

Po stopách tepla

Petr Kácovský

1 Úvod

Termovizní kamery představují fascinující nástroj, který umožňuje vizualizovat oku skryté tepelné jevy a procesy. V posledních letech se přitom stávají vzhledem k jejich setrvale klesajícím cenám stále dostupnějšími, díky čemuž pronikají také do školního prostředí. Pro studenty základních i středních škol jsou termokamery velmi atraktivní zobrazovací pomůckou, která je schopna upoutat jejich pozornost a podnítit spontánní potřebu objevovat svět okolo nás, a to doslova „v jiném světle“ – pomocí termografických měření.

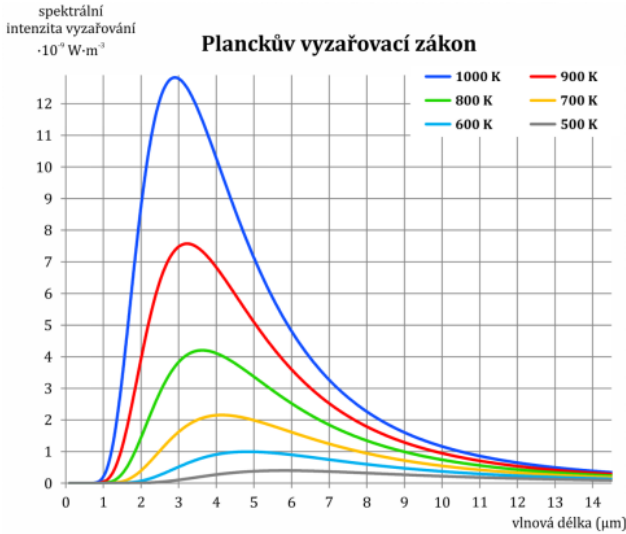
2 Teorie termografie

Každé těleso emituje do svého okolí elektromagnetické záření různých vlnových délek; toto záření někdy označujeme jako záření tepelné. Detekcí a vyhodnocením tepelného záření můžeme získat informaci o teplotním rozložení na povrchu tělesa – tímto úkolem se zabývá termografie. Text kapitoly 2 je zestručněním práce [1].

2.1 Záření absolutně černého tělesa

Absolutně černé těleso (AČT) je fyzikálním modelem objektu, který veškeré záření dopadající na jeho povrch pohlcuje, a to bez ohledu na jeho vlnovou délku. Současně je takové těleso schopné stejné množství energie prostřednictvím záření emitovat – je tedy ideálním zářičem.

AČT vyzařuje na různých vlnových délkách různé množství energie v závislosti na svojí termodynamické teplotě T . Veličina, která vyzařování popisuje, se označuje jako **spektrální intenzita vyzařování** $M_{e\lambda}^0$, $M_{e\lambda}^0 = M_{e\lambda}^0(\lambda, T)$; horní index „0“ vyjadřuje, že se zabýváme modelem AČT.



Obrázek 1: Závislost spektrální intenzity vyzařování na vlnové délce pro AČT

Závislost spektrální intenzity vyzařování na vlnové délce λ a termodynamické teplotě povrchu tělesa T popisuje formule známá jako Planckův vyzařovací zákon:

$$M_{e\lambda}^0(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1}$$

kde h je Planckova konstanta, c rychlost světla ve vakuu a k_B Boltzmannova konstanta. Graf na obr. 1 ukazuje pro několik pevně zvolených teplot průběh výše uvedené funkce jako $M_{e\lambda}^0 = M_{e\lambda}^0(\lambda)$.

Derivováním Planckova vyzařovacího zákona podle vlnové délky a následným hledáním extrémů této funkce lze najít takovou hodnotu λ_{\max} , při které je spektrální intenzita vyzařování maximální; tato vlnová délka závisí pouze na termodynamické teplotě tělesa. Tento poznatek označujeme jako **Wienův posunovací zákon** a zapisujeme ho ve tvaru:

$$\lambda_{\max} T = b,$$

kde T je termodynamická teplota povrchu tělesa, λ_{\max} vlnová délka, na které těleso vyzařuje s nejvyšší intenzitou, a konstanta $b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ mK}$.

Pokud Planckův vyzařovací zákon integrujeme přes všechny vlnové délky, dostáváme celkovou intenzitu vyzařování $M_e^0 = M_e^0(T)$; graficky jde pro danou teplotu o obsah plochy pod křivkou $M_{e\lambda}^0 = M_{e\lambda}^0(\lambda)$ na obr. 1. Celková

intenzita vyzařování M_e^0 představuje energii, která je vyzařena z 1 m^2 povrchu AČT za 1 sekundu, tj. $[M_e^0] = Js^{-1}m^{-2} = Wm^{-2}$.

$$M_e^0(T) = \int_0^\infty M_{e\lambda}^0(\lambda, T) d\lambda = 2hc^2 \int_0^\infty \frac{1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\frac{hc}{e\lambda k_B T} - 1} d\lambda = \sigma T^4,$$

kde $\sigma = \frac{2\pi^5 k_B^4}{15h^3 c^2} \doteq 5,67 \cdot 10^{-8} Wm^{-2}K^{-4}$ je Stefanova – Boltzmannova konstanta; tento vztah je znám jako **Stefanův – Boltzmannův zákon** a je klíčem k fungování termokamer.

2.2 Šedá tělesa a selektivní zářiče

AČT je ovšem fyzikální idealizací – reálná tělesa nikdy veškeré dopadající záření zcela nepohltní, ale část jej vždy odrazí, případně jimi část prochází. Reálné těleso navíc vždy vyzařuje méně energie než AČT o stejné teplotě na stejné vlnové délce. Pokud označíme spektrální intenzitu vyzařování reálného tělesa $M_{e\lambda}$ (tj. již bez indexu „0“), platí:

$$\varepsilon = \frac{M_{e\lambda}(\lambda, T)}{M_{e\lambda}^0(\lambda, T)} < 1,$$

kde $\varepsilon(\lambda, T)$ je tzv. **spektrální emisivita** (dále již jen emisivita), která v podstatě udává, jakou část záření emituje na příslušné vlnové délce reálné těleso ve srovnání s AČT téže teploty.

Jak je uvedeno výše, emisivita povrchů je obecně závislá na vlnové délce emitovaného záření. Je-li tato závislost významná, je záření některých vlnových délek tělesem vysíláno velmi „ochotně“, naopak jiné téměř vůbec – hovoříme pak o takzvaných **selektivních zářičích**.

Pokud je závislost emisivity na vlnové délce pouze slabá a lze ji – alespoň v nějakém intervalu vlnových délek – zanedbat, hovoříme o tzv. **šedém tělese**, které je pro termografii užitečným kompromisem mezi AČT a selektivními zářiči. Pro šedé těleso je emisivita konstantou: $\varepsilon \neq \varepsilon(\lambda, T)$; je-li tedy například emisivita šedého tělesa $\varepsilon = 0,75$, vyzařuje takové těleso na každé vlnové délce za 1 sekundu 75 % energie, které by na ní vyzařovalo absolutně černé těleso o stejné teplotě (obojí přepočteno na 1 m^2).

Pro šedé těleso s povrchovou teplotou T se podoba Wienova posunovacího zákona nemění a Stefanův – Boltzmannův zákon má tvar:

$$M_e(T) = \varepsilon \sigma T^4.$$

Pro potřeby termografických měření ve výuce lze obvykle většinu běžných povrchů modelem šedého tělesa aproximovat.

3 Využití termografie ve fyzikálním vzdělávání

Při výuce fyziky na základní i střední škole nacházejí termovizní kamery své přirozené využití v klíčových oblastech termiky a termodynamiky – jmenovitě při studiu skupenských přeměn, tepelné vodivosti, změn vnitřní energie, kalorimetrických úvahách apod. Další oblastí, která je potenciálně zajímavá, je pak ohmické zahřívání vodičů vlivem Joulova tepla. Níže jsou uvedeny některé náměty na experimenty, které lze do výuky snadno zařadit:

- **Průchod vzdáleného infračerveného záření (far infrared – FIR) materiálem:** Pro studenty bývá zajímavé studovat, nakolik se při průchodu různými materiály liší chování vzdáleného infračerveného záření (jehož zdrojem jsou předměty pokojové teploty) oproti světlu. Zatímco sklo je pro viditelné záření průhledné, v oblasti FIR se chová jako zrcadlo; naopak, například hojně používané obaly z nízkohustotního polyethylenu jsou ve FIR průhledné, ale ve viditelném světle nikoliv.
- **Tepelná vodivost plastu a kovu:** Studenti položí ruce současně na plastovou a kovovou matně natřenou destičku a sledují, jakým způsobem se na nich zvyšuje teplota. Zatímco kovová destička se prohřeje téměř rovnoměrně v celém svém objemu, plast zůstane zahřátý pouze v místě kontaktu s dlaní.
- **Přeměna kinetické energie na energii vnitřní:** Studenti udeří gumovou palicí do polystyrenové podložky a sledují přitom její povrch. Termovizní kamera odhalí, že v místě dopadu dojde lokálně ke zvýšení teploty řádově o jednotky stupňů Celsia v důsledku přeměny kinetické energie palice na vnitřní energii palice i podložky. Ohřev je samozřejmě patrný nejen na polystyrenové podložce, ale také na samotné palici.
- **Ochlazování vypařováním:** Vypařující se kapalina odnímá svému okolí skupenské teplo vypařování, čímž se její okolí ochlazuje. Snadným způsobem, jak toto demonstrovat, je použít lihový fix a napsat jím na papír jakýkoliv nápis – termovizní kamera pak umožní ukázat, že místa pokrytá inkoustem jsou v důsledku intenzivního vypařování jejich lihové komponenty výrazně chladnější než okolní papír.
- **Jak hřeje světelné zdroje?** Je známým faktem, že klasická žárovka s wolframovým vláknem je velmi neefektivním světelným zdrojem, ovšem překvapivě dobrým „topením“ – většina energie je emitována ve formě infračerveného záření. Tuto skutečnost lze snadno ověřit tím, že vedle sebe postavíme lampičku s klasickou a lampičku s úspornou žárovkou

(poskytující stejný světelný tok), současně je rozsvítíme a pozorujeme tepelnou emisi do okolí. Kromě toho, že žárovka výrazně zahřívá svůj povrch i své okolí, lze navíc ukázat, že baňka žárovky se zahřívá vždy odshora, kam stoupá zahřátá ochranná atmosféra wolframového vlákna.

- **Joulovo teplo:** Ta část elektrické energie, která se při průchodu vodičem spotřebuje na zahřátí vodiče a jeho okolí, je označována jako Joulovo teplo a je přímo úměrná odporu vodiče a kvadrátu procházejícího proudu. Lze tak například ukázat, že při sériovém zapojení různých rezistorů stejné geometrie se nejvíce zahřívají ty s největším odporem, zatímco při zapojení paralelním ty s odporem nejmenším (...neboť proud jimi procházející je největší).

Celý pracovní list, který dostali účastníci Letní školy k dispozici, je volně dostupný na webových stránkách [2].

4 Závěr

Postupně rostoucí množství termovizních kamer používaných ve školách vede k přirozené potřebě zajímavých experimentů, které by na relevantních místech obohatily výuku fyziky a využily atraktivitu této technologie k získání pozornosti a zájmů studentů. V rámci Letní školy měli účastníci (studenti i učitelé) možnost vyzkoušet si na pěti stanovištích celkem 18 experimentů využívajících termovizní kameru pro měření, která jsou s běžným kontaktním teploměrem neuskutečnitelná. Většina těchto experimentů včetně vzorových výsledků a technických a metodických poznámek je detailněji popsána ve sbírce [3].

Reference

- [1] KÁCOVSKÝ, P. *Experimentujeme s termovizní kamerou*. Dostupné online: <http://kdf.mff.cuni.cz/kacovsky/termokamera.pdf>
- [2] KÁCOVSKÝ, P. *Infračervený svět – Fyzika s termokamerou*. Dostupné online: http://kdf.mff.cuni.cz/kacovsky/ir_svet.pdf
- [3] Sbíрка fyzikálních pokusů. Dostupné online: <http://fyzikalnipokusy.cz/cs>