

Přeměny energie ve fyzice pohledem termokamery

Petr Kácovský
Matematicko-fyzikální fakulta UK

ABSTRAKT

Příspěvek představuje jednoduché experimenty využitelné ve výuce fyziky v souvislosti s vizualizací energetických přeměn – typicky jde o přeměny mechanické či elektrické energie na energii vnitřní. Kvalitativní pojetí experimentů umožňuje jejich začlenění do výuky na základní i střední škole, a to jak ve formě demonstrační, tak coby náměty na skupinovou žákovskou práci.

ÚVOD

Termografická měření (termografie) umožňují určení povrchové teploty objektu vyhodnocováním elektromagnetického záření, které povrch objektu vyzařuje. Za pomoci Stefanova-Boltzmannova zákona a znalostí, které máme o snímaném povrchu (zejména ze znalosti jeho

emisivity), lze takto měřit teplotu i v situacích, kdy měření kontaktními teploměry selhává (např. kvůli fyzické nedostupnosti povrchu nebo hrozí-li spálení či opaření).

Podobně jako dalekohledy nebo mikroskopy rozšiřuje termografie omezené schopnosti našeho zraku při studiu světa kolem nás, a je tedy ideálním nástrojem do výuky fyziky. Zásadní výhodou termografie je přitom snadné ovládání kamer a také intuitivní interpretace získaných dat – existují studie (např. [1]), které ukazují, že i žáci ve věku kolem 10 let jsou spolehlivě schopni správně vysvětlit význam barev v naměřených termogramech.

Experimenty, které jsou na dalších stranách představeny, mají kvalitativní povahu a jsou přímo využitelné v hodinách fyziky, ať už na úrovni základní či střední školy. Tematicky je zastřešuje téma energetických přeměn, které zahrnuje jak přeměny mechanické a elektrické energie na energii vnitřní, tak například teplotní změny při skupenských přeměnách. Experimenty lze pojmout buď demonstračně, nebo na jejich základě vystavět stanoviště sloužící pro hands-on experimentování žáků v malých skupinkách.

Termogramy, kterými jsou jednotlivé experimenty doprovázeny, byly pořízeny již poněkud starší termokamerou FLIR i7 pro defaultně nastavenou emisivitu $\varepsilon = 0,95$. Protože experimenty jsou obvykle primárně kvalitativní (jde o to, co a kde se zahřálo, nikoliv „o kolik“), doprovodné obrázky ne vždy obsahují údaje o měřené teplotě a/nebo vysvětlivky k barevné teplotní škále.

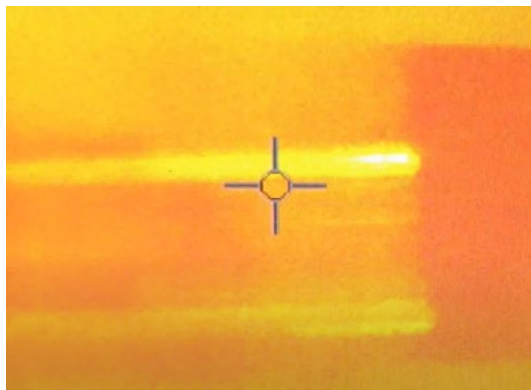
Zahřívání smykovým třením

POMŮCKY

- Termokamera
- Dostatečně těžký předmět
- Provázek

POSTUP

K těžkému předmětu přivážeme provázek a s předmětem pak smykáme po pevné podložce; situaci snímáme termokamerou. Za taženým předmětem zůstává tepelná stopa; typicky nejde o stejnoměrně zahřátý pruh na podložce, výrazněji se ohřívají pouze místa, kde je styk podložky a taženého předmětu „nejtěšnější“. Výsledek zachycuje obr. 1.



Obrázek 1: Vpravo obrys předmětu taženého směrem doprava, za ním (nalevo) zůstává tepelná stopa v podobě dvou výraznějších „kolejnic“ na podložce

VYSVĚTLENÍ

Termodynamicky řečeno, mechanická energie se zde přeměňuje na energii vnitřní. Pokud půjdeme na vysvětlení mikroskopicky, můžeme říct, že tření mezi předmětem a podložkou (přesněji: práce třecích sil) vede k rozkmitávání částic na jejich styčných plochách, čímž teplota předmětu i podložky roste. Didakticky je vhodné ukázat, že se skutečně zahřála nejenom podložka (což jasně vidíme na obr. 1), ale také spodní strana taženého předmětu.

Experiment je detailně metodologicky zpracován ve [2].

POKUS Č. 2

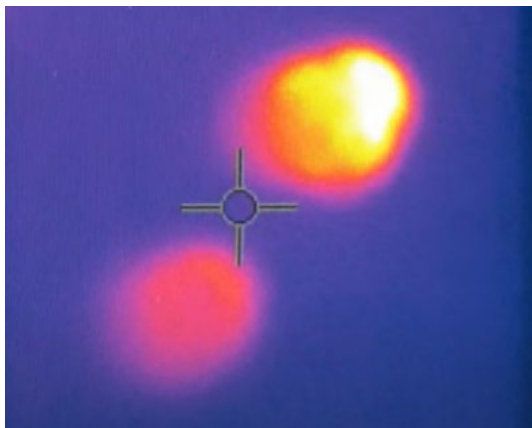
Úder palicí

POMŮCKY

- Termokamera
- Gumová palice
- Polystyrenová podložka

POSTUP

Udeříme palicí do polystyrenové destičky a místo úderu sledujeme termovizní kamerou. Teplota se v místě dopadu lokálně zvýší řádově o jednotky °C (viz obr. 2). Experiment doporučuji provádět na podlaze, aby se předešlo poškození školních lavic či laboratorních stolů.



Obrázek 2: Místa dvou úderů palice do polystyrenové podložky. Vpravo stopa po „čerstvém“ úderu, vlevo po úderu starém cca 20 sekund.

VYSVĚTLENÍ

Podobně jako v předcházejícím experimentu se zde přeměňuje mechanická energie (zde: kinetická energie) na energii vnitřní. Při dopadu palice na podložku se část její kinetické energie využije na konání práce při nepružné deformaci podložky a část se přemění na vnitřní energii palice a podložky. Tento nárůst vnitřní energie se projeví lokálním zvýšením teploty obou předmětů.

Je důležité, aby si žáci uvědomili, že při experimentu se samozřejmě nezahřívá pouze podložka, ale také samotná palice – to můžeme pomocí termovizní kamery také ukázat. Stojí za zmínku, že oproti předcházejícímu experimentu zde nehraje roli tření – pokus by, na rozdíl od pokusu předcházejícího, fungoval stejně i ve „světě bez tření“.

Experiment je detailně metodologicky zpracován ve [3].

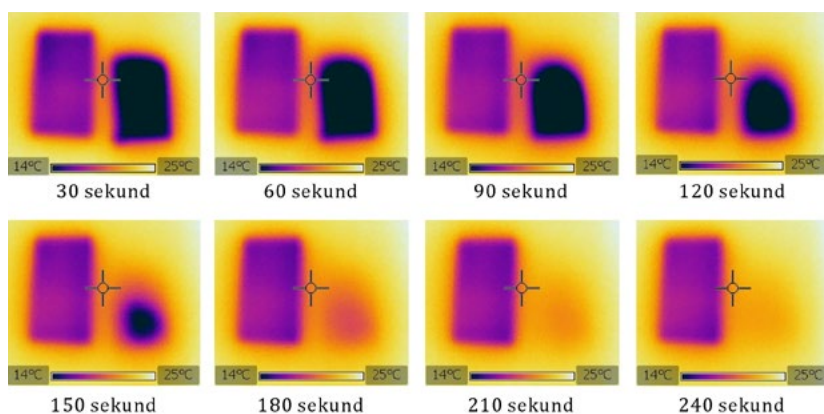
Vypařování lihu a vody

POMŮCKY

- Termokamera
- Dvě stejné nádoby (kelímky, skleničky)
- Technický líh a voda
- Dva proužky papíru

POSTUP

Jednu z nádobek naplníme vodou, druhou technickým lihem; obě kapaliny by měly mít na začátku experimentu pokojovou teplotu. Následně krátce, na několik sekund, ponoříme jeden proužek papíru do vody a druhý do lihu. Po vyjmutí necháme proužky osychat vedle sebe na stole a sledujeme termovizní kamerou, co se děje s jejich teplotou; časový vývoj zachycuje obr. 3.



Obrázek 3: Časový vývoj teploty papírových pruhů ponořených do různých kapalin. Na každém snímku je vpravo pruh ponořený do lihu a vlevo pruh ponořený do vody.

VYSVĚTLENÍ

To, co je v postupu výše označeno jako „osychání“, by fyzik přesněji označil jako vypařování kapaliny z povrchu papíru. Aby se kapalina vypařila, musí přijmout ze svého okolí energii nutnou pro tuto skupenskou přeměnu – v našem případě si voda i líh berou tuto energii (skupenské teplo vypařování) z papíru a také z okolního vzduchu.

Z obr. 3 je patrné, že výrazněji poklesne teplota papíru, který byl ponořen do lihu, což je způsobeno tím, že líh se vypařuje poměrně rychle a intenzivně tak odebírá skupenské teplo. To ale také způsobuje, že zatímco po cca 4 minutách je už papír vpravo zahřátý prakticky zpět na pokojovou teplotu (veškerý líh se vypařil a papír se již nemá jak ochlazovat), odpařování vody z levého pruhu dále probíhá – levý papír je stále mokřý a jeho teplota je vlivem vypařování nižší než teplota okolí.

Experiment je detailně metodologicky zpracován ve [4].

POKUS Č. 4

Zahřívání laserem

POMŮCKY

- Termokamera
- Černá polystyrenová destička
- Laserové ukazovátko

POSTUP

Položíme černou polystyrenovou destičku na stůl a svítíme na ní laserem. Pokud bude laserový svazek směřovat do jednoho místa, naměříme v tomto místě lokální vzrůst teploty. Můžeme také po destičce laserovým svazkem pomalu pohybovat – je-li náš laser dostatečně

silný, bude za pohybujícím se světelným bodem zůstávat i dočasná tepelná stopa.

VYSVĚTLENÍ

Elektromagnetické záření, tedy i světlo, s sebou nese energii, která se při dopadu na nepropouštějící překážku dělí na část, která je odražena, a část, která je pohlcena překážkou. Zde je naší překážkou destička, která se pohlcením části laserového záření zahřívá (zvyšuje svoji vnitřní energii).

Aby experiment dobře fungoval, je důležité, aby byla destička dobrým tepelným izolantem (= energie se deponovala do jednoho místa) a aby byla co nejtavnější (= dobře pohlcovala). Černý polystyren je tedy ideální volba, navíc je tento materiál matný, takže nehrozí nebezpečné odrazy laserového svazku.

Bezpečnostní upozornění: Žáci by v hodinách neměli pracovat s lasery o výkonu větším než 1 mW, na tento pokus je ale typicky potřeba laser s větším výkonem – experiment by tedy měl provádět vždy učitel.

Experiment je detailně metodologicky zpracován v [5].

POKUS Č. 5

Sériové a paralelní zapojení rezistorů

POMŮCKY

- Termokamera
- Rezistory, vodiče
- Zdroj stejnosměrného napětí

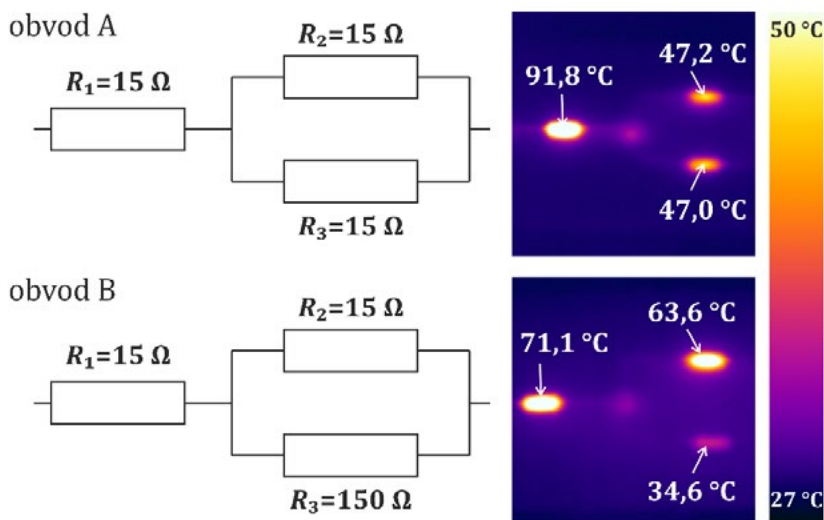
POSTUP

Sestavíme zapojení rezistorů, které chceme zkoumat, připojíme je ke zdroji napětí a sledujeme zapojení termovizní kamerou.

VYSVĚTLENÍ

Pokud mají všechny rezistory přibližně stejné rozměry a stejnou vnitřní konstrukci, míra jejich zahřívání odpovídá výkonu elektrického proudu na daném rezistoru. Tento výkon P je dán jako součin el. proudu a el. napětí, tedy $P = UI$. Mezi sériově řazenými odpory se tedy nejvíce zahřívají ty s největším odporem, mezi paralelně řazenými rezistory ty s nejmenším odporem.

Nejzajímavější jsou ovšem situace, kdy se kombinuje sériové a paralelní zapojení – výsledky měření s takovým zapojením ukazuje obr. 4 (převzato z [6]). Další experimenty využívající termokamery v souvislosti se zahříváním rezistorů, např. ověření Kirchhoffových zákonů, jsou popsány v článku [6].



Obrázek 4: Zahřívání rezistorů v obvodech označených A a B. Teploty představují lokální maxima na každém rezistoru, a to 1 minutu po připojení zdroje 4,5 V.

Výkon ve střídavém obvodu s nízkou frekvencí

POMŮCKY

- Termokamera
- Tuha do mikrotužky (průměr 0,5 mm, délka 6 cm)
- Frekvenční generátor umožňující frekvence 0,2 Hz a menší

POSTUP

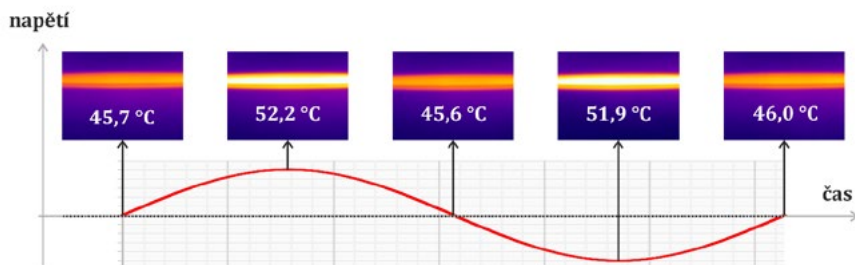
Připojíme tuhu k frekvenčnímu generátoru na střídavé napětí o frekvenci např. 0,1 Hz a efektivní hodnotě cca 2 V. Vzhledem k odporu tuhy není třeba předřazovat do obvodu rezistor. Sledujeme teplotní změny na povrchu tuhy termokamerou.

VYSVĚTLENÍ

Podobně jako v předcházejícím experimentu odpovídá měřená teplota výkonu na odporovém prvku – tím je zde místo rezistoru právě tuha. Ve střídavém obvodu dosahují napětí i proud na tuze současně maxima, minima i nulové hodnoty – v prvních dvou případech je výkon na tuze maximální, v posledním případě minimální (nulový).

Tuha má díky své malé hmotnosti velmi malou tepelnou kapacitu, snadno tedy mění svoji teplotu, rychle se ohřívá a rychle i chladne. Můžeme tedy pozorovat, že ve chvílích, kdy je výkon na tuze největší, dosahuje její povrch maximální teploty; naopak, je-li výkon blízký nule, tuha chladne (abychom byli zcela přesní, časový průběh výkonu o málo předchází vývoji teploty); tyto teplotní změny se periodicky opakují.

Detailněji jsou zkušenosti s experimentem popsány v článku [6], odkud byl převzat i obrázek 5, který schematicky zachycuje výsledek experimentu.



Obrázek 5: Vývoj teploty povrchu tuhy ve střídavém obvodu s frekvencí 0,1 Hz (periodou 10 s). Měřeno uprostřed délky tuhy.

POUŽITÁ LITERATURA A INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] HAGLUND, Jesper, JEPPSSON, Fredrik and SCHÖNBORN, Konrad J. Taking on the heat—a narrative account of how infrared cameras invite instant inquiry. *Research in Science Education*. 2015. Vol. 46, Issue 5, 685–713.
- [2] <http://fyzikalnipokusy.cz/1591/zmena-vnitрни-energie-konanim-prace-tazeni-predmetu-podlozce>
- [3] <http://fyzikalnipokusy.cz/1585/premena-kineticke-energie-na-vnitрни-energii--uder-palici>
- [4] [http://fyzikalnipokusy.cz/1623/odparovani-vody-a-lihu-\(s-termovizni-kamerou\)](http://fyzikalnipokusy.cz/1623/odparovani-vody-a-lihu-(s-termovizni-kamerou))
- [5] <http://fyzikalnipokusy.cz/1720/tepelne-ucinky-laseroveho-svazku>
- [6] KÁCOVSKÝ, Petr. Electric Circuits as Seen by Thermal Imaging Cameras, *The Physics Teacher*. 2019. Vol. 57, Issue 9, 597–599.

