

Ing. Roman VAVŘIČKA, Ph.D. ^{1),2)}
Bc. Dan PUHL ¹⁾

¹⁾ ČVUT v Praze, Fakulta strojní,
Ústav techniky prostředí
²⁾ ČVUT v Praze, Univerzitní
centrum energeticky efektivních
budov

Recenzent
Ing. Vladimír Jirka, CSc.

Nejistota měření a kritický úhel snímání při bezkontaktním měření povrchové teploty

Measurement Uncertainty and Critical Sensing Angle of Contactless Surface Temperature Measurement

Článek se zabývá nejistotami měření teplot při použití bezkontaktních přístrojů. V teoretické části je uveden rozbor výpočtu nejistoty měření včetně příkladu stanovení nejistoty měření povrchové teploty otopného tělesa pro bezdotykový teploměr a termovizní kameru. V experimentální části je popsáno, jaký vliv na výsledky měření má u bezkontaktního měření teplot úhel mezi normálou měřeného povrchu a měřicím přístrojem.

Klíčová slova: termovize, bezdotykový teploměr, kritický úhel snímání, nejistota měření

The article deals with uncertainties of temperature measurement using contactless devices. The theoretical part analyses calculation of measurement uncertainty, including example of uncertainty calculation for measurement of radiator surface temperature by contactless thermometer and thermal imaging camera. The experimental part describes the impact of the angle between normal of the measured surface and measuring device.

Keywords: thermography, contactless thermometer, critical sensing angle, measurement uncertainty

ÚVOD

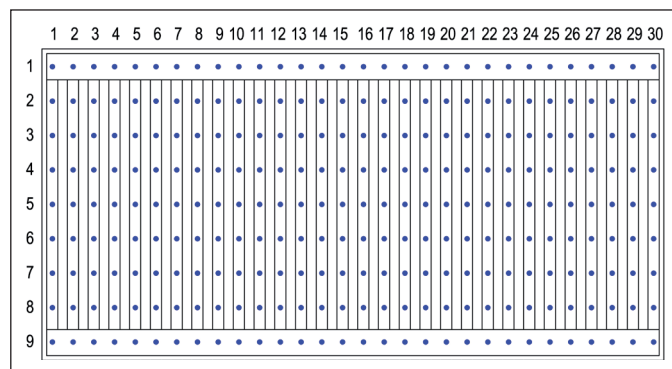
U bezkontaktního způsobu měření teploty hraje významnou úlohu přesnost naměřených hodnot. V tomto ohledu je nutné definovat celou řadu okrajových podmínek měření, tzn. zahrnutí celé řady nejistot měření. Nejvýznamnější je nejistota měření způsobená neznalostí správné hodnoty emisivity snímaného povrchu, nejistota měření způsobená neznalostí správné hodnoty propustnosti prostředí mezi čidlem a měřeným objektem, nepřesná korekce odraženého záření z okolního prostředí na měřený objekt a nejistota měření způsobená špatným zaměřením objektu (velikosti měřicí plochy nebo velikosti pixelu termogramu).

Cílem příspěvku je v první části ukázat, jakým způsobem lze vyhodnotit nejistotu měření při použití bezkontaktního teploměru nebo termovizní kamery. Ve druhé části článku je provedeno vyhodnocení experimentu pro stanovení tzv. kritického úhlu snímání bezkontaktního měření povrchové teploty v závislosti na teplotě snímaného povrchu a typu přístroje (bezdotykový teploměr, termovizní kamera).

TEORETICKÝ VÝPOČET NEJISTOTY MĚŘENÍ U BEZKONTAKTNÍHO ZPŮSOBU MĚŘENÍ

Chyba měření vzniká složením chyb jednotlivých vlivů uplatňujících se při měření. Chyby opakovaných měření vytvářejí soubor náhodných chyb a vykazují určité statistické zákonitosti. Oproti tomu systematické chyby souvisejí obvykle s použitou metodou měření či měřicími přístroji nebo se samotným pozorovatelem, tj. jsou způsobeny kontrolovatelnými vlivy. Hlavní zdroje systematických chyb je třeba hledat v omezené přesnosti přístrojů, použité metodě měření a osobní chybě operátora [3].

Zobecněním výše uvedených skutečností je pro praxi zaveden pojem nejistota měření. Zatímco chyba charakterizuje rozdíl naměřené hodnoty od skutečné (pravé) hodnoty, nejistota měření charakterizuje rozsah (interval) hodnot měřené veličiny kolem výsledku měření, který podle očekávání obsahuje skutečnou hodnotu měřené veličiny. Nejistota se stanoví nejen pro výsledek měření, ale také pro měřidla,



Obr. 1 Rastr měřicích bodů u deskového otopného tělesa 10 – 500 × 1000

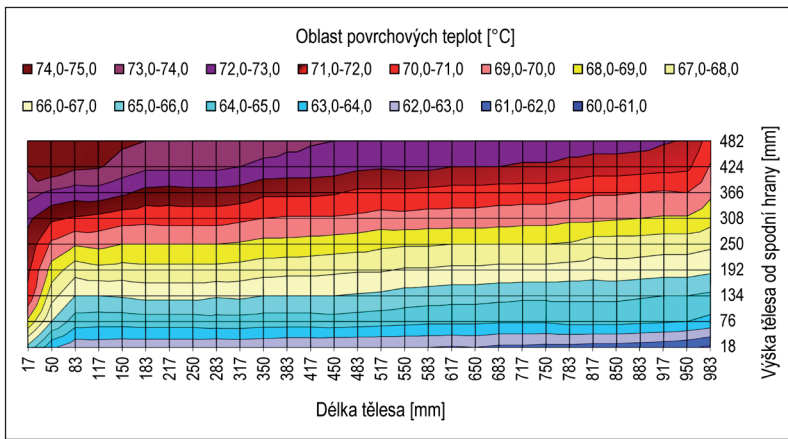
Fig. 1 Grid of measuring points for panel radiator 10 – 500 × 1000

použité konstanty, pro korekce apod. Základem určování nejistot je statistický přístup, a to jak pro chyby náhodné, tak i pro chyby systematické. Pro tyto účely byl zaveden pojem nejistota měření typu A a typu B. Nejistota měření typu A vzniká (je uplatňována) v případě opakovaného měření a základem je směrodatná odchylka aritmetického průměru naměřených hodnot. Nejistota typu B je přímo závislá na nedokonalostech měřicích přístrojů.

Na jednoduchém případě měření střední povrchové teploty deskového otopného tělesa lze ukázat, s jakou nejistotou měření byl experiment proveden.

Povrchová teplota deskového otopného tělesa – bezdotykový teploměr

Bylo měřeno deskové otopné těleso typu 10 – 500 × 1000, na jehož povrchu byl vytvořen rastr měřicích bodů (obr. 1). Na každý kanálek otopného tělesa bylo po výšce vyneseno 9 měřicích bodů, celkem tedy 270 měřicích bodů. Otopné těleso bylo napojeno na mobilní zdroj tepla, který po celou dobu měření udržoval konstantní hmotnostní průtok vody a konstantní přívodní teplotu vody do otopného tělesa. Pro měření byl použit bezdotykový teploměr Testo Quicktemp 860-T2. Vyhodnocení měření bylo provedeno v MS Excel (obr. 2).



Obr. 2 Vyhodnocení rozložení povrchových teplot u deskového otopného tělesa typu 10 – 500 × 1000, napojeného jednostranně shora-dolů

Fig. 2 Evaluation of the temperature distribution on the surface of panel radiator type 10 – 500 × 1000, single sided top-bottom connection

Nejistota měření způsobená neznalostí hodnoty propustnosti prostředí mezi čidlem a měřeným objektem a nejistota měření špatným zaměřením povrchu

Transparentnost prostředí je významná hodnota zejména při dálkovém snímání zobrazovaného objektu (např. snímání povrchové teploty fasády před a po zateplení objektu apod.). Zeslabení zářivého toku při průchodu atmosférou může být způsobeno jednak přímou absorpcí a jednak rozptylem infračerveného záření na molekulách plynu, aerosolech, kapkách vody, částicích kouře atd. Na snižování transparentnosti atmosféry se podílí zejména molekuly H_2O , CO_2 , O_3 , CH_4 a CO , které vykazují pohltivost v infračerveném spektru. Experiment probíhal v laboratořích Ústavu techniky prostředí Fakulty strojní ČVUT Praha. Během měření byla vypnuta jak vzduchotechnika (zdroj nuceného proudění vzduchu a také prachových částic), tak i světelná technika. Měření bylo prováděno na stativu ve vzdálenosti 360 mm kolmo od povrchu otopného tělesa. S tím souvisí nejistota měření způsobená špatným zaměřením objektu (skutečná velikost měřicí plochy), která je dána tzv. optickým rozlišením přístroje. Optické rozlišení bezdotykového teploměru je závislé na poměru D (průměr měřené plochy) : S (vzdálenost měřicího přístroje). Pro bezdotykový teploměr QuickTemp 860-T2 je optické rozlišení $D : S = 60 : 1$. Ze vzdálenosti mezi teploměrem a měřenou plochou a poměru $D : S$ vyplývá, že průměr měřené plochy na povrchu deskového otopného tělesa byl 6 mm (kanálek deskového otopného tělesa měl šířku 8,1 mm).

Z výše popsaných důvodů lze pro tento experiment zanedbat jak nejistotu měření způsobenou zhoršenou propustností prostředí mezi povrchem otopného tělesa, tak i nejistotu měření špatným zaměřením povrchu.

Další nejistota měření: nepřesná korekce odraženého záření z okolního prostředí na měřený objekt

Teplota vnějšího prostředí ovlivňuje velikost detekovaného signálu a zároveň i jeho kolísání. Vnější zdroje infračerveného záření ovlivňují v závislosti na povrchových vlastnostech objektu buď jeho skutečnou povrchovou teplotu (součinitel absorpce), nebo jeho zdánlivou povrchovou teplotu (součinitel reflexe). Zářivý tok dopadá na detektor, kde se jeho část pohltí a část se odrazí. Současně ale vychází opačným směrem zářivý tok z detektoru, který dopadá na měřený objekt a opět se částečně pohltí a částečně odrazí. Matematicky lze popsat vztah mezi emisivitou měřeného objektu, detektorem bezdotykového teploměru a výslednou teplotou detektoru T_c (na kterou je cejchována optika přístroje), jako [1]

$$T_c = \sqrt[4]{(\Psi \cdot T_1^4 + \Psi \cdot T_2^4)} \quad (1)$$

kde je:

T_1 teplota měřeného objektu [°C],
 T_2 teplota měřicího přístroje [°C],
 Ψ geometrická konstanta [-].

Geometrická konstanta Ψ je definována ve tvaru [1]

$$\Psi = \frac{\varepsilon_1(1 - \varepsilon_2)}{1 - (\varepsilon_1)(1 - \varepsilon_2)} \quad (2)$$

kde je:

ε_1 emisivita měřeného povrchu [-],
 ε_2 emisivita měřicího přístroje [-].

Vztah (1) a (2) platí pro dva zcela rovnoběžné povrchy (bezdotykový teploměr byl umístěn kolmo k měřenému povrchu), ve skutečnosti pro obecně položené objekty je výpočet poměrně obtížný. Emisivita povrchu měřeného tělesa byla $\varepsilon_1 = 0,95$. Detektor bezdotykového teploměru QuickTemp 862-T2 má emisivitu $\varepsilon_2 = 0,92$. Tomu odpovídá geometrická konstanta $\Psi = 0,048$, což se na výsledné teplotě T_c (pro podmínky měření otopných těles $t_i = 20$ °C a $t_{st} = 70$ °C) detektoru projeví nárůstem snímané teploty o $2 \cdot 10^{-6}$ K. Vzhledem k pásmu teplot, ve kterém se pohybuje měření, je proto i tato nejistota zanedbatelná.

Nejistota typu A – $u_{A,x}$ je obvykle vyhodnocována přes aritmetický průměr naměřených hodnot a s ohledem na dosažení vyšší přesnosti pro vyčíslení náhodné chyby se používá výběrová směrodatná odchylka aritmetického průměru hodnot ve tvaru [3]

$$u_{A,x} = s_x = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3)$$

kde je:

\bar{x} aritmetický průměr naměřených hodnot [-],
 x_i jednotlivé hodnoty stanovené měřením [-],
 n počet měření [-].

Pro menší počet měření než 10 lze nejistotu typu A (3) přepsat do tvaru

$$u_{A,x} = k_x \cdot s(\bar{x}) \quad (4)$$

kde je:

k_x opravný koeficient [-],
 $s(\bar{x})$ směrodatná odchylka aritmetického průměru [-].

Počet měření byl $n = 3$, kde je opravný koeficient roven $k_x = 2,5$ (to odpovídá pravděpodobnosti 95 % pro normální rozdělení [3]). Standardní nejistota typu A měření střední povrchové teploty otopného tělesa byla pak vypočítána $u_A = 0,16$ K.

Nejistota měření stanovení emisivity povrchu a nejistota měření měřicího přístroje

Pro podmínky experimentu a následného stanovení celkové nejistoty je uvažováno s nejistotou měření stanovení emisivity povrchu a nejistotou měření měřicího přístroje. Obě tyto nejistoty měření jsou nejistoty typu B. Nejprve se stanoví nejistoty typu B od jednotlivých zdrojů z_j , ze vztahu [3]

$$u_{B,x} = \sqrt{\frac{z_x^2}{3}} \quad (5)$$

kde z_x je přesnost měřicích přístrojů [-].

Výslednou nejistotu typu B poté můžeme vypočítat dle [3]

$$u_{B,x} = \sqrt{\sum_{i=1}^n A_{x,z_i}^2 u_{z_i}^2} \quad (6)$$

kde A_{x,z_i} je citlivostní koeficient

$$A_{x,z_i} = \frac{\partial X}{\partial z_i} \quad [-] \quad (7)$$

Citlivostními koeficienty A_x lze převést jednotlivé složky nejistoty typu B na jednotky měřené veličiny. Pokud mezi jednotlivými složkami nejistoty není žádná vazba (resp. korelace), lze tyto koeficienty položit rovny 1 [3]. Emisivita povrchu otopného tělesa byla nastavovaná podle hodnoty NTC termistorů, které byly umístěny na povrchu otopného tělesa nezávisle na měření bezdotykovým teploměrem. Mezi NTC termistory a bezdotykovým teploměrem tak nebyla žádná vazba, a proto lze citlivostní koeficienty uvažovat $A_x = 1$ [3].

Pyrometr firmy Testo QuickTemp 860-T2 má dle údajů výrobce rozlišovací schopnost $\pm 0,1$ K v měřicím rozsahu od -30 °C do 900 °C. Přesnost přístroje je výrobcem udávána v měřicím rozsahu od -5 °C do $+75$ °C jako $z_x = \pm 0,75$ K + 1 digit. Nejistota typu B pro bezdotykový teploměr je tak

$$u_{B1} = \sqrt{\frac{z_x^2}{3}} = \sqrt{\frac{(0,75 + 1 \cdot 0,1)^2}{3}} = 0,49 \text{ K}$$

Pro NTC termistory výrobce udává přesnost $z_x = \pm 0,2$ °C. Nejistota typu B je tak pro použité termistory

$$u_{B2} = \sqrt{\frac{z_x^2}{3}} = \sqrt{\frac{0,2^2}{3}} = 0,11 \text{ K}$$

Výsledná standardní nejistota typu B pro použitý bezdotykový teploměr je dle (6):

$$u_{B,x} = \sqrt{\sum_{i=1}^n A_{x,z_i}^2 u_{z_i}^2} = \sqrt{(1^2 \cdot 0,49^2) + (1^2 \cdot 0,11^2)} = 0,50 \text{ K}$$

Kombinovanou standardní nejistotu lze pak vyjádřit jako [3]

$$u_x = \sqrt{u_{A,x}^2 + u_{B,x}^2} \quad (8)$$

Pro případ experimentálního měření střední povrchové teploty deskového otopného tělesa je tak kombinovaná nejistota měření rovna

$$u_x = \sqrt{u_{A,x}^2 + u_{B,x}^2} = \sqrt{0,16^2 + 0,5^2} = 0,52 \text{ K}$$

Zápis naměřené hodnoty střední povrchové teploty otopného tělesa (vyhodnoceno ze sady 3 měření pro 270 měřicích bodů) je pak ve tvaru $t_s = 74,71 \pm 0,52$ °C. Což odpovídá celkové relativní odchylce od naměřené hodnoty cca $\pm 0,69$ %.

Povrchová teplota deskového otopného tělesa – termovizní kamera

Pro stejné podmínky experimentu byla zároveň použita i termovizní kamera ThermaCAM S65. Použitá termovizní kamera pracuje s teplotní citlivostí $\pm 0,08$ K a v rozsahu od -40 do $+1500$ °C výrobce udává přesnost měření $z_x = \pm 2$ K nebo ± 2 % z měřené hodnoty. Vzhledem k předpokládané střední povrchové teplotě na otopném tělese $t_{st} = 70$ °C a při přesnosti kamery ± 2 % z měřené hodnoty, je předpokládaná hodnota přesnosti měření $z_x = \pm 1,4$ K. Z toho vyplývá standardní nejistota typu B

$$u_{B1} = \sqrt{\frac{z_x^2}{3}} = \sqrt{\frac{1,4^2}{3}} = 0,81 \text{ K}$$

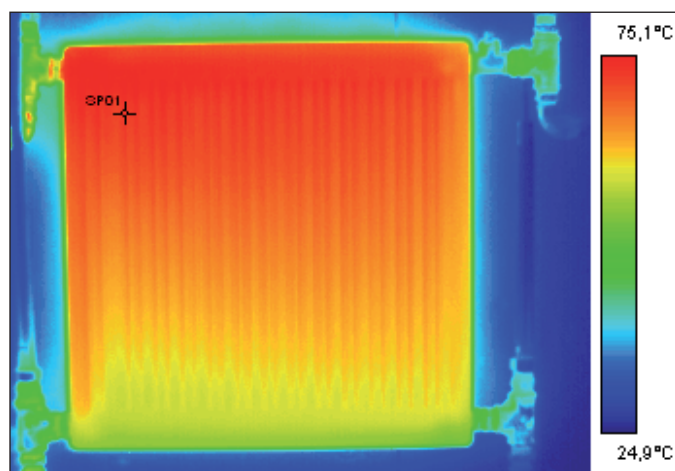
Stejně jako u bezdotykového teploměru byla emisivita povrchu kalibrována přes systém NTC termistorů, tj. nejistota typu B použitých termistorů je $u_{B2} = 0,11$ K. Výslednou hodnotu standardní nejistoty typu B pro termovizní kameru pak stanovíme jako

$$u_{B,x} = \sqrt{\sum_{i=1}^n A_{x,z_i}^2 u_{z_i}^2} = \sqrt{(1^2 \cdot 0,81^2) + (1^2 \cdot 0,11^2)} = 0,82 \text{ K}$$

Termovizní kamerou byl pořízen pouze jeden termogram (obr. 3), ze kterého bylo měření vyhodnocováno, tj. nejednalo se o opakovatelné měření. Hodnota standardní nejistoty typu A je proto uvažována $u_A = 0$. Pro bod SP01 dle obr. 3 termovizní kamera indikovala teplotu $t_{SP01} = 74,1$ °C. Zápis měřené hodnoty povrchové teploty by tak měl být ve tvaru $t_{SP01} = 74,1 \pm 0,82$ °C. Což odpovídá celkové relativní odchylce od naměřené hodnoty $\pm 1,11$ %.

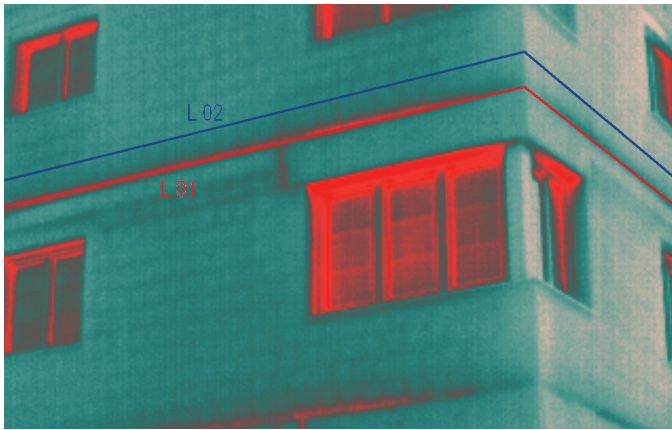
VLIV ÚHLU SNÍMÁNÍ BEZDOTYKOVÉHO PŘÍSTROJE NA VÝSLEDKY MĚŘENÍ

Na obr. 4 je znázorněn typický termogram obálky nezateplené budovy. Vyhodnocení termogramu formou přímkou L01 (výrazná tepelná vazba mezi jednotlivými podlažími bytového domu) a L02 (průběh teploty zdíva venkovní fasády) ukazuje výrazné teplotní rozdíly mezi jižní a západní fasádou (obr. 5).



Obr. 3 Rozložení povrchových teplot u deskového otopného tělesa $10 - 500 \times 500$ se znázorněným vyhodnocovacím bodem (napojení jednostranné shora-dolů, jmenovitě teplotní podmínky)

Fig. 3 Distribution of surface temperatures on the panel radiator $10 - 500 \times 500$ with marked point of evaluation (single sided top-bottom connection, nominal temperature conditions)

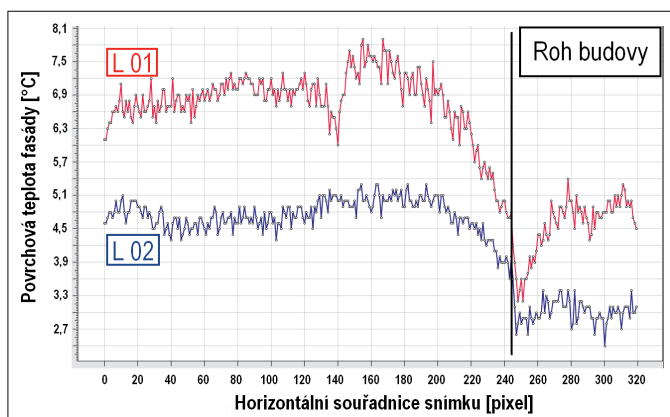


Obr. 4 Termogram obálky bytového domu s vyznačenými přímkami L01 a L02 pro vyhodnocení tepelných mostů mezi jednotlivými patry

Fig. 4 Thermogram of apartment building's envelope with marked lines L01 and L02 for the evaluation of thermal bridges between individual storeys

Obr. 5 ukazuje graficky, jaká je změna povrchové teploty na jižní a západní fasádě domu s ohledem na roh budovy. Je zřejmé, že v případě stejného materiálu obvodových stěn a při stejné teplotě venkovního vzduchu a vnitřního vytápěného prostoru dané místnosti by měl být průběh teploty obou vynesných přímek L01 a L02 na obou navzájem kolmých stěnách přibližně vyrovnány. Obr. 5 ale ukazuje, že na severozápadní fasádě, která je snímána kamerou pod úhlem cca 130°, dochází k výraznému poklesu snímáných teplot. Severní fasáda (oblast horizontálních souřadnic na obr. 5 od 0 do 200 pixelů) snímána pod úhlem 30° vykazuje průměrnou povrchovou teplotu 6,5 °C – L01 (resp. 4,8 °C – L02). Na rohu budovy dochází vlivem tepelných mostů k výraznému poklesu snímáných teplot, což je pro tento příklad očekávané. Nicméně dále na zobrazené severozápadní fasádě (na obr. 5 oblast od 280 do 320 pixelů) je jasně patrný pokles povrchové teploty fasády o cca 1,7 K, a to u obou přímek L01 i L02. Za předpokladu, že obvodová konstrukce zdva má stejný tepelný odpor a z pohledu vnitřního prostoru se jedná jak na severozápadní, tak na severní fasádě o sdílení tepla ze stejné místnosti, je zřejmé, že by se povrchová teplota severozápadní a severní fasády neměla lišit.

Tento jev je dán závislostí intenzity vyzařování v daném úhlu zářiče (v případě obr. 4 fasády domu), resp. Lambertovým zákonem, který říká, že září-li plošný zářič dS do poloprostoru ve směru, který svírá s normálou k ploše zářiče úhel φ , je zářivý tok plošného zářiče dS úměrný kosinu úhlu φ . Matematicky lze tento zákon vyjádřit ve tvaru:



Obr. 5 Závislost povrchové teploty fasády (v přímkách L01 a L02 dle obr. 4) na souřadnici snímku

Fig. 5 Facade surface temperature dependence (in straight lines L01 and L02, according to Fig. 4) on the image coordinate

$$dl_{\varphi, \varepsilon} = dl_{\varepsilon} \cdot \cos \varphi = l_{\varepsilon} \cdot \cos \varphi \cdot dS \quad (9)$$

kde je:

$dl_{\varphi, \varepsilon}$ intenzita vyzařování v daném úhlu zářiče [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$],

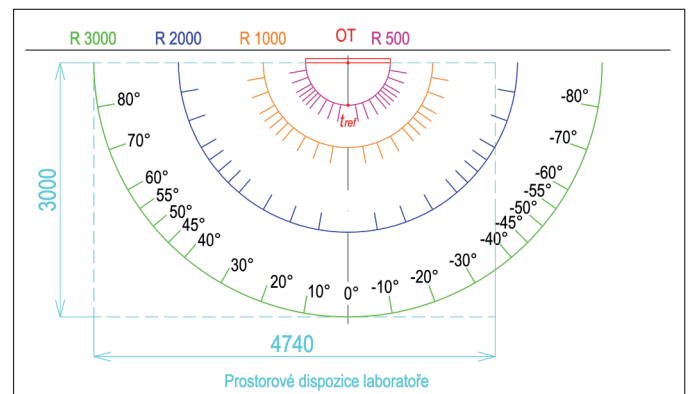
dl_{ε} intenzita vyzařování ve směru normály

k ploše zářiče dS [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$],

φ úhel zářiče, který svírá s normálou k ploše zářiče [°].

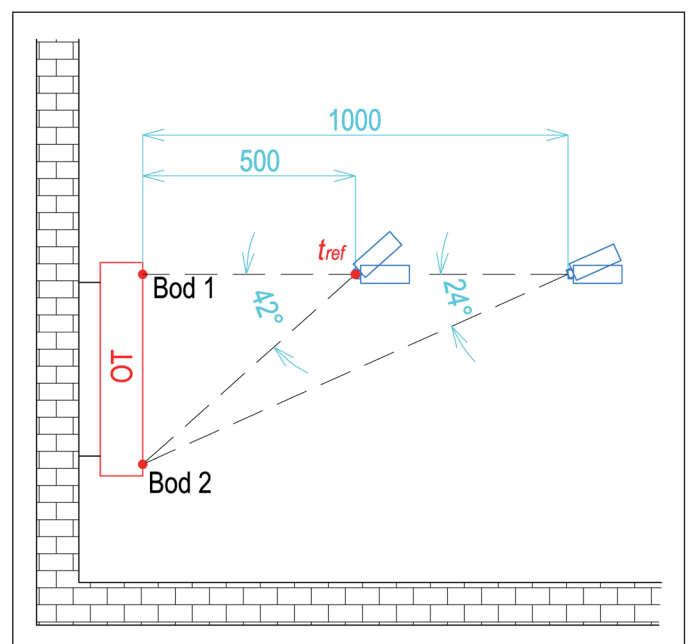
Otázkou je, kdy je již úhel zářiče φ natolik velký, že rozdíl mezi skutečnou povrchovou teplotou a povrchovou teplotou indikovanou bezdotykovým zařízením v daném úhlu zářiče bude vyšší než výrobcem udávaná relativní nejistota měřené hodnoty. Výsledky předchozích experimentů stanovení tzv. kritického úhlu snímání bezdotykovými přístroji φ_k [°] lze nalézt např. v [2, 4, 5]. Tyto experimenty byly prováděny většinou pro vysokou povrchovou teplotu zářiče (100 nebo 200 °C) a závěry ukazují na hodnotu kritického úhlu snímání v rozsahu od 53° do 60° v závislosti na typu použitého přístroje.

V laboratořích Ústavu techniky prostředí byl proveden experiment, který popisoval vliv úhlu pohledu na povrch deskového otopného tělesa při povrchových teplotách 40, 60 a 80 °C [5]. Základem bylo deskové



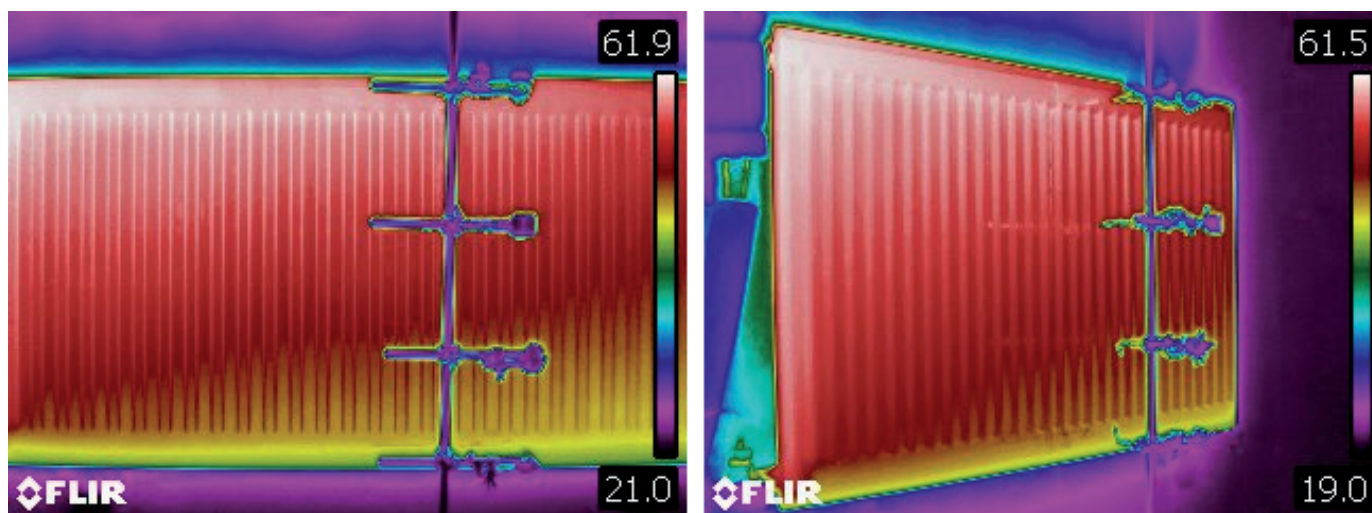
Obr. 6 Schéma měřících bodů experimentu – půdorys laboratoře

Fig. 6 Scheme of measuring points of the experiment – ground-plan of the laboratory



Obr. 7 Schéma měřících bodů experimentu – bokorys laboratoře

Fig. 7 Scheme of measuring points of the experiment – side-view of the laboratory



Obr. 8 Termogram měřeného deskového otopného tělesa pořízení termovizní kamerou Flir T460 ve vzdálenosti R 2000 – pro teplotu povrchu tělesa 60 °C: a) v normále k ploše tělesa; b) s úhlem snímání 55° k normále plochy tělesa

Fig. 8 Thermogram of the panel radiator measured by infrared camera Flir T460 in the distance R 2000 – for surface temperature 60 °C: a) in normal of the radiator's surface; b) with sensing angle 55° to the normal of the radiator's surface

otopné těleso v kombinaci s mobilním zdrojem tepla, který udržoval po dobu měření konstantní vstupní teplotu otopné vody a konstantní hmotnostní průtok. Díky tomu bylo možné po celou dobu měření udržovat konstantní povrchovou teplotu otopného tělesa (zářiče). Na podlaze laboratoře byl vytvořen rastr měřících bodů na kružnicích o poloměru R 500, R 1000, R 2000 a R 3000 mm (obr. 6). Na těchto kružnicích byly vyneseny měřící body v rozptýlu 10° od normály. V oblasti od 40° do 60° odklonu od normály plochy snímaného tělesa byl měřící krok zjemněn na 5°. Jednotlivé přístroje upevněné na stativ byly umísťovány do rastru měření (obr. 6) a postupně byl měřen Bod 1 (měřící bod a měřící přístroj byly ve stejné výšce) a Bod 2 (měřící bod byl o 450 mm níže, než byla pozice měřícího přístroje) dle schématu na obr. 7. Úhel vertikálního naklonění přístroje pro měřící Bod 2 byl 42° na kružnici R 500, 24° – R 1000, 13° – R 2000 a 8° – R 3000. S ohledem na omezení prostorových dispozic laboratoře byly měřící body na kružnici R 3000 omezeny pouze do hodnoty -30° a na kružnici R 2000 do hodnoty -60° (obr. 6). Ukázka termogramů je na obr. 8. Použité přístroje byly bezdotykový teploměr Testo QuickTemp 860-T2, Minolta Land Cyclops Mini View a termovizní kamery Flir i7 EDU, S65 a T460.

VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU

Vyhodnocení bylo vztahováno k referenční teplotě t_{ref} (obr. 6 a 7) vztahem

$$X_i = \frac{t_{m,i}}{t_{ref,i}} \cdot 100 \quad (10)$$

kde je:

- X_i relativní nejistota v i-tém měřícím bodě [%],
- $t_{m,i}$ teplota naměřená v i-tém měřícím bodě [°C],
- $t_{ref,i}$ referenční teplota [°C].

Referenční teplota $t_{ref,i}$ je hodnota na dané kružnici v normále k měřenému povrchu. Hodnoty měřené bezdotykovými teploměry byly odečítány přímo z displeje přístrojů. Termogramy pořízené termovizními kamerami byly vyhodnocovány v programu ThermCAM Researcher Pro 2.10. Dle údajů výrobce použitých přístrojů je přesnost přístrojů převedena na relativní nejistotu měřené hodnoty dle následujícího:

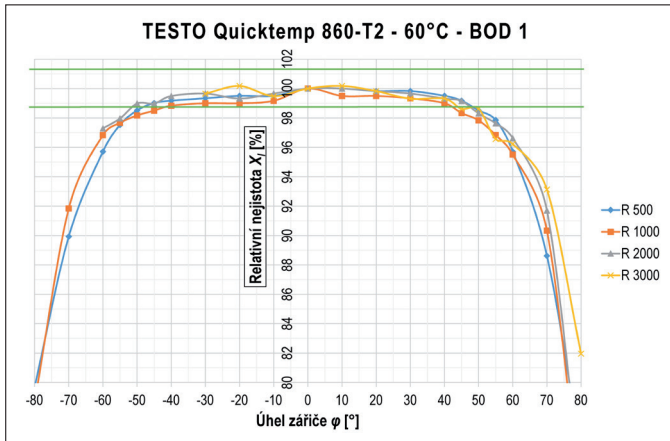
Testo QuickTemp 860-T2	(±0,75 K ± 1 digit) => ±1,4 %
Minolta Land Cyclops Mini View	(±2 K ±1 digit) => ±3,5 %
Flir i7 EDU	(±2 K ±1 digit) => ±2 %
Flir S65	(±2 K nebo ±2 %) => ±2 %
Flir T460	(±2 K nebo ±2 %) => ±2 %

Na grafech na obr. 9 až 14 jsou graficky znázorněny pouze výsledky měření přístrojů Testo, Minolta a Flir T460, pro referenční teplotu 60 °C. Kompletní grafické vyhodnocení lze nalézt v [5]. Jak měření prokázalo z pohledu praxe, jsou více problematické bezdotykové teploměry. Výsledek ovlivňuje hlavně optické rozlišení ($D : S$) bezdotykového teploměru (QuickTemp 862-T2 – $D : S = 60 : 1$, Minolta Land Cyclops – $D : S = 40 : 1$). S rostoucí vzdáleností roste snímaná plocha bezdotykového teploměru a tím se zároveň snižuje indikovaná povrchová teplota. Bezdotykový teploměr s měřící plochou snímá zároveň i část zdi za otopným tělesem (zářičem) a indikuje tak nižší povrchovou teplotu v důsledku větší plochy snímané detektorem vůči skutečné měřené ploše. V důsledku toho pak klesá i hranice kritického úhlu zářiče. V případě měření Bodu 2, který není ve stejné výšce jako měřící přístroj, je tato závislost ještě výraznější (obr. 10 a obr. 12). Kritické hodnoty úhlu snímání pro Bod 1 shrnuje tab. 1, pro Bod 2 pak tab. 2.

Tab. 1 platí pro měřící Bod 1, který je ve stejné výšce jako měřící přístroj – tj. vertikální úhel snímání je 0°. U měřených termovizních kamer se kritický úhel zářiče pohyboval od 48° do 62°. U použitých bezdotykových teploměrů to bylo v rozmezí od 43° do 72°. Maximálních hodnot kritického úhlu (až 72° od normály povrchu) vykazoval bezdotykový teploměr Minolta Land Cyclops Mini View. Tento přístroj ale zároveň vykazoval největší pásmo relativní přesnosti přístroje, a to ±3,5 % od měřené hodnoty. To zapříčinilo, že vyšší odchylka snímané teploty povrchu v daném úhlu byla ještě v toleranci relativní přesnosti přístroje. Patrné je to při porovnání mezi obr. 12 (přístroj Minolta – rozsah pásmo relativní přesnosti ±3,5 %) a obr. 10 (přístroj Testo – ±1,4 %). Nižší pásmo relativní přesnosti přístroje je také příčinou toho, že dosažené výsledky kritického úhlu přístroje Testo QuickTemp 862-T2 jsou výrazně nižší než u bezdotykového přístroje Minolta Land Cyclops. V případě měření Bodu 2 – tj. zahrnutí i vertikálního úhlu, jsou výsledky měření výrazně horší u obou bezdotykových teploměrů (tab. 2).

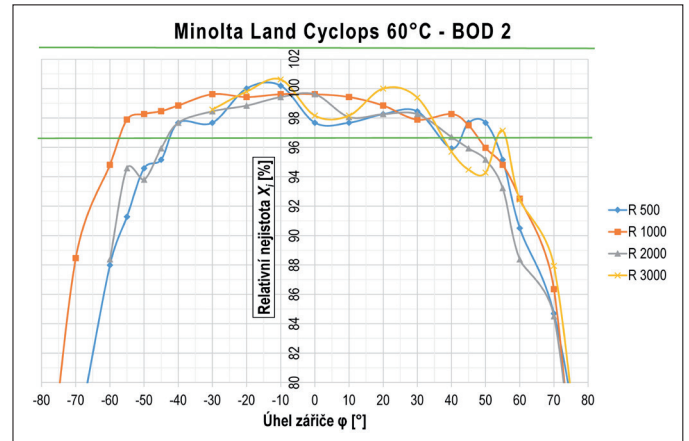
U termovizních kamer s nižším pixelovým rozlišením termogramu (Flir i7 a S65) se s rostoucí vzdáleností kritický úhel snímání výrazněji snižuje než u kamery Flir T460. Z pohledu závislosti kritického úhlu na

teplotě povrchu je dle tab. 1 vidět, že např. u termovizní kamery T460 se kritický úhel snímání výrazně neliší (od 56° do 60°).



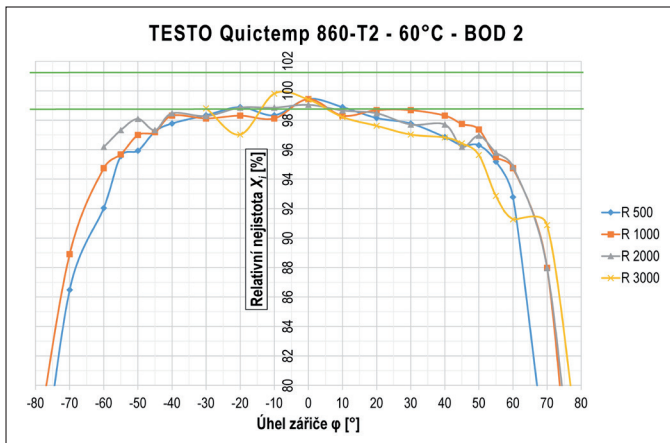
Obr. 9 Relativní nejistota měření pro Testo QuickTemp 860-T2 – Bod 1, referenční teplota 60 °C

Fig. 9 Relative measurement uncertainty for Testo QuickTemp 860-T2 – Point 1, reference temperature 60 °C



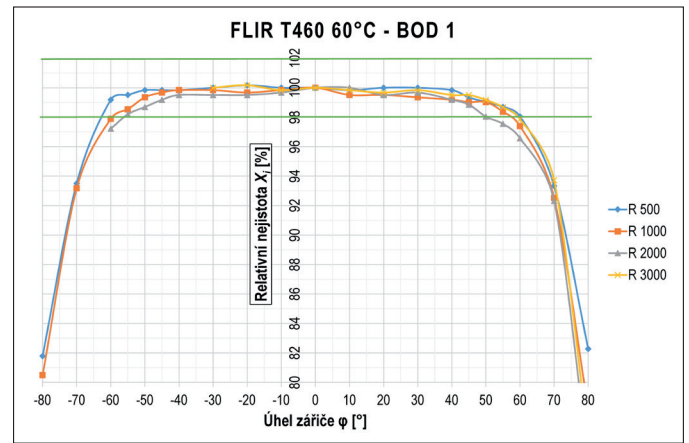
Obr. 12 Relativní nejistota měření pro Minolta Land Cyclops Mini View – Bod 2, referenční teplota 60 °C

Fig. 12 Relative measurement uncertainty for Minolta Land Cyclops Mini View – Point 2, reference temperature 60 °C



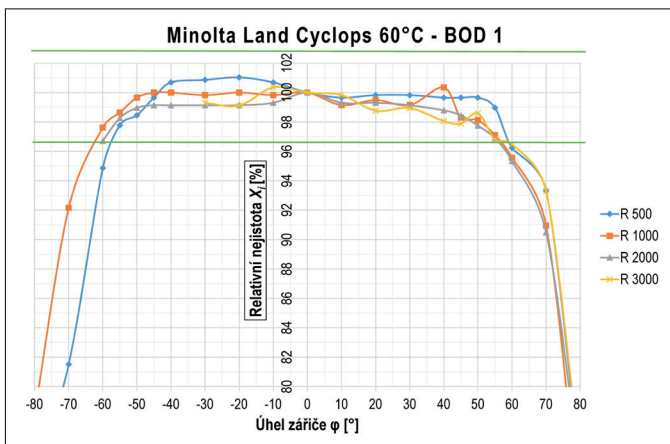
Obr. 10 Relativní nejistota měření pro Testo QuickTemp 860-T2 – Bod 2, referenční teplota 60 °C

Fig. 10 Relative measurement uncertainty for Testo QuickTemp 860-T2 – Point 2, reference temperature 60 °C



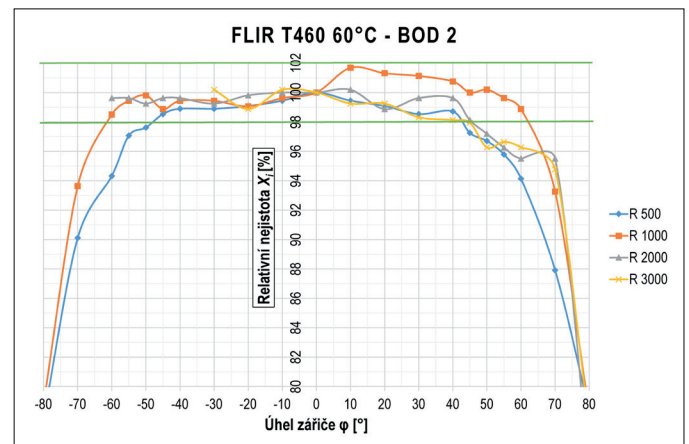
Obr. 13 Relativní nejistota měření pro Flir T460 – Bod 1, referenční teplota 60 °C

Fig. 13 Relative measurement uncertainty for Flir T460 – Point 1, reference temperature 60 °C



Obr. 11 Relativní nejistota měření pro Minolta Land Cyclops Mini View – Bod 1, referenční teplota 60 °C

Fig. 11 Relative measurement uncertainty for Minolta Land Cyclops Mini View – Point 1, reference temperature 60 °C



Obr. 14 Relativní nejistota měření pro Flir T460 – Bod 2, referenční teplota 60 °C

Fig. 14 Relative measurement uncertainty for Flir T460 – Point 2, reference temperature 60 °C

Tab. 1 Kritické hodnoty úhlu snímání φ_k pro Bod 1

 Tab. 1 Critical values of sensing angle φ_k for Point 1

Teplota povrchu [°C]	Poloměr měřené kružnice [m]	φ_k [°]				
		Testo QuickTemp 860-T2	Minolta Land Cyclops Mini View	Flir i7 EDU	Flir S65	Flir T460
40	R 500	51	66	57	60	58
	R 1000	52	66	52	55	56
	R 2000	50	72	48	52	58
	R 3000	48	70	62	60	58
60	R 500	50	58	58	60	60
	R 1000	43	56	55	55	58
	R 2000	48	56	58	54	50
	R 3000	45	58	58	60	58
80	R 500	48	60	58	50	58
	R 1000	46	58	50	58	60
	R 2000	46	55	55	53	60
	R 3000	44	54	58	55	60

 Tab. 2 Kritické hodnoty úhlu snímání φ_k pro Bod 2

 Tab. 2 Critical values of sensing angle φ_k for Point 2

Teplota povrchu [°C]	Poloměr měřené kružnice [m]	φ_k [°]				
		Testo QuickTemp 860-T2	Minolta Land Cyclops Mini View	Flir i7 EDU	Flir S65	Flir T460
40	R 500	50	45	50	54	55
	R 1000	43	48	40	55	50
	R 2000	48	68	46	53	40
	R 3000	45	64	45	60	40
60	R 500	25	44	40	54	45
	R 1000	30	48	38	40	62
	R 2000	15	44	40	50	45
	R 3000	5	38	35	60	42
80	R 500	25	38	40	47	50
	R 1000	20	35	45	45	50
	R 2000	22	48	42	40	45
	R 3000	23	10	40	49	48

ZÁVĚR

Bezkontaktní měření povrchové teploty se rychle prosazuje v různých odvětvích, a to nejen průmyslu. Měření je v zásadě rychlé a nijak neovlivňuje měřící místo. Ovšem z pohledu okrajových podmínek a s tím související přípravy takového měření je bezkontaktní měření teploty velmi složitá disciplína. V první řadě je nutné vědět, s jakou přesností se dané měření může uskutečnit. Nevýznamnější je tedy přesnost použitých přístrojů. Dále je nutné nastavení základních okrajových podmínek, jako jsou emisivita měřeného povrchu, korekce na propustnost a rela-

tivní vlhkost okolního prostředí, zdánlivě odražející teplota, vzdálenost měřícího přístroje od měřeného povrchu atd. [6, 7].

Dále je také nutné si uvědomit základní fyzikální podstatu měření a z ní vyplývající závislost na úhlu snímání měřeného povrchu. Na základě provedeného experimentu lze potvrdit, že hodnoty kritického úhlu snímání bezdotykového přístroje, když měřící bod a přístroj jsou ve stejné rovině, se pohybují okolo 50° pro bezdotykové teploměry a pro termovizní kamery s nižším pixelovým rozlišením. U termovizní kamery s vyšším pixelovým rozlišením (Flir T460) je kritický úhel snímání vyšší, a to cca okolo 58°. V případě vertikálního posunu mezi přístrojem a měřícím bodem pak kritický úhel snímání výrazně klesá a jeho hranice je závislá nejen na horizontálním úhlu pohledu přístroje, ale také na vzdálenosti od měřeného místa.

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

Poděkování: Tato práce vznikla za finanční podpory MŠMT v rámci programu NPU I č. LO1605.

Použití zdroje:

- [1] KREIDL, M. *Měření teploty*. Technická literatura BEN, 2005, 240 s. ISBN 80-7300-145-4.
- [2] LITWA, M. Influence of Angle of View on Temperature Measurements Using Thermovision Camera [online]. Sensors Journal, IEEE, 2010, 3s. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=05482017&tag=1>
- [3] NOVÁK, R., NOVÁKOVÁ, D. *Základy měření a zpracování dat*. Vydavatelství ČVUT, 1999, 112 s. ISBN 80-01-01825-3.
- [4] MUNIZ, P.R., CANI, S.P.N., MAGALHAES, R.D.S. Influence of Field of View of Thermal Imagers and Angle of View on Temperature Measurements by Infrared Thermovision [online]. Sensors Journal, IEEE, 2014, 5 s. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6645393>
- [5] PUHL, D. *Bezkontaktní měření teploty*. Praha, 2015. Bakalářská práce 7-TZSI-2015. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav techniky prostředí, 86 s.
- [6] VAVŘIČKA, R. Měření vysokých povrchových teplot bezkontaktním způsobem. *Vytápění, větrání, instalace*. 2014, s. roč. 23, č. 5, s. 210–213. ISSN 1210-1389.
- [7] VAVŘIČKA, R. *Bezkontaktní způsoby měření teploty*. Praha: STP, 2014, 65 s. ISBN 978-80-02-02515-3.

Teplonosné kapaliny pro oblasti s ochranou vod

V německých oblastech s ochranou vod lze podle Spolkového úřadu pro životní prostředí užívat teplonosné kapaliny v povrchové geotermii, jen pokud neohrožují vody. Tak např. nelze používat kapaliny na bázi vodných roztoků glykolu třídy ochrany vod WGK 1.

Pro tyto oblasti vyvinula společnost Aqua Concept Gesellschaft für Wasserbehandlung, Gräfeling, teplonosnou kapalinu Coracon GEKO WF, obsahující vodný roztok inhibitorů, bránících korozi a vzniku usazenin. Všechny přísady jsou podle autorů vynálezu biologicky odbouratelné a neškodné. Kapalina neohrožuje vody, neobsahuje glykol, má vyšší schopnost přenosu tepla s vyšší účinností při minimálním zatížení životního prostředí.

Pramen: CCI 04/2016, s. 7

(AB)

Teplná čerpadla Ochsner pro velké výkony

Výrobce tepelných čerpadel Ochsner Wärmepumpen GmbH, Linz, založil v Rakousku novou firmu Ochsner Energie Technik GmbH, Haag, která převezme veškeré aktivity včetně vývoje v oboru tepelných čerpadel velkých výkonů od 100 do 1 600 kW a vysokoteplotních tepelných čerpadel pro práci do teploty 95 °C. Zvláštní důraz klade na růst tepelných faktorů svých výrobků a využití podzemních vod a chladicích sítí s nasazením dvoustupňových chladicích okruhů. Navíc lze u odpadního tepla s teplotou 95 °C využít jednostupňového chladicího okruhu, což má podle firmy velký tržní potenciál.

Pramen: CCI 04/2016, s. 7

(AB)