

11.13 Tepelná emisivita betonu

Tepelně vyzařují všechna tělesa, jejichž teplota je větší, jak nula stupňů Kelvina (-273,15 °C). K tepelnému záření se vztahují čtyři základní fyzikální zákony: Planckův vyzařovací zákon, Wienův posunovací zákon, Stefan-Boltzmanův zákon a Kirchhoffův zákon. První tři zákony se týkají tepelného záření absolutně černého tělesa (modelové těleso, které vyzařuje nejvíce ze všech těles), avšak Kirchhoffův zákon se týká vyzařování především šedých těles (reálná tělesa, která nás obklopují). O těchto zákonech je blíže pojednáno v elektronických skriptech k předmětu CB001, takže by nebylo účelné výklad těchto zákonů opakovat.

Na základě Kirchhoffova zákona můžeme integrální intenzitu tepelného záření H vydávané povrchem šedých těles vyjádřit pomocí redukované intenzity vydávané absolutně černým tělesem, které má stejnou teplotou povrchu T , jako šedé těleso. Redukci integrální intenzity absolutně černého tělesa H_b provádíme integrální emisivitou ε (vedle integrální emisivity se zavádí také spektrální emisivita ε_λ , která závisí na vlnové délce λ tepelného záření).

Integrální emisivita je - přibližně řečeno - materiálovou konstantou, jejíž hodnota se pohybuje v intervalu nula až jedna.

$$H = \varepsilon \sigma T^4, \quad H_b = \sigma T_{\varepsilon=1}^4, \quad \varepsilon \in (0;1), \quad \sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4} \quad (1)$$

Absolutně černý povrch má emisivitu rovnu jedné (vše pohlcuje, nic neodráží), kdežto tuhé šedé povrchy mají emisivitu menší než jedna (částečně pohlcují, částečně odrážejí, ale nic nepropouští - objemem tuhých těles se teplo šíří vedením, nikoliv zářením).

Tepelná emisivita ε , jakožto materiálová konstanta, hraje významnou roli při výpočtu vyzářené tepelné energie, což je například zcela zásadní při oceňování tepelného přenosu v interiérech budov a při výpočtu tepelných ztrát.

Emisivita ovšem není konstantou v absolutním smyslu, protože jeví závislost na některých dalších fyzikálních veličinách. K těmto veličinám patří např. **teplota povrchu**, **tvar povrchu** (konvexní, konkávní), **stav povrchu** (hrubý, hladký), **vlhkost povrchu**, **rozsah vyzařovaných vlnových délek** tepelného záření, **směr vyzařování** apod. V této laboratorní práci se zaměříme především na materiálovou závislost integrální emisivity.

Hodnoty emisivit budou určovány u **vzorku betonu při různých teplotách** pomocí dvou teploměrů, z nichž jeden je kontaktní a druhý bezkontaktní. Teploty obou teploměrů se budou lišit, poněvadž bezkontaktní infra teploměr je cejchován vzhledem k černému tělesu, jehož emisivita se blíží k jedné. Tento bezkontaktní infra teploměr bude mít ve svém menu stabilně nastavenou hodnotu emisivity rovnu "jedné", a proto teplotu, kterou bude ukazovat, budeme označovat jako $T_{\varepsilon=1}$. *Ve skutečnosti ovšem nemá žádný bezkontaktní teploměr maximum emisivity rovno jedné, nýbrž je o něco málo menší, tj. $\varepsilon_{\max} < 1$.* Při tovární (výrobní) kalibraci totiž infra teploměry přejímají hodnotu emisivity ($\varepsilon_{\max} < 1$) použitého tmavého kalibračního etalonu, která je vždy o něco málo menší, než jedna. Takto "získanou" emisivitu infra teploměru nazýváme virtuální emisivitou [1], [2].

Kontaktní teploměr nám ukáže **skutečnou teplotu** vzorku T . Teplota přečtená z bezkontaktního infra teploměru bude menší, než teplota zjištěná kontaktním teploměrem ($T_{\varepsilon=1} < T$). **Obě teploty budeme měřit současně a výslednou emisivitu ε betonového vzorku zjistíme podle následujícího vzorce:**

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_{\max} \cdot T_{\varepsilon=1}^4 - T_R^4}{T^4 - T_R^4}, \quad (\text{teploty jsou v kelvinech !}) \quad (2)$$

Bezkontaktní teploměry používané v naší studentské laboratoři mají tyto hodnoty virtuálních emisivit: Fluke č. 1 a č. 2 mají virtuální emisivitu $\varepsilon_{\max} = 0.96$, teploměr Fluke č. 3 má virtuální emisivitu $\varepsilon_{\max} = 0.97$.

Horní hranici radiozitivní teploty místnosti T_R poznáme v průběhu chladnutí vzorku, jakmile nastane rovnost teplot $T = T_{\varepsilon=1} = T_R$. Snažíme se nechat vzorek chladnout tak dlouho, až rovnost $T = T_{\varepsilon=1}$ nastane nebo alespoň do takové její blízkosti, kdy se dá společná hodnota **spolehlivě odhadnout**. Pomocí vzorce (2) budeme počítat emisivitu betonového vzorku.

Měření bude probíhat tak, že nejdříve zahřejeme vzorek betonu na teplotu, která bude nejméně o **60** stupňů nad pokojovou teplotou. K tomu účelu bude k dispozici malý vaříč. Teplý vzorek se pak pomocí termo-rukavice přemístí z vaříče na měřicí místo a počká se, až se setrvačný vzrůst teploty vzorku zastaví. Jakmile teplota vzorku poklesne o 3 °C, zahájí se měření v předepsaných časových intervalech oběma teploměry současně.

K tomuto způsobu měření je ale nutné dodat, že vzorec (2), obsahuje rozdíly teplot a pokud jsou tyto teploty vzájemně blízké, vzniká velká tzv. rozdílová chyba měření, a proto budeme vyhodnocovat emisivitu pouze v intervalu teplot, které jsou alespoň o **20** stupňů nad pokojovou teplotou. S chladnoucím vzorkem se totiž rozdíl hodnot mezi teplotami T a $T_{\varepsilon=1}$ zmenšuje, až u teplot vzorku dostatečně nízkých se hodnoty T , $T_{\varepsilon=1}$ a T_R vyrovnávají, takže hodnota emisivity počítaná podle vzorce (2) dává v tom okamžiku singulární výraz s nulou ve jmenovateli - v tomto okolí je chyba měření tak velká, že výsledky měření již nelze považovat za věrohodné.

Publikované hodnoty emisivit některých materiálů s teplotou 27 °C.
(Nebyl uveden stav povrchu ani metoda měření).

Materiál	Emisivita
Ocel (leštěná)	0,10
Hliníková fólie	0,05
Hliník(eloxovaný)	0,15 -0,69
Nerezová ocel (leštěná)	0,20
Nikl (oxidovaný)	0,37
Látka textilní	0,90
Dřevo	0,82 - 0,92
Papír	0,92 - 0,97
Beton (hrubý povrch)	0,88 - 0,93
Beton (hladký, leštěný povrch)	0,60 - 0,88
Cihla (červená)	0,93 - 96

Úkol:

1) Ověřte hodnotu radiační teploty okolí, tj. zapisujte postupně teploty T a $T_{\varepsilon=1}$ chladnoucího vzorku a snažte se dospět do okamžiku, kdy nastane jejich rovnost nebo se přiblížte alespoň do bezprostřední blízkosti této rovnosti, ze které pak určíte horní hranici radiozitivní teploty T_R .

2) Vyčíslete hodnoty emisivit podle vzorce (2) pro celý rozsah teplot.

3) Vymezte si interval **teplot vzorku**, které jsou ***o více jak 30 stupňů*** nad pokojovou teplotou a pro tento interval spočítejte aritmetický průměr emisivity $\langle \varepsilon \rangle$. V tomto intervalu teplot vyčíslete odchylky emisivity od aritmetického průměru $\langle \varepsilon \rangle$ a z odchylek určete absolutní a relativní pravděpodobnou chybu průměru $\langle \varepsilon \rangle$. Výslednou emisivitu $\langle \varepsilon \rangle$ porovnejte s tabulkovou hodnotou betonu (*event. mírně rozdílné hodnoty mohou být způsobeny měřeními při odlišných teplotách, odlišným stavem povrchů - hladký, hrubý - nebo měřeními při různých úhlech ap.*).

Pomůcky:

- Vzorek betonu se zabudovaným čidlem kontaktního teploměru
- Dotykový teploměr
- Bezdotykový teploměr
- Hodiny s vteřinovým odečtem

Postup měření:

1) Bezdotykový teploměr má podobu pistole se spouští dole na rukojeti. Po stisknutí spouště se rozsvítí dvě laserové stopy, které je nutné zaměřit na dvě červeně vyznačené skvrny na vzorku betonu. Stačí přidržet nad vzorkem z malé vzdálenosti tak, aby se laserové stopy kryly s červenými stopami na vzorku, pak počkat asi 3 vteřiny na ustálení hodnot, uvolnit spoušť, oddálit teploměr a přečíst teplotu na displeji teploměru, který podrží hodnotu teploty ještě malou chvíli, než pohasne. Bezdotykový teploměr je uložen celou dobu mimo vzorek a měří se s ním jen v okamžiku uplynutí dalšího časového intervalu. Bezkontaktní teploměr při měření držte kolmo k povrchu vzorku, abyste měřili kolmou složku emisivity. Vyzkoušejte si celou proceduru měření bezdotykovým teploměrem na studeném vzorku. Až si nacvičíte rychlé zaměření barevných skvrn na vzorku a pohotovému ovládání a čtení z teploměru, pak pokračujte k bodu 2).

Při manipulaci s bezdotykovým teploměrem je třeba opatrnosti, aby laserové stopy nedopadly do lidského oka - hrozí poškození zraku.

2) Přeneste dřevěný deskový podnos s celým zařízením k vařiči. Zapněte kontaktní teploměr. Chladný vzorek betonu opatrně přesuňte na plotnu vařiče a pak vařič zapněte na **maximum**. Vzorek betonu zahřívejte tak dlouho, až kontaktní teploměr ukáže hodnotu **70 °C**, ***pak okamžitě vařič vypněte***, ihned uchopte horký vzorek pomocí **termo-rukavice** a přemístěte jej na dřevěný měřicí podnos a vraťte se s ním na své místo v laboratoři. Zde vyčkejte, až se setrvačný vzrůst teploty vzorku zastaví. Jakmile teplota vzorku **poklesne o 3 °C**, zahajte měření - v předepsaných časových intervalech zapisujte do tabulky teploty zjištěné na obou teploměrech (viz tabulka 1 s příkladem měření).

Příklad měření je na následující straně - lze také nahlédnout do publikace [3]:

Tab. 1 Naměřené hodnoty teplot v průběhu chladnutí vzorku betonu
(pokojová teplota 24°C, vlhkost vzduchu 50%).

t/min	t/s	T / °C	T _{ε=1} / °C	$\epsilon = \frac{\epsilon_{\max} \cdot (T_{\epsilon=1} + 273,15)^4 - (T_R + 273,15)^4}{(T + 273,15)^4 - (T_R + 273,15)^4}$	Výsledek	
0	0	73,9	68,1	0,787584	< ε > = 0,72 ± 0.02 ρ ≈ 2,8 % (51,6 ; 73,9) °C	
1	60	71,7	64,8	0,751377		
2	120	69,4	62,1	0,729947		
3	180	67	60,5	0,738866		
4	240	64,8	58,2	0,72338		
5	300	61,4	55,7	0,729105		
6	360	59,2	53,5	0,713358		
7	420	57,2	52	0,714964		
8	480	55,3	50,1	0,698295		
9	540	53,3	48,4	0,690329		
10	600	51,6	47,2	0,693052		
11	660	49,9	45,7	0,681874		-
12	720	48,5	44,6	0,677925		-
13	780	47	43,4	0,671728		-
14	840	45,7	42	0,644807		-
16	960	43,6	40,4	0,634509		-
18	1080	41,4	38,8	0,62537	-	
20	1200	39,5	37,2	0,595325	-	
22	1320	38	36	0,569569	-	
24	1440	36,5	34,9	0,545985	-	
26	1560	35,3	34	0,517263	-	
30	1800	33,4	32,1	0,361873	-	
40	2400	29,7	29,2	-0,42385	-	
50	3000	27,8	27,8	#DIV/0!	-	

Horní hranice radiozitivní teploty místnosti: T_R ≈ 27,8 °C..

Přesnější výpočet radiozitivní teploty se provádí složitěji a výsledná radiozitivní teplota bude nižší než uvedená horní hranice.

Diskuse výsledků :

Literatura

- [1] T. Ficker, Virtual emissivities of infrared thermometers, *Infrared Physics and Technology* 114 (2021) 103656 (DOI: 10.1016/j.infrared.2021.103656).
- [2] T. Ficker, Addendum: Measurement of emissivity in student laboratories, *European Journal of Physics* 42(3) (2021) 039401. (DOI: 10.1088/1361-6404/abd987).
- [3] T. Ficker, Measurement of emissivity in student laboratories, *European Journal of Physics* 41(1) (2020) 015101. (DOI: 10.1088/1361-6404/ab4c1e).