 4 \cdot \sigma \cdot T^3 \cdot \Delta T \quad (2)$$



Obr. 1 Spektrální citlivost termovizních kamer AGEMA Thermovision 400 a FLIR ThermoCAM S65



Obr. 2 Prezentace Stefan-Boltzmannova zákona pro absolutně černé těleso

Vztah (2) tak umožňuje aproximaci Stefan-Boltzmannova zákona v konečném intervalu teplot a tím i jednoduchý přepočet v oblasti rozdílných vlnových délek. Grafické vyjádření pro absolutně černé těleso je pak zobrazeno na obr. 2.

Na základě vzorce (1) lze pro reálná tělesa také odvodit závislost relativní změny zobrazované teploty objektu vůči chybně zadané hodnotě emisivity [3]. Nastavíme-li pro termovizi hodnotu emisivity $\varepsilon = 1$, pak při měření povrchové teploty reálného tělesa T_s , jehož emisivita je $\varepsilon < 1$, nebude změřená hodnota teploty odpovídat skutečné teplotě povrchu reálného tělesa T_s , ale takové teplotě T_ε , při níž by byl zářivý výkon I_ε černého tělesa stejný jako reálného tělesa. Matematicky to lze zapsat ve tvaru

$$I_s = \varepsilon_s \cdot \sigma \cdot T_s^4 = I_\varepsilon = \sigma \cdot T_\varepsilon^4 \quad (3)$$

Po úpravě vztahu lze pak teplotu reálného tělesa vyjádřit jako

$$T_s = T_\varepsilon \cdot \sqrt[4]{\frac{1}{\varepsilon_s}} \quad (4)$$

Derivací vztahu 4, lze odhadnout nejistotu $\pm \Delta T$ měřené teploty T_s při dané odchylce $\pm \Delta \varepsilon$ hodnoty emisivity měřeného povrchu, kde pro malé hodnoty odchylky $\pm \Delta \varepsilon$ platí

$$\frac{dT}{T} = -0,25 \cdot \frac{d\varepsilon}{\varepsilon} \Rightarrow \Delta T \approx -0,25 \cdot T \cdot \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} \quad (5)$$

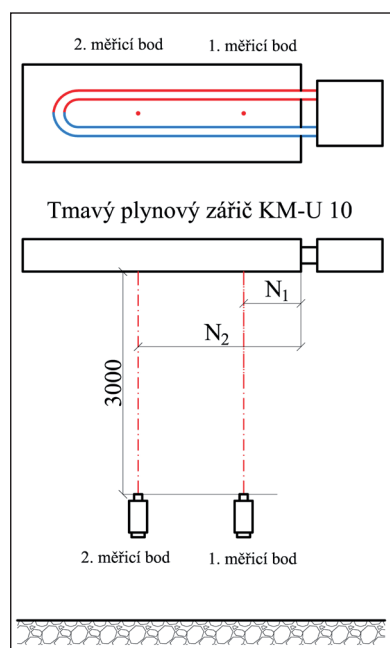
Např. pro parní potrubí o teplotě $T = 423 \text{ K}$ (150°C) a emisivitě povrchu potrubí $\varepsilon = 0,88$. Uživatel, který zadá emisivitu nižší např. o $\Delta \varepsilon = 5 \%$ (tj. $\varepsilon = 0,84$), pak vyvolá změnu zobrazované teploty o $-6,01 \text{ K}$.

V současnosti jsou pro běžné aplikace nejčastěji používané přístroje se spektrální citlivostí od $7,5 \mu\text{m}$ do $13,5 \mu\text{m}$. Důvodem je maximální eliminace vlivu radiace Slunečního záření na detektor, které je právě v oblasti delších vlnových délek méně významné. Nicméně na základě předchozího teoretického odvození lze i s těmito přístroji měřit v oblasti kratších vlnových délek, tj. vysoké povrchové teploty.



Obr. 3 Plynový tmavý zářič KM-U 10 v halových laboratořích

EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ



Obr. 4 Schéma měření

Experimentální ověření předchozího teoretického tvrzení bylo provedeno na měření povrchové teploty tmavého plynového zářiče KM-U 10 instalovaného v halových laboratořích Ústavu techniky prostředí, Fakulty strojní, ČVUT v Praze (obr. 3). Schéma měření je znázorněno na obr. 4. Emisivita povrchu kouřovodů plynového zářiče byla stanovena kalibrací s dotykovým čidlem ANRI-TSU N-331K-02 pro teplotu 400°C jako $\varepsilon = 0,98$. Pro měření byly využity dvě termovizní kamery AGEMA Thermovision 400 a FLIR ThermaCAM S65 jejichž spektrální citlivost ukazuje obr. 1.

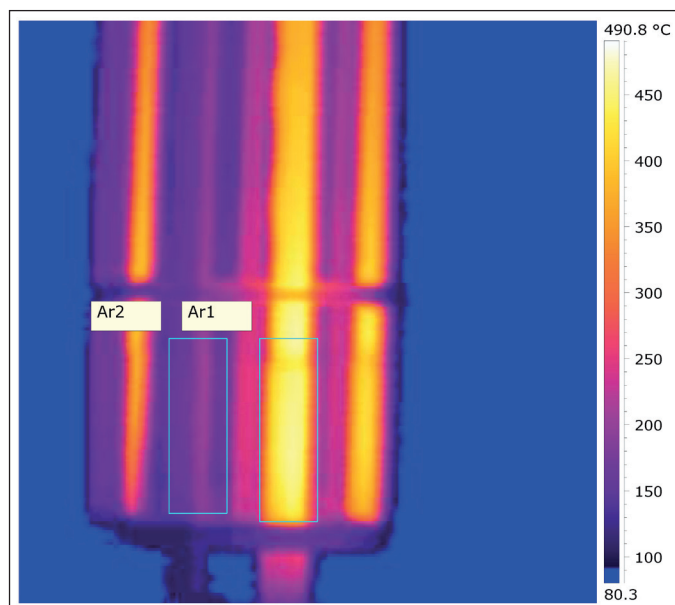
Při vyhodnocení měření dle tab. 1 je nutné v první řadě uvážit přesnost přístrojů. V případě použitých termovizních kamer se jedná o $\pm 2 \%$ z naměřené hodnoty. Z tohoto pohledu je většina naměřených hodnot v dobré shodě. Jedinou výraznou odchylku měření lze zaznamenat v případě 1. měřicího bodu na hořákové trubce u termovizní kamery FLIR ThermaCAM S65 (cca $+1,9 \%$ v porovnání s čidlem ANRITSU N-331-K02). Tuto výraznou odchylku lze vysvětlit použitím odlišného měřicího rozsahu termovizní kamery. Pro tento měřicí bod byl teplotní rozsah zvolen od $+350$ do 1500°C . Dosaženou maximální teplotu vytyčené oblasti na hořákové trubce (obr. 6) při teplotním rozsahu od 0 do $+500^\circ \text{C}$ udává hodnota uvedená v závorce tabulky 1. Pro ostatní měřicí body byl měřicí rozsah nastaven od 0 do $+500^\circ \text{C}$. Jak se uká-

Tab. 1 Maximální povrchové teploty hořákové a ventilátorové trubky tmavého plynového zářiče (obr. 5 až 8)

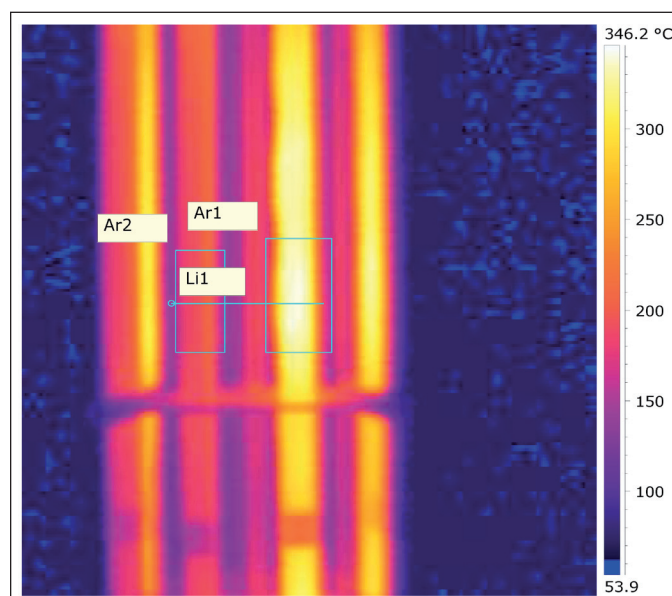
Měřicí bod		Maximální teplota měřeného povrchu ve vyznačených oblastech [°C]		
		Čidlo ANRITSU N-331-K-02	AGEMA Thermovision 400	FLIR ThermoCAM S65
1. měřicí bod	Hořáková trubka	467,3	470,3	476,1 (472,3)
(30 cm za vstupem)	Ventilátorová trubka	174	175,2	175,8
2. měřicí bod	Hořáková trubka	345	348,2	346,7
(30 cm za půlkou)	Ventilátorová trubka	215	217,3	215,8

zalo ve vyšším teplotním rozsahu je zřejmě v termovizní kameře FLIR ThermoCAM S65 implementován odlišný softwarový převod aplikace Stefan-Boltzmannova zákona, který se hodí až pro měření velmi vysokých teplot, tj. nad + 500 °C. V oblasti teplot, kde se oba teplotní rozsahy překrývají, nejsou udávané hodnoty přístroje ve shodě. Nicméně toto výrobce termovizní kamery nekomentoval.

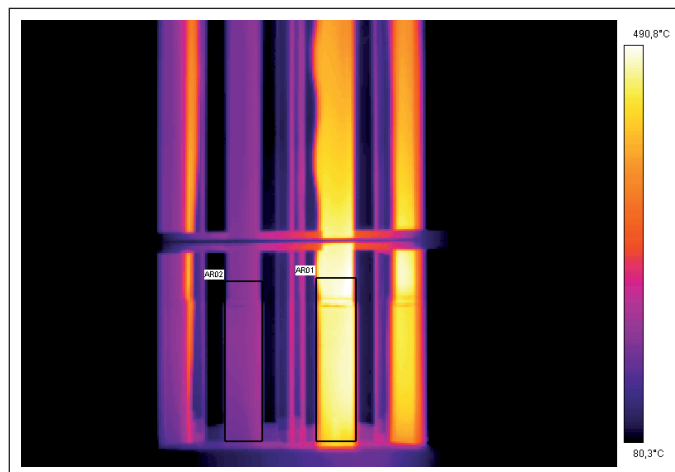
Další problémy při měření vysokých teplot lze prezentovat na sledování povrchové teploty skříně turbodmychadla. Při běžném provozu tj. během zatěžovacího a odlehčovacího cyklu turbodmychadla lze naměřit na povrchu odlitku teplotní diferenci až 500 K. Přičemž maximální měřená povrchová teplota byla cca 600 °C. V první fázi měření se na novém odlitku skříně turbodmychadla projevil problém s nastavením emisivity. Během zatěžovacích cyklů, kdy povrch odlitku prochází výraznými změnami teplot, se na povrchu odlitku výrazně urychluje proces oxidace. To způsobovalo výrazné problémy při vyhodnocení, kdy se počáteční nastavená hodnota emisivity v průběhu měření měnila. Pro opakované měření tak byl povrch opatřen nástřikem speciální vysokoteplotní barvou s předem definovanou emisní složkou. Barva byla nanášena pouze na polovinu nově měřeného povrchu odlitku a poté byl odlitek podroben



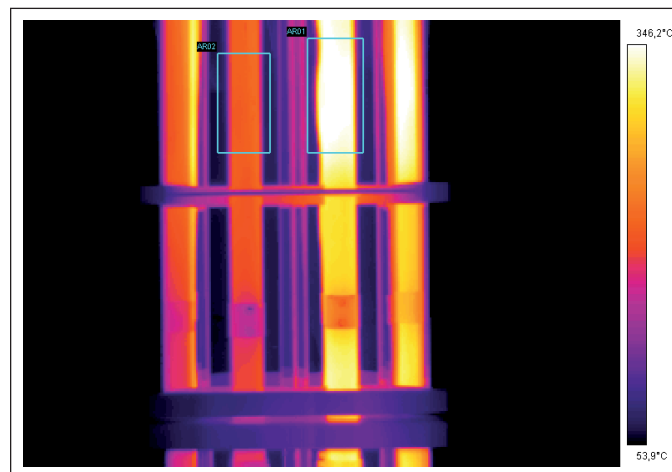
Obr. 5 Termogram 1. měřicího bodu kouřovodů tmavého plynového zářiče KM-U 10 pořízený termovizní kamerou AGEMA Thermovision 400, Ar1: $t_{\max} = 470,3$ °C, Ar2: $t_{\max} = 175,2$ °C



Obr. 7 Termogram 2. měřicího bodu kouřovodů tmavého plynového zářiče KM-U 10 pořízený termovizní kamerou AGEMA Thermovision 400, Ar1: $t_{\max} = 348,2$ °C, Ar2: $t_{\max} = 217,3$ °C



Obr. 6 Termogram 1. měřicího bodu kouřovodů tmavého plynového zářiče KM-U 10 pořízený termovizní kamerou FLIR ThermoCAM S65, Ar1: $t_{\max} = 476,1$ °C, Ar2: $t_{\max} = 175,8$ °C



Obr. 8 Termogram 2. měřicího bodu kouřovodů tmavého plynového zářiče KM-U 10 pořízený termovizní kamerou FLIR ThermoCAM S65, Ar1: $t_{\max} = 346,7$ °C, Ar2: $t_{\max} = 215,8$ °C

několikadennímu testování na zkušební stoli. Změna emisních vlastností sledovaného povrchu před a po zatěžovacích zkouškách je dobře patrná z obr. 9. Snímky byly pořízeny těsně po vyjmutí skříňě turbodmychadla z elektrické pece přehřáté na cca 180 °C. Jak se ukázalo, speciální nástřík vysokoteplotní barvou byl vhodným řešením, neboť si po celou dobu testů zachoval konstantní hodnotu emisivity povrchu. Termogram při zátěžovém testu po nástřiku celého povrchu turbodmychadla se zvýšeným kontrastem barev ukazuje obr. 10.

Při měření povrchových teplot vyšších než 100 °C v interiéru budov je z pohledu vlivu okrajových podmínek nejdůležitější emisivita měřeného povrchu. Čím vyšší je teplota měřeného povrchu, tím zanedbatelnější je vliv ostatních okrajových podmínek. Tento předpoklad můžeme ukázat u měření plynového světelného zářiče (měření bylo provedeno termovizní kamerou FLIR ThermaCAM S65). Změna při zadávání okrajových podmínek se realizovala v softwaru FLIR ThermaCAM Researcher Pro 2.9. Jak lze z obr. 11 odečíst, oba termogramy se vizuálně prakticky neliší. První termogram (obr. 11a) byl pořízen při zadání chybné teploty pozadí a druhý (obr. 11b) při chybném zadání emisivity měřeného povrchu. Jak

ukazuje tab. 2 odchylka v případě zadání pětkrát vyšší hodnoty odražené zdánlivé teploty je v podstatě nulová. Naopak odchylka v zadání emisivity (0 – 5 %) leží již mimo udávanou přesnost přístroje. Experiment potvrdil, že při měření takto vysokých teplot zůstává jedinou důležitou okrajovou podmínkou měření správná hodnota emisivity. Ostatní okrajové podmínky mají na celkovou nejistotu měření velmi nízký vliv.

Tab. 2 Změny sledovaných teplot podle zadání obr. 11 (hodnoty v závorkách uvádějí relativní odchylku od skutečné naměřené hodnoty)

Sledované parametry	Emisivita 0,7 Teplota odražená 20 °C	Emisivita 0,7 Teplota odražená 100 °C (obr. 11a)	Emisivita 0,66 (obr. 11b)
Maximální teplota termogramu [°C]	819	818 (- 0,1 %)	852 (+ 4,0 %)
Teplota v bodě SP01 [°C]	763	763 (0 %)	793 (+ 3,9 %)

ZÁVĚR

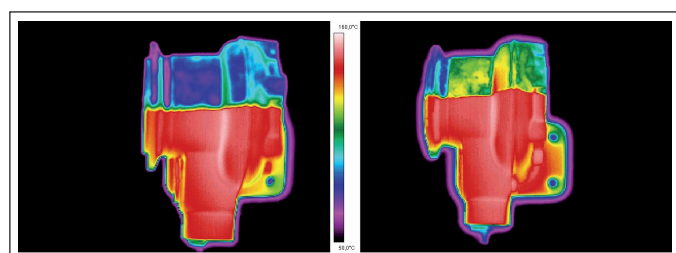
Měření vysokých teplot je v podstatě samostatná disciplína. Použití dotykových přístrojů je pro celou řadu aplikací prakticky nemožné. Bezdotykový způsob měření oproti tomu poskytuje celou řadu možností. Z pohledu okrajových podmínek pro bezdotykové měření platí, že čím vyšší povrchovou teplotu měříme, tím více záleží pouze na nastavení emisivity měřeného povrchu a další okrajové podmínky již nemají na výsledek měření významný vliv. Emisivita je ale spektrálně závislá a také povrch měřeného povrchu může během působení vysokých teplotních gradientů výrazně měnit své vyzařovací vlastnosti. Na druhou stranu je nutné zdůraznit, že každé měření může být natolik specifické, že vliv různých okrajových podmínek se může lišit. Z pohledu přesnosti měření je důležité si také uvědomit, že většina bezdotykových přístrojů pracuje s přesností ± 2 %, což při měření povrchové teploty řádově ve stovkách °C může znamenat rozdíl několika desítek stupňů.

Kontakt na autora: Roman.Vavricka@fs.cvut.cz

Poděkování: Autor by rád poděkoval Ing. Ondřeji Hojerovi, Ph.D. za spolupráci při měření a firmě TMVSS spol. s.r.o. za zapůjčení termovizní kamery AGEMA Thermovision 400.

Použité zdroje:

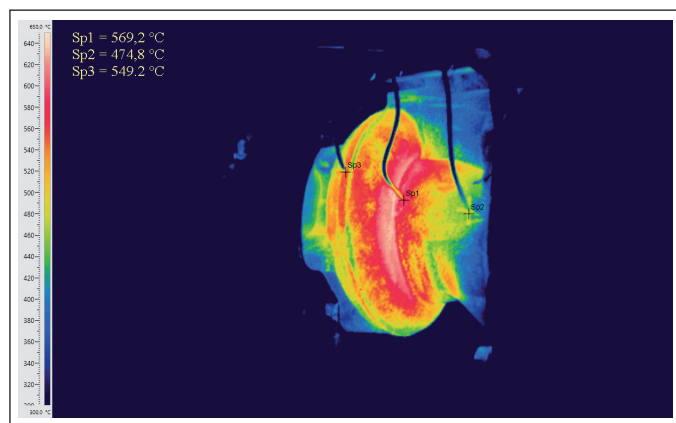
- [1] VAVŘIČKA, R. Kontrola tepelnětechnického stavu budov. *Vytápění, větrání, instalace*. 2013, roč. 22, č. 1, s. 23-27. ISSN 1210-1389.
- [2] DRASTICH, A. *Netelevizní zobrazovací systémy*. Brno: VUT v Brně, FEL, ÚBMI, 2001. ISBN 80-214-1974-1.
- [3] KREIDL, M. *Měření teploty, senzory a měřící obvody*. Praha: Technická literatura BEN, 2005. ISBN 80-7300-145-4. ■



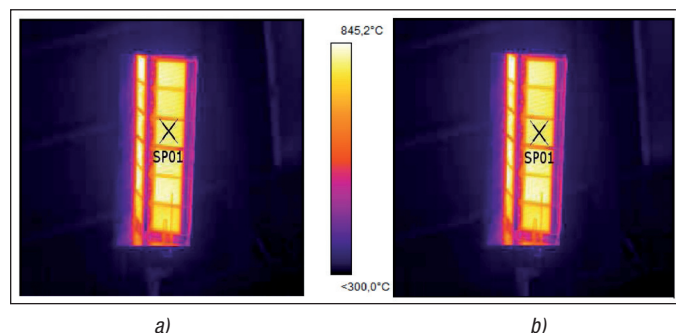
Stav těsně po nástřiku

Po 3 dnech provozu

Obr. 9 Termogramy povrchu odlitku skříňě turbodmychadla po provedení nástřiku barvou s garancí konstantní emisivity nástřiku do 800 °C



Obr. 10 Termogram během zátěžového testu turbodmychadla na měřicí stoli (měřeno ve spolupráci s ČZ a.s. divize Turbo)



a)

b)

Obr. 11 Termogram desky světelného plynového zářiče:

- a) zadání při změně odražené zdánlivé teploty na 100 °C
b) zadání při změně emisivity o -5 %

BIQ – světově první dům s bioreaktivní fasádou

V rámci projektu Smart Material Houses, kde se vyvíjí materiálové systémy, které reagují na změněné podmínky životního prostředí byl vyvinut systém domů BIQ. Na koncepci, na níž se vedle Hanno Werk GmbH z Laatzen, podílely firmy Splitterwerk a Label der Bildenden Kunst ze Štýrského Hradce (Graz), Arup GmbH z Berlína, Ingenieure B+G z Frankfurtu nad Mohanem a Immosolar GmbH z Hamburku, rostou na předvěšené fasádě mikrořasy. Odděleným vodním okruhem jsou zásobovány živinami, když sluneční energie se jim dostává ze solárního panelu. Úroda řas se pravidelně sklízí a užívá k výrobě bioplynu. Z části nevyužité sluneční energie se vyrábí teplo. Část tepla se užívá k přípravě teplé vody, část k vytápění a část se skladuje jako teplá solanka v 80 m hlubokém vrtu.

Pramen: Tisková informace Hanno Werk GmbH, Laatzen

(AB)