

Demonstrujeme teplotní vodivost

JIŘÍ ERHART – PETR DESEŇSKÝ

Fakulta přírodovědně-humanitní a pedagogická TU, Liberec

Úvod

Mezi dvěma místy s rozdílnou teplotou dochází k předávání tepla. Omezíme-li se pouze na nejjednodušší mechanismus přenosu tepla tepelnou výměnou, lze přenesené teplo charakterizovat pomocí veličiny zvané tepelný tok

$$J_Q = \frac{\partial Q}{\partial t} \approx \frac{\Delta Q}{\Delta t}, \quad [\text{W}]. \quad (1)$$

Veličina udává teplo přenesené za jednotku času. To je pochopitelně veličina závislá na geometrii přenosu a vlastnostech materiálu. Tepelný tok lze vyjádřit pomocí těchto vlastností jako

$$J_Q = \lambda S \frac{T_2 - T_1}{d}, \quad (2)$$

kde λ [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] je součinitel tepelné vodivosti, S je plocha, kterou se teplo kolmo přenáší na vzdálenost d s teplotním rozdílem $T_2 - T_1$. Součinitel tepelné vodivosti λ charakterizuje přenášené teplo, nikoliv však rozložení teploty v prostoru. Rovnice vedení tepla je však již celkem složitou parciální diferenciální rovnicí pro teplotu $T(x, t)$ jako funkci času t a polohy x

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \left(\frac{\lambda}{\rho c} \right) \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0, \quad (3)$$

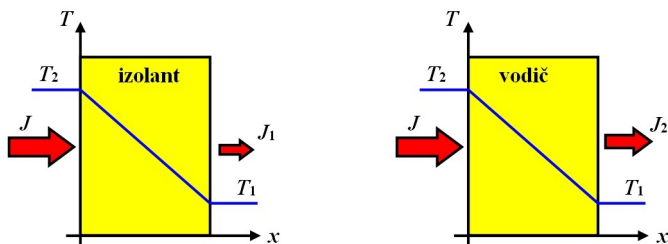
jdoucí již nad rámec středoškolské fyziky. Obsahuje jen jediný materiálový koeficient – součinitel vedení teploty

$$\chi = \frac{\lambda}{\rho c}, \quad [\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}], \quad (4)$$

kde ρ je hustota prostředí a c je jeho měrná tepelná kapacita. Tento koeficient potom charakterizuje časovou a prostorovou závislost rozložení

teploty. Rovnici vedení tepla nelze obecně řešit pro libovolné zadání okrajových a počátečních podmínek. Lze však alespoň jednoduše najít ustálené rozdělení teploty v prostoru.

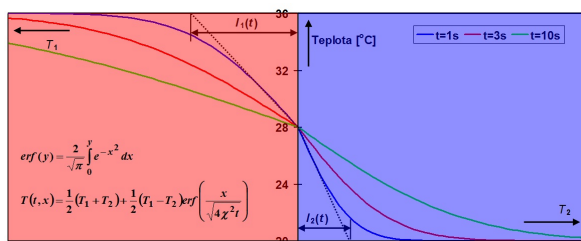
To je charakterizováno ustáleným spádem teploty, který není závislý na materiálových vlastnostech prostředí. Při stejném ustáleném profilu teploty se však liší tepelný tok materiálem. V tepelně dobře izolujících materiálech je tok menší, v tepelně dobře vodivých materiálech pak velký (obr. 1).



Obr. 1 Profil teploty a tepelný tok v tepelně izolačním a tepelně vodivém materiálu. Při stejném ustáleném rozdělení teploty je tepelný tok J_2 přenesený tepelně vodivým materiálem větší než tok J_1 tepelně izolujícím prostředím.

Parabolický zákon šíření teplotní změny v prostoru

Předpokládejme nyní pro jednoduchost dvě materiálová prostředí vyplňující sousedící poloprostory s různými vlastnostmi a s rovinným rozhraním podle obr. 2. Pro odvození šíření tepla na rozhraní dvou těles použijme postup podle [1].



Obr. 2 Prostorový průběh teploty v závislosti na čase na rozhraní dvou prostředí. Vlevo je teplejší ($T_1 = 36 \text{ }^\circ\text{C}$, $\chi = 0,2 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) a vpravo chladnější těleso ($T_2 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $\chi = 0,1 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$). Teplota na rozhraní je na čase nezávislá a rovna $T_0 = 28 \text{ }^\circ\text{C}$, vyznačeny jsou také rozdílné hloubky průniku teplotní změny v jednotlivých tělesech l_1 a l_2 .

Ve velké vzdálenosti od rozhraní nechť mají prostředí limitně teploty T_1 a T_2 . Po vzájemném kontaktu obou prostředí na jejich rozhraní dochází k přenosu tepla z tělesa teplejšího (T_2) na těleso chladnější (T_1). Stejná (malá) změna teploty ΔT nastane v jednotlivých prostředích v čase t v hloubkách $l_1(t)$ a $l_2(t)$. Přitom musí být teplo přenesené do této hloubky za jednotku času rovno tepelnému toku rozhraním za tento čas t , tj.

$$\rho S l(t) c \Delta T = \lambda S \frac{\Delta T}{l(t)} t, \quad (5)$$

kde S je plocha rozhraní. Odtud je potom

$$l(t) = \sqrt{\frac{\lambda}{\rho c} t} = \sqrt{\chi t}. \quad (6)$$

Hloubka průniku teploty do prostředí závisí podle tohoto zákona parabolicky na čase a lze vypočítat také teplotu T_0 , která se ustálí na rozhraní obou prostředí. Tepelný tok vycházející z teplejšího tělesa musí být roven tepelnému toku vstupujícímu do tělesa chladnějšího, tedy

$$\lambda_1 S \frac{T_0 - T_1}{l_1(t)} = \lambda_2 S \frac{T_2 - T_0}{l_2(t)}. \quad (7)$$

Odtud po dosazení z rovnice (6) je

$$T_0 = \frac{T_2 + \nu T_1}{1 + \nu}, \quad (8)$$

kde bezrozměrový koeficient ν je definován vztahem

$$\nu = \sqrt{\frac{\lambda_1 \rho_1 c_1}{\lambda_2 \rho_2 c_2}}. \quad (9)$$

Rovnici (8) pak můžeme použít pro aproximaci teploty na dotyku naší ruky a nějakého prostředí. Lidské tělo má receptory teploty umístěny v malé hloubce pod kůží a ty pak prakticky registrují teplotu rozhraní kůže – materiál. Vlastnosti lidského těla aproximujme pro jednoduchost vlastnostmi vody, ze které je tělo z valné části složeno. Při dotyku těla o teplotě 36°C na tělese o teplotě 20°C přechází teplo z naší ruky do materiálu a předmět vnímáme jako chladnější – viz Tabulku 1 s vlastnostmi

látek a dotykovými teplotami. Dřevo se zdá na dotyk ruky „teplejší“ než kov, i když mají stejnou teplotu 20 °C. Naopak při dotyku rukou na těleso v sauně, kde je teplota kolem 100 °C, přechází teplo z tělesa do kůže ruky. Vede-li materiál teplo lépe, cítíme ho jako „teplejší“. Při teplotě 100 °C v sauně tak cítíme dřevěnou lavici jako „chladnější“ než kov, o který se v sauně zaručeně škaredě spálíme. Dotyková teplota na dřevěnou lavici je totiž 44 °C, teplota na dotyku s kovem potom již nebezpečných 94 °C. V sauně se proto používají materiály s malou teplotní vodivostí a nedotýkáme se tam kovových součástí.

Tabulka 1 Vlastnosti různých materiálů a dotykové teploty při kontaktu s lidskou rukou $T_1 = 36$ °C, teplota materiálů $T_2 = 20$ °C.

Materiál	c [J · kg ⁻¹ · K ⁻¹]	λ [W · m ⁻¹ · K ⁻¹]	ρ [kg · m ⁻³]	χ [10 ⁻⁷ m ² · s ⁻¹]	ν [-]	T_0 [°C]
Voda	4 180	0,63	1 000	1,5	1	28,0
Vzduch	1 010	0,026	1,2	210	0,0035	35,9
Dřevo	900	0,13	500	2,9	0,15	34,0
Žula	820	1,4	2 700	6,3	1,1	28,0
Hliník	896	236	2 700	976	15	21,0

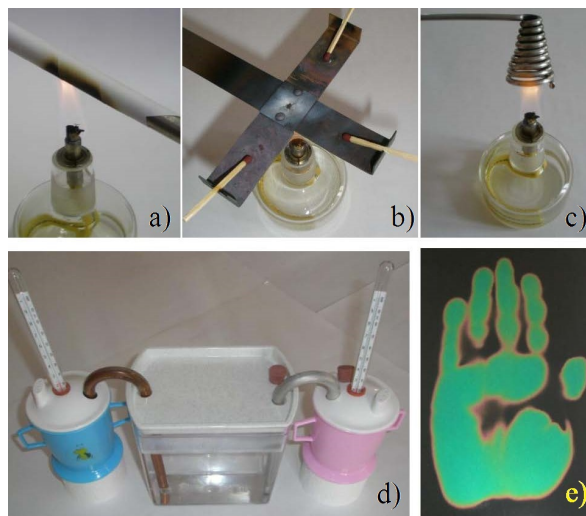
Experimenty na tepelnou vodivost

Existuje celá řada experimentů a školních demonstrací, které ukazují na různou tepelnou vodivost látek. Velmi často kombinují efekt vedení tepla a prostorového rozložení teploty. Vzhledem k tomu, že většinou nemáme možnost přímo zobrazovat rozložení teploty nebo tepelné toky, využívá se jiných fyzikálních vlastností jako je např. teplotní délková a objemová roztažnost, teplota tání nebo vzplanutí materiálu, průměrná teplota kapaliny, změna barvy kapalného krystalu atd. Mezi školní demonstrace tepelné vodivosti patří obvyklé experimenty s tepelnou vodivostí kovů (obr. 3):

- Nevzplanutí papírového pásku těsně motaného na kovové tyči zahřívané v plameni (obr. 3a). Teplo je zde rychle odváděno kovovou tyčí a nedojde tak ke vzrůstu teploty potřebné k zapálení papíru.
- Vedení tepla kovovým páskem/tyčí, kdy dosažení určité teploty je signalizováno táním voskových kuliček přilepených na pásku, nebo vzplanutím zápalky (obr. 3b).
- Zhasnutí plamene kahanu stíněného kovovou spirálou (obr. 3c).

- Zahřívání chladné vodní lázně od jiné teplejší lázně propojené kovovým tepelným můstkem (obr. 3d).
- Tepelná vodivost ve vrstvě kapalných krystalů, zobrazení rozložení teploty pomocí barvy krystalů (obr. 3e).

Čtenář si jistě doplní řadu dalších pokusů na demonstraci tepelné vodivosti. Poměrně zřídka lze vidět interaktivní exponáty, kde si lze tepelnou a teplotní vodivost vyzkoušet vlastníma rukama.



Obr. 3 Experimenty pro demonstraci tepelné vodivosti: a) Nevzplanutí papíru těsně namotaného na kovové tyči, b) tepelná vodivost v páscích různých kovů (mosaz, železo a měď), c) uhašení plamene kovovou spirálou, d) vedení tepla kovovým můstkem z teplejší kapaliny do chladnější, e) rozložení teploty po dotyku ruky na folii s kapalnými krystaly (barvy zobrazují teploty v rozmezí 25 – 30 °C). Experimenty b) až d) jsou z produkce firmy Ariane Schola.

Interaktivní nástěnka pro demonstraci dotykové teploty

Dotyková teplota je demonstrována na pěti rozdílných materiálech s teplotou okolního prostředí (obr. 4). Při dotyku rukou na panely dochází k odvodu tepla z ruky do panelu a všechny panely se tak zdají „chladnější“ než naše ruka. Zajímavé ovšem je, že různé materiály se zdají různě „chladné“ ačkoliv na připojených teploměrech si můžeme přecíst stejnou

teplotu všech panelů. Nejchladnější se zdá na dotyk kov (hliník, dural), dále pak žula, potom plast (Silon) a naopak nejteplejší jsou panely ze dřeva a tepelně izolačního plastu (Trovitex). Experimentátor si může dotykem ruky porovnat dotykové teploty jednotlivých materiálů a srovnat si svá pozorování s jejich skutečnou teplotou uvedenou na teploměru. Při dlouhodobějším přiložení ruky na kovový panel si také může zkontrolovat postupný nárůst teploty na tomto panelu. Teplo ruky je přenášeno vodivým kovem do panelu a postupně se jeho teplota zvýší až o několik stupňů. Nástěnka je doplněna textem s návodem k použití, vysvětlením pozorovaných jevů a výpočtem dotykové teploty pro dotyk ruky na různé materiály. Na doplnění je celý interaktivní exponát nasvícen pomocí LED pásků a při umístění na chodbě je osvětlení zapínáno pomocí pohybového čidla při přiblížení žáka.



Obr. 4 Interaktivní nástěnka demonstraci dotykové teploty na různých druzích materiálů – dole zleva panely materiálů: plast (Trovitex), kov (hliník), dřevo, žula, plast (Silon).

Závěr

Experimenty demonstrující tepelnou a teplotní vodivost látek jsou velmi efektní při výuce fyziky a často dávají obecně nečekané a překvapivé výsledky. Přehled běžně provozovaných demonstrací tepelné vodivosti jsme doplnili o nový interaktivní exponát ukazující názorně na vlastní zkušenosti rozdílnost teplotní vodivosti dobře a špatně tepelně vodivých látek jako jsou kov, žula a dřevo, plasty.

Poděkování

Autoři děkují za podporu grantu SGS FP-TUL 19/2012.

Literatura

- [1] A. V. Bjalko: Těplo tvojich ruk, Kvant (1987) č. 4, s. 3-7 (rusky).

Úlohy z termiky pro fyzikální olympioniky

PAVEL KABRHEL – IVO VOLF

ÚK FO, Univerzita Hradec Králové

Tematický celek Termika je součástí výuky fyziky jednak na základní škole, jednak na střední škole. V obou případech vychází z reálných představ žáků, ale výklad i následně řešení problémů je opřeno o dva základní pojmy, jejichž vysvětlení je poměrně nesnadné. Prvním pojmem je *teplota*. Patří mezi základní fyzikální veličiny v Mezinárodní soustavě jednotek (s jednotkou $^{\circ}\text{C}$ zejména na základním stupni vzdělávání a s jednotkou K, popř. $^{\circ}\text{C}$ na školách středních). Představu o veličině teplota vytváříme postupně od subjektivních vjemů až po vyjádření toho, že se změnami teploty dochází ke změně dalších fyzikálních veličin, jež jsou měřitelné a jež nám pomohou při měření teploty.