TEPELNÉ ZÁŘENÍ TĚLES

Obecná část

Každé těleso zahřáté na nějakou teplotu, vyzařuje do okolního prostoru energii ve formě elektromagnetického vlnění se spojitým spektrem vlnových délek. Největší část této energie (maximum) bývá obvykle vyzářena v podobě infračerveného (vlnové délky 800 nm až 20 μm, nízké teploty), viditelného (asi 400 až 800 nm, střední teploty), případně i ultrafialového záření (200 až 400 nm, velmi vysoké teploty). Maximum se s rostoucí teplotou posouvá do oblasti kratších vlnových délek (viz Planckův vyzařovací zákon – přednášky). Jestliže z plochy dS povrchu tělesa je za čas dt vyzářena energie dW_e, pak můžeme zavést zářivý tok z plochy dS vztahem:

$$\Phi_e = \frac{\mathrm{d}W_e}{\mathrm{d}t} \quad [\mathrm{W}] \tag{1}$$

a intenzitu vyzařování z elementu dS:

$$M_e = \frac{\mathrm{d}\Phi_e}{\mathrm{d}S} \quad [\mathrm{Wm^{-2}}]. \tag{2}$$

Intenzita vyzařování tedy udává celkové množství zářivé energie vyzářené na **všech** existujících vlnových délkách za jednotku času z jednotkové plochy. Můžeme si také zvolit diferenciálně malý interval o šířce dλ v okolí zvolené vlnové délky λ. Na vlnových délkách spadajících do tohoto intervalu se pak vyzáří pouze část dM_e z celkové hodnoty M_e. Podíl

$$\frac{\mathrm{d}M_e}{\mathrm{d}\lambda} = M_{e\lambda} \tag{3}$$

se nazývá monochromatická (spektrální) intenzita vyzařování. Udává energii vyzářenou z jednotkové plochy za jednotku času na vlnových délkách spadajících do jednotkového intervalu v okolí dané vlnové délky λ.

Abstrakcí byl zaveden pojem „absolutně černého tělesa", což je hypotetické těleso, které vyzařuje nejvíce jak je to možné a zároveň pohlcuje veškeré dopadající záření. Pro jeho vyzařování byly nalezeny vztahy:

$$M_{e\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5\left(e^{\frac{hc}{k\lambda T}} - 1\right)} \qquad \text{(Planckem)}, \tag{4}$$

$$M_e = \sigma T^4 \qquad \text{(Stefanem a Boltzmannem)}, \tag{5}$$

kde c je rychlost světla, h Planckova konstanta, k Boltzmannova konstanta, σ Stefanova-Boltzmannova konstanta. $T = 273{,}15 + t$ [K; °C] je absolutní teplota.

V praxi se absolutně černému tělesu blíží jen uzavřené prostory s malými výstupními otvory (např. pece). U ostatních těles je vyzářená energie vždy menší a proto se zavádí tzv. emisivita ε, která udává poměr skutečně vyzářené energie

reálného a absolutně černého tělesa a je vždy menší než jedna. Emisivita závisí na druhu látky, úpravě povrchu a někdy na teplotě tělesa. Tělesa, jejichž emisivita nezávisí na teplotě, se označují jako „šedá“. Pro ně pak platí Stefan-Boltzmannův ve tvaru:

$$P_\mathrm{v} = \varepsilon S \sigma T^4, \tag{6}$$

kde P_v je celkový vyzářený výkon, S je plocha zářícího tělesa. Při určování topného příkonu P (nutného pro udržení teploty tělesa T) musíme však vzít v úvahu i výkon záření P_d, který na naše zářící těleso dopadá z okolního prostředí s teplotou T_amb. Výkonová bilance pak vypadá takto:

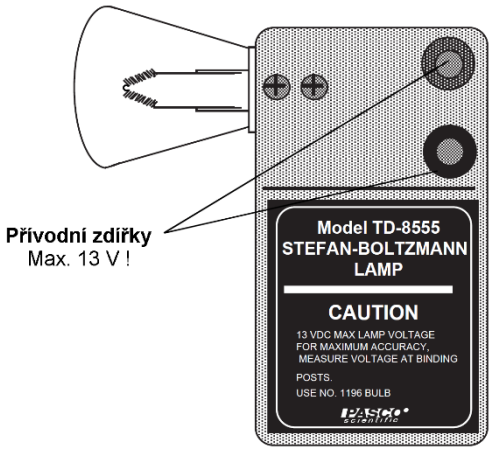
$$P = P_\mathrm{v} - P_\mathrm{d} = \varepsilon S \sigma T^4 - \varepsilon S \sigma T_\mathrm{amb}^4 = \varepsilon S \sigma (T^4 - T_\mathrm{amb}^4) \tag{7}$$

(konstanty ε, S, σ pro absobci záření jsou stejné jako pro vyzařování).

Měření

Jako zářicích těles použijeme pro vysoké teploty Stefan-Boltzmannovu lampu, pro nízké teploty „Tepelně-radiační kostku“.

Stefan-Boltzmannova lampa je žárovka s vhodně tvarovaným wolframovým vláknem (obr. 1). Vlákno budeme žhavit na různé teploty regulovatelným zdrojem napětí. Teplotu vlákna určíme pomocí teplotní závislosti elektrického odporu wolframu. Tato závislost ovšem není v širokém rozsahu teplot lineární, proto nelze pro výpočet použít známý lineární vzoreček, ale musíme použít empiricky zjištěné hodnoty z tabulky 1. Postup:



Obr. 1 Stefan-Boltzmanova lampa

1) Přesně změříme odpor vlákna R_{300} při pokojové teplotě (asi 300 K). Přesnost je zde důležitá – malá chyba R_{300} může způsobit velkou chybu při určení výsledné teploty.
2) Když je vlákno zahřáté, změříme proud a napětí na žárovce a vypočteme odpor vlákna R_T. Napětí musíme měřit těsně u patice žárovky na drátových přívodech, abychom vyloučili úbytky napětí na připojovacích zdířkách a přívodních vodičích.
3) Vypočteme poměr R_T/R_{300} a pomocí tabulky 1 určíme teplotu vlákna. Není-li náš poměr roven přesně hodnotě v tabulce, provádíme lineární interpolaci mezi sousedními hodnotami.

Tabulka 1: Teplota a relativní rezistivita Wolframu

R_T/R_{300}	T [K]	R_T/R_{300}	T [K]	R_T/R_{300}	T [K]	R_T/R_{300}	T [K]
1,00	300	5,48	1200	10,63	2100	16,29	3000
1,43	400	6,03	1300	11,24	2200	16,95	3100
1,87	500	6,58	1400	11,84	2300	17,62	3200
2,34	600	7,14	1500	12,46	2400	18,28	3300
2,85	700	7,71	1600	13,08	2500	18,97	3400
3,36	800	8,28	1700	13,72	2600	19,66	3500
3,88	900	8,86	1800	14,34	2700	20,35	3600
4,41	1000	9,44	1900	14,99	2800		
4,95	1100	10,03	2000	15,63	2900		

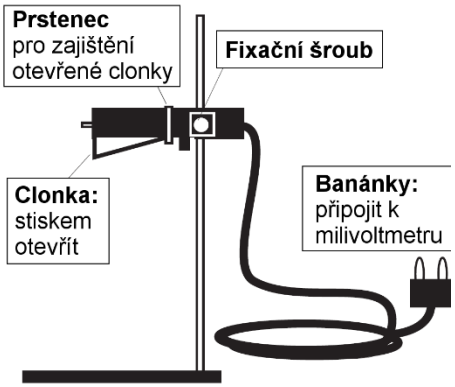
Tepelně-radiační kostka (též Leslieho kostka) je dutá hliníková krychle se silnými stěnami, uvnitř vyhřívaná 100W žárovkou (obr. 2). Silné stěny a dobrá tepelná vodivost hliníku zaručují konstantní teplotu všech povrchů. V jednom rohu je zabudován termistor sloužící k měření teploty. Jednoduše změříme jeho odpor a z tabulky (bude přiložena u úlohy) vyčteme teplotu. Maximální přípustná teplota je 130 °C. V podstavci je elektronika a knoflík, kterým můžeme řídit výkon topné žárovky. Každá ze stěn kostky má jinou povrchovou úpravu, díky níž je možno demonstrovat rozdíly v množství vyzářené tepelné energie.

Obr. 2 Tepelně-radiační kostka

Pro měření intenzity dopadajícího tepelného záření použijeme *radiační senzor* (obr. 3). Jedná se o řadu do série spojených termočlánků (v angl. literatuře označovaný jako „thermopile“). Jak známo, každý termočlánek má referenční a měřící spoj. Výstupní elektrické napětí termočlánku je (přibližně lineárně) úměrné rozdílu teplot měřicího a referenčního spoje. U radiačního senzoru jsou referenční spoje všech termočlánků tepelně spojeny s tělesem senzoru, které má teplotu T_{det}. Měřicí spoje pak tvoří plochu, na níž dopadá měřené záření. Celkové napětí, které produkuje senzor je ve shodě se vztahem (7) úměrné rozdílu energie dopadajícího záření a energie záření opouštějícího senzor:

$$U_{\mathrm{det}} \approx \sigma T^4 - \sigma T_{\mathrm{det}}^4 \tag{8}$$

Pokud by byl senzor provozován při teplotě absolutní nuly, získali bychom maximální citlivost. Pokud je teplota senzoru T_{det} nenulová, musíme ji při výpočtech brát v úvahu. Nemůžeme ji zanedbat, zejména pokud se měřené těleso svojí teplotou blíží teplotě senzoru. Budeme-li senzor důkladně chránit a stínit před zářením, můžeme předpokládat, že jeho teplota bude blízká teplotě místnosti: $T_{\mathrm{det}} \cong T_{\mathrm{amb}}$. Aby tedy nedocházelo k ohřevu tělesa senzoru, nesmíme jej vystavovat měřenému záření déle než je nezbytně nutné a mezi jednotlivými měřeními ho stínit. K tomu účelu je senzor opatřen vstupní clonkou z plechu, jejímž stisknutím se otevře. Je-li třeba se vyhnout nežádoucímu posunutí senzoru při manipulaci se clonou, můžeme ji trvale otevřít pomocí posuvného prstence a mezi měřením celý senzor stínit pomocí dvou destiček z izolačního materiálu s odraznou vrstvou. Destičky musí být orientovány odraznou vrstvou ke zdroji záření a mají mít mezi sebou malou vzduchovou mezeru. Jednotlivá měření tedy provádíme rychle – maximálně 5 sec a pak ihned zaclonit!

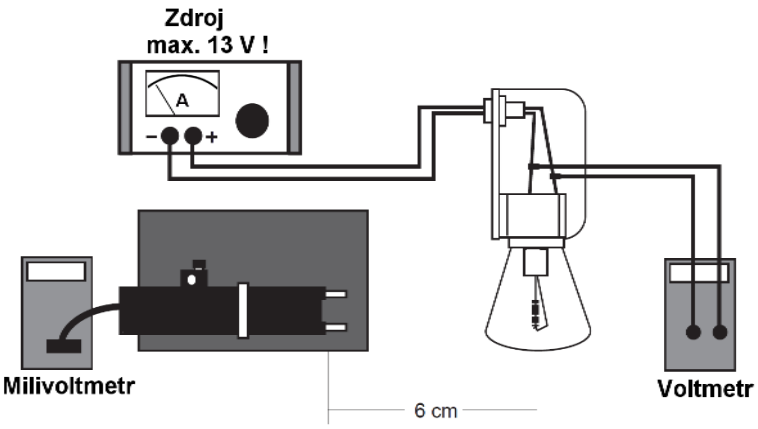


Obr. 3 Radiační senzor

Senzor je opatřen dvěma kolíky o délce 8 mm, které vymezují minimální vzdálenost od radiačního zdroje a umožňují rychlé měření na této vzdálenosti. Spektrální odezva našeho senzoru je v podstatě hladká v infračervené oblasti 0,6 až 30 μm. Pro měření je zapotřebí dobrý milivoltmetr.

A. Stefan-Boltzmannův zákon při vysokých teplotách

Cílem je ověření vztahu (6) pomocí Stefan-Boltzmannovy lampy a radiačního senzoru. Přesněji – můžeme ověřit jen to, zda je údaj senzoru úměrný čtvrté mocnině teploty. Senzor totiž není kalibrovaný, jeho výstupní napětí závisí na



Obr. 4

vzdálenosti od zdroje r (jako $1/r^2$ pro bodový zdroj záření), neznáme plochu S, ani emisivitu ε vlákna žárovky. Problémem žárovky je navíc skutečnost, že sklo propouští infračervené záření o něco méně než viditelné, což způsobuje chybu zejména při nižších teplotách vlákna, kdy je velká část energie vyzařována v infračervené oblasti a sklo je překážkou.

Uspořádání experimentu je na obr. 4. Voltmetr musí být připojen těsně u patice žárovky na drátových přívodech pomocí „krokosvorek“. Maximální přípustné napětí žárovky je 13 V!!! Radiační senzor umístěte asi 6 cm od vlákna žárovky a do stejné výšky jako vlákno. V zorném poli senzoru nesmí stát kromě žárovky žádné jiné blízké zářící objekty. Clonku senzoru ponechte trvale otevřenou (zablokovat prstencem) a mezi senzor a lampu umístěte stínící destičky stříbrným povrchem směrem k žárovce. Při nastavení nové hodnoty napětí na žárovce vždy počkejte 30 sec na ustálení poměrů. Pak vysuňte stínící destičky na 5 sekund a zaznamenejte napětí senzoru. Vzdálenost žárovka – senzor nesmíte přitom změnit!

Z naměřených dat sestrojíte graf závislosti napětí senzoru na čtvrté mocnině teploty $U_{\mathrm{det}} = \mathrm{f}(T^4)$, měl by být přímkový. Dále nakreslete závislost $U_{\mathrm{det}} = \mathrm{f}(T)$ a v tabulkovém procesoru proveďte regresi očekávanou funkcí (mocninná).

Pracovní úkol A

1) Opište si z přiloženého listu odpor vlákna žárovky při teplotě 300 K a změřte teplotu v místnosti T_{amb}.
2) Zapněte *Tepelně-radiační kostku* na výkonový stupeň **5**, aby byla předehřátá pro pracovní úkol **B**. Postavte ji co nejdále od senzoru.
3) Proveďte měření tepelného záření *Stefan-Boltzmannovy lampy* pro napětí 1 až 12 V s krokem 1 V. Pro každé napětí zaznamenejte proud žárovky I a napětí senzoru U_{det}. Hodnoty zapisujte do tabulky 2:

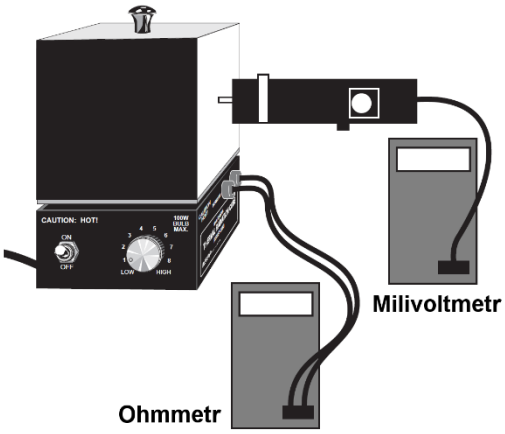
Tabulka 2: Stefan-Boltzmannův zákon při vysokých teplotách, T_{amb} = …..K, R_{300}=….. Ω

Naměřená data			Vypočtené hodnoty			
U [V]	I [A]	U_{det} [mV]	R_{T} [Ω]	R_{T}/R_{300}	T [K]	T^4 [K^4]
1,00	*0,87*	*0,18*	*1,149*	*3,401*	*805,4*	*4,209e+11*
2,00	*1,09*	*0,97*	*1,827*	*5,406*	*1188*	*1,994e+12*
3,00	...	...	...	...	...	...

4) Vypočtěte (doma) pro každé napětí odpor vlákna žárovky R_{T} a postupem uvedeným v odstavci *Stefan-Boltzmannova lampa* určete teplotu vlákna a její čtvrtou mocninu. Hodnoty uveďte též do tabulky 2.
5) Nakreslete graf závislosti napětí senzoru na čtvrté mocnině teploty $U_{\mathrm{det}} = \mathrm{f}(T^4)$. Splňuje závislost teoretické předpoklady?
6) Nakreslete graf závislosti napětí senzoru na teplotě $U_{\mathrm{det}} = \mathrm{f}(T)$. Proložte (např. v Excelu) očekávanou funkci (mocninnou), zobrazte její rovnici a zhodnoťte.
7) Proveďte regresi v předchozím úkolu ještě jednou, vyřaďte však první čtyři měření (nízké teploty). Opět zhodnoťte, pokuste se najít vysvětlení lepší shody s teorií.

B. Tepelné vyzařování různých povrchů a propustnost skla

V tomto měření otestujeme míru vyzařování různých povrchů tepelně radiační kostky a také zda propouští okenní sklo odlišně infračervené a viditelné záření. Teplota kostky se mění pomalu, proto použijte postup nastavení na listu u úlohy. Během měření na všech čtyřech stranách kostky se odpor termistoru (tj. teplota) nesmí změnit. Můžete začít s měřením, až když je odpor konstantní po dobu alespoň jedné minuty (předpokládá se, že čtyři strany dokážete změřit během minuty). Při měření senzor sejměte ze stojanu (viz obr. 5) a umístěte do středu měřené plochy tak, aby se kolíky na jeho vstupní straně dotkly povrchu (tím se zajistí konstantní vzdálenost 8 mm), otevřete clonu a zaznamenejte napětí. Po měření pak senzor umístěte do větší vzdálenosti (asi 0,5 m). Odpor termistoru převedete na teplotu podle přiložené tabulky.



Obr. 5

Pracovní úkol B

1) Proměřte tepelné vyzařování čtyř povrchů tepelně radiační kostky pro úrovně topného příkonu **4**, **5** a **6**. Data uveďte do tabulky 3:

Tabulka 3: Tepelné vyzařování rozdílných povrchů při nízkých teplotách

Topný příkon [-]:	*4*	*5*	*6*
Odpor termistoru [Ω]:			
Teplota [K]:			
Povrch	U_{det} [mV]		
černý			
bílý			
leštěný hliník			
matný hliník			

2) Umístěte senzor na stojanu asi 5 cm od černého povrchu radiační kostky a zaznamenejte údaj. Ihned poté vložte mezi senzor a kostku kousek okenního skla a opět zaznamenejte údaj. Vypněte kostku, oddalte senzor od kostky.
3) Nyní proveďte totéž měření se senzorem namířeným přímo na vyhřívací žárovku. Nejprve sejměte víko radiační kostky, položte ji opatrně na bok (pozor – horká, brát za spodní část) a připravte senzor do správné výšky a vzdálenosti od vyhřívací žárovky. Pak dejte topný příkon na maximum, kostku zapněte a rychle proveďte obě měření.
4) Zhodnoťte (doma) výsledky z bodu 1), seřaďte povrchy podle emisivity. Je pořadí nezávislé na teplotě? Jak se nazývají zářiče, jejichž emisivita nezávisí na teplotě?
5) Podle výsledků měření 2) a 3) rozhodněte, který obor (infračervené/viditelné) záření naše sklo propouští více. Vysvětlete pojem „skleníkový jev“.