

Lokalizace infrazáření termokamerou a zjištění součinitele prostupu tepla

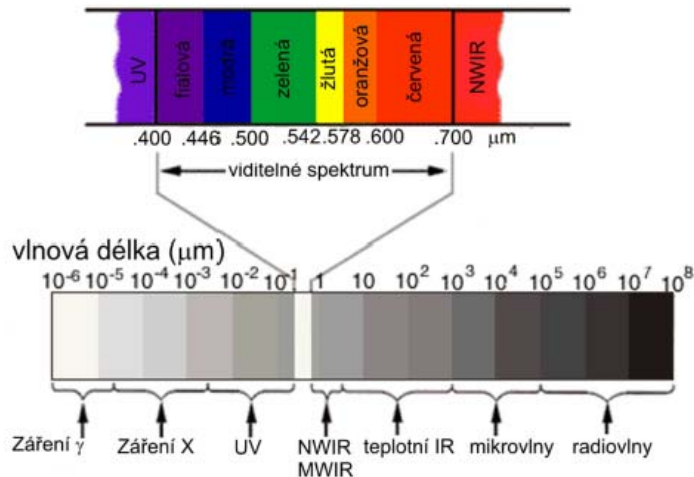
1 Úvod

1.1 Infračervené záření

Objevitelem infračerveného záření v roce 1800 je britský astronom William Frederic Herschel. Ten pomocí hranolu nejprve rozložil sluneční světlo na spektrum a poté k jeho jednotlivým částem přikládal teploměr. Směrem k červené oblasti spektra teplota rostla. Poté přiložil teploměr za červenou část spektra a zjistil, že teplota stoupla více než v kterékoliv části červeného spektra. Tato oblast byla nazvána infračervenou (z latinského infra = pod). Vlnová optika definuje záření pomocí jeho vlnové délky. Tu lze vyjádřit rovnicí:

$$\lambda = c/f \quad (1)$$

kde λ je vlnová délka [m], c je rychlost světla v daném prostředí [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$], f je frekvence vlny [Hz]. Viditelné světlo patří do oblasti vlnových délek přibližně 430 nm (fialová barva) až po 750 nm (červená). Infračervené záření (také nazývané IC nebo IR) má vlnovou délku větší než viditelné světlo: 750 nm až 1 mm. Toto spektrum je ještě dále rozděleno na více částí. Pro termovizi se využívá oblast LWIR (long wave infrared) s vlnovou délkou 8 až 15 μm viz obrázek 1.



Obrázek 1 Spektrum vlnových délek záření

1.2 Černé těleso a emisivita

Absolutně černé těleso (angl. blackbody radiator) je ideální těleso, které pohlcuje veškeré záření a jeho vyzařovací charakteristika je přímo závislá na povrchové teplotě. Jedná se o ideální zářič, který veškerou tepelnou energii přemění na infračervené záření. Je charakterizován emisivitou $\varepsilon = 1$. Ideální černé těleso je pouze pojem, běžné předměty jsou od absolutně černého tělesa odlišné. Tuto odlišnost vyjadřuje parametr nazvaný emisivita ε . Emisivita každého materiálu je dále proměnná s teplotou předmětu, úhlem vyzařování a vlnovou délkou emitovaného záření. Šedé těleso má parametr $\varepsilon < 1$. Obecně neznámé těleso může mít emisivitu v rozsahu $0 < \varepsilon < 1$.

Emisivitu můžeme zjistit z tabulek emisivity, ale ne vždy se můžeme na údaje spolehnout. Různé povrchové úpravy mají také velmi rozdílnou emisivitu. Dalším a přesnějším způsobem jak zjistit emisivitu je měření pomocí termokamery. Nastavení emisivity je pro termokameru velice důležité, proto je nutné před započítím měření emisivitu změřit nebo jinak zjistit. Emisivita se dá změřit několika způsoby.

1) Použitím referenčního teploměru – měříme teplotu neznámého objektu termokamerou a referenčním teploměrem. Teploměr udává přesnou teplotu tělesa a změnou v nastavení emisivity u termokamery se snažíme docílit shodné teploty. Když se teploty shodují, nastavená emisivita je právě ta emisivita neznámého tělesa.

(Při tomto měření by se vyskytl problém s odrazivostí lesklých vzorků – měď a hliník. Samotná emisivita takovýchto materiálů je nízká, ale uplatňuje se zde odražené infračervené záření z okolí, které potom termokamera snímá. Další nesrovnalost vznikla při měření více emisivních materiálů – eloxovaného hliníku, zinku a olova. Termokamera zobrazovala teplotu předmětu vyšší, než byla skutečná naměřená pomocí teploměru. To by značilo, že emisivita je vyšší než 1, což je fyzikálně nemožné. Proto je předpokládáno, že termokamera není správně kalibrovaná a ukazuje vyšší teploty, než skutečně jsou.)

2) Použitím referenční látky se známou emisivitou – Neznámé těleso pokryjeme nebo natřeme látkou o známé emisivitě ε_0 . Tuto nastavíme na termokameře a změříme teplotu tohoto známého povrchu ohřátého na teplotu tělesa. Tuto teplotu si poznamenejme – T_0 . Měřicí bod namíříme na povrch neznámého tělesa. Nyní měníme nastavení emisivity tak, dokud nedosáhneme stejné teploty T_0 , jaké měl známý povrch. Při nastavení stejné teploty odečteme emisivitu ε neznámého tělesa.

3) Použitím referenčního tělesa a výpočtem – Pro toto měření musíme mít známé těleso se známou emisivitou a teplotou a těleso s neznámou emisivitou, u kterého známe jeho teplotu.

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 T_{24} / T_{14}$$

1.3 Tepelná vodivost materiálů a součinitel prostupu tepla

Každý materiál je složen z atomů a molekul. Protože jsou molekuly v látce relativně blízko sebe, mohou přenášet tepelný pohyb a tepelná energie může prostupovat materiálem. Protože mají různé materiály různou vzdálenost molekul, je tepelná vodivost pro každou látku jiná. Dobrymi vodiči tepla jsou kovy, u nichž je tepelná vodivost zprostředkována pohybem volných elektronů, které jsou blízko sebe. Naopak špatnými vodiči tepla jsou např. plasty a vzduch, protože jsou jejich částice ve větší vzdálenosti od sebe. Tepelná vodivost charakterizována součinitelem tepelné vodivosti λ , který je definován jako množství tepla Q , které projde za jednotku času τ tělesem a vytvoří na jednotkové délce tělesa teplotní rozdíl.

$$Q = \lambda \cdot S \cdot \frac{\Delta T}{d} \tau, \quad (2)$$

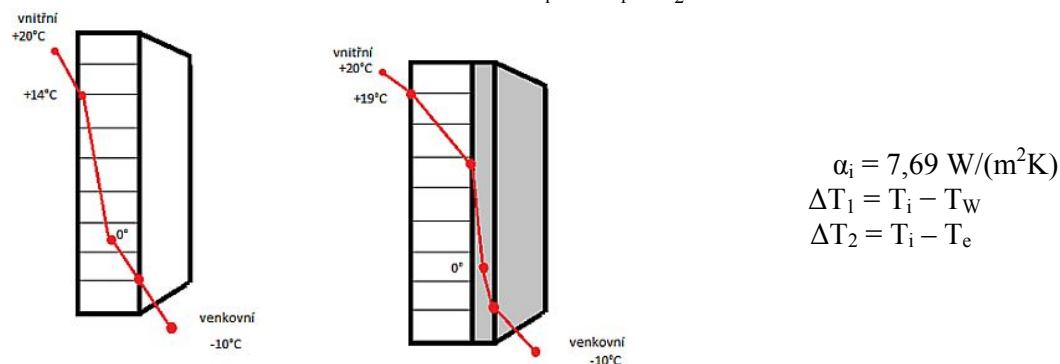
kde Q je množství tepla [J], λ je součinitel tepelné vodivosti [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$], S je plocha tělesa [m^2], ΔT je rozdíl termodynamických teplot [K], d je hloubka vniku tepla [m], τ je čas, za který teplo projde tělesem [s]. Podílem Q/τ definujeme výkon tepelného záření P a po úpravě dostaneme pro součinitel tepelné vodivosti:

$$\lambda = P \frac{d}{S \Delta T}. \quad (3)$$

Ve stavebnictví se zabýváme složitějšími strukturami, často s neznámou skladbou. Definujeme součinitel prostupu tepla U . Součinitel prostupu tepla je množství tepla procházející 1 m^2 konstrukce při rozdílu teplot vzduchu mezi interiérem a exteriérem 1 K . Kromě konstrukce zahrnuje i vliv nehybné vrstvičky vzduchu na vnějším i vnitřním povrchu

konstrukce. Principem metody je současné měření vnitřní teploty vzduchu T_i měřicím přístrojem, měření teploty vnitřního povrchu konstrukce T_w (wall, window) příloženými sondami přilepenými plastelínou a měřením vnější teploty vzduchu T_e vnější radiovou sondou. Z těchto tří teplot se v přístroji za použití konstanty – součinitele přestupu tepla na **rozhraní** interiérového vzduchu a stěny- $\alpha_i = 7,69 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ vypočte součinitel prostupu tepla U (pro konkrétní konstrukci a konkrétní tloušťku stěny) ze vzorce:

$$U = \alpha_i \cdot \Delta T_1 / \Delta T_2$$



Obr 2: Průběh teploty přes konstrukci obvodového pláště bez zateplení a se zateplením

Vzhledem k tomu, že rozdíl ΔT_1 mezi teplotou vnitřního vzduchu a vnitřního povrchu konstrukce klesá se zvyšujícími izolačními vlastnostmi konstrukce, lze uspokojivě měřit většinou jen starší nezateplené konstrukce. U lepších konstrukcí s $U \leq 0,4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ je ΔT_1 již významně ovlivňována nepřesnostmi měření a proměnlivostí podmínek, takže výsledky jsou již neuspokojivé.

2 Použitá zařízení

2.1 Termokamera - FLIR

Bezkontaktní měření teploty nachází praktické uplatnění v mnoha oblastech. Používá se při kontrolách tepelné izolace budov, může také odhalit praskliny ve zdivu, vlhkost. Ve strojírenství je termokamera vhodná pro inspekci tepelného namáhání materiálu, zahřívání a přehřívání ložisek, motoru a hlavně pohyblivých objektů, které není možné měřit přímo. V elektrotechnice je měření důležité při odhalování nedokonalých spojů vodičů, v bezpečnostních složkách a armádě jsou používány k detekci osob. Uplatnění termokamer lze nalézt také v lékařství (potíže s klouby a svaly - zvýšená teplota postiženého místa).

Při využití infrakamery pro měření teploty se obvykle nejjasnější (nejteplejší) části obrazu barví bíle, střední teploty červeně a žlutě, a nejtmačší (nejchladnější) části modře. Vedle obrázku zvolené palety „pseudo barvy“ je stupnice, která jasně definuje teplotu určité barvy. Rozlišení infrakamer je mnohem menší než u klasických optických kamer, snímací čip má většinou pouze 160x120 v lepších případech 640x480 pixelů. Infrakamery jsou několikanásobně dražší než klasické optické kamery.



Obr. 3 Školní termokamera FLIR i7

2.2 Testo 635

Zařízení sestává z měřicího přístroje (Obr. 4), obsahující čidlo teploty vzduchu, ze třech příložných sond spojených kabelem s přístrojem a nakonec z vnější sondy, která měří vnější teplotu a naměřenou hodnotu pomocí radiové frekvence odesílá do měřicího přístroje k okamžitému výpočtu součinitele U.



Obr. 4 Testo 635

2.3 Další pomůcky

PC (Notebook), čtečka SD karet, redukce miniSD karty na SD, kádinka s ledovou tříští - 0°C, teploměr.

3 Návod k použití Testo 635 - stručně

- 1) Připojte zelené sondy a zapněte přístroj krátkým stisknutím tlačítka (power), dalším stiskem podsvítíte displej přístroje. Dlouhým stiskem přístroj vypnete.
- 2) Zapněte externí sondu stiskem tlačítka power na spodní straně sondy, dlouhým stiskem sondu vypnete.
- 3) Opakovaným stiskem tlačítka s šipkou nahoru přepínáte zobrazený údaj v horním řádku displeje.
- 4) Opakovaným stiskem tlačítka s šipkou dolů přepínáte zobrazený údaj v dolním řádku displeje.
- 5) Další funkce - viz podrobný návod.
- 6) Dbejte na to, aby byl samotný přístroj při měření v místě, které odpovídá charakteru místnosti. Nenechávejte jej na parapetu, radiátoru, apd.

Pozn. :

Kalksten – vápenec, pískovec

Mursten – cihla

Gas beton – porobeton

a. leder – anhydritový potěr

c. leder – cementový potěr

Hwtr – tvrdé dřevo

Swtr – měkké dřevo

Gas plade – lisovaná lepenka

L Mursten – vysoce izolační cihla

4 Úkoly

- 1) Seznamte se s funkcemi termokamery Flir a přístroje Testo 635
- 2) Ověřte zkalibrování termokamery (pomocí ledu s vodou, železa a teploměru)
- 3) Zaznamenejte několik snímků svého nejbližšího okolí (pohled na vnitřní a vnější stěny budovy, lidské tělo, povrchy s různou emisivitou a diskutujte vliv emisivity povrchu, rozlišení kamery a stupně tepelného stavu (prohřátí) objektů na termovizních snímcích.
- 4) Stanovte součinitel prostupu tepla pro vybrané konstrukce a vypočtete součinitel prostupu tepla pro stěnu budovy Žižkova 17 ve vaší laboratoři.

5 Postup

- 1) Vložte teploměr do kádinky s ledem a vodou a nechte ustálit. Pozorujte termokamerou.
- 2) Pozorujte vaše okolí termokamerou, můžete jít i na balkon: pozorujte např. stěny s okny z vnějšku nebo zevnitř, předměty ve vašem okolí (lednice - pokud funguje) a vyberte 3 snímky pro okomentování. Nezapomeňte na různou emisivitu předmětů a odrazivost materiálů (zejména skla a kovů). Poznamenejte si při pořízení snímku jeho číslo a slovní popis snímku.
- 3) Přesuňte vaše snímky do PC (notebooku) do vámi vytvořené složky a zkopírujte si je na váš flash disk.
- 4) Podle návodu k měření u přístroje Testo 635 připojte k přístroji čidla teploty povrchu stěny budovy Žižkova 17 (externí čidlo umístěte na balkon učebny, nemělo by být na přímém slunci, pozor, vždy čekejte na ustálení) **Pozor! Pokud je venkovní teplota vyšší než 10°C, nemůžete měřit podle níže uvedených bodů a), b), c) a proved'te určení součinitele prostupu tepla pouze pro bod d).** Vše okomentujte v protokolu.
Určete součinitel prostupu tepla:
 - a) výplně okna
 - b) rámu okna
 - c) stěny budovy (neměřte ostění okna!)
 - d) stěny lednice (externí čidlo umístěte dovnitř lednice).Údaje запиšte do přehledné tabulky, spolu s detailním popisem místa měření, popř. zaznamenejte fotografii umístění fotoaparátu.
- 5) Vypněte a uklid'te všechna zařízení a přístroje, led schovejte do lednice.

Tabulka pro záznam měření součinitele prostupu tepla:

č.m.	konstrukce	U	Poznámky (čas měření)
		W/(m ² K)	
1			
2			
3			
4			
5			

6 Zpracování měření

- 1) Sestavte protokol o měření, velmi stručný úvod, seznam přístrojů a stručný postup
- 2) V části Výsledky měření a diskuse vytiskněte v přiměřené kvalitě zaznamenané fotografie termovizních měření s podrobným popisem. V dalším textu uveďte vaše zhodnocení stavu pozorovaných objektů z tepelně izolačního hlediska a kritické posouzení jak stavu, tak vlivů na měření a uveďte stručně vaše závěry.
- 3) Stejně jako v bodě 2 vytiskněte vybrané fotografie z měření koeficientu prostupu tepla a v tabulce uveďte vaše zjištěné hodnoty.
- 4) Stanovte součinitel prostupu tepla pro stěnu učebny vlastním výpočtem z materiálových vlastností jednoplášťové stěny, uvažujte smíšené zdivo ($\lambda=1,0 \text{ W/(mK)}$) a uvažujte omítky běžné tloušťky po obou stranách. Celková tloušťka stěny je 90cm. Materiálové vlastnosti dohledejte na internetu.
- 5) Kriticky zhodnoťte validitu (správnost) naměřeného údaje s údaji, které jsou pro vaše měřené konstrukce dostupné na internetu (údaje výrobce, odborná fóra).
- 6) V závěru shrňte vaše poznatky a vlastními slovy proveďte zhodnocení.

7 Použitá literatura

- 1) Pohledy fyziky – stránky komerční firmy
<http://sun-of-hope-topne-panely.sunofhope.cz/pohled-fyziky.pdf>
- 2) Jakub Icela : Infракamera a její využití v BT, bakalářská práce, UTB, 2008
http://dspace.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/5249/icela_2008_bp.pdf?sequence=1
- 3) Petr Švábeník, Lucie Dordová: Použití termokamery v technické praxi, Elektrověue, VOL.13, NO.1, FEBRUARY 2011
<http://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CDgQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.elektrověue.cz%2Ffile.php%3Fid%3D200000575-3eca43fc42&ei=uRL4UsLwNc-ihgf46IGICQ&usq=AFQjCNGpTMGWsJa8Uj-4mmLI9wiXawHKbg&bvm=bv.60983673,d.ZG4&cad=rja>
- 4) Manuál Termokamera FLIR i7
- 5) Manuál U-metru Testo
- 6) Ing. Renata Straková, Ing. Josef Knob : Měření součinitele prostupu tepla stávajících stavebních konstrukcí, odborný článek na webu: tzb-info.cz
<http://stavba.tzb-info.cz/prostup-tepla-stavebni-konstrukci/8125-mereni-soucinitele-prostupu-tepla-stavajicich-stavebnich-konstrukci>

8 Dodatek

Tepelný odpor vrstvy R_i [$\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$]

$$R_i = d_i / \lambda_i$$

kde:

d_i [m] je tloušťka dané vrstvy v konstrukci

λ_i [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$] je součinitel tepelné vodivosti

Odpor konstrukce při prostupu tepla R [$\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$]

$$R = R_{si} + R_{omítky} + R_{stěny} + R_{omítky} + R_{se}$$

R_{si} uvažujte $0,13 \text{ (m}^2\text{K)/W}$

R_{se} uvažujte $0,04 \text{ (m}^2\text{K)/W}$

Součinitel prostupu tepla stěnou:

$$U = 1/R$$