

Chladienie telesa voľným prúdením a sálaním

Cieľ práce:

Namerať na laboratórnom zariadení časovú závislosť teploty kovového telesa pri jeho ochladzovaní v nehybnom vzduchu. Na základe nameraných údajov určiť:

1. celkový tok tepla z povrchu telesa do okolia v závislosti od času,
2. kombinovaný súčiniteľ prestupu tepla prúdením a sálaním,
3. celkový tok tepla rozdeliť na zložku spôsobenú prúdením a sálaním.
4. emisivitu (stupeň čiernosti) povrchu telesa.

Teoretická časť

Chladienie telesa umiestneného do nepohybujúceho sa vzduchu sa realizuje prestupom energie z jeho povrchu do okolitého vzduchu voľným prúdením a sálaním.

Pre tok tepla sálaním z povrchu telesa do okolia platí rovnica

$$\dot{Q}_S = \varepsilon \sigma_0 A (T^4 - T_0^4) \quad (1)$$

kde ε je emisivita (stupeň čiernosti) telesa,

$\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ je Stefan-Bolzmannova konštanta,

A je plocha povrchu telesa,

T a T_0 sú absolútne teploty telesa a okolitého vzduchu.

Pre tok tepla voľným prúdením z povrchu telesa do okolitého vzduchu platí rovnica:

$$\dot{Q}_{VP} = \alpha_{VP} \cdot A \cdot (t - t_0) \quad (2)$$

kde α_{VP} je koeficient prestupu tepla voľným prúdením,

A je plocha povrchu telesa,

t je okamžitá teplota telesa a t_0 je teplota okolitého vzduchu.

Hodnotu α_{VP} môžeme vypočítať z kritériálnej rovnice platnej pre voľné prúdenie

$$Nu = 0,54(Gr \cdot Pr)^{0,25} \quad (3)$$

kde bezrozmerné kritériá sú definované takto:

$$Nu = \frac{\alpha_{VP} \cdot L}{\lambda} \quad Gr = \frac{L^3 \rho^2 g \beta (t - t_0)}{\mu^2} \quad Pr = \frac{c_p \mu}{\lambda}$$

L je charakteristický dĺžkový rozmer

ρ, μ, λ, c_p sú fyzikálno-chemické vlastnosti vzduchu pri teplote medznej vrstvy $t_m = (t + t_0)/2$

β je koeficient teplotnej rozťažnosti vzduchu ($\beta = \frac{1}{T_m}$)

Ochladzovanie horúceho telesa je typický časovo neustálený proces. Za krátky časový úsek $d\tau$ sa teplota telesa zníži o hodnotu dt , pričom sa do okolia odvedie teplo dQ . Bilančne to môžeme vyjadriť nasledujúcou rovnicou

$$dQ = mc_p(-dt) = \alpha_{komb}A(t - t_0)d\tau \quad (4)$$

m je hmotnosť telesa,

c_p je špecifická tepelná kapacita materiálu telesa,

t je okamžitá teplota telesa v čase τ .

Pretože kombinovaný súčiniteľ prestupu tepla prúdením a sálaním sa s teplotou povrchu telesa mení, okamžitú hodnotu toku tepla \dot{Q} z povrchu telesa do okolitého vzduchu vypočítame podelením rovnice (4) časovým úsekom $d\tau$:

$$\frac{dQ}{d\tau} = \dot{Q} = -mc_p \left(\frac{dt}{d\tau} \right) = \alpha_{komb}A(t - t_0) \quad (5)$$

Z rovnice (5) vidíme, že z nameraných experimentálnych údajov $t = f(\tau)$ je pre výpočet toku tepla \dot{Q} potrebné získať deriváciu $\frac{dt}{d\tau}$, t. j. rýchlosť zmeny teploty telesa s časom.

Zadanie práce

1. Namerajte závislosť teploty kovového telesa a zaveseného v nehybnom vzduchu v závislosti od času pri jeho ochladzovaní.
2. Z nameraných údajov vypočítajte okamžité hodnoty toku tepla z povrchu telesa do okolia v závislosti od času resp. okamžitej teploty telesa.
3. Vypočítajte experimentálne hodnoty kombinovaného súčiniteľa prestupu tepla α_{komb} z povrchu telesa do okolia v závislosti od teploty telesa t a graficky ich porovnajte s hodnotami získanými z empirickej rovnice:

$$\alpha_{komb} = 9,74 + 0,07 \cdot (t - t_0)$$

4. Vypočítajte okamžité hodnoty toku tepla z povrchu telesa do okolia voľným prúdením ako aj sálaním v závislosti od teploty telesa a znázornite túto závislosť graficky.
5. Vypočítajte emisivitu ε (stupeň čiernosti) telesa.

Experimentálna časť

Na realizáciu meraní je k dispozícii elektrický varič (jednoplatička), dva termočlánky na meranie teploty telesa a okolitého vzduchu, meracia ústredňa a digitálne stopky.

Meranie

- 1) Všetky zariadenia – varič, meraciu ústredňu aj digitálne stopky zapneme do elektrickej siete a na variči nastavíme maximálny výkon ohrevu.
- 2) Zoberieme teleso určené na meranie, zasunieme do otvoru v ňom termočlánok a položíme ho na varič. Skontrolujeme, či na displeji meracej ústredne vidíme obidve teploty – teplotu okolitého vzduchu aj teplotu telesa. Ak tomu tak nie je, zavoláme vedúceho cvičenia.
- 3) Teleso postupne ohrievame a na displeji meracej ústredne sledujeme aktuálnu teplotu telesa.
- 4) Keď teplota telesa dosiahne cca 220°C zoberieme ho z variča a zavesíme ho na háčik na pripravenom stojane. Skontrolujeme, či termočlánok je v otvore telesa zasunutý úplne.

- 5) Zapneme digitálne stopky a každých 30 sekúnd zaznamenáme okamžitú teplotu telesa do pripravenej tabuľky nameraných údajov. Toto meranie trvá cca 40 minút.
- 6) Medzitým umiestnime na platničku variča druhé teleso, ktoré podľa zadania máme použiť na meranie a ohrievame ho – tentokrát bez zasunutého termočlánku.
- 7) Po skončení merania prvého telesa vyberieme z neho termočlánok a zasunieme ho do druhého telesa, ktoré sa dovtedy ohrievalo na variči a zmeriame jeho teplotu.
- 8) Ak teplota druhého telesa už dosiahla cca 220°C, zoberieme ho z variča a celé meranie realizujeme s druhým telesom znovu. Varič po odobratí druhého telesa vypneme.
- 9) Po skončení merania druhého telesa (tiež trvá cca 40 minút) vypneme digitálne stopky aj meráciu ústredňu.

Vyhodnotenie nameraných údajov:

1. Nameranú závislosť okamžitej teploty telesa od času $t=f(\tau)$ si znázorníme graficky v tvare $\frac{1}{t} = A\tau^2 + B\tau + C$ (teplota v °C, čas v sekundách) a vyhodnotíme koeficienty A, B, C tejto rovnice. Je na to vhodné použiť Riešiteľa v MS Excel.
2. Získanú závislosť $t = \frac{1}{A\tau^2 + B\tau + C}$ analyticky zderivujeme podľa času a dostaneme rovnicu

$$\frac{dt}{d\tau} = -\frac{2A\tau + B}{(A\tau^2 + B\tau + C)^2}$$
3. Z rovnice (5) vypočítame okamžité hodnoty toku tepla z povrchu telesa do okolitého vzduchu \dot{Q} v závislosti od teploty telesa. Následne pri známej ploche povrchu telesa A (potrebné údaje nájdete v dokumentácii ku práci) a nameranej okamžitej teplote t z pravej strany rovnice (5) vypočítame experimentálne hodnoty kombinovaného súčiniteľa prestupu tepla prúdením a sálaním α_{komb} .
4. Z experimentu získané hodnoty α_{komb} graficky porovnáme v meranom rozsahu teplôt s hodnotami vypočítanými z empirickej rovnice $\alpha_{komb} = 9,74 + 0,07 \cdot (t - t_o)$
5. Pre každé meranie vypočítame teplotu medznej vrstvy vzduchu ako aritmetický priemer okamžitej teploty telesa t a teploty okolitého vzduchu t_o .
6. Teplota medznej vrstvy je určujúcou teplotou pre získanie hodnôt fyzikálno-chemických vlastností vzduchu $\rho, \mu, \lambda, c_p, Pr$ potrebných pre výpočet Nu .
7. Vypočítame hodnoty Nu z kritériálnej rovnice (3) a z nich vypočítame koeficient prestupu tepla pri voľnom prúdení α_{VP} .
8. Z rovnice (2) vypočítame tok tepla voľným prúdením \dot{Q}_{VP} z povrchu telesa do okolia.
9. Okamžité hodnoty toku tepla sálaním získame ako rozdiel \dot{Q} (vypočítané v bode 3) a \dot{Q}_{VP} (vypočítané v bode 8), $\dot{Q}_S = \dot{Q} - \dot{Q}_{VP}$.
10. Do spoločného grafu vynesieme závislosti okamžitých hodnôt toku tepla prúdením aj sálaním z povrchu chladnúceho telesa do okolia v závislosti od okamžitej teploty telesa.
11. Nakoniec z rovnice (1) vypočítame hodnoty emisivity telesa ε . Výslednú emisivitu vypočítame ako aritmetický priemer emisív vypočítaných pre všetky merania.

Tabuľka nameraných údajov

Čas	Teleso 1	Teleso 2
[min]	[°C]	[°C]
0		
0,5		
1		
1,5		
2		
2,5		
3		
3,5		
4		
4,5		
5		
5,5		
6		
6,5		
7		
7,5		
8		
8,5		
9		
9,5		
10		
10,5		
11		
11,5		
12		
12,5		
13		
13,5		
14		
14,5		
15		

Čas	Teleso 1	Teleso 2
[min]	[°C]	[°C]
15,5		
16		
16,5		
17		
17,5		
18		
18,5		
19		
19,5		
20		
20,5		
21		
21,5		
22		
22,5		
23		
23,5		
24		
24,5		
25		
25,5		
26		
26,5		
27		
27,5		
28		
28,5		
29		
29,5		
30		

Čas	Teleso 1	Teleso 2
[min]	[°C]	[°C]
30,5		
31		
31,5		
32		
32,5		
33		
33,5		
34		
34,5		
35		
35,5		
36		
36,5		
37		
37,5		
38		
38,5		
39		
39,5		
40		
40,5		
41		
41,5		
42		
42,5		
43		
43,5		
44		
44,5		
45		