

Experimenty s termovizní kamerou

Petr Kácovský

KDF MFF UK, kontakt: petr.kacovsky@mff.cuni.cz

Abstrakt

Tento příspěvek je velmi stručnou kompilací textů vytvářených pro elektronickou Sbírkou fyzikálních pokusů [1] a jeho cílem je představit přibližně deset jednoduchých experimentů, které lze provést s termovizní kamerou. Tyto experimenty (a mnohé další) jsou pak detailněji popsány právě v uvedené sbírce.

Termovizní kamera ve výuce

Princip fungování

Termovizní kamery patří mezi zařízení umožňující bezkontaktní měření teploty povrchů těles, a to na základě analýzy záření, které každé těleso právě prostřednictvím svého povrchu emituje do okolí; tato metoda je známá jako termografie. Pro vyhodnocení teploty používají kamery poměrně robustní výpočetní vztahy, které zahrnují různé korekce (např. na vlastní záření měřicího čipu nebo na záření atmosféry), ale principiálně jsou založeny na Stefanově-Boltzmannově zákoně pro šedé těleso ve tvaru $I = \varepsilon\sigma T^4$, kde I je intenzita vyzařování ve wattech na metr čtvereční, ε emisivita povrchu, σ Stefanova-Boltzmannova konstanta a T termodynamická teplota povrchu.

Právě emisivita ε je zcela stěžejním parametrem všech termografických měření a její správné pochopení zásadně ovlivňuje vypovídací hodnotu všech prováděných kvalitativních a zejména pak kvantitativních experimentů. Emisivitu lze nejnadhěji vnímat jako údaj, který na škále od 0 do 1 informuje o tom, nakolik se měřený povrch blíží svými vlastnostmi modelu tzv. absolutně černého tělesa. Vysoké hodnoty emisivity vykazují povrchy, které se blíží ideálním zářičům – například emisivita 0,95 značí, že povrch vyzařuje 95 % energie, které by vyzařovalo absolutně černé těleso o stejné teplotě; naproti tomu tělesa s nízkou emisivitou (např. lesklé kovy s hodnotami $\varepsilon < 0,05$) vyzáří ve srovnání se stejně zahřátým absolutně černým tělesem pouze zlomek energie.

Většina matných povrchů vykazuje vysoké emisivity mezi 0,85 a 0,95, což jsou zároveň hodnoty implicitně nastavené jako výchozí ve většině termovizních kamer. Z tohoto důvodu je výhodné používat při měřeních výhradně matné objekty; původně lesklé kovové předměty byly pro potřeby použití v následujících experimentech opatřeny černým matným nátěrem.

Možnosti vs. dostupnost

Zásadní předností termovizních kamer je možnost zkoumat teplotní rozložení na povrchích těles a názorně ho vizualizovat. Tato schopnost otevírá velké výukové možnosti zejména při probírání látky zaměřené na tepelné jevy (vypařování kapalin, pohlcování tepelného záření apod.), ale také v některých partiích mechaniky (třecí síly) či elektřiny a magnetismu (zahřívání sériově či paralelně zapojených rezistorů apod.). Další možná školní využití se nabízejí v dalších přírodovědných disciplínách – biologii a chemii.

V českém kontextu je používání termovizních kamer ve fyzikálním vzdělávání patrně ještě stále na svém počátku a jedna z hlavních příčin tohoto stavu je nasnadě – pořizovací cena v řádech desítek tisíc korun je jednoduše stále velmi vysoká. Navzdory postupně klesajícím cenám, které už prolomily hranici 30.000 Kč, tak zůstávají termo-

vizní kamery stále pro mnoho škol zbožím zcela nedostupným; na druhou stranu postupně roste počet škol, které v rámci různých jednorázových projektů k zakoupení jedné kamery do výuky přistoupily.

Pokud nechceme investovat do plnohodnotné termovizní kamery, nabízí se alternativa v podobě zařízení FLIR One [2], jenž má podobu ochranného krytu (obr. 1), který je možné nasadit na iPhone 5 (nebo 5s) a ovládat pomocí stejnojmenné aplikace. S rozlišením 60x80 pixelů, teplotním rozsahem 0 °C až 100 °C a cenou do 10.000 Kč představuje toto řešení pro majitele iPhoneů rozumný kompromis mezi kvalitou termovizního zobrazení a cenou zařízení.



Obrázek 1: Zařízení FLIR One

Kvalitativní experimenty s termovizní kamerou

Následující přehled stručně popisuje jednoduché kvalitativní experimenty, které lze s pomocí termovizní kamery provádět ve výuce; jak již bylo uvedeno v abstraktu, jejich rozsáhlejší popis včetně vzorových výsledků, fotodokumentace, videosekvencí či metodických poznámek lze nalézt ve Sbírce fyzikálních pokusů [1], která vzniká na Katedře didaktiky fyziky MFF UK.

Ve všech případech byla při experimentování využita termovizní kamera FLIR i7. Pokud se kdekoli v následujícím textu hovoří o infračerveném záření, je jím myšleno dlouhovlnné IR o vlnových délkách kolem 10 μm .

1. Vrtání do dřeva

Pomůcky: termovizní kamera, prkénko, vrtačka nebo mikrovrtáčka.

Jednoduchý experiment lze použít v souvislosti se zvyšováním vnitřní energie mechanickou prací prostřednictvím třecích sil. Na to, abychom se přesvědčili, že při vrtání do prkénka se vrták i dřevo zahřívá, samozřejmě nepotřebujeme termovizní kameru, ale s její pomocí lze situaci názorně předvést včetně takových nuancí, jako že kov s malou měrnou tepelnou kapacitou se v porovnání se dřevem zahřívá o poznání pomaleji apod.

2. Úder palicí

Pomůcky: termovizní kamera, polystyrenová podložka, gumová palice (event. kladivo).

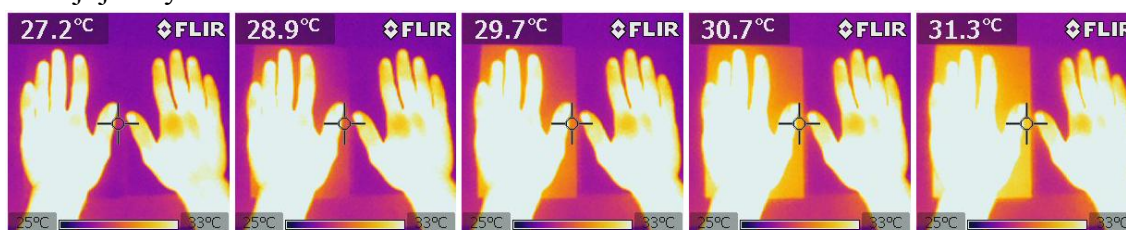
Když ve školním prostředí hovoříme o zákonu zachování mechanické energie, obvykle zmiňujeme, že v reálném světě se s platností tohoto zákona setkáme jen stěží – pingpongový míček puštěný na zem nevyskočí po odrazu do stejné výšky a jeho pohyb

se po krátké chvíli zcela utlumí. V takových okamžicích se ve fyzice zaklínáme přeměnou kinetické energie na elastickou energii podložky a na teplo, ovšem ne vždy máme možnost toto tvrzení podložit na školní úrovni důkazem – skutečně se podložka v místě dopadu předmětu zahřívá? Tento experiment může být za takový důkaz považován – je z něj zřejmé, že při každém úderu gumové palice do polystyrenové podložky se v místě impaktu zvyšuje teplota. Experiment lze provést i s obyčejným kladivem, pak je ale část tepla odvedena jeho kovovým tělem.

3. Tepelná vodivost plastu a kovu

Pomůcky: termovizní kamera, kovová a plastová destička přibližně rozměru lidské dlaně (tip: v tomto experimentu použitá polypropylenová destička byla vyříznuta z desek kancelářského rychlovazače).

Jednoduchým experimentem názorně přiblížíme rozdíl mezi tepelným vodičem a izolantem. Položíme současně jednu dlaň na kovovou a druhou dlaň na plastovou destičku a po dobu cca 20 sekund sledujeme obě destičky termovizní kamerou. Zatímco kovová destička se za tuto dobu téměř rovnoměrně prohřeje, plastová zvýší svoji teplotu pouze v místě kontaktu s přiloženou dlaní – plast coby tepelný izolant neumožní distribuci tepelné energie do okrajových částí destičky (obr. 2). Když ovšem budeme po sejmutí dlaní z destiček hledat jejich absolutně nejteplejší místo, vždy jej najdeme právě na plastové destičce – izolant téměř neumožňuje vedení tepla, teploty v něm se tedy nemají jak vyrovnávat.



Obrázek 2: Tepelná vodivost vizualizovaná pomocí termovizní kamery – vlevo kovová, vpravo plastová destička

4. Propustnost různých plastů pro infračervené záření

Pomůcky: termovizní kamera, těleso o stálé teplotě vyšší než je teplota pokojová (delší dobu puštěný počítač, rychlovarná konvice s vroucí vodou a otevřeným víkem apod.), filtry z různých plastů.

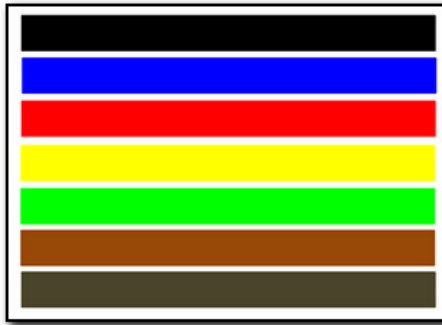
Zafixujeme termovizní kameru tak, aby stále snímala vybraný předmět o znatelně odlišné teplotě ve srovnání s okolím. (V tomto experimentu byla vybraným předmětem rychlovarná konvice s kontinuálně se vařící vodou.) Postupně mezi kameru a vybraný předmět umísťujeme jednotlivé plastové folie a sledujeme, jak se mění kamerou snímáný obraz. Čím více je původní obraz zeslaben, tím více infračerveného záření bylo příslušnou folií pohlceno.

Pokud máme k dispozici folie přibližně stejné tloušťky (lze ověřit například mikrometrickým měřítkem), můžeme přímo porovnávat jednotlivé plasty mezi sebou - ukazuje se, že zatímco polypropylen a zejména polyethylen propouštějí poměrně velkou část dlouhovlnného infračerveného záření, polyethylentereftalát a polystyren jej naopak velmi účinně pohlcují.

5. Pohlcování infračerveného záření povrchy různých barev

Pomůcky: Termovizní kamera, čtvrťka s vytištěnými pruhy různých barev (viz obrázek 3), klasická žárovka (v tomto experimentu s výkonem 40 W).

Položíme čtvrťku s barevnými pruhy na stůl a ze vzdálenosti řádově desítek centimetrů na ni svítíme klasickou žárovkou (viz video v následující sekci). Termovizní kamerou pozorujeme, jakým způsobem se mění teplota jednotlivých barevných proužků. Je patrné, že významněji se zahřívají pouze dva nejtmaší odstíny, zatímco plochy ostatních barev nárůst teploty téměř nevykazují.



Obrázek 3: Čtvrťka s pruhy různých barev

6. Tepelné účinky laserového svazku

Pomůcky: Termovizní kamera, černá polystyrenová destička, laserové ukazovátko s držákem, který ho zafixuje ve vodorovné poloze. Použité laserové ukazovátko mělo jmenovitý výkon do 5 mW a pracovalo na vlnové délce 532 nm.

Cílem experimentu je ukázat, že také viditelná komponenta elektromagnetického záření je nositelem energie, jejíž absorpce způsobuje zahřívání předmětů.

Zafixujeme laserové ukazovátko vůči černé destičce tak, aby stopa mířila stále do jednoho místa (viz obrázek 4). Je výhodné, pokud současně můžeme zařídit, aby ukazovátko svítilo nepřerušovaně (například přelepením izolepy přes zapínací tlačítko). Termovizní kamerou sledujeme osvětlené místo. V řádu několika sekund až desítek sekund může teplota lokálně vystoupat až na 100 °C.



Obr. 4: Zafixování laseru vůči polystyrenové destičce

7. Chladicí účinky sprejů

Pomůcky: Termovizní kamera, sprej (vhodné jsou obecně deodoranty, insekticidy, barvy ve spreji, spreje na odstranění prachu apod.), tepelně izolující podložka pro aplikaci spreje (dřevo, plast apod.).

V experimentu budeme demonstrovat rychlý pokles teploty způsobený intenzivním odpařováním kapaliny rozptýlené aerosolovým rozprašovačem (sprejem). Aplikujeme sprej na povrch s malou tepelnou vodivostí a sledujeme teplotní změny nastávající v důsledku odpařování rozprašované kapaliny. Protože jde o poměrně rychlé děje, při kterých může být chvilková nepozornost klíčová, je vhodné aplikaci spreje pro žáky několikrát za sebou zopakovat.

Věnujte velkou pozornost výběru spreje! Použití deodorantu by mělo být bezproblémové, naopak vdechování aerosolů některých průmyslových sprejů může být pro citlivější žáky dráždivé, zvažte proto jejich použití v uzavřených a špatně větratelných místnostech! Venku lze experimentovat bez omezení. Pozor, i běžné repelenty či deodoranty jsou schopny krátkodobě snížit teplotu povrchu o pokojové teplotě o řádově desítky stupňů Celsia a způsobit tak při masivním použití omrzliny!

8. Psaní zvýrazňovači a popisovači na alkoholové bázi, tisk

Pomůcky: Termovizní kamera, papír, zvýrazňovač či jiný popisovač.

Experiment ukazuje, že s chladicím efektem provázejícím vypařování kapalin se můžeme setkat například při psaní fixy (zvýrazňovači) nebo při tisku na inkoustové tiskárně. Zvýrazňovače, resp. popisovače obecně jsou psací potřeby založené na aplikaci inkoustu prostřednictvím pórovité houbovitě špičky. Dříve se jako těkavá součást inkoustů využívaly aromatické uhlovodíky jako toluen či xylen, současné inkousty jsou připravovány na bázi alkoholů, například 1-propanolu, 1-butanolu nebo kresolů.

Po aplikaci na papír se alkoholová komponenta inkoustu rychle odpařuje, což způsobuje lokální pokles teploty v místě aplikace. Na papír tedy můžeme nakreslit libovolný obrazec (křivku, písmeno...) a termovizní kamerou jej sledovat – v místě aplikace lokálně poklesne teplota. Podobný obrázek se nám naskytne, když termovizní kameru namíříme na stránku textu čerstvě vtištěnou na inkoustové tiskárně (obr. 5).

ZMĚNA VNITŘNÍ ENERGIE KONÁNÍM PRÁCE: ZATLOUKÁNÍ HŘEBÍKU

Cíl pokusu
Ukážeme, jak při zatloukání 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 zatloukající hřebík do dřeva. Tření mezi hřebíkem a prkénkem vede k rozkmitávání částic na styčných plochách kovu a dřeva, čímž teplota obou materiálů roste.

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

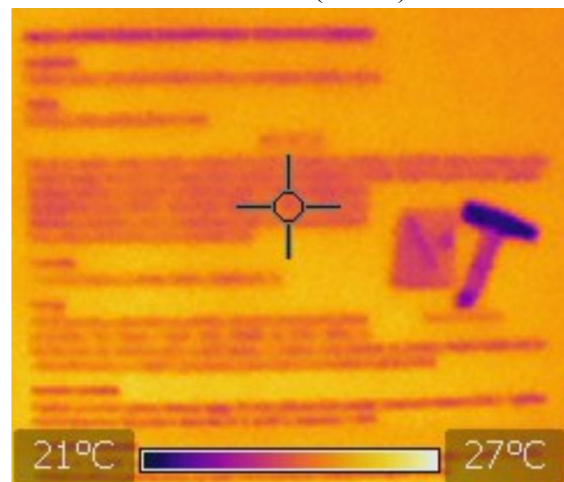
Postup
Hřebík povolně zatloukáme do prkénka. Na termovizní kameře přitom pozorujeme růst teploty v místě vniku hřebíku do dřeva. Místo, ve kterém roste, dle infračervených snímků teplota, je místem vniku hřebíku do prkénka. Vlastní hřebík není na videu příliš patrný, po většinu experimentu je jeho teplota 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. 5: Čerstvě vtištěná stránka na inkoustové tiskárně ve viditelném a IR oboru

9. Odpařování vody a lihu

Pomůcky: Termovizní kamera, dva kelímky, voda a technický lih o pokojové teplotě, dvě brčka.

Připravíme si dva kelímky, jeden naplníme vodou, druhý stejným množstvím technického lihu; obě kapaliny by měly mít na začátku experimentu pokojovou teplotu. Kelímky sledujeme termovizní kamerou. Současně ponoříme do obou kelímků identická brčka a po několika sekundách je vyjmeme. Sledujeme, jak se bude teplota brček měnit. Kapaliny se z brček odpařují a odnímají jim skupenské teplo vypařování, teplota obou brček tedy klesá; pokles je výraznější v případě brčka ponořeného do lihu, který se odpařuje intenzivněji.

10. Kondenzace vodních par

Pomůcky: Termovizní kamera, kelímek s vodou o teplotě nepatrně nižší, než je teplota okolí (např. o 2 °C apod.), list papíru.

Naším cílem bude vizualizovat nárůst teploty způsobený kondenzací vodní páry. Naplníme kelímek vodou a překryjeme jeho vrchní okraj listem papíru. Pozorujeme změnu teploty papíru termovizní kamerou. V místě, kde papír zakrývá hladinu vody, registrujeme nárůst teploty o cca 1 °C. Tento nárůst je dočasný, pak se opět začíná ustavovat termodynamická rovnováha s okolím. Experiment je inspirován webem Infrared Tube [3].

Literatura a další zdroje

- [1] *Sbírka fyzikálních pokusů*. [on-line] [cit. 12. 10. 2015] Dostupné z: <<http://fyzikalnipokusy.cz/cs>>
- [2] *FLIR Systems*. [on-line] [cit. 14. 10. 2015] Dostupné z: <<http://www.flir.com/flirone/content/?id=62910>>
- [3] *Infrared Tube*. [on-line] [cit. 14. 10. 2015] Dostupné z: <<http://energy.concord.org/ir/>>