

Po technické stránce CD připravil *Mgr. Lukáš Richterek, Ph.D.*, který je také autorem některých fotografií. Obrázky kreslené programem META-POST připravil *PaedDr. Přemysl Šedivý*. I když v přepracovaném vydání učebnice většinou nejde o zcela nový text, přesto bylo zpracování učiva znovu posouzeno lektory, kterými byli *doc. RNDr. Josef Hubeňák, CSc.* a *RNDr. František Pluháček, Ph.D.* Pro tisk učebnici velmi pečlivě připravili redaktori nakladatelství Prometheus *Mgr. Milena Osobová* a *PaedDr. Bohuslav Rothanzl*.

Autor děkuje všem spolupracovníkům, lektorům i redaktorům za dobře odvedenou práci. Věřím, že se nové zpracování učebnice stane pro učitele i žáky gymnázií užitečnou učební pomůckou. Všichni spolupracovníci také rádi přijmou připomínky, které by mohly přispět k dalšímu zlepšení knihy i doplňujících materiálů na CD.

Vypařování v experimentech: V hlavní roli váhy

PETR KÁCOVSKÝ

Matematicko-fyzikální fakulta UK, Praha

Hmotnost kam se podíváš

Hmotnost je jednou z prvních fyzikálních veličin, se kterou se žáci ve svém životě setkávají – nejdříve v domácím prostředí v běžné mluvě, následně pak ve škole jako s fyzikální veličinou. V hodinách fyziky je pak nepřestává provázet až do maturitního ročníku – pomineme-li elektromagnetické jevy, kde se objevuje jen sporadicky, je hmotnost možná tím nejzákladnějším a nejčastěji uvažovaným parametrem těles v celé základoškolské a středoškolské fyzice. Koneckonců, najdeme ji i ve dvou zřejmě neslavnějších fyzikálních vztazích, které se ze školních lavic zčásti probojovaly do povědomí veřejnosti – ve slavném Einsteinově $E = mc^2$ i Newtonově zákonu síly ve tvaru $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$.

Měření hmotnosti pak ve výuce často představuje klíč k určování jiných, přímo obtížně měřitelných veličin – na základní škole jde obvykle o výpočet hustoty, na škole střední se pak přidává výpočet zrychlení z výše zmíněného zákona síly či určení tuhosti pružiny statickou i dynamickou metodou.

Měření hmotnosti

Metody měření hmotnosti jsou vzhledem k častému výskytu této veličiny ve fyzice velmi rozmanité a zahrnují jak metody přímé, tak nepřímé, metody absolutní i relativní, substituční i kompenzační; není ovšem cílem tohoto článku se těmito metodami podrobněji zabývat.

Historicky nejstarším nástrojem používaným k určování hmotnosti jsou nám důvěrně známé rovnoramenné váhy používané již v Babylóně, Egyptě nebo Číně v souvislosti s obchodem; v českých zemích se pak objevují za vlády Přemysla Otakara II. [1].

Určování hmotnosti rovnoramennými vahami přetrvalo ve školních lavicích do dnešních dnů a je standardní součástí přípravy žáků, přestože z praxe již tyto váhy téměř vymizely a jejich opodstatnění ve výuce tak spočívá hlavně v demonstraci principu páky. Z hlediska tohoto příspěvku je použití rovnoramenných vah zcela vyloučeno – níže uvedené experimenty se zaměřují na vypařování kapalin, tedy děj, při kterém se hmotnost kapaliny neustále mění. Je tedy třeba používat váhy, které vrátí aktuální hmotnost okamžitě, než se tato stačí změnit, což zdlouhavé vyvažování misek v případě rovnoramenných vah neumožňuje.

Váhy pružinové, využívající pro měření hmotnosti Hookova zákona, tento nedostatek částečně odstraňují, i když i zde musíme po zavěšení váženého tělesa počítat s určitou časovou prodlevou potřebnou k ustálení pružiny v její nové rovnovážné poloze. Paradoxně se ve školách s pružinovými vahami setkáváme častěji v podobě pružinových siloměrů, které ovšem můžeme při znalosti tíhového zrychlení s úspěchem využívat k vážení. Pro zaznamenání malých změn hmotnosti kapalin typických pro vypařování vykazují ale tyto váhy příliš malou citlivost i přesnost.

Nejpřesnějšími běžně dostupnými vahami jsou v současné době váhy elektronické (tenzometrické), které využívají ke stanovení hmotnosti piezoelektrického jevu, kdy je mechanicky deformovaný krystal zdrojem měřitelného elektrického napětí [2]. Na trhu se dnes vyskytuje velké množství těchto vah různých rozsahů i citlivostí a pro školy je dobrou zprávou setrvalý pokles jejich ceny. V současné době je možné pořídit přenosné kapesní váhy s citlivostí 0,01 gramu a rozsahem 0 až 200 gramů i za cenu okolo

200 Kč, což z nich dělá dostupnou a velmi užitečnou učební pomůcku pro frontální i skupinové metody výuky. Právě kapesní váhy s těmito parametry (obr. 1) byly díky své rychlé odezvě a dostatečné přesnosti použity při proměřování tří experimentů, které popíšeme v následujícím textu.



Obr. 1 Kapesní váhy používané v následujících experimentech

Experiment 1 (Určení měrného skupenského tepla varu vody)

Zatímco určování měrného skupenského tepla tání ledu (resp. tuhnutí vody) bývá poměrně běžným praktickým úkolem středoškoláků, měrné skupenské teplo varu často zmiňujeme pouze teoreticky. Tento experiment umožňuje jeho snadné a poměrně přesné určení v čase ne delším než 15 minut. Ideou měření je využití konstantního tepelného výkonu rychlovarné konvice při ohřívání i varu vody.

Pomůcky: Teploměr (výhodou, ale ne podmínkou je čidlo spolupracující s počítačem, které je schopné vykreslovat časový vývoj teploty; pro tento konkrétní experiment bylo využito čidlo Vernier Go!Temp), rychlovarná konvice, váhy (postačuje citlivost 1 g).

Teorie: K tomu, abychom vodu o hmotnosti m_1 v rychlovarné konvici ohřáli o rozdíl teplot Δt , je třeba jí dodat teplo $Q = cm_1\Delta t$, kde konstanta c je měrná tepelná kapacita vody, $c = 4180 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Pokud navíc víme, že zvýšení teploty o Δt si vyžádalo čas τ_1 , můžeme určit průměrný tepelný výkon P_1 konvice při ohřevu jako

$$P_1 = \frac{Q}{\tau_1} = \frac{cm_1\Delta t}{\tau_1}.$$

Při dosažení teploty varu se přestává teplota kapaliny zvyšovat a veškeré dále dodávané teplo je využíváno na vypařování kapaliny z celého jejího

objemu. Toto teplo označujeme jako skupenské teplo varu L_v . Dodání většího tepla L_v umožní změnu skupenství většímu množství vody m_2 , což lze matematicky vyjádřit jako

$$L_v = m_2 l_v,$$

kde m_2 je hmotnost varem odpařené vody. Konstanta úměrnosti l_v se nazývá měrné skupenské teplo varu a udává teplo, které je třeba dodat jednomu kilogramu kapaliny (zde vody), aby se tato zcela přeměnila na páru stejné teploty. Pokud navíc víme, že se voda o hmotnosti m_2 odpařila za čas τ_2 , můžeme určit průměrný tepelný výkon P_2 konvice při varu jako

$$P_2 = \frac{m_2 l_v}{\tau_2}.$$

Budeme-li nyní oprávněně předpokládat, že tepelný výkon konvice je během ohřevu vody i během jejího varu stejný, tj. $P_1 = P_2$, dostáváme rovnost výkonů ve tvaru

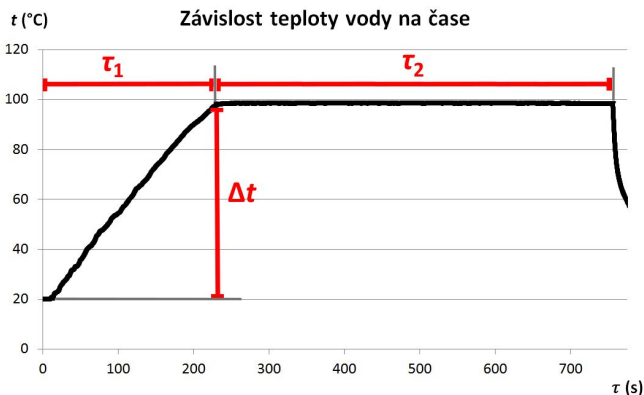
$$\frac{cm_1 \Delta t}{\tau_1} = \frac{m_2 l_v}{\tau_2}.$$

Z této rovnice již snadno vyjádříme hledané měrné skupenské teplo varu vody

$$l_v = c \Delta t \frac{m_1 \tau_2}{m_2 \tau_1}.$$

Postup: Konvici naplníme přibližně do poloviny jejího maximálního deklarovaného objemu studenou kohoutkovou vodou a zvážíme ji. Upevníme teploměr tak, aby měřil teplotu několik centimetrů pod hladinou, ale současně se nedotýkal topné spirály či dna konvice. Víko konvice necháváme po celou dobu experimentu otevřené.

Současně se zapnutím konvice spustíme měření teploty. Přivedeme vodu k varu a poté ji necháme – stále při otevřeném víku – vřít alespoň po dobu srovnatelnou s dobou ohřevu, event. déle. Následně ukončíme měření teploty, současně vypneme konvici a co nejrychleji ji opět zvážíme. Z rozdílu hmotností před a po experimentu zjistíme hmotnost m_2 vyvařené vody. Na závěr vodu vylijeme a zvážíme konvici prázdnou – to nám umožní dopočítat původní hmotnost vody m_1 . Všechny ostatní údaje, tj. Δt , τ_1 a τ_2 , vyčteme z naměřené závislosti teploty na čase (obr. 2).



Obr. 2 Odečet hodnot Δt , τ_1 a τ_2 z grafu

Výsledky: Pro ilustraci jsou níže přiloženy výsledky pěti měření – viz tab. 1. Průměrná hodnota měrného skupenského tepla varu vody vzešlá z těchto pěti měření činí přibližně 1,94 MJ/kg, což představuje odchylku přibližně 14 % od tabulkové hodnoty (2,26 MJ/kg).

Tab. 1: Výsledky vzorových měření

měření	m_1 (kg)	m_2 (kg)	τ_1 (s)	τ_2 (s)	Δt (°C)	l_v (MJ/kg)
1	0,470	0,176	225	520	78,5	2,03
2	0,476	0,106	230	310	78,0	1,97
3	0,429	0,097	201	280	73,5	1,90
4	0,414	0,082	200	237	77,1	1,93
5	0,363	0,123	183	362	77,0	1,88
průměr						1,94

Limity měření: Největším zdrojem chyb v tomto experimentu je předpoklad, že během ohřevu vody se tepelný výkon konvice využije pouze na ohřev vody – ve skutečnosti se musí ohřát také vlastní tělo konvice, které v tomto konkrétním případě se svojí hmotností téměř 350 g vstupuje do tepelné bilance poměrně výrazně. Kdyby se nemuselo ohřívát i tělo konvice, byl by čas τ_1 kratší, dopočítaná hodnota l_v by vzrostla a více se blížila své skutečné hodnotě.

Další nepřesností je předpoklad, že vzniklá pára konvici zcela opouští. Ve skutečnosti její část kondenzuje na stěnách konvice, stéká zpět a může

tak být „odpařena dvakrát“. Jinak řečeno, hmotnost skutečně odpařené vody m_2 je větší než pouhý rozdíl hmotností vody před a po experimentu. Tuto nepřesnost lze alespoň minimalizovat tím, že použijeme konvici, která se směrem vzhůru nijak zásadně nezužuje. Pozor! S konvicemi, které mají ústí výrazně zúžené, můžeme dostat velmi špatné výsledky (i s více než padesátiprocentní odchylkou od skutečné hodnoty).

V experimentu dále neuvažujeme, že voda se vypařuje za každé teploty, tedy i během svého ohřevu na teplotu varu; tento vliv je ovšem slabý.

Technické a metodické poznámky

- Je opravdu důležité, aby nebyla konvice plná více než z poloviny předepsaného objemu. V opačném případě začne během varu voda cákat mimo konvici a kromě znehodnocení měření tak může způsobit i popálení experimentátorů. Je vhodné před měřením optimální výšku hladiny vyzkoušet a během měření dodržovat zásady bezpečnosti práce s vroucí vodou.

- Teploměr musí být ponořený do hloubky několika centimetrů, aby nedošlo k tomu, že během měření se s úbytkem vody dostane jeho měřicí část nad hladinu.

- Experiment lze využít k tomu, aby žáci lépe porozuměli grafům souvisejícím se změnami skupenství, se kterými se na základěškolské i středoškolské úrovni setkávají.

Experiment 2 (Závislost rychlosti vypařování na obsahu plochy hladiny kapaliny)

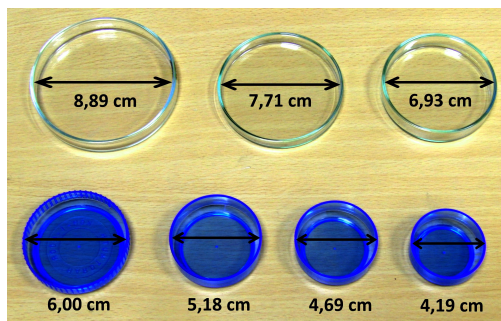
S poznatkem, že vypařování kapaliny se urychlí zvětšením jejího povrchu, se setkáváme jak na základěškolské [3], tak na středoškolské [4] úrovni. Obvykle se tato skutečnost konstatuje, event. kvalitativně dokazuje. Následující experiment navrhuje proměření závislosti rychlosti odpařování na obsahu plochy hladiny kapaliny kvantitativně.

Pomůcky: Váhy (s citlivostí alespoň 0,01 g), technický líh, mističky různých průměrů (v dražší verzi Petriho misky, v levnějším provedení například mističky na míchání barev ve výtvarné výchově; v našem případě kombinace).

Teorie: Rychlost vypařování nemá v českém kontextu žádnou ustálenou definici ani označení. Z logiky věci se zdá být rozumné definovat ji jako hmotnost kapaliny odpařené za jednotku času. Pro žáky bude ale obecně

snazší hovořit o změně hmotnosti v různých nádobách za stejný časový úsek, proto se o intuitivní definici pokoušet nebudeme.

Postup: Posuvným měřítkem určíme a zaznamenáme průměry používaných mističek (obr. 3). Do všech mističek nalijeme technický líh (ne nutně stejné množství) a mističky i s líhem zvážíme. Poté necháme líh odpařovat a po uplynutí alespoň jedné hodiny zvážíme všechny mističky znovu. Rozdíl hmotností představuje pro každou misku hmotnost odpařeného líhu.



Obr. 3 Rozměry používaných mističek

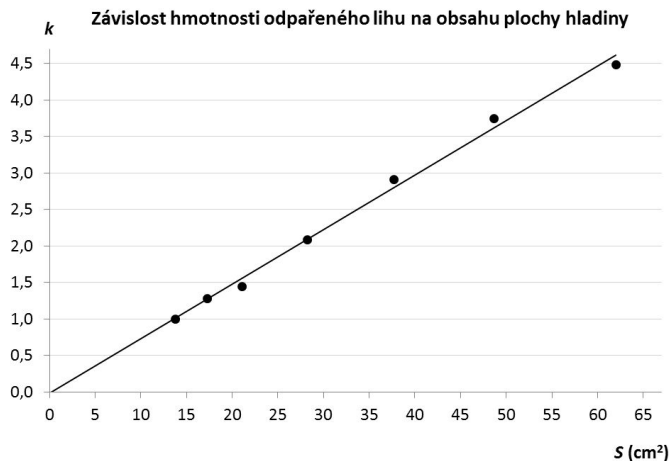
Protože je měření časově náročné, nelze jej ve výuce rozumně zopakovat. Pokud ale chceme mít více hodnot k dalšímu zpracování, může měření provádět více skupin žáků naráz, stačí každé skupince opatřit stejnou sadu mističek; vážení probíhá jednorázově na začátku a na konci měření a jedny váhy při něm tudíž postačí.

Výsledky: Měření bylo vzorově provedeno desetkrát, pokaždé ale trvalo jinak dlouho. Nelze tak přímo průměrovat hmotnosti odpařeného líhu – při kratších měřeních jsou tyto logicky nižší. Proto byl pro účely zpracování dat zaveden bezrozměrný koeficient k , který pro každé měření říká, kolikrát větší hmotnost líhu se z jednotlivých mističek odpařila ve srovnání s mističkou nejmenší (tj. např. hodnota $k = 2$ pro danou mističku říká, že se z ní odpařilo dvakrát více líhu než z nejmenší mističky za stejný čas). Při takovémto způsobu zpracování dat již nezáleží na době měření a je možné hodnoty k z různě dlouhých měření zprůměrovat; samozřejmě je na zvážení učitele, zda tímto žáky zatěžovat, nebo se spokojit s jediným méně přesným, ale názorným měřením. Vzorově naměřené hodnoty ukazuje tab. 2 a graf na obr. 4. Z grafu je patrné, že se zvyšujícím se obsahem plochy hladiny roste hmotnost odpařeného líhu (prostřednictvím koefi-

entu k) lineárně a extrapolace na nulový obsah plochy naznačuje dokonce přímou úměrnost.

Tab. 2: Vzorově naměřené hodnoty, průměry z deseti měření

S (cm ²)	13,8	17,3	21,1	28,2	37,7	48,6	62,0
k	1,00	1,28	1,44	2,09	2,91	3,75	4,48



Obr. 4 Graf závislosti hmotnosti odpařeného lihu na obsahu plochy hladiny odpařovaného lihu, průměr z deseti měření

Technické a metodické poznámky:

- Vzhledem k lihovým výparům není příjemné provádět měření v učebně, kde probíhá výuka. Odpařování lze nechat probíhat například v jiné, volné učebně.

- Měření je svou délkou vhodné na dvě po sobě následující spojené hodiny fyziky. Protože vyžaduje zásah experimentátorů pouze na začátku a na konci svého trvání, je přirozené vyplnit dobu měření jinou aktivitou (výklad, procvičování, pokus).

- Měření průměru misek se může stát samostatnou laboratorní úlohou zahrnující práci s posuvným měřítkem a statistické zpracování dat získaných opakovaným měřením téže veličiny.

- Úspěch experimentu stojí na použití mělkých mistichek. Použití vysokých nádob vede k tomu, že odpařovaný líh začne kondenzovat na jejich stěnách a úbytek hmotnosti se zpomalí.

- Po nalití lihu je dobré zkontrolovat, že jsou mističky zvnějšku suché, event. je před zvážením otřít. Jinak riskujeme, že naše data ovlivní rychlé odpařování lihu z vnějšího povrchu misek.
- Všechny mističky je vhodné mít na stejném místě – zamezíme tak riziku, že se budou nacházet v místech s různou teplotou či jiným prouděním vzduchu, které rychlost odpařování ovlivňují.

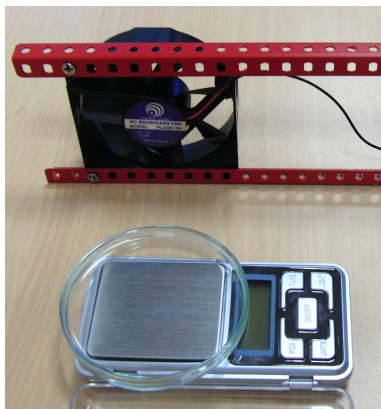
Experiment 3 (Závislost rychlosti vypařování na odstraňování par nad hladinou kapaliny)

Cílem posledního experimentu je kvantitativně ukázat vliv, který má odstraňování par nad hladinou kapaliny na rychlost jejího odpařování.

Pomůcky: Váhy (s citlivostí alespoň 0,01 g), technický líh, Petriho miska, ventilátor z počítače (typické napájecí napětí 12 V), zdroj střídavého napětí 12 V (s výhodou regulovatelný), voltmetr/multimetr.

Teorie: Stejná jako u předcházejícího experimentu.

Postup: Zapneme váhy, Petriho misku naplníme lihem a postavíme ji na vážící plochu. Ventilátor připojíme ke zdroji střídavého napětí a umístíme ho do vzdálenosti 5 až 10 cm od misky tak, aby po jeho spuštění proud vzduchu směřoval nad hladinu lihu (obr. 5). Zaznamenanáme počáteční hmotnost m_1 , kterou ukazují váhy, a přivedením vhodného vstupního napětí (které kontrolujeme voltmetrem) uvedeme ventilátor do chodu. Po 5 minutách ventilátor odpojíme a zaznamenanáme koncovou hmotnost m_2 ; zajímá nás úbytek hmotnosti $\Delta m = m_1 - m_2$.



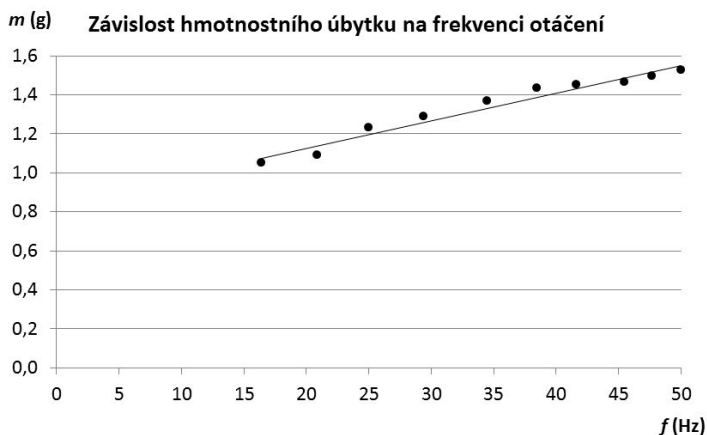
Obr. 5 Uspořádání třetího experimentu

Výsledky: Úbytek hmotnosti můžeme proměřit pro různá vstupní napětí ventilátoru a bez dalších složitějších zpracování tak pouze ukázat, že s rostoucím vstupním napětím roste nejen intuitivně vnímaná frekvence otáčení ventilátoru, ale také hmotnost lihu odpařená za stejný časový interval (např. zmíněných 5 minut). Do porovnání je vhodné zařadit i údaj, jaký je hmotnostní úbytek bez použití ventilátoru.

V našem vzorovém měření byl hmotnostní úbytek během 5 minut proměřen pro deset hodnot vstupního napětí v rozmezí 3 až 12 V. Vyhodnocení pak bylo dotaženo ještě o krok dále – pomocí optické závory Vernier Photogate byla ke každé z deseti hodnot napětí určena frekvence otáčení ventilátoru (tab. 3), což umožnilo vynést graf závislosti hmotnostního úbytku na frekvenci otáčení ventilátoru tak, jak to ukazuje obr. 6. Je patrné, že jde o rostoucí závislost, která vykazuje známky linearity; skutečné vlivy turbulentního proudění na odpařování jsou ovšem natolik složité, že lineární aproximaci uvedenou v grafu je třeba brát se značnou rezervou.

Tab. 3: Závislost hmotnostního úbytku na frekvenci otáčení ventilátoru, průměr z pěti měření

U (V)	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	11,0	12,0
f (Hz)	16,4	20,8	25,0	29,4	34,5	38,5	41,7	45,5	47,6	50,0
Δm (g)	1,05	1,09	1,23	1,29	1,37	1,43	1,45	1,46	1,49	1,52



Obr. 6 Graf závislosti hmotnostního úbytku lihu na frekvenci otáčení ventilátoru odstraňujícího páry nad jeho hladinou; průměr z pěti měření

Technické a metodické poznámky:

- Proměření celé závislosti tak, jak je uvedena v tabulce 3, je časově náročné a během pětiminutových intervalů vznikají neúčinné prostoje; ve výuce může být tedy praktičtější ukázat pouze skutečnost, že pokud budeme páry nad hladinou lihu odstraňovat, odpaří se dramaticky více lihu než bez odstraňování, a to bez dalšího matematického zpracování.

- Je-li ventilátor zapnutý, mohou váhy ukazovat na první pohled chaotické nárůsty a úbytky hmotnosti podle toho, jak turbulentní proudění na hladinu lihu právě působí.

- Vzhledem k výše uvedenému bodu je nutné odečítat hmotnost ve chvílích, kdy je ventilátor vypnutý.

Závěr

Cenová dostupnost dnešních relativně přesných vah s citlivostí až 0,01 g umožňuje poměrně snadno provádět ve výuce (ať už frontální či skupinové) experimenty spojené s malými změnami hmotnosti (menšími než 1 gram). Typickým příkladem jsou experimenty související s vypařováním kapalin za pokojové teploty, z nichž tři jsou popsány v tomto příspěvku. Cílem bylo nastínit kvantitativní přístup k dějům souvisejícím s vypařováním, v běžné výuce lze ovšem výše popsané postupy značně zkrátit a méně precizovat tak, aby byly žákům srozumitelné a zároveň nekonzumovaly neúměrně velké množství času. Ve svém plném znění, tak jak jsou popsány v tomto příspěvku, mohou tyto experimenty sloužit jako náměty pro laboratorní práce žáků.

Literatura

- [1] Kolář, J.: Hmotnost – jednotky a metody měření. Bakalářská práce, Brno, 2007.
- [2] Sedlák, B. – Štoll, I: Elektřina a magnetismus. Academia, Praha, 2002.
- [3] Bohuněk, J. – Kolářová, R.: Fyzika pro 8. ročník základní školy. Prometheus, Praha, 1999.
- [4] Bartuška, K. – Svoboda, E.: Fyzika pro gymnázia – Molekulová fyzika a termika. Prometheus, Praha, 2003.