

Fyzika očima termografie

PETR KÁCOVSKÝ

Katedra didaktiky fyziky MFF UK

Termovizní kamery pracující ve vzdáleném infračerveném oboru umožňují vizualizaci mnoha fyzikálních jevů, které jinak zůstávají našim očím skryty – velmi často jde o jevy, které se manifestují teplotními změnami na površích těles. Tato schopnost činí termovizní kamery vhodným pomocníkem zejména při výuce termodynamiky, jak již bylo popsáno například v [1] či [2]. Následující příspěvek ovšem poukazuje na využití termografie v jiných partiích fyziky, kde jsou tepelné jevy vnímané spíše jako vedlejší průvodní efekt.

Poznámka: Následující experimenty byly provedeny s použitím termovizní kamery FLIR i7. Při černobílém tisku termogramů platí, že tmavé plochy odpovídají místům s nízkou teplotou, zatímco světlé (bílé) plochy místům teplejším.

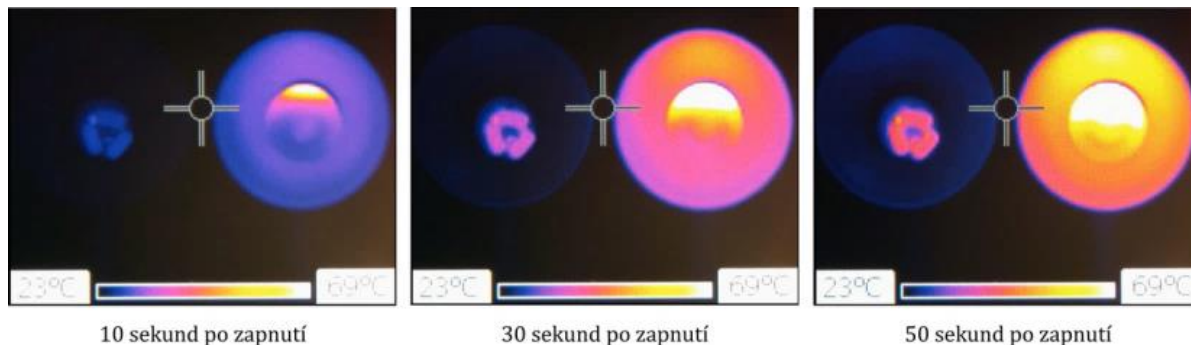
Experiment 1: Světelná účinnost kompaktní zářivky a klasické žárovky

Pomůcky: Termovizní kamera, klasická žárovka a kompaktní zářivka.

Ke srovnání efektivity zdrojů světla se obvykle používá tzv. světelná účinnost zdroje K , která vyjadřuje, jaký světelný tok poskytuje zdroj světla na 1 W svého příkonu.

Hodnoty světelné účinnosti můžeme snadno odhadnout z údajů, které výrobci světelných zdrojů udávají na obalech svých produktů; v našem experimentu budeme používat klasickou žárovku s nominálními parametry 700 lm a 60 W ($K \approx 12$ lm/W) a kompaktní zářivku (nesprávně „úspornou žárovku“) 700 lm a 13 W ($K \approx 54$ lm/W).

Z tohoto srovnání je patrné, že klasická žárovka pošle z každého wattu svého příkonu do světelného oboru výrazně méně energie než kompaktní zářivka; o to více tedy emituje v infračervené oblasti spektra. Tento obecně známý fakt ukazuje obr. 1, na kterém je vždy v levé části každého snímku kompaktní zářivka a v pravé části klasická žárovka. Zatímco zářivka zůstává poměrně chladná a její okolí se prakticky nezahřívá, klasická žárovka rychle dosahuje vysoké teploty a prohřívá celou konstrukci lampičky.



Obr. 1. Kompaktní zářivka (vlevo) a klasická žárovka (vpravo) krátce po zapnutí

Experiment 2: Proudění tam, kde byste ho nečekali

Pomůcky: Termovizní kamera, klasická žárovka.

Při pozorném sledování ohřevu baňky klasické žárovky na obr. 1 si lze všimnout toho, že její teplota roste odshora, spodní část se ohřívá jako poslední. Z této situace lze udělat pro žáky problémovou úlohu – proč zahřívání probíhá právě takto? Zopakujeme-li experiment vícekrát, zjistíme, že nejde o nahodilý jev, ale skutečně o kauzální souvislost. Žáci pravděpodobně přijdou po nějaké chvíli se správným vysvětlením – tj. tím, že plyn uvnitř baňky (ochranná atmosféra vlákna) se od vlákna ohřívá, snižuje svoji hustotu a proudí vzhůru, kde tak roste teplota nejrychleji. Dostáváme tak učebnicový příklad tepelné výměny prouděním.

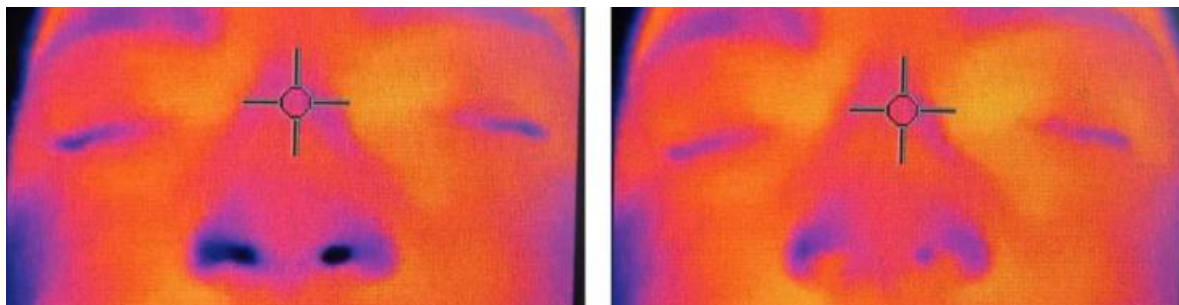
Pokud chceme tuto problematiku dále rozvíjet, můžeme nyní žáky vyzvat, aby přišli s návrhem, jak tuto hypotézu – tj. že jde o proudění – experimentálně potvrdit. Nejjednodušší způsob, jak to udělat, je otočit žárovku v tíhovém poli tak, aby se doposud spodní část žárovky ocitla nahoře a horní (zahřátá) naopak dole. Nejteplejší část ochranné atmosféry začne ihned putovat proti směru tíhové síly a po několika sekundách se obnoví původní stav.

Experiment 3: Teplotní změny na nosní sliznici

Pomůcky: Termovizní kamera, dobrovolník.

Primární vstupní cestou vzduchu do organismu zdravého člověka je nosní dutina, ve které je vstupující vzduch filtrován řasinkovým epitelem a tím zbavován prachu a nečistot. Z čistě fyzikálního hlediska dochází ve skořepinách dutiny nosní ke zvlhčení vzduchu a k jeho ohřátí před vstupem do plic na teplotu blízkou vnitřní teplotě těla. Naopak při výstupu vzduchu z organismu zde dochází k jeho částečnému ochlazení tak, aby tělo vydechováním neztrácelo velké množství tepla; nosní dutina tedy plní funkci jakéhosi tepelného výměníku.

Při běžné pokojové teplotě je každopádně vydechovaný vzduch teplejší než vzduch nadechovaný, a právě to budeme pomocí termovizní kamery vizualizovat. Přesněji, nebudeme měřit přímo teplotu proudícího vzduchu, ale sliznice nosní dutiny, která se vydechovaným (nadechovaným) vzduchem ohřívá (ochlazuje). Obr. 2 ukazuje, že během nádechu (vlevo), kdy do nosní dutiny vstupuje vzduch o pokojové teplotě, se ústí nosních dírek prochlazuje, zatímco při výdechu (vpravo), kdy tělo opouští ohřátý vzduch, k tomuto jevu nedochází.



Obr. 2. Teplotní změny na nosní sliznici – vlevo nádech, vpravo výdech

Experiment 4: Skupenské teplo vypařování

Pomůcky: Termovizní kamera, zvýrazňovač na alkoholové bázi, inkoustová tiskárna.

Při vypařování kapaliny z povrchu předmětu opouštějí kapaliny částice s nejvyšší kinetickou energií; průměrná energie zbývajících částic tak klesá a povrch, na kterém vypařování probíhá, se ochlazuje. Z makroskopického hlediska bychom řekli, že kapalina odebírá povrchu skupenské teplo vypařování.

Pomocí termovizní kamery můžeme snadno ukázat, že k tomuto ději dochází i v situacích, kde bychom to možná nečekali – obr. 3 ukazuje text napsaný zvýrazňovačem (vpravo) a text vytištěný na inkoustové tiskárně (vlevo). V obou případech je zřejmé, že místa pokrytá inkoustem jsou vlivem odpařování obsažených rozpouštědel chladnější než zbytek papíru.

ZMĚNA VNITŘNÍ ENERGIE KONÁNÍM PRÁCE: ZATLŮKÁNÍ HŘEBÍKU

Cíl pokusu

Ukážeme, jak při zatlůkání hřebíku do dřeva roste teplota hřebíku i dřeva.

Teorie

První termodynamický zákon ve tvaru:

$$\Delta U = W + Q,$$

kde ΔU je změna vnitřní energie systému, W je práce dodaná do systému a Q dodané teplo, povoluje změnu vnitřní energie libovolné termodynamické soustavy (nevyměňující s okolím částice) právě dvěma způsoby - tepelnou výměnou a konáním mechanické práce. V našem případě koná mechanickou práci kladivo zatlůkající hřebík do dřeva. Tření mezi hřebíkem a prkénkem vede k rozostření částic na styčných plochách kovu a dřeva, čímž teplota obou materiálů roste.

Pomůcky

Termovizní kamera, prkénko, kladivo, hřebík (obr. 1).

Postup

Hřebík povolna zatlůkáme do prkénka. Na termovizní kamerě přitom pozorujeme růst teploty v místě vsunutí hřebíku do dřeva. Místo, ve kterém roste die infračervených smíků teplota, je místem vsunutí hřebíku do prkénka. Vlastní hřebík není na vidětu příliš patrný, po většinu experimentu je jeho teplota srovnatelná s teplotou okolí.

Vzorový výsledek

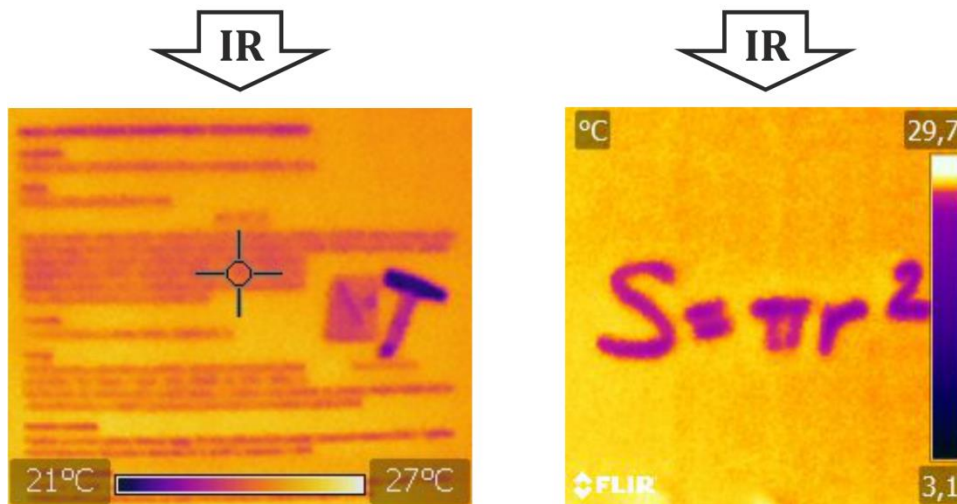
Úspěšné provedení pokusu ilustruje [video](#). Při jeho přípravě byla použita termovizní kamera FLIR i7. Teplotní rozsah škály barev byl zvolen v intervalu 24 °C až 30 °C, emisivita $\epsilon = 0,95$.

Technické poznámky

Obecně je vhodné volit hřebíky s matným povrchem. Vyvarujeme se tak problémům s velmi rozdílnou emisivitou dřeva a lesklého kovu, což může vést k chybnému vyhodnocení teploty hřebíku.



Obrázek 1: Pomůcky



Obr. 3. Vlevo odpařování inkoustu z vytištěné stránky, vpravo ze stopy zvýrazňovače

Experiment 5: Joulovo teplo na vlastní oči

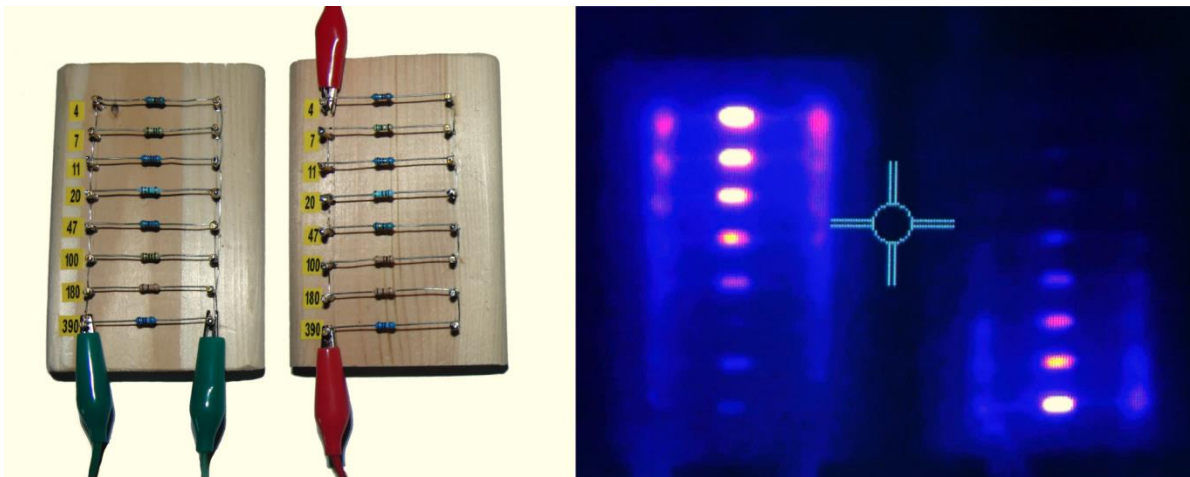
Pomůcky: Termovizní kamera, vhodná sada rezistorů, plochá baterie.

Při průchodu elektrického proudu I vodičem o odporu R se vnitřní energie vodiče za čas t zvýší o $Q_J = RI^2t$, kde Q_J je tzv. Joulovo teplo. Navenek se tento nárůst vnitřní energie manifestuje zahřátím vodiče, které můžeme termovizní kamerou snadno detekovat.

Pro potřeby následujícího experimentu byly vyrobeny dvě identické sady rezistorů, jednou spojeny sériově (celkový odpor asi 760 Ω) a jednou paralelně (celkový odpor 1,7 Ω). Na obr. 4 jsou sady zachyceny tak, že odpor rezistorů směrem dolů roste.

Při paralelním zapojení je napětí na všech rezistorech stejné a proud každým z nich lze dopočítat pomocí Ohmova zákona, takže Joulovo teplo lze vyjádřit jako $Q_J = \frac{U^2 t}{R}$. Největší Joulovo teplo se tedy bude vyvíjet na „horních“ rezistorech s nejmenším odporem.

Při sériovém zapojení je proud všemi rezistory stejný a největší Joulovo teplo se tak vyvíjí na „dolních“ rezistorech s největším odporem – ty se proto nejvíce zahřívají.



Obr. 4. Reálné provedené odporových sad a termovizní snímek; vlevo vždy paralelní zapojení, vpravo vždy sériové zapojení.

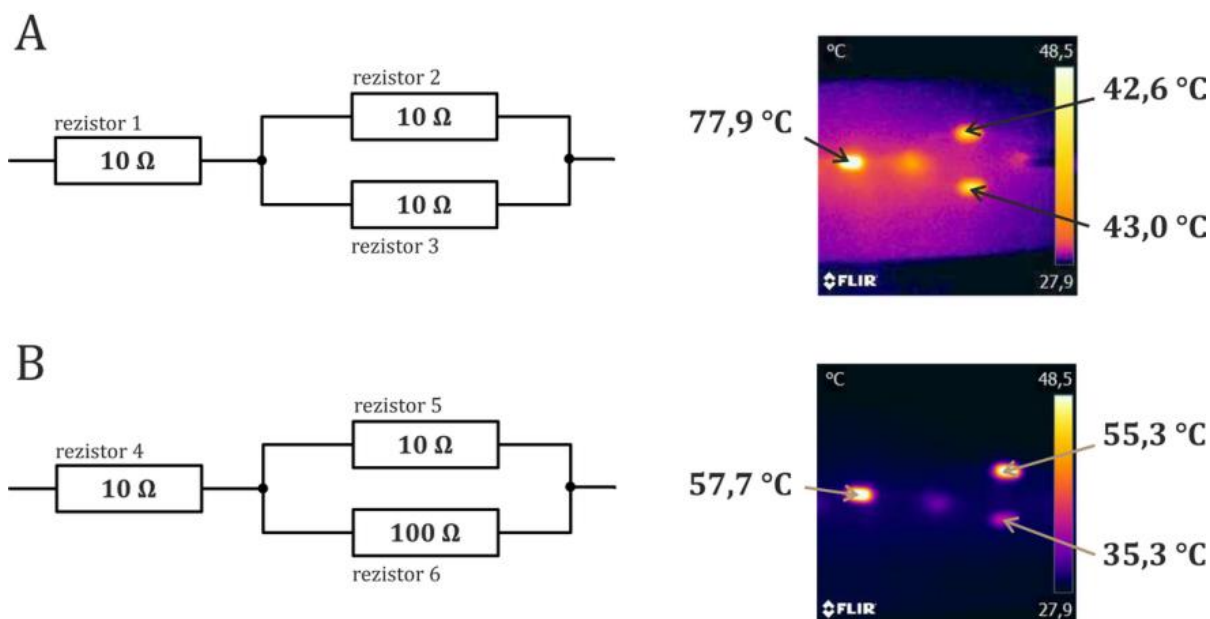
Experiment 6: Termovizní kameru namísto ampérmetru?

Pomůcky: Termovizní kamera, rezistory 10 Ω a 100 Ω, plochá baterie.

Na experiment 5 lze navázat dalšími rozšiřujícími pokusy. Kombinací rezistorů lze spájet různá schémata a sledovat zahřívání jednotlivých součástí při průchodu proudem. Pro tento příspěvek byla připravena dvě zapojení A a B (obr. 5 vlevo), ke kterým byla v obou případech připojena plochá baterie 4,5 V. Výsledné termogramy jsou vidět na obr. 5 vpravo.

V případě zapojení A se proud rozdělí do větví obvodu rovnoměrně – rezistory 2 a 3 se zahřívají přibližně stejně, zatímco rezistor 1, kterým teče dvojnásobný proud, hřeje výrazně více.

V případě zapojení B je proud spodní větví obvodu desetinový oproti větvi horní a desetinové je v tomto srovnání také Joulovo teplo, které se ve spodní větvi vyvíjí – rezistor 6 se tedy prakticky nezahřívá, zatímco rezistory 4 a 5, kterými teče veškerý, resp. téměř veškerý proud obvodem, se zahřívají přibližně stejně.



Obr. 5. Vzorový výsledek k experimentu č. 6

Kde najít další materiály a rady

Všechny výše uvedené experimenty jsou detailněji popsány a zdokumentovány v elektronické *Sbírce fyzikálních pokusů* [3]. Součástí těchto pokusů je také dokument [4], který stručně shrnuje zásady práce s termovizní kamerou a dává doporučení, čemu se při práci s ní ve výuce vyhnout.

Literatura

- [1] Kácovský, P. *S termokamerou po stopách tepla*. In: Sborník konference Veletrh nápadů učitelů fyziky 19. Ed.: Vochozka, V., Bednář, V., Kéhar, O., Randa, M. Západočeská univerzita v Plzni, 2014, s. 69–73.
- [2] Kácovský, P. *Experimenty s termovizní kamerou*. In: Sborník příspěvků ze semináře Jak získat žáky pro fyziku? 2. Ed.: Seifert. JČMF Praha 2015.
- [3] <http://fyzikalnipokusy.cz/cs>
- [4] https://physicstasks.eu/media/01584/Experimentujeme_s_termovizni_kamerou.pdf